ДИНАМИКА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, МЕРИДИОНАЛЬНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ, СТРУКТУРА ПОЛЯРНОГО И ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В 21 – 24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

...........

Е. И. Морозова, А. А. Петрукович, И. П. Безродных, А. А. Мусалитин

Работа посвящена исследованию связи динамики крупномасштабного магнитного поля Солнца и динамики солнечной активности, анализируется впияние параметров меридиональной циркуляции на формирование солнечных циклов. Для 21 – 24-го солнечных циклов изучаются корреляционные связи между динамикой числа солнечных пятен и временной динамикой следующих параметров: тороидального магнитного поля в области источника (в области тахоклина), среднеширотного (усредненного по долготе) тороидального магнитного поля, полярного магнитного поля, скорости меридиональных потоков. Корреляционные зависимости были вычислены отдельно для средних значений параметров фаз роста и спада, рассматривалась взаимная динамика временных профилей и взаимная динамика временных градиентов. Получены новые результаты. Подробно рассмотрено влияние взаимной динамики меридиональной скорости и тороидального оляя на динамику полярного магнитного поля. В частности показано, что для фазы роста активности увеличение положительного грядиента тороидального магнитного поля ускоряет процесс распада старого полярного поля. Для фазы спада увеличение отрицательного градиента тороидального поля ускоряет процесс роста нового полярново поля. Вычисленные результаты позволяют по данным прямых измерений динамики в циклах числа солнечных пятен получить данные о параметрах меридиональной циркуляции.

Ключевые слова: тороидальное магнитное поле, полярное магнитное поле, меридиональная циркуляция, скорость дрейфа, меридиональная скорость.

Введение

Динамику солнечной активности традиционно связывают с динамикой числа солнечных пятен. В современных моделях формирование солнечного цикла рассматривают как циклический процесс изменения структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца. Два основных процесса управляют динамикой солнечного цикла. Это дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция магнитных потоков. Дифференциальное вращение усиливает и преобразует магнитное поле солнечного диполя (полярное поле) в широтное тороидальное магнитное поле. Тороидальное поле возникает и хранится в основании зоны конвекции в области тахоклина. Силовые трубки тороидальных потоков поднимаются вверх (в основном за счет магнитной плавучести) и проявляются вблизи поверхности в виде биполярных групп солнечных пятен (низкотемпературные области с сильным магнитным полем). Появление магнитных структур на поверхности (в действительности в приповерхностном слое на $r \approx 0.96R_s$, R_s – радиус Солнца) является основным фактором, определившим динамику полярного поля. При воздействии дифференциального вращения на широтные магнитные поля возникающих магнитных структур на поверхности формируется долготный тороидальный магнитный поток. На поверхности Солнца тороидальный поток распространяется в меридиональном направлении к полюсу, формируя новое полярное (аксиальное) поле. Меридиональная циркуляция направляет магнитный поток полярного поля в зону источника (в область тахоклина),

где новое тороидальное поле возникает как результат дифференциального вращения полоидального поля. В области источника тороидальный поток распространяется в меридиональном направлении к экватору со скоростью ~ 2 – 3 град./год. Меридиональный перенос широтных тороидальных магнитных потоков к полюсу на поверхности и к экватору в источнике называется меридиональной циркуляцией. Динамика меридиональной скорости тороидальных потоков (меридиональная циркуляция) определяет процесс формирования солнечного цикла. В процессе роста солнечной активности старое полярное уничтожается и на фазе спада активности возникает новое полярное поле противоположного знака. Для подтверждения гипотезы о циклическом характере динамики полярного и тороидального магнитного полей важно определить, какие параметры меридиональной циркуляции формируют периодичность солнечных циклов. К сожалению, экспериментальных данных о динамике меридиональных потоков и структуре полярного и тороидального магнитных полей Солнца очень мало.

