

ФОРМИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ДИНАМО-МЕХАНИЗМА

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

Солнечную активность традиционно характеризуют временной динамикой числа солнечных пятен. Современные модели динамику солнечной активности связывают с действием некоторого периодического динамо-механизма, который формируется внутри Солнца и определяет возникновение и эволюцию динамического магнитного поля Солнца. Динамо-теория солнечной активности предлагает только качественную картину вариаций числа солнечных пятен в цикле и не дает численных оценок экспериментальным величинам. В работе проводится сравнительный анализ временной динамики структуры периодов вариаций числа солнечных пятен для периодов $\sim 1,3 - 4$ г., временной динамики числа солнечных пятен (SSN) и временной динамики напряженности и широты динамического магнитного поля Солнца. Для анализа использовались суточные величины числа солнечных пятен в 17 – 24-м солнечных циклах. В работе получены численные величины для напряженности (B) и широты (Q) динамического магнитного поля Солнца и показана функциональная связь временных вариаций параметров динамического магнитного поля Солнца и динамики числа солнечных пятен. Показано, что скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности определяет временная динамика широты динамического магнитного поля Солнца, которая для фазы спада активности в среднем равна $\sim 2,3$ град./г. (для 20-го и 23-го циклов $\sim 1,6$ град./г.). Для фазы роста активности эти величины в среднем равны $\sim 3,6$ град./г. и $\sim 2,6$ град./г. для 17-го и 24-го циклов. В процессе развития активности широта динамического магнитного поля Солнца уменьшается, градиент линейной функции Q(t) отрицательный. Динамика напряженности динамического магнитного поля Солнца определяет динамику числа солнечных пятен, функция SSN(B) для всех циклов меняется в пределах $\pm 12\%$ от среднего значения $\sim 10,7$ ssn/кГс. Структура вариаций с периодами $\sim 1,3 - 4$ г. формируется временной динамикой широтной компоненты динамического магнитного поля Солнца и практически не зависит от величины магнитного поля B_0 , реализуемого в области «тахоклина». Градиент функции T(Q), период – широта для всех циклов равен ~ 57 сут/град. Структура периодов в цикле формируется временной динамикой напряженности динамического магнитного поля Солнца. Анализ показал, что вариаций солнечной активности (11-летние вариации и вариации $\sim 1,3 - 4$ г.) формируются в рамках развития единого динамо-механизма, определяющего временную динамику магнитного поля и широты динамического магнитного поля Солнца.

Ключевые слова: динамическое магнитное поле Солнца, солнечные пятна, спектральная плотность мощности вариаций, тахоклин.

Введение

В статье исследуется связь динамики солнечной активности с временной динамикой параметров динамического магнитного поля Солнца. Проводится анализ динамики числа солнечных пятен (SSN) для 8-ми циклов солнечной активности (17 – 24-й циклы): 11-летних вариаций и вариаций, сконцентрированных в диапазоне $\sim 1,5 - 3,5$ г. (так называемые квазидвухлетние вариации или QBO-вариации). В современных моделях динамику солнечной активности связывают с воздействием некоторого динамо-механизма, при этом резко меняется структура внутреннего магнитного поля Солнца, формируется динамическое магнитное поле Солнца (ДМП). Формирование 11-летнего цикла рассматривается как результат взаимной динамики полоидального (дипольное поле, ось диполя параллельна оси вращения) и тороидального (ось параллельна экватору) магнитных полей Солнца [1]. Два основных параметра определяют динамику солнечной активности: это слабое крупномасштабное магнитное поле Солнца (полоидальное, меридиональное) и дифференциальное вращение Солнца [1, 2]. Дифференциальное вращение (экваториальные области Солнца вращаются быстрее, чем полярные) заставляет магнитное поле расширяться в тороидальном (по широте) направлении, закручиваясь около Солнца. Круп-

номасштабная структура магнитного поля Солнца меняется. При этом тороидальное поле (широтная компонента ДМП) 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 (> 50 кГс), магнитное поле в нижней части конвективной зоны 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), образует на поверхности низкотемпературные области высоких значений (\sim кГс) магнитного поля – солнечные пятна. Динамика солнечных пятен фактически отражает динамику ДМП Солнца. Следует отметить, что динамо-теория солнечной активности описывает только качественную картину вариаций солнечных пятен и не дает численных оценок экспериментальным величинам [2, 3]. Подробно

трудности динамо-теории рассмотрены в [3]. Одним из нерешенных вопросов, в частности, является возникновение вариаций солнечных пятен в диапазоне $\sim 1,5 - 4$ г. (квазидвухлетних, QBO-вариаций). Квазипериодические вариации регистрируются в динамике солнечных параметров (в величинах числа и площади солнечных пятен, в потоках электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах), и как отклик на солнечные вариации QBO регистрируются в динамике параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, в динамике индексов геомагнитной активности. Для всех параметров QBO-вариации проявляются как стохастические вариации (амплитудная и временная шкалы вариаций нестационарны) в виде нерегулярных периодических структур. Подробный анализ исследований параметров QBO приведен в [4]. В настоящее время предлагается несколько механизмов для объяснения солнечных QBO. В частности, обсуждается возможность реализации на Солнце двух динамо-процессов. Основной динамо-механизм, ответственный за формирование 11-летних вариаций, расположен в нижней части конвекционной зоны, в области тахосферы [1]. Второй динамо-механизм, генерирующий QBO-вариации, работает на глубине $\sim 35\ 000$ км от солнечной поверхности и связан с динамикой поверхностного магнитного поля [5 – 9]. Альтернативное объяснение QBO-вариаций предлагается в [10 – 12], нестабильные гармоники магнитных волн Россби рассматриваются как источник QBO-вариаций. Вариации напряженности тороидального магнитного поля в области тахоклина и широтное дифференциальное вращение Солнца приводят к появлению определенного типа волн в верхней части тахоклина. Нестабильные гармоники магнитных волн Россби приводят к периодическому возникновению магнитного потока на поверхности Солнца, что вызывает наблюдаемую периодичность в магнитной активности и соответственно определяет периодичность вариаций солнечных пятен. В работе для 17 – 24-го солнечных циклов проводится совместный анализ временных вариаций суточных величин солнечных пятен (11-летние вариации и вариации в диапазоне $\sim 1,5 - 4$ г.) и вариаций ДМП Солнца.

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

Вариации числа солнечных пятен с периодичностью порядка 11-ти лет, формирующие основные параметры космической погоды, являются наиболее значимой

характеристикой солнечной активности. На рис. 1 представлена динамика вариаций числа солнечных пятен для 17 – 24-го солнечных циклов (1932 – 2018 гг.). Черным цветом выделены суточные числа солнечных пятен, красная линия показывает 13-месячные сглаженные величины. На рис. 2 для 17 – 24-го солнечных циклов представлена динамика спектров мощности вариаций (СМВ, в относительных единицах (о. е.)) суточных величин солнечных пятен (для периодов 450 – 1400 сут (Фурье-преобразование)). Значительные увеличения мощности вариаций проявляются в виде отдельных групп периодов с пиковыми значениями спектральной мощности вариаций (СМВ) для $\sim 450, 650, 900, 1200$ сут. Этот график дает некоторую усредненную \sim за 100 лет динамику спектров мощности вариаций SSN.

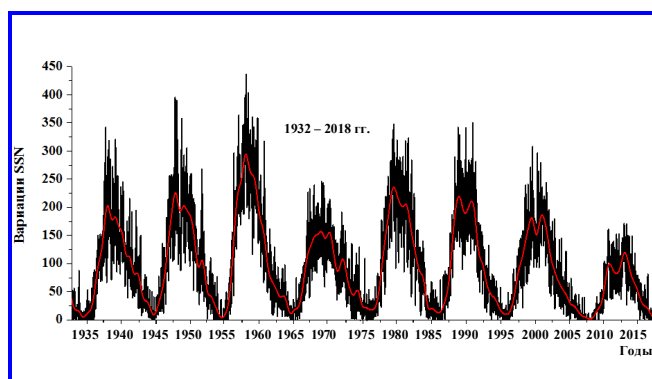


Рис. 1. Вариации суточных величин солнечных пятен для 17 – 24-го солнечных циклов (1932 – 2018 гг.)

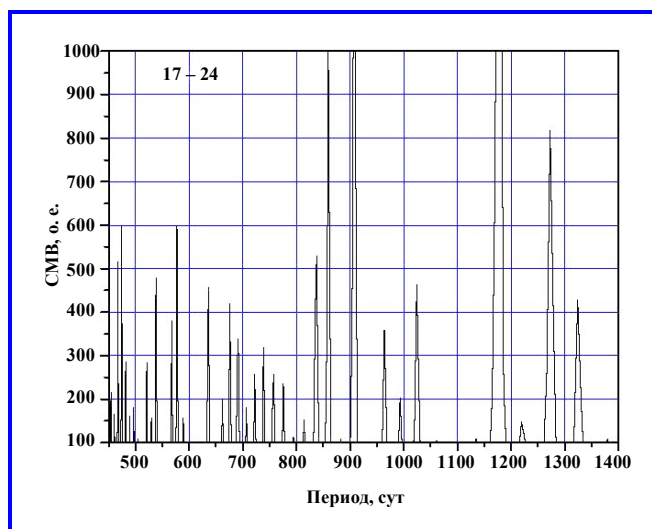


Рис. 2. Динамика вариаций спектра мощности для периодов 450 – 1400 сут в 17 – 24-м солнечных циклах

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) увеличилось в ~ 10 раз. Это позволило получить тонкую структуру вариаций для каждой группы периодов и сравнить динамику вариаций между циклами в каждой группе. СМВ отдельно для 17-го, 18-го, 20-го и 23-го солнечных циклов представлены на рис. 3 соответственно. Следует отметить, что между циклами внутри выделенных групп пиковые мощности регистрируются при разных значениях периодов.