Скорость меридиональных потоков (~ 10 – 20 м/с) на 1 – 2 порядка меньше скорости дифференциального вращения (~200 м/с) и скорости конвективных потоков (~500 м/с для супергранул). Это значительно усложняет исследование меридиональной циркуляции. Широтное распределение скорости дифференциального вращения и скорости меридиональных потоков (в керрингтоновой системе координат, синодическая скорость) с чрезвычайно высоким пространственным и временным разрешением были получены при изучении магнитограмм полного диска Солнца для 23-го и 24-го солнечных циклов [1 – 4]. Можно выделить некоторые основные характеристики динамики меридиональных потоков. Средняя скорость дифференциального вращения на широтах 0 - 60 град. меняется от ~ 30 до 180 м/с. Средний широтный профиль скорости меридиональных потоков V_{mer} близок к простой синусоиде и на широте 30 град. $V_{mer} \sim 10 - 12$ м/с, на широте 10 град. – $\sim 5 - 7$ м/с, в максимуме цикла – около 15 м/с. Скорость меридиональных потоков больше в минимуме солнечного цикла и медленнее в максимуме цикла [1]. V_{mer} в минимуме 23/24-го солнечных циклов значительно больше, чем в минимуме 22/23-го циклов [1]. Интересная особенность в динамике V_{mer} проявляется для 24-го цикла [2]. На фазе спада активности меридиональные потоки на средних широтах (~30°) ускоряются от 10 до 17 м/с, что дает ~50% увеличение средней скорости. Магнитные элементы с сильным (23 цикл) и слабым (24 цикл) магнитным полем показывают более медленную/быструю меридиональную скорость, поэтому динамические процессы в 24-м цикле более активны, среднее значение $V_{mer}(24) > V_{mer}(23)$ [2]. Подробная картина широтной и пространственной динамики скорости меридиональных потоков V_{mer} (отдельно для северной и южной полусфер) для 23 – 24-го солнечных циклов представлена в [3]. На широте $\pm 30^{\circ}$ в области источника ($r = 0.713R_s$) среднее значение Vmer~4,15 м/с для 23-го цикла и ~3,1 м/с [4] для 24-го цикла. На поверхности $(r = R_s)$ среднее $V_{mer}(23) \sim 8,75$ м/с, среднее Vmer (24) ~ 9,1 м/с. В [4] для 21 – 24-го циклов проведено сравнение данных, полученных при изучении магнитограмм, с симуляцией широтно-временной динамики тороидального магнитного поля, вычисленной в рамках SFM-модели (модели поверхностной транспортировки полоидального и тороидального магнитных полей [5]). Было показано, что при определенном подборе скорости меридиональной циркуляции ($V_{mer} = 15$ м/с на поверхности и $V_{mer} = 1$ м/с в источнике) SFM-модель [5] достаточно точно отражает широтно-временную динамику радиального и тороидального магнитных полей на поверхности.

Исходные данные

В работе для 21 – 24-го циклов солнечной активности изучаются корреляционные связи между некоторыми экспериментальными величинами: динамикой числа солнечных пятен (*Sunspot Number* – SSN) в цикле и временной динамикой следующих параметров: тороидального магнитного поля в области источника (в области тахоклина) – **В**_{torss}, среднеши-

ротного (усредненного по долготе) тороидального магнитного поля – \mathbf{B}_{tor} , полярного поля – \mathbf{B}_{pol} , скорости меридиональных потоков – V_{mer}. В статье использованы следующие исходные данные. Число солнечных пятен взято с сайта [6]. Временная и широтная динамика \mathbf{B}_{torss} в источнике получена в [7] при анализе динамики гармоник в спектрах мощности солнечных пятен для периодов 500 - 1000суток при предположении, что магнитное поле в источнике меняется как $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin Q \cos Q$ (Q – коширота). Величины \mathbf{B}_0 определены в [8] по результатам анализа динамики гармоник в спектрах мощности солнечных пятен для периодов 120-220 суток. Для временной динамики тороидального и полярного магнитных полей были использованы данные, представленные в работах [9, 10]: **В**_{tor} (широта $\pm 45^{\circ}$) и **B**_{pol} (широта $\pm 45^{\circ} - \pm 75^{\circ}$). В статье мы используем абсолютную величину (без знака) магнитного поля: $\mathbf{B}_{tor} = \{ |\mathbf{B}_{torn}| + |\mathbf{B}_{tors}| \} / 2.$ \mathbf{B}_{tor} это среднеширотное (широта $\pm 45^{\circ}$) усредненное по долготе тороидальное магнитное поле.

Методика вычислений

Корреляционные связи рассматриваются для всего набора параметров. Для фазы роста T_{p} и спада T_{cn} активности анализируется взаимная динамика временных профилей, сравнивается динамика временных градиентов параметров (частично широтных градиентов). Отметим, что временные ряды параметров достаточно короткие (используются среднегодовые величины), *n* ≤ 12 для полного цикла и $n \le 8$ для отдельных фаз солнечного цикла. Поэтому считаем достаточно достоверными только линейные корреляционные зависимости (вида $Y = Y_0 + bX$) для коэффициентов корреляции $R \ge 0.8$ (статистическая ошибка $\Delta_R < 20\%$, ошибка градиента b < 10%). В качестве основных параметров солнечной активности рассматривается амплитуда цикла (число SSN в максимуме цикла) и длительность фазы роста и спада числа солнечных пятен. Все полученные при анализе численные результаты представлены в таблице отдельно для периодов роста и спада солнечной активности для 21-24-го циклов. Мы проведем анализ корреляционных связей для временных профилей и временных градиентов между следующими параметрами: солнечные пятна SSN и тороидальное магнитное поле в источнике \mathbf{B}_{torss} , среднеширотное магнитное поле **B**_{tor}, тороидальное магнитное поле в источнике \mathbf{B}_{torss} и SSN, полярное \mathbf{B}_{pol} и тороидальное **В**_{tor} магнитные поля. Далее полученные результаты сравним с динамикой меридиональной скорости.

	Та							
№ цикла	21		22		23		24	
\mathbf{B}_0 в источнике, кГс	90		93		94		58	
Максимум цикла В _{torss} , кГс В _{tor} , Гс Широта, град.	1979/220 35,15 16 25,6		1989/211 34 19,3 23,3		2000/175 32,6 16 22		2014/113 20,5 10,9 22,3	
Фаза активности	Рост	Спад	Рост	Спад	Рост	Спад	Рост	Спад
Период, годы	1975 – 1980	1980 – 1986	1986 – 1990	1990 – 1996	1996 – 2000	2000 – 2010	2010 – 2014	2014 – 2019
gradSSN(t), SSN/год	90,4	-42,3	88	-53,2	48,3	-29,3	30,5	-30,5
Длительность Т , год	3,75	6,75	3,17	6,75	4,33	8	5,33	5,66
gradSSN(Q), SSN/град.	-29	18,1	-22,7	21,7	-14,6	17	-14,9	11,12
grad <i>Q</i> (<i>t</i>), град./год <i>V</i> , м/с Средний grad <i>Q</i> (<i>t</i>)	-3,12 1,18 -3,2	-2,1 0,79 -2	-3,9 1,48	-1,96 0,74	-3,25 1,23	-1,79 0,68	-2,54 0,97	-2,14 0,9
$\mathbf{gradB}_{torss}(t), \kappa \Gamma c / roд$	5,49	-2,86	6,2	-2,85	4,56	-2,7	1,8	-1,89
gradB _{torss} (Q), κΓc/ ^o	-1,76	1,37	-1,6	1,48	-1,4	1,5	-0,71	0,88
gradB _{tor} (t), Гс/год Средний gradB _{tor} (t)	3,56 3,13	-3,51 -3	4,51	-3,58	3,2	-2,3	1,23	-2,52
Среднее В _{tor} Гс	9,67	10	12,1	11,97	10,67	9,27	7,82	7,22
gradB _{pol} (t), Гс/год	-0,24	0,26	-0,33	0,29	-0,24	0,132	-0,1	0,176
Средняя V_{mer} , м/с grad $V_{mer}/\Delta t$, м \cdot с ⁻¹ /год	10,8 -0,46	7,5 -0,67	10,5 0,48	7,4 -0,68	10,34 -0,44	7,23 -0,63	10,37 -0,42	7,41 0,7
$\mathbf{B}_{tormax}, \Gamma \mathbf{c}$		16		19,3		16		10,9
В _{polmax} , Гс Число SSN в максимуме	+1,1	-1,3 220	-1,3	+1,06 211	+1,06	-0,62 174	-0,62	+0,67 113

Солнечные пятна SSN и B_{torss}

Два основных события определяют динамику солнечных циклов: появление в области тахоклина тороидального магнитного поля (\mathbf{B}_{torss}) и появление на поверхности магнитных структур солнечных пятен SSN.