Результаты анализа «тонкой» структуры СМВ солнечных пятен отдельно для каждого солнечного цикла представлены в табл. 1. Отметим, что мы рассматриваем величины СМВ ≥ 100 о. е. с достоверностью не менее 95%. В табл. 1 приведены также SSN в максимуме цикла и величины тороидального магнитного поля (ТМП) V_0 (кГс). Величины тороидального магнитного поля V_0 были вычислены в работах [13, 14] при анализе структуры вариаций солнечных пятен для периодов $\sim 140 - 180$ сут и вариаций периодов быстрых гармоник магнитных волн Россби, возникающих в нижней части области конвекции, в зоне «тахоклина». Отметим некоторые особенности структуры и динамики вариаций в циклах (табл. 1). Для всех циклов в спектральном ряду вариаций 400 – 1400 сут проявляются несколько идентичных периодических гармоник, периоды которых при увеличении магнитного поля V_0 уменьшаются (для сравнения, периоды 680 и 1280 сут при напряженности V (ТМП) = 76,4 кГс в 17-м цикле и периоды 608 и 1217 сут при V (ТМП) = 103,6 кГс в 18-м цикле). Градиенты между периодами вариаций внутри циклов практически одинаковы для всех циклов (например, отношение периодов для 17-го цикла $1280/640 = 2$ и $640/580 = 1,33$, для 19-го цикла эти величины равны $1217/608 = 2$ и $608/456 = 1,33$). Это означает, что градиенты не зависят от величины V_0 .

Связь периодов QBO-вариаций с динамикой тороидального магнитного поля

Возможной причиной динамики периодов вариаций в циклах может быть широтная динамика ТМП. Широтная зависимость ТМП обычно задается фор-

мулой $V_Q = V_0 \cos q \sin q$ [15], где Q – широта тороидального поля; V_0 – значение тороидального магнитного поля в области генерации, в «тахоклине». Величина V_Q варьируется вдоль широты, достигает максимума $V_{\max} = V_0/2$ на широте 45 град. и меняет знак на экваторе. Если предположить, что периоды вариаций меняются пропорционально V_Q , то при постоянной для цикла величине V_0 отношения периодов изменяются пропорционально $\cos q \sin q$. Для вычисления широтного градиента вариаций мы предложили в качестве реперных точек использовать широту 23 град. для периода 1200 сут и 10 град. для периода 456 сут, градиент равен ~ 57 сут/град. Это предположение основано на анализе широтного распределения числа солнечных пятен [3]: в среднем максимальные величины SSN регистрируются вблизи широт 22 – 25 град., а на низких широтах наиболее точные измерения значений SSN проводятся на широте ~ 10 град. (минимальный разброс данных по станциям). Предполагая линейную зависимость между периодом вариаций и широтой, мы вычислили для градиента 57 сут/град. значения широты Q для каждого периода и в соответствии с последовательностью периодов получили величины широтных градиентов для каждого цикла. Результаты вычислений широты Q (град.) и магнитного поля V (кГс) по формуле $V = V_0 \cos q \sin q$ приведены для всех периодов в табл. 2. Здесь V можно рассматривать как широтную компоненту динамического поля Солнца.

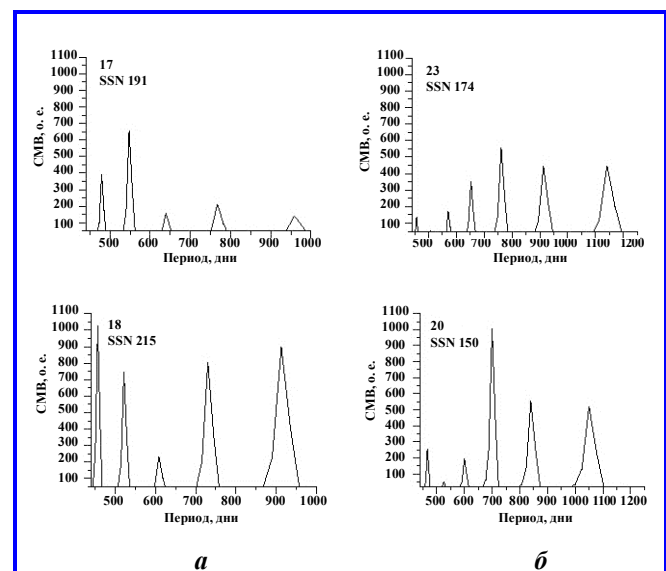


Рис. 3. Динамика спектров мощности вариаций суточных величин солнечных пятен для 17-го и 18-го (а), 23-го и 20-го (б) циклов

Таблица 1

№ цикла	Период, сут							SSN	В ₀ (ТМШ), кГц
	400 – 500	500 – 600	600 – 700	700 – 800	800 – 920	920 – 1000	1100 – 1400		
17	480	547	640	766		956	1280	191	76,4
18	456	521	608	730	912		1217	215	106,3
19	456	521	608	730	913		1217	269	119
20	466	525	600	700	840	1049		150	79
21	446	573	670		803	1004	1339	220	90,2
22	456	521	608	730	912		1217	211	92,9
23	456	570	600	761	913		1141	174	93,8
24	495	578	690	788	867		1156	113	58

Таблица 2

№ цикла											
				18 (106,3 кГц)	19 (119 кГц)	22 (92,9 кГц)					
T, сут	Q	cosqsinq	B								
456	10	0,171	18,18	20,35	15,89						
521	11,4	0,193	20,5	22,97	17,94						
608	12,67	0,214	22,75	25,4	19,89						
730	14,8	0,247	26,25	29,4	22,96						
912	18	0,294	31,25	35	27,32						
1217	23,3	0,363	38,5	43,2	33,73						
	35	0,47	50	56	43,66						
№ цикла											
24 (58, кГц)				17 (76,4, кГц)							
T, сут	Q	cosqsinq	B	T, сут	Q	cosqsinq	B				
495	10,68	0,184	10,67	480	10,42	0,178	13,6				
578	12,14	0,206	11,95	547	12,12	0,205	15,66				
690	14,1	0,236	13,68	640	13,22	0,223	17				
788	15,82	0,262	15,2	766	15,43	0,256	19,6				
867	17,21	0,282	16,36	959	18,8	0,305	23,27				
1156	22,3	0,35	20,3	1280	24,42	0,376	28,72				
	35	0,47	27,3		35	0,47	35,91				
№ цикла											
21 (90,16 кГц)				23 (93,8 кГц)				20 (79 кГц)			
T, сут	Q	cosqsinq	B	T	Q	cosqsinq	B	T	Q	cosqsinq	B
446	9,83	0,168	15,14	456	10	0,171	16	466	10,17	0,174	13,73
573	12,06	0,204	18,39	570	12	0,203	19,0	525	11,2	0,191	15,05
670	13,76	0,231	20,82	660	13,58	0,228	21,4	600	12,52	0,212	16,71
803	16,1	0,266	23,98	761	15,34	0,241	22,66	700	14,27	0,239	18,87
1004	19,63	0,316	28,49	913	18	0,294	27,57	840	16,72	0,283	22,39
1339	25,63	0,39	35,15	1141	22,01	0,347	32,59	1049	20,38	0,326	25,78
	35	0,47	42,4		35	0,47	44		35	0,47	37,1

Значения B_0 для 17 – 24-го циклов (в табл. 2 выделены красным цветом) взяты из [14].