На рис. 1 представлена динамика вариаций числа солнечных пятен SSN и тороидального магнитного поля **В**_{torss} в области источника в тахоклине. На рис. 2 представлена взаимная динамика числа солнечных пятен SSN и тороидального магнитного поля **В**_{torss}. Корреляция близка к 94%. На рис. З для фаз роста и спада активности показаны временные вариации широты Qтороидального поля **В**_{torss} и широтная динамики числа солнечных пятен SSN, цифрами показаны значения временных градиентов широты (град./год) для фазы роста и спада. На рис. 4 для 21 – 24-го циклов показана связь длительности фазы роста и спада активности, которая задается динамикой числа солнечных пятен, с временной динамикой широты тороидального магнитного поля **B**_{torss}.

В процессе развития солнечной активности реализуется положительная корреляция между временной динамикой в цикле числа солнечных пятен SSN на поверхности и динамикой тороидального поля \mathbf{B}_{torss} в источнике (коэффициент корреляции $R \sim 0.94$, рис. 2) и между длительностью фазы роста и спада в цикле числа солнечных пятен и временной динамикой градиента широты $dQ(t)/dt - \mathbf{grad}Q(t)$ тороидального поля \mathbf{B}_{torss} (рис. 4).

Для 21-24-х циклов среднее значение **grad** $Q(t) \approx -3,2$ град./год для фазы роста, для фазы спада grad $Q(t) \approx -2$ град./год. Эти величины близки к значению параметров, описывающих динамику центроида площади солнечных пятен [11]. Это означает, что градиент широты $\mathbf{grad}Q(t)$ фактически отражает динамику зоны солнечных пятен в цикле (диаграмму «бабочки»). Следует отметить, в 23-м цикле для фазы спада gradQ(t) на ~10% меньше среднего значения, это самый длинный солнечный цикл. В 24-м цикле нарастание активности происходит медленнее, а спад быстрее, чем в среднем для 21 - 24-го циклов: для фазы роста **grad**Q(t)на ~21% меньше среднего значения, для фазы спада gradQ(t) на ~7% больше среднего. Можно оценить линейную скорость V_{dr} (скорость дрейфа) движения солнечных пятен (вблизи экватора скорость 1 град./год = 0,378 м/с). Средние скорости V_{dr} для фазы роста и спада активности равны соответственно ~1,22 и ~0,76 м/с.







Рис. 2. Взаимная динамика числа солнечных пятен SSN и тороидального поля B_{torss} , коэффициент корреляции $R \approx 0.94$



Рис. 3. Временная динамика широты *Q* числа солнечных пятен SSN, цифрами показаны значения временных градиентов широты (град./год) для фаз роста (•) и спада (**п**) активности. Тонкие линии – динамика числа солнечных пятен SSN в 21 – 24-м циклах



Рис. 4. Взаимная динамика длительности фазы роста $T_p(\bullet)$ и фазы спада активности $T_{cn}(\bullet)$ и временного градиента широты gradQ(t). Коэффициенты корреляции $R \approx 0,9$ для фазы роста и $R \approx 0,92$ для фазы спада

Среднеширотное магнитное поле В_{tor}, тороидальное магнитное поле в источнике В_{torss} и SSN

Одним из основных процессов, определившим динамику солнечной активности, является образование на поверхности широтного тороидального магнитного поля – \mathbf{B}_{tor} . В статье мы используем среднеширотное (широта 0° – ±45°), усредненное по долготе магнитное тороидальное поле \mathbf{B}_{tor} , абсолютные значения \mathbf{B}_{tor} [9]. \mathbf{B}_{tor} вычислено при анализе движения отдельных магнитных структур солнечных пятен. Динамика \mathbf{B}_{tor} тесно связана с динамикой в цикле числа солнечных пятен.

Рассмотрим временную динамику среднеширотного тороидального \mathbf{B}_{tor} , тороидального поля в источнике \mathbf{B}_{torss} и SSN. На рис. 5 представлена временная динамика \mathbf{B}_{tor} и SSN для 21 – 24-го циклов, на рис. 6 представлена взаимная динамика \mathbf{B}_{tor} и SSN, коэффициент корреляции $R \approx 0.88$. На рис. 7 представлена временная динамика \mathbf{B}_{tor} и \mathbf{B}_{torss} . Коэффициент корреляции \mathbf{B}_{tor} и \mathbf{B}_{torss} $R \approx 0.85$. На рис. 8 представлена взаимная динамика временных градиентов grad \mathbf{B}_{tor} и grad \mathbf{B}_{torss} . На рис. 9 время роста солнечной активности T_p сопоставлено с временными градиентами магнитных полей \mathbf{B}_{torss} 1, \mathbf{B}_{tor} 2 и градиентом числа солнечных пятен SSN 3. Коэффициенты корреляции для 1, 2 и 3 отрицательные и, соответственно, равны ~ -0.98, ~ -0.96 и ~ -0.93.

В процессе роста активности реализуется линейная связь (коэффициент корреляции отрицательный) между длительностью фазы роста T_р и временными градиентами следующих параметров: магнитного поля в источнике – $\mathbf{gradB}_{torss}(t)$, среднеширотного магнитного поля – $\operatorname{gradB}_{tor}(t)$, числа солнечных пятен – gradSSN(t). Среднее значение gradB_{tor} \approx 3,13 Гс/сут для фазы роста и **gradB**_{tor} \approx -3 Гс/сут для фазы спада. Динамика трех градиентов $\operatorname{grad} Q(t)$, $\operatorname{grad} B_{tor}(t)$ и gradB_{torss}(t) показывает, что в 24-м цикле реализуется самый медленный рост числа SSN (самые низкие величины градиентов). Следует отметить, что корреляция практически отсутствует между длительностью фазы спада активности T_{cn} и временными градиентами этих параметров. Корреляция между градиентами **B**_{tor} и **B**_{torss} (см. рис. 8) и одновременно корреляция между временной динамикой числа солнечных пятен и абсолютными величинами \mathbf{B}_{tor} (см. рис. 6) позволяет сделать вывод, что динамика **B**_{tor} повторяет широтное распределение в цикле числа солнечных пятен (диаграмма «бабочки»). Время регистрации максимальных значений **B**_{tor} зависит от временной динамики широты. Это подтверждает временной сдвиг в ~1 час (см. рис. 7) при регистрации максимумов **В**_{tor} в 21-м (Q = 25,6) и 24-м циклах (Q = 22,3 град.). При скорости ~3,12 град./сутки временной сдвиг составит ~1 сутки.



Рис. 5. Временная динамика тороидального магнитного поля В_{tor} (•) и числа солнечных пятен SSN (■)



Рис. 6. Взаимная динамика тороидального магнитного поля В_{tor} и числа солнечных пятен SSN



Рис. 7. Временная динамика долготно-усредненного тороидального магнитного поля В_{tor} (▲) и тороидального магнитного поля в источнике В_{torss} (■)



Рис. 8. Взаимная динамика временных градиентов тороидальных магнитных полей gradB_{tor} и gradB_{torss} для фазы роста (•) и фазы спада активности (**m**). Коэффициенты корреляции $R \approx 0,98$ для фазы роста и $R \approx 0,85$ для фазы спада



Рис. 9. Взаимная динамика длительности фазы роста активности T_p и динамики временных градиентов магнитных полей gradB_{torss} (1, **n**) ($R \approx -0.98$), gradB_{tor} (2, **a**) ($R \approx -0.96$) и динамики градиента числа солнечных пятен gradSSN/30 (3, •) ($R \approx -0.93$)

Полярное и тороидальное магнитные поля

Динамика солнечной активности напрямую связана с циклическими вариациями величины полярного поля \mathbf{B}_{pol} . Появление биполярных магнитных структур (солнечных пятен) и меридиональная циркуляция магнитных потоков формируют динамику полярного поля. В динамике солнечной активности реализуется определенная цепочка взаимосвязей: величина полярного поля \mathbf{B}_{pol} *п*-цикла формирует число SSN в максимуме n + 1-цикла,