Результаты вычислений представлены в графическом виде. На рис. 4, а, показана зависимость периодов T от широты Q (функция $T(Q)$) для 17-го, 23-го и 20-го солнечных циклов, на рис. 5, б – для 18-го, 21-го и 24-го циклов. Номера циклов, периоды для отдельных циклов и соответствующие значения ТМП B_0 (кГс) отмечены разными цветами. Широтная динамика вариаций периодов не зависит от величины ТМП B_0 , для всех циклов градиент линейной функции $T(Q)$ равен ~ 57 сут/град. На рис. 5 показана зависимость периодов T от динамики в цикле ТМП B (кГс) (функция $T(B)$) для 24-го, 21-го и 19-го солнечных циклов. Градиенты линейной функции $T(B)$ соответственно равны 64,1, 44,66 и 33,4 сут/кГс. На рис. 6 показана зависимость градиентов функции $T(B)$ от величины магнитного поля в зоне «тахоклина» B_0 . Градиенты функций $T(B)$ и $T(Q)$ для всех циклов даны в табл. 3. Анализ показывает, что основные характеристики структуры и динамики периодов вариаций солнечных пятен (диапазона $\sim 1,2 - 4$ г., QBO-вариации) определяются широтной динамикой

и величиной ТМП B_0 , то есть источник этого типа вариаций солнечных пятен расположен в зоне «тахоклина». Наши выводы находят подтверждение в расчетах динамики нестабильных магнитных волн Россби [12]. В работе показано, что нестабильные гармоники магнитных волн Россби с периодами >500 суток (диапазон периодов QBO-вариаций) могут возникать при напряженности магнитного поля в зоне «тахоклина» >60 кГс, периоды гармоник увеличиваются (рис. 2 в статье [12]) при увеличении напряженности поля. 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. Следует отметить, что название для $\sim 1,5 - 4$ суточных вариаций как двухлетних квазипериодических вариаций (QBO) не отражает динамику основных параметров. Анализ показал, что эти вариации имеют прямую функциональную связь с динамикой параметров ТМП.

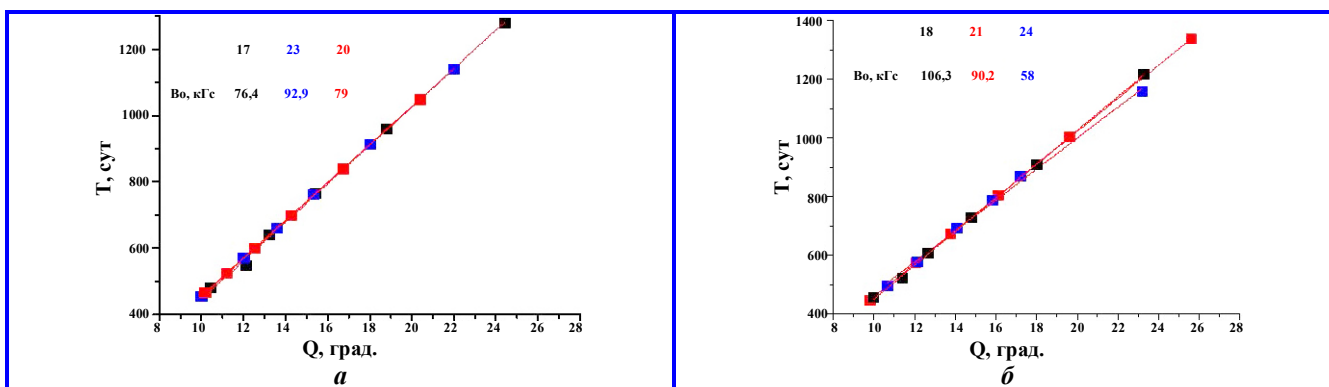


Рис. 4. Зависимость периодов вариаций от широты для 17-го, 23-го и 20-го циклов (а), для 18-го, 21-го и 24-го циклов (б)

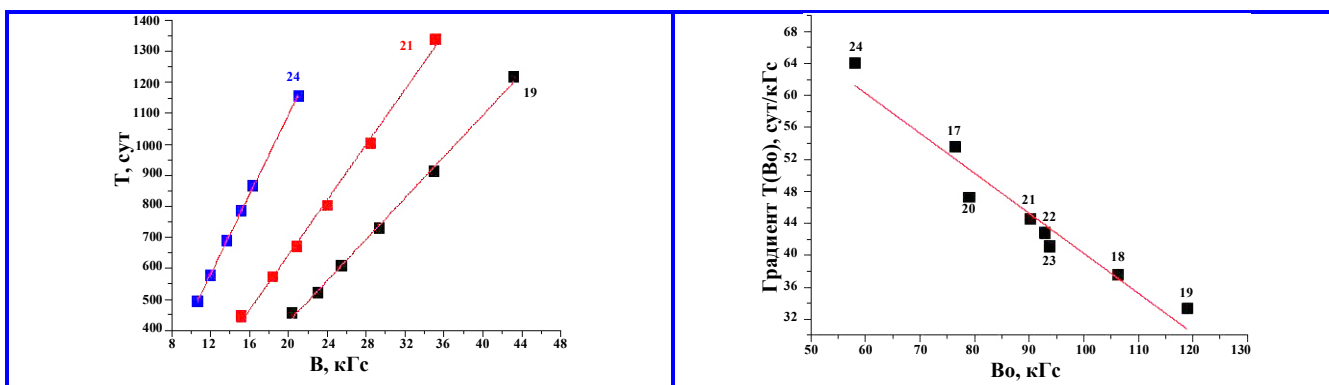


Рис. 5. Зависимость периодов вариаций от динамики в цикле тороидального магнитного поля для 24-го (синие значки), 21-го (красные) и 19-го (черные) циклов

Рис. 6. Зависимость градиентов периодов вариаций в циклах от величины B_0 для 17 – 24-го циклов

Структура вариаций QBO-периодов и временная динамика числа солнечных пятен

Временная динамика числа солнечных пятен всегда рассматривается как основной показатель динамики солнечной активности. Далее мы проведем сравнительный анализ структуры периодов вариаций в цикле и временной динамики числа солнечных пятен на фазе спада активности. При этом сделано предположение, что структура периодов вариаций в цикле связана с динамикой числа солнечных пятен и максимальный период соответствует максимальной величине SSN. На рис. 7 для 17-го (а) и 21-го (б) циклов временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена с результатами измерений периодов вариаций SSN в цикле (табл. 1). Структура периодов фактически отражает временную структуру динамики SSN. На рис. 8 показана динамика SSN для фазы спада активности и динамика структуры периодов вариаций для 24-го, 17-го, 21-го и 19-го солнечных циклов. Зависимость можно представить линейной функцией $T(SSN)$, градиенты функции $dT/dSSN$ (сут/ssp) показаны в табл. 3 для всех циклов. Для всех функций в табл. 3 используется одна система обозначений. Например: обозначение $Q_{cn}(t)$ (град./г.) показывает градиент линейной функции $Q_{cn}(t)$ для фазы спада активности; обозначение $SSN(B_p)$ (ssp/кГс) показывает градиент линейной функции $SSN(B_p)$ для фазы роста активности. Индексы «сп» и «р» указывают, какой фазе развития активности соответствует данная величина («сп» – фаза спада, «р» – фаза роста).

Временная динамика числа солнечных пятен и параметры динамического магнитного поля Солнца

Рассмотрим динамику широты и напряженности ТМП (табл. 2) и временную динамику SSN. На рис. 9 временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена для 21-го цикла с динамикой напряженности ТМП (а) и для 17-го цикла с динамикой широты ТМП (б). Динамика напряженности и широты ТМП фактически отражают временную структуру динамики SSN. На рис. 10 показана зависимость SSN от напряженности В (ТМП) для 20-го и 24-го солнечных циклов (а), зависимость SSN от широты ТМП для 19-го, 22-го и 24-го циклов (б). Динамику SSN можно представить в виде линейных функций $SSN(B_{cn})$ и $SSN(Q_{cn})$. Градиенты функций $dSSN/dB$ (ssp/кГс) и $dSSN/dQ$ (ssp/град.) показаны в табл. 3 для всех циклов. Градиенты функции $SSN(B_{cn})$ для всех циклов меняются в пределах +/-12% от среднего значения, градиенты функции $SSN(Q_{cn})$ меняются в пределах ~ 20 – 40 %. Можно сопоставить временную динамику SSN с динамикой функции $SSN(B_{cn})$ и с динамикой функции $SSN(Q_{cn})$.

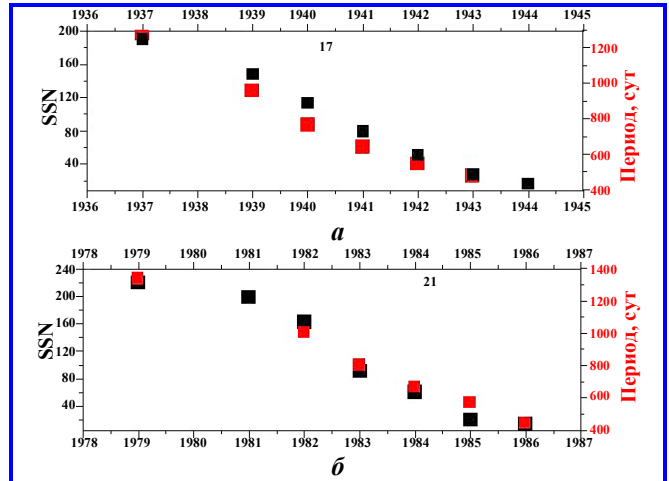


Рис. 7. Временная динамика числа солнечных пятен для 17-го (а) и 21-го (б) солнечных циклов. Красным нанесены значения периодов вариаций