Рис. 12. Сравнение динамики полярного магнитного поля $B_{pol}(n)$ для минимума *n*-цикла с динамикой максимальных значений тороидального магнитного поля $B_{tormax}(n + 1)$ (**n**) и с динамикой максимального числа солнечных пятен $SSN_{max}(n + 1)$ (**o**) для *n* + 1цикла. Коэффициенты корреляции для $B_{pol}(n)$ и $B_{tormax}(n + 1) R \sim 0,99$ и для $B_{pol}(n)$ и $SSN_{max}(n + 1) R \sim 0,92$ которое в свою очередь формирует величину нового полярного поля для максимума SSN в *n*+2цикле [12]. Задача состоит в том, чтобы выделить основные параметры в динамике тороидального и полярного магнитных полей, которые определяют эту эмпирическую зависимость. На рис. 10 представлена временная динамика полярного магнитного поля \mathbf{B}_{pol} и SSN. На рис. 11 представлена временная динамика полярного **В**_{pol} и тороидального **B**_{tor} магнитных полей. Следует отметить временное запаздывание $\sim 2-x$ лет максимума \mathbf{B}_{tor} относительно момента смены знака полярного поля. Это время требуется меридиональным потокам для формирования в источнике дипольного момента [13]. На рис. 12 показана временная динамика \mathbf{B}_{nol} в минимуме n-цикла и временная динамика максимальных значений \mathbf{B}_{tormax} и SSN_{max} для n + 1цикла. На рис. 13 представлена взаимная динамика градиентов полярного gradB_{pol} и тороидального gradB_{tor} магнитных полей. На рис. 14 показана связь динамики полярного поля $\mathbf{B}_{pol}(n)$ для *n*-цикла с динамикой длительности фазы роста $T_{p}(n+1)$ для *n* + 1-цикла *1*; показана связь динамики тороидального поля в максимуме n + 1-цикла $\mathbf{B}_{tormax}(n+1)$ с динамикой длительности фазы роста активности $T_{\rm p}(n+1)$ 2. Коэффициенты корреляции для обеих зависимостей отрицательные и равны для зависимости *1* – *R* ~ –0,98, для *2* – *R* ~ –0,96.



Рис. 11. Временная динамика полярного В_{pol} (▲) и тороидального В_{tor} магнитных полей (■)



Рис. 13. Взаимная динамика градиентов полярного и тороидального магнитных полей gradB_{pol} и gradB_{tor} для фазы роста (●) и фазы спада активности (■). Коэффициенты корреляции для обеих фаз отрицательные и равны *R* ~ -0,98 для фазы роста и *R* ~ -0,99 для фазы спада



Рис. 14. Взаимная динамика: I – полярного магнитного поля $B_{pol}(n)$ для n-цикла и длительности фазы роста в последующем n + 1-цикле $T_p(n + 1)$ (•) ($R \sim -0.98$); 2 – для n + 1-цикла тороидального магнитного поля в максимуме цикла $B_{tormax}(n + 1)$ и длительности фазы роста для n + 1-цикла $T_p(n + 1)$ (•) ($R \sim -0.96$). Звездочками отмечены длительности фазы роста для 25-го цикла по данным обеих зависимостей