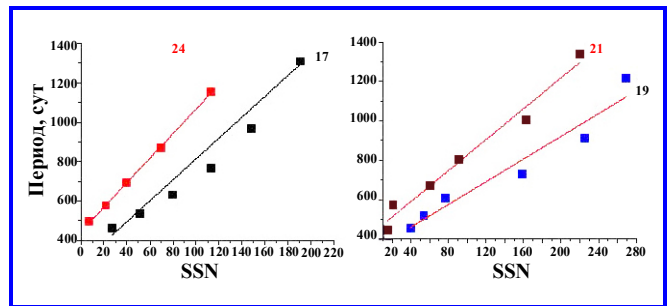


Рис. 8. Зависимость периодов вариаций для 24-го (красные значки), 17-го (черные), 21-го (коричневые) и 19-го (синие) солнечных циклов от динамики SSN (фаза спада активности)

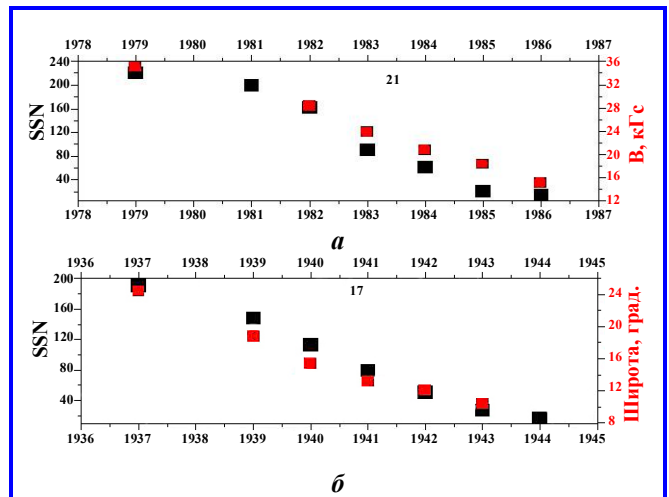


Рис. 9. Временная динамика SSN на фазе спада активности совмещена для 21-го цикла с динамикой напряженности тороидального магнитного поля (а) и для 17-го цикла с динамикой широты тороидального поля магнитного поля (б)

Мы получили временную динамику напряженности и широты ТМП для фазы спада активности в виде линейных функций $V_{\text{сп}}(t)$ и $Q_{\text{сп}}(t)$, градиенты функций кГс/г. и град./г. даны в табл. 3. На рис. 11 для фазы спада активности показана динамика напряженности ТМП для 17-го, 18-го и 19-го циклов (а) и для 21-го, 22-го и 24-го циклов. На рис. 12 для фазы спада активности показана динамика широты ТМП для 22-го, 21-го и 24-го циклов (а) и для 17-го, 19-го и 18-го циклов (б). Можно выделить значительные отличия в динамике параметров ТМП для фазы спада активности для 20-го, 23-го и 24-го циклов. Для 20-го и 24-го циклов градиенты функции $V_{\text{сп}}(t)$ равны $\sim 1,8$ кГс/г., среднее значение ~ 3 кГс/г. Градиенты функции $Q_{\text{сп}}(t)$ для 20-го (1,52 град./г.) и 23-го (1,75 град./г.) циклов значительно ниже средних значений (2,26 град./г.), что и определило длинное время спада $t_{\text{сп}}$ активности для этих циклов

$\sim 7,5$ лет, среднее $t_{\text{сп}} \sim 6,5$ лет. В табл. 3 в строке $t_{\text{сп}}/t_{\text{экс}}$ показаны вычисленные и экспериментальные значения [3] этих величин. Временная динамика и численные значения напряженности и широты ТМП получены при анализе средней временной динамики SSN, при этом не рассматривалась структура сдвоенных максимумов SSN вблизи максимума цикла. Наличие второго максимума будет увеличивать как время роста активности, так и время спада, в обоих случаях градиенты уменьшаются. Поэтому полученные величины нужно рассматривать как некоторые средние характеристики динамики параметров ТМП. Следует отметить, нижний предел регистрируемых значений периодов ~ 450 сут (табл. 1, ниже мешают шумы), поэтому все корреляционные зависимости ограничены значением широты ТМП ~ 10 град. и соответствующими значениями величины и напряженности ТМП.

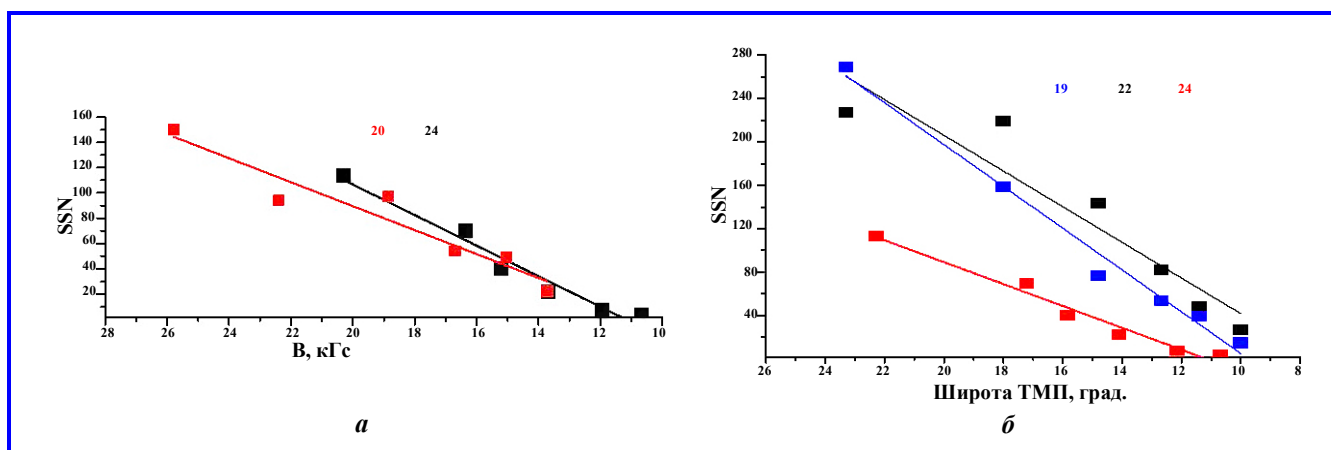


Рис. 10. Зависимость SSN от напряженности V (ТМП) для 20-го и 24-го солнечных циклов (а), зависимость SSN от широты ТМП для 19-го, 22-го и 24-го циклов

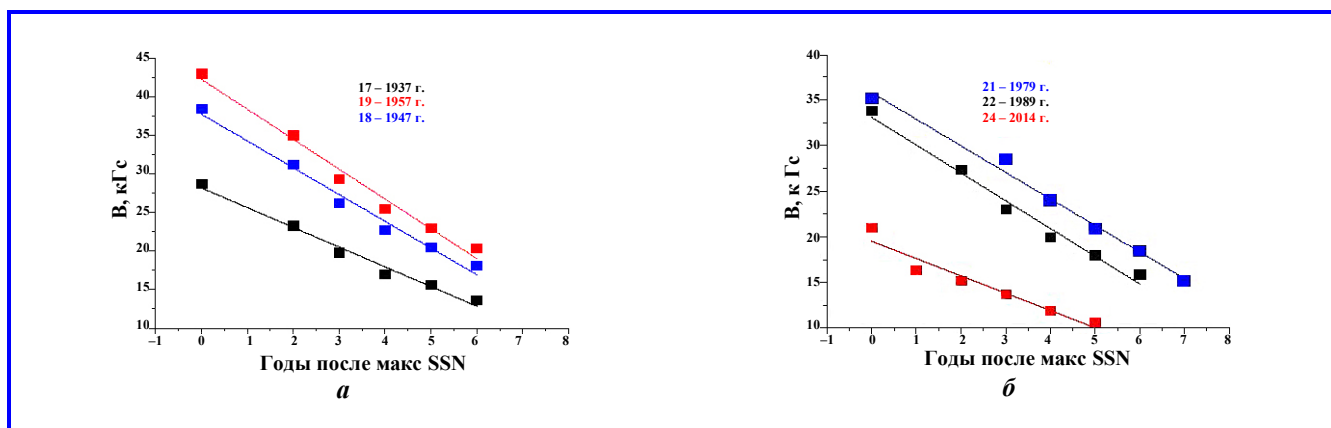


Рис. 11. Динамика напряженности ТМП для 17-го, 18-го и 19-го циклов (а) и для 21-го, 22-го и 24-го циклов (б). Нулевая точка на шкале X соответствует году максимума SSN в каждом цикле