Анализ корреляционных связей, представленных на рис. 10 – 14, позволяет сделать следующие выводы о взаимной динамике полярного поля \mathbf{B}_{pol} , тороидального поля \mathbf{B}_{tor} и SSN. Величина \mathbf{B}_{pol} в минимуме *n*-цикла определяет величины SSN_{max} и **В**_{tormax} в максимуме *n* + 1-цикла (см. рис. 12). При минимуме $\mathbf{B}_{pol} = 0,67 \ \Gamma c$ для 24-го цикла и с учетом зависимостей, представленных на рис. 12, можно оценить число солнечных пятен и величину максимального тороидального поля **В**_{tormax} для максимума 25-го цикла: SSN $\approx 126 \pm 16$, **B**_{tormax} $\approx 11,2 \pm 1,0$ Гс. Для фазы роста и спада активности реализуется отрицательная корреляционная зависимость между градиентами тороидального и полярного полей. Временные градиенты $gradB_{tor}(t)$ и $gradB_{pol}(t)$ имеют разные знаки: для фазы роста активности это плюс/минус, для фазы спада активности это минус/плюс, знаки меняются (см. рис. 13). Коэффициент корреляции между градиентами *R* ~ -0,98. При росте активности увеличение тороидального поля (увеличение положительного градиента) приводит к уменьшению полярного поля, сформированного в предыдущем цикле (увеличение отрицательного градиента), и, соответственно, к уменьшению длительности фазы роста. Старое полярное поле быстро падает. При спаде активности формирование нового полярного поля (положительный градиент увеличивается) сопровождается уменьшением тороидального поля (отрицательный градиент увеличивается), длительность фазы спада уменьшается, новое поле быстро растет. Отношение наклонов

корреляционных кривых для фазы спада и роста активности равно 0,11/0,0683 = 1,6, что практически совпадает с отношением средних величин длительности фазы спада и фазы роста активности (~1,6). Реализуется отрицательная корреляция между величиной полярного поля **B**_{pol} для *n*-цикла и длительностью фазы роста T_p для n + 1-цикла (см. рис. 14, 1), для $\mathbf{B}_{pol} = 0,67$ Гс (24-й цикл) предполагаемая длительность фазы роста для 25-го цикла $T_{\rm p} \approx 5,35 \pm 0,25$ года. Зависимость тороидального поля в максимуме цикла $\mathbf{B}_{tormax}(n+1)$ от длительности фазы роста в цикле $T_{\rm p}(n+1)$ (см. рис. 14, 2) для $\mathbf{B}_{tormax} = 11,2$ Гс (см. рис. 14, 25-й цикл) дает значение длительности фазы роста $T_{\rm p} \approx 5.3 \pm 0.25$ года. Эти две корреляционные зависимости предсказывают практически одно значение длительности фазы роста. Максимум 25-го солнечного цикла ожидается в первой половине 2025 года.

Динамика скорости меридиональных потоков

Дифференциальное вращение Солнца и меридиональная циркуляция формируют динамику магнитного поля солнечного цикла и цикличность солнечной активности. Смена знака полярного поля в каждом последующем цикле является типичным проявлением такой цикличности. Меридиональный перенос широтных тороидальных магнитных потоков к полюсу на поверхности и к экватору в источнике (меридиональная циркуляция) является основным исполнителем этой цикличности. Динамика меридиональной скорости тороидальных потоков определяет процесс формирования солнечного цикла. В работе для 21 – 24-го циклов проведены вычисления средней скорости меридиональных потоков для фазы спада и роста активности. Широтный профиль скорости меридионального потока V_{mer} (в керрингтоновой системе координат, абсолютные значения скорости, синодическая скорость) для 23-го солнечного цикла получен в [1] в виде:

$$V_{mer}(Q) = (d\sin Q + e\sin^3 Q)\cos Q, \qquad (1)$$

где $d = 29,7 \pm 0,3$ м/с; $e = -17,7 \pm 0,7$ м/с; Q – коширота, град.

Мы применили эту формулу для вычисления средней скорости V_{mer} для 21 - 24-го циклов, предполагая для диапазона широт ± 30 град. (эта область динамики широт SSN в цикле) идентичность широтных профилей меридиональной скорости в этих циклах. Это оказалось оправданным. Сравнение результатов динамики V_{mer} для 23-го и 24-го циклов показало для диапазона широт ± 30 град. идентичность широтных профилей [14]. На рис. 15 представлен широтный профиль меридиональной скорости, рассчитанный по формуле (1), широтный профиль V_{mer} для 23-го цикла и широтный профиль средней меридиональной скорости V_{mer} для фазы роста и спада активности в 21 – 24-м циклах. При вычислении использовалась широтная динамика числа солнечных пятен для фазы роста и спада активности, представленная на рис. 3. Отметим, что в [1] для 23-го цикла вычислены точечные значения V_{mer