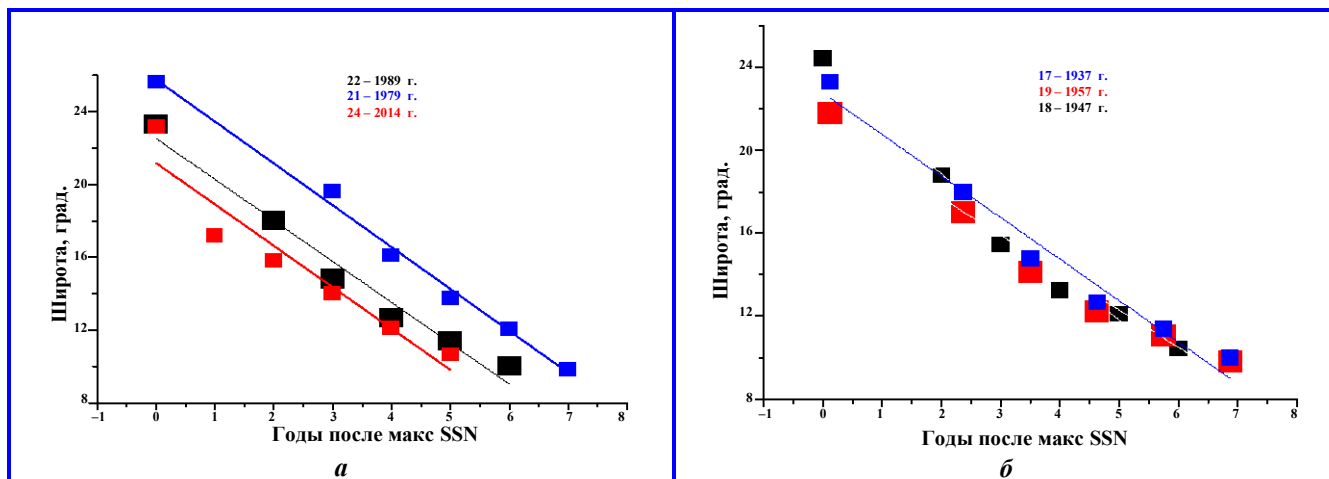


Рис. 12. Динамика широты ТМП для 22-го, 21-го и 24-го циклов (а) и для 17-го, 19-го и 18-го циклов (б). Нулевая точка на шкале X соответствует году максимума SSN в каждом цикле

Таблица 3

№ цикла	17	18	19	20	21	22	23	24
SSN/ t_{max}	191/1937	215/1947	269/1957	150/1968	220/1979	211/1989	174/2000	113/2014
$T(Q)$, сут/град.	57,97	57,64	57,64	57,1	56,55	57,64	57,06	52,91
$T(B)$, сут/кГц	53,5	37,53	33,4	47,27	44,56	42,8	41,15	64,1
$T(SSN)$, сут/ssn	4,78	3,52	2,87	4,64	3,92	3,35	3,89	6,21
SSN(B_{cp}), ssn/кГц	10,9	9,9	11,1	9,47	11,12	11,5	9,73	12,1
$B_{cp}(t)$, кГц/г.	-2,6	-3,47	-3,87	-1,82	-2,9	-2,65	-2,39	-1,8
SSN(Q_{cp}), ssn/град.	11,67	15	19,25	11,53	14,08	15,26	13,3	10,1
$Q_{cp}(t)$, град./г.	-2,35	-2,25	-2,25	-1,52	-2,3	-2,25	-1,75	-2,14
$t_{cp}/t_{экс}$, Г.	6,85/6,84	6,38/6,92	6,38/6,58	7,48/7,33	7,23/6,75	6,35/6,75	7,43/7,08	5,89/5,67
$B_p(t)$, кГц/г.	5,51	9,13	9,68	4,75	8,24	8,94	4,56	1,52
$Q_p(t)$, град./г.	-2,64	-3,9	-3,9	-3,66	-3,12	-3,9	-3,12	-2,54
SSN(+1 г.)	14,6	55,3	54,2	22	39,3	33,9	28,9	24,9
$B(+1 г.)$, кГц	11,7	20,24	21,9	12,86	18,67	15,84	19	13,23
$B(SSNm)$, кГц	28,72228,72 28,72	38,5	43,2	25,78	35,15	33,73	32,6	20,3
$Q(+1 г.)$, град.	32,36	31,1	31,1	31,34	31,9	31,1	31,75	32,46
$Q(SSNm)$, град.	24,42	23,3	23,3	20,38	25,63	23,3	22,01	22,28

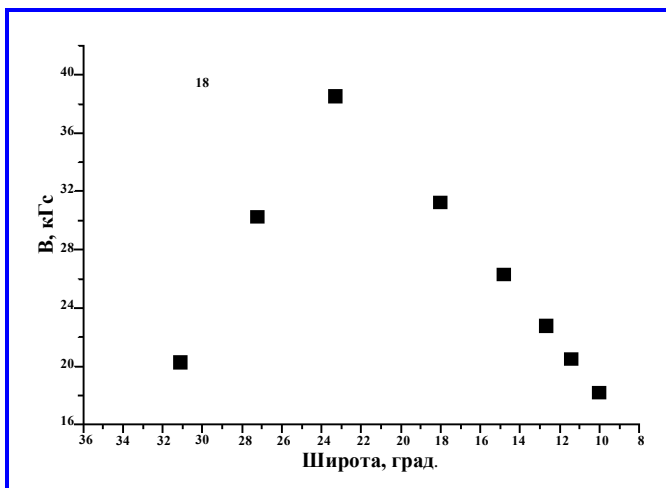


Рис. 13. Вариации напряженности и широты динамического магнитного поля для 18-го цикла. Точка перегиба соответствует широте Q для максимума SSN

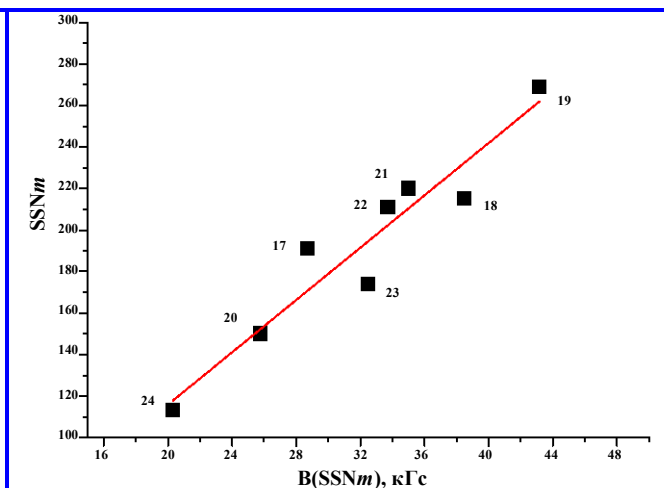


Рис. 14. Динамика напряженности динамического магнитного поля в максимуме цикла и динамика максимального числа в цикле солнечных пятен для 17 – 24-госолнечных циклов

Таким образом, в результате сравнительного анализа структуры периодов вариаций в цикле и временной динамики SSN для фазы спада активности были сделаны количественные оценки параметров ТМП (численные значения напряженности и широты, рис. 12 и рис. 13). ТМП можно рассматривать как широтную гармонику ДМП Солнца, которое возникает как результат перестройки структуры полярного (меридионального, внутреннего поля Солнца) и появления широтного ТМП [1]. Для вычисления динамики параметров ДМП на фазе роста активности мы предположили, что функция $SSN(B_{cp})$, вычисленная для фазы спада активности, не меняется в процессе развития активности в цикле, отражает функциональную связь между вариациями ДМП Солнца и числом солнечных пятен для всего цикла. Это вполне оправдано, так как градиенты функции $SSN(B_{cp})$ практически не меняются для разных циклов при разных величинах B_0 (табл. 3). Временную динамику магнитного поля для фазы роста активности $B_p(t)$ мы вычислили сопоставляя функции $SSN(t)$ и $SSN(B_{cp})$. Динамику широты ДМП для фазы роста активности $Q_p(t)$ мы рассчитали в предположении линейной зависимости между широтой ~ 35 град. (начало цикла [3]) и широтой для максимума SSN в циклах (табл. 2). Градиенты функций $B_p(t)$ и $Q_p(t)$ показаны в табл. 3. Для фазы роста 17-го и 24-го солнечных циклов характерно очень медленное развитие активности. Градиенты функций $B_p(t)$ и $Q_p(t)$ значительно ниже средних значений: градиент функции $Q_p(t)$ равен $\sim 2,6$ град./г., среднее значение $\sim 3,6$ град./г., для 24-го цикла градиент функции $B_p(t)$ равен $\sim 1,5$ кГс/г., среднее значение для 18-го, 19-го, 21-го и 22-го циклов равно

~ 9 кГс/г. Следует отметить существенное отличие в динамике магнитного поля и широты на фазе роста и спада активности. На фазе роста активности в диапазоне широт $\sim 35 - 23$ град. магнитное поле увеличивается, достигает максимума вблизи максимума SSN и далее уменьшается. На фазе спада активности реализуется прямая зависимость между напряженностью и широтой ДМП, на фазе роста – обратная (широта уменьшается, магнитное поле увеличивается). Вариации напряженности и широты ДМП для 18-го цикла представлены на рис. 13. Точка перегиба соответствует широте для максимума SSN. На рис. 14 представлена динамика напряженности ДМП для максимума цикла и динамика максимального числа солнечных пятен для 17 – 24-го солнечных циклов. В динамике солнечного цикла проявляются два критических значения широты ДМП: ~ 35 и ~ 23 град. Разрыв меридианного полярного поля для всех циклов происходит на одной широте ~ 35 град. при разных значениях напряженности ДМП, для 19-го и 20-го циклов магнитное поле отличается \sim в два раза (табл. 2). Первые значительные возрастания солнечных пятен регистрируются \sim через год после начала цикла на широте ~ 32 град. при разных величинах магнитного поля. Значения SSN (+1 г.), B (+1 г.) и Q (+1 г.) даны в табл. 3. Начало спада солнечной активности для всех циклов происходит на широте ~ 23 ($\pm 10\%$) градуса при разных величинах магнитного поля (рис. 14). Значения B (SSNm) и Q (SSNm) даны в табл. 3. Мы можем представить полную временную структуру SSN в циклах как временные вариации параметров ДМП Солнца. На рис. 15 показана временная динамика SSN и напряженности ДМП для

17-го цикла (а) и для 20-го цикла (б) и временная динамика SSN и широты ДМП для 17-го цикла (б) и для 20-го цикла (з). Численные зависимости представлены линейными функциями $SSN(B_{сп})$, $SSN(Q_{сп})$, $B_p(t)$ и $Q_p(t)$ для фазы спада и роста активности (табл. 3). Анализ показал, что динамика солнечных пятен в цикле формируется временной динамикой параметров ДМП Солнца.

Динамика 11-летних солнечных циклов

Временная динамика числа солнечных пятен традиционно используется для описания динамики солнечной активности. Сравнительный анализ тонкой структуры периодов вариаций SSN (диапазон периодов ~ 1,3 – 4 г.) и динамики широтной компоненты ДМП (тороидального магнитного поля) показал возможность сделать количественные оценки временных вариаций SSN как вариаций динамического поля Солнца. На рис. 16 показаны вариации ДМП Солнца и вариации числа солнечных пятен для 17 – 24-го солнечных циклов.

Можно выделить некоторые общие для всех циклов детали развития солнечной активности.

1. Градиенты функции $SSN(B)$ для всех циклов меняются в пределах +/-12% от среднего значения ~10,7 ssn/кГс. На рис. 17 для 17 – 24-го солнечных циклов показана зависимость $SSN(B)$, которая аппроксимируется линейной функцией $SSN = -104,79 + 8,91B$ (кГс), коэффициент корреляции ~93%. Эта функция определяет динамику $SSN(B)$ для отдельных циклов с точностью +/-25%. Возможно, существует единый механизм, формирующий динамику вариаций солнечных пятен и магнитного поля.

2. Скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности задается временной динамикой широты ДМП. На рис. 18 для 17 – 24-го циклов представлена временная динамика широты ДМП. Функции $Q_p(t)$ и $Q_{сп}(t)$ определяют скорость движения магнитных потоков к солнечной поверхности, задают периоду (длину) солнечных циклов. Для фазы спада активности широта изменяется со скоростью ~ 2,3 град./г., для 20-го и 23-го циклов со скоростью ~ 1,6 град./г. Для фазы роста активности широта изменяется со скоростью ~3,6 град./г. и ~ 2,6 град./г. (17-й и 24-й циклы). В процессе развития активности широта ДМП уменьшается, градиент линейной функции $Q(t)$ отрицательный. Временная динамика и численные значения напряженности и широты ТМП получены при анализе средней временной динамики SSN, при этом не рассматривалась структура сдвоенных максимумов SSN вблизи максимума цикла. Наличие второго макси-

ма будет увеличивать как время роста активности, так и время спада, в обоих случаях градиенты уменьшаются. Поэтому полученные величины нужно рассматривать как некоторые средние характеристики динамики параметров ДМП.

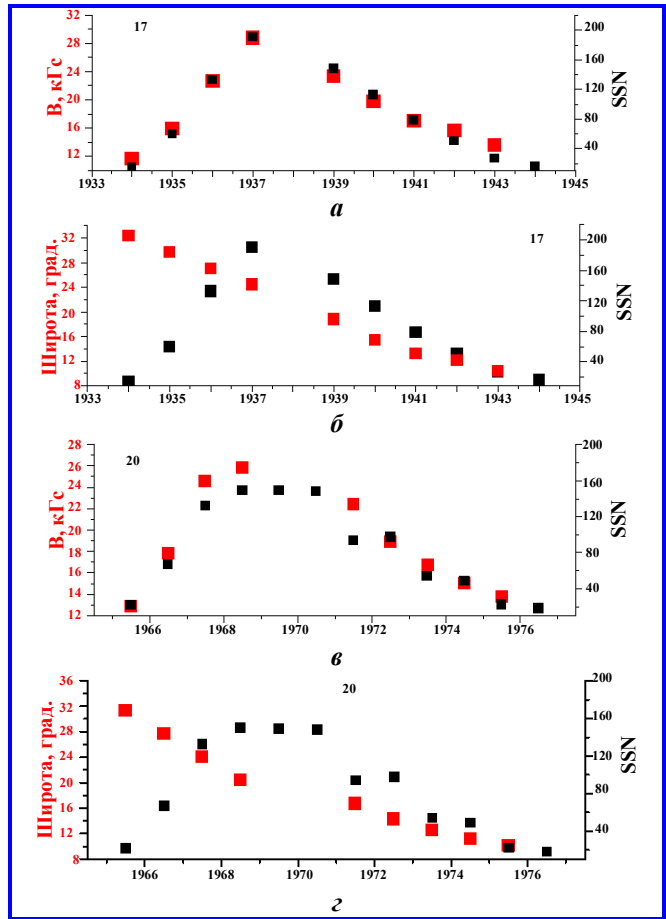


Рис. 15. Временная динамика SSN и напряженности динамического магнитного поля для 17-го цикла (а) и для 20-го цикла (б), временная динамика SSN и широты динамического магнитного поля для 17-го цикла (б) и для 20-го цикла (з)

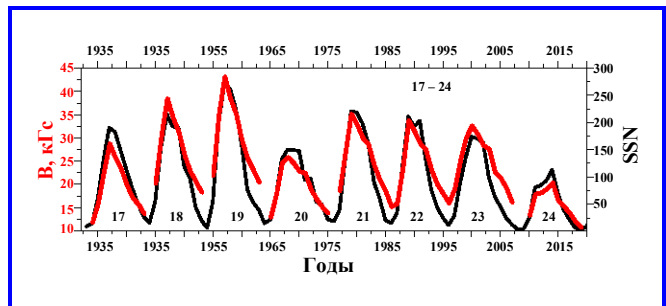


Рис. 16. Динамика числа солнечных пятен в 17 – 24-м солнечных циклах показана вместе с динамикой напряженности динамического магнитного поля Солнца

3. Динамику солнечной активности можно представить как временные вариации напряженности и широты ДМП Солнца. ДМП возникает как результат перестройки структуры полярного (меридионального, внутреннего поля Солнца) и появления широтного тороидального магнитного поля. В настоящее время нет прямых измерений временных вариаций отдельных гармоник ДМП. Динамика поверхностного фотосферного магнитного поля (ФМП) служит основой для изучения динамики ДМП. Следует отметить, что вариации среднегодовых величин магнитного поля солнечных пятен (фотосферного поля) достаточно точно (коэффициент корреляции ~48%) отражают временную динамику напряженности ДМП. На рис. 19 представлены динамика среднегодовых величин магнитного поля солнечных пятен, число солнечных пятен (а) [рис. 4 [16]] и вычисленные значения ДМП (б). Подробно структура фотосферного магнитного поля рассмотрена в работах [6, 17, 18], анализируются временные вариации трех компонент ФМП: меридианной V_{MER} , широтной (восток – запад) V_{EW} и радиальной V_R . Миграция к полюсу меридианной компоненты ФМП и миграция к экватору широтной компоненты определяет основные параметры динамики в цикле числа солнечных пятен [6]. Фотосферное магнитное поле формируется в результате подъема к поверхности отдельных силовых трубок ДМП, динамика ФМП, во многом, отражает динамику ДМП (рис. 19). Можно предположить, что перенос магнитных потоков ДМП к поверхности определяется динамикой широтного и меридианного компонентов ДМП. Это объясняет характерные для всех циклов сдвоенные максимумы числа солнечных пятен вблизи максимума цикла (Gnevyshev gap), рис. 1. Динамика широты ДМП определяет скорость миграции магнитных потоков к поверхности: для фазы роста активности скорость равна ~3,9 град./г., для фазы спада 2,25 град./г. (данные для 19-го цикла, максимумы SSN регистрируются почти одновременно). Временной сдвиг между максимумами (~1 – 3 г.) определяется динамикой смены знаков компонент ДМП [6, 17]. Для более точной оценки влияния отдельных гармоник ДМП на формирование временной динамики солнечных пятен необходимы данные о векторной структуре динамического магнитного поля Солнца.

Авторы надеются, что результаты сравнительного анализа динамики солнечных пятен и временных вариаций ДМП Солнца будут полезны при изучении пространственно-временной эволюции магнитного поля Солнца и для тестирования динамо-механизмов, формирующих солнечную активность.

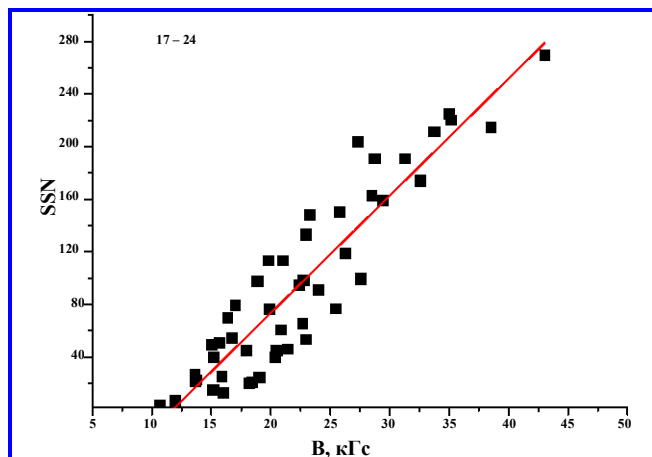


Рис. 17. Динамика SSN и напряженности ДМП для 17 – 24-го солнечных циклов

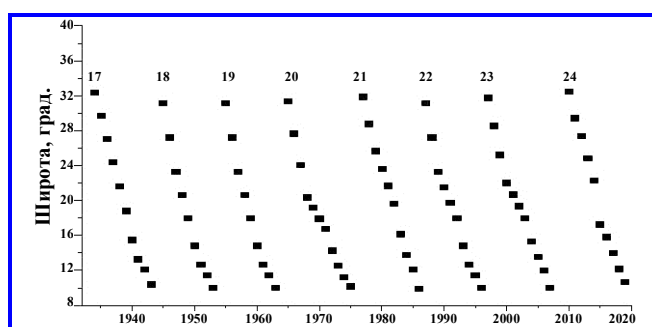


Рис. 18. Динамика широты ДМП в 17 – 24-м солнечных циклах

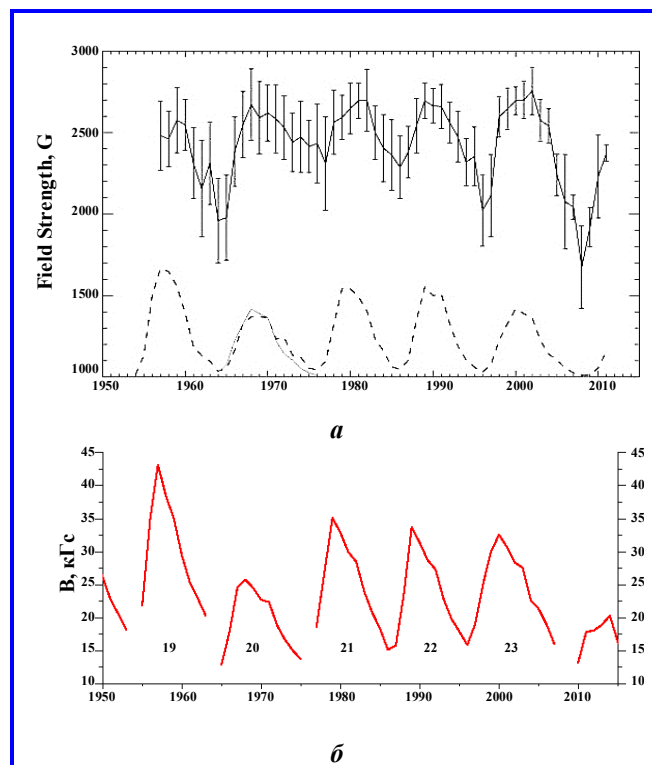


Рис. 19. Динамика среднегодовых величин магнитного поля солнечных пятен, число солнечных пятен (а) [16] и вычисленные значения ДМП (б)

Основные результаты

В работе представлена картина развития динамомеханизма, формирующего динамику солнечной активности. Сравнительный анализ временной динамики структуры периодов вариаций SSN (периоды $\sim 1,3 - 4$ г.), временной динамики числа солнечных пятен и динамики широтной компоненты ДМП (тороидального магнитного поля) показал возможность сделать количественные оценки динамики напряженности и широты динамического магнитного поля Солнца для каждого цикла. Временные вариации параметров динамического магнитного поля Солнца определяют динамику числа солнечных пятен. Получены следующие результаты.

1. Структура вариаций с периодами $\sim 1,3 - 4$ г. формируется временной динамикой широтной компоненты ДМП и практически не зависит от величины магнитного поля B_0 , реализуемого в области «тахоклина». Градиент функции $T(Q)$ (период – широта) для всех циклов равен ~ 57 сут/град. Временная структура вариаций периодов в цикле формируется динамикой напряженности ДМП.

2. Зависимость числа солнечных пятен от напряженности ДМП можно представить линейной функцией $SSN(B)$, градиенты функции $SSN(B)$ для всех циклов меняются в пределах $\pm 12\%$ от среднего значения $\sim 10,7$ ssn/kГс.

3. Скорость перемещения магнитных потоков к солнечной поверхности определяет временная динамика широты ДМП. Для фазы спада солнечной активности средняя скорость $\sim 2,3$ град./г. и $\sim 1,6$ град./г. для 20-го и 23-го циклов. Для фазы роста солнечной активности эти величины равны $\sim 3,6$ град./г. и $\sim 2,6$ град./г. для 17-го и 24-го циклов.

4. Можно предположить, что перенос магнитных потоков к поверхности и формирование динамики солнечных пятен в цикле, в основном, определяется динамикой двух компонент ДМП (широтной и меридианной). Это объясняет появление сдвоенных максимумов числа солнечных пятен вблизи максимума цикла (Gnevyshev gap) и, соответственно, динамику длительности солнечных циклов. Динамика широты ДМП определяет скорость миграции магнитных потоков (одинаковую для обеих гармоник) к поверхности: для фазы роста скорость равна $\sim 3,9$ град./г., для фазы спада $\sim 2,25$ град./г. (данные для 19-го цикла, максимумы регистрируются почти одновременно). Временной сдвиг между максимумами ($\sim 1 - 3$ г.) определяется динамикой смены знаков компонент ДМП. Для более точной оценки влияния отдельных гармоник ДМП на формирование временной динамики

солнечных пятен необходимы данные о векторной структуре динамического магнитного поля Солнца.

5. Вариаций солнечной активности (11-летние вариации и вариации $\sim 1,3 - 4$ г.) формируются в рамках развития единого динамо-механизма, определяющего временную динамику магнитного поля и широты ДМП.

Литература

1. Dynamo models of the solar cycle / Paul Charbonneau // Living Reviews in Solar Physics. – 2020. – Vol. 17. – № 4. – DOI : 10.1007/s41116-020-00025-60123456789.
2. Introduction to the solar activity cycle: overview of causes and consequences / A. Balogh, H. S. Hudson, K. Petrovay [et al.] // Space Science Reviews. – 2014. – Vol. 186 (1 – 4) – P. 1–15. – DOI : 10.1007/s11214-014-0125-8.
3. The Solar Cycle / David H. Hathaway // Living Rev. Solar Phys. – 2015. – Vol. 12. – № 4. – DOI : 10.1007/lrsp-2015-4.
4. Combined Analysis of the Observational Aspects of the Quasi-biennial Oscillation in Solar Magnetic Activity / G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth [et al.] // Space Science Reviews December. – 2014. – Vol. 186. – Issue 1 – 4. – P. 359–386. – DOI : 10.1007/s11214-014-0068-0.
5. Benevolenskaya E. E. A Model of the Double Magnetic Cycle of the Sun / E. E. Benevolenskaya // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 509. – Issue 1. – P. L49–L52. – DOI : 10.1086/311755.
6. The dynamics of the solar magnetic field: polarity reversals, butterfly diagram, and quasi-biennial oscillations / A. Vecchio, M. Laurenza, D. Meduri [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2012. – Vol. 749. – № 27. – [10 p.]. – DOI : 10.1088/0004-637X/749/1/27.
7. On the presence of two populations of sunspots / Y. A. Nagovitsyn, A. A. Pevtsov // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 833. – Issue 1. – № 94. – [6 p.]. – DOI : 10.1134/S001679321808025X.
8. One Possible Reason for Double-Peaked Maxima in Solar Cycles: Is a Second Maximum of Solar Cycle 24 Expected? / A. Kilcik, A. Ozguc // Solar Phys. – 2014. – Vol. 289. – P. 1379–1386. – DOI : 10.1007/s11207-013-0407-4.
9. Kostyuchenko I. The Fine Structure of the Quasi-Biennial Oscillations of Sunspot Areas and the Double Magnetic Cycle of the Sun / I. Kostyuchenko, E. Bruevich // Solar Phys. – 2021. – Vol. 296:84. – DOI : 10.1007/s11207-020-01745-6.
10. Zaqarashvili T. V. 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.
11. Periodicities in solar coronal mass ejections / Y.-Q. Lou, Y.-M. Wang, Z. Fan [et. al.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2003. – Vol. 315. – P. 809–818. – DOI : 10.1046/j.1365-8711.2003.06993.x.
12. Quasi-biennial oscillations in the solar tachocline caused by magnetic rossby wave instabilities / T. V. Zaqarashvili,

- M. Carbonell, R. Oliver [et al] // The Astrophysical Journal Letters. – 2010. – Vol. 724. – P. L95–L98. – DOI : 10.1088/2041-8205/724/1/L95.
13. Rieger-type periodicity during solar cycles 14 – 24: estimation of dynamo magnetic field strength in the solar interior / E. Gurgenchashvili, T. V. Zaqarashvili, V. Kukhianidze [et al] // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 826. – № 55. – [10 p.]. – DOI : 10.3847/0004-637X/826/1/55.
14. Тонкая структура периодических вариаций солнечных пятен (17 – 24-й циклы солнечной активности). 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 [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2021. – Т. 182. – № 3. – С. 24 – 31.
15. Joint Instability of Latitudinal Differential Rotation and Toroidal Magnetic Fields below the Solar Convection Zone / Peter A. Gilman and Peter A. Fox // The Astrophysical Journal. – 1997. – Vol. 484. – № 1. – DOI : 10.1086/304330.
16. Long-term trends in sunspot magnetic fields / A. A. Pevtsov, Y. A. Nagovitsyn, A. G. Tlatov [et. al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2011. – Vol. 742. – P. L36 [4pp]. – DOI : 10.1088/2041-8205/742/2/L36.
17. On the fluctuating component of the sun's large-scale magnetic field / Y.-M. Wang, N. R. Sheeley, Jr. // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 590. – № 2. – P. 1111–1120. – DOI : 10.1086/375026.
18. The solar surface toroidal magnetic field / R. K. Ulrich, J. E. Boyden // The Astrophysical Journal. – 2005. – Vol. 620. – P. L123–L127.

Поступила в редакцию 06.12.2022

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.

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»).

FORMATION OF SOLAR ACTIVITY IN THE PROCESS OF DYNAMO MECHANISM DEVELOPMENT

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

Solar activity is traditionally characterized by the temporal dynamics of the number of sunspots. Modern models associate the dynamics of solar activity with the action of some periodic dynamo mechanism that is formed inside the Sun and determines the emergence and evolution of the dynamic magnetic field of the Sun (DMF). The dynamo theory of solar activity offers only a qualitative picture of variations in the number of sunspots in the cycle and does not give numerical estimates of experimental values. The paper provides a comparative analysis of the temporal dynamics of the structure of the periods of variations in the number of sunspots for periods of 1,5 – 4 years, the temporal dynamics of the number of sunspots and the temporal dynamics of the intensity and latitude of the DMF. The daily values of the number of sunspots in 17 – 24 solar cycles were used for the analysis. Numerical values for the intensity (B) and latitude (Q) of the DMP are obtained and the functional relationship between the time variations of the parameters of the dynamic magnetic field of the Sun and the dynamics of the number of sunspots is shown. It is shown that the velocity of magnetic fluxes to the solar surface is determined by the temporal dynamics of the latitude of the DMF, which for the phase of activity decline is on average ~2,3 degrees/year (for 20 and 23 cycles ~1,6 degrees/year). For the phase of activity growth, these values are on average ~3,6 deg/year and ~2,6 deg/year for 17 and 24 cycles. During the development of activity, the latitude of the DMP decreases, the gradient of the linear function Q(t) is negative. The dynamics of the intensity of the DMF determines the dynamics of the number of sunspots, the SSN(B) function for all cycles varies within +/- 12% of the average value of ~10,7 ssn/ kG. The structure of variations with periods of ~1,5 – 4 years is formed by the temporal dynamics of the latitudinal component of the DMF and practically does not depend on the magnitude of the magnetic field B_0 realized in the "tachocline" region. The gradient of the function T(Q), period-latitude for all cycles is ~57 days/deg. The dynamics of variations of periods in the cycle is formed by the dynamics of the intensity of the DMF. The analysis showed that variations in solar activity (11-year variations and 1,5 – 4-year variations) are formed within the framework of the development of a single dynamo mechanism that determines the temporal dynamics of the magnetic field and the latitude of the DMF.

Keywords: dynamic magnetic field of the Sun, sunspots, spectral power density of variations, tachocline.

References

1. Dynamo Models of the Solar Cycle / Paul Charbonneau // Living Reviews in Solar Physics. – 2020. – Vol. 17. – No. 4. – DOI : 10.1007/s41116-020-00025-60123456789.
2. Introduction to the Solar Activity Cycle: Overview of Causes and Consequences / A. Balogh, H. S. Hudson, K. Petrovay [et al.] // Space Science Reviews. – 2014. – Vol. 186 (1–4) – P. 1–15. – DOI : 10.1007/s11214-014-0125-8.
3. The Solar Cycle / David H. Hathaway // Living Rev. Solar Phys. – 2015. – Vol. 12. – No. 4. – DOI : 10.1007/lrsp-2015-4.
4. Combined Analysis of the Observational Aspects of the Quasi-biennial Oscillation in Solar Magnetic Activity / G. Bazilevskaya, A.-M. Broomhall, Y. Elsworth [et al.] // Space Science Reviews December. – 2014. – Vol. 186. – Issue 1–4. – P. 359–386. – DOI : 10.1007/s11214-014-0068-0.
5. Benevolenskaya E. E. A Model of the Double Magnetic Cycle of the Sun / E. E. Benevolenskaya // The Astrophysical Journal. – 1998. – Vol. 509. – Issue 1. – P. L49–L52. – DOI : 10.1086/311755.
6. The Dynamics of the Solar Magnetic Field: Polarity Reversals, Butterfly Diagram, and Quasi-Biennial Oscillations / A. Vecchio, M. Laurenza, D. Meduri [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2012. – Vol. 749. – No. 27. – [10 p.]. – DOI : 10.1088/0004-637X/749/1/27.
7. On the Presence of Two Populations of Sunspots / Y. A. Nagovitsyn, A. A. Pevtsov // The Astrophysical Journal. – 2016. – Vol. 833. – Issue 1. – No. 94. – [6 p.]. – DOI : 10.1134/S001679321808025X <https://doi.org/10.1134/S001679321808025X>.
8. One Possible Reason for Double-Peaked Maxima in Solar Cycles: Is a Second Maximum of Solar Cycle 24 Expected? / A. Kilcik, A. Ozguc // Solar Phys. – 2014. – Vol. 289. – P. 1379–1386. – DOI : 10.1007/s11207-013-0407-4.
9. Kostyuchenko I. The Fine Structure of the Quasi-Biennial Oscillations of Sunspot Areas and the Double Magnetic Cycle of the Sun / I. Kostyuchenko, E. Bruevich // Solar Phys. – 2021. – Vol. 296:84. – DOI : 10.1007/s11207-020-01745-6.
10. Zaqarashvili T. V. 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.
11. Periodicities in Solar Coronal Mass Ejections / Y.-Q. Lou, Y.-M. Wang, Z. Fan [et. al.] // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2003. – Vol. 315. – P. 809–818. – DOI : 10.1046/j.1365-8711.2003.06993.x.
12. Quasi-Biennial Oscillations in the Solar Tachocline Caused by Magnetic Rossby Wave Instabilities / T. V. Zaqarashvili, M. Carbonell, R. Oliver [et al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2010. – Vol. 724. – P. L95–L98. – DOI : 10.1088/2041-8205/724/1/L95.
13. 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. – No. 55. – [10 p.]. – DOI : 10.3847/0004-637X/826/1/55.
14. The Fine Structure of Periodic Oscillations of Sunspots (17th – 24th Cycles of Solar Activity). 1. Dynamics of the Structure of Sunspot Oscillations during Solar Cycles 17 – 24-m for the periods of 120 – 220 days. Calculation of the Dynamic Magnetic Field / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JSC, 2021. – Vol. 182. – No. 3. – P. 24–31.
15. Joint Instability of Latitudinal Differential Rotation and Toroidal Magnetic Fields below the Solar Convection Zone / Peter A. Gilman and Peter A. Fox // The Astrophysical Journal. – 1997. – Vol. 484. – No. 1. – DOI : 10.1086/304330. <https://iopscience.iop.org/journal/0004-637X>, <https://iopscience.iop.org/volume/0004-637X/484>, <https://iopscience.iop.org/issue/0004-637X/484/1>
16. Long-Term Trends in Sunspot Magnetic Fields / A. A. Pevtsov, Y. A. Nagovitsyn, A. G. Tlatov [et. al.] // The Astrophysical Journal Letters. – 2011. – Vol. 742. – P. L36 [4 p.]. – DOI : 10.1088/2041-8205/742/2/L36.
17. On the Fluctuating Component of the Sun's Large-Scale Magnetic Field / Y.-M. Wang, N. R. Sheeley, Jr. // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 590. – No. 2. – P. 1111–1120. – DOI : 10.1086/375026.
18. The Solar Surface Toroidal Magnetic Field / R. K. Ulrich, J. E. Boyden // The Astrophysical Journal. – 2005. – Vol. 620. – P. L123–L127.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.

IKI RAN (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, JC «VNIIEM 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.

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.
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.
(JC «VNIIEM Corporation»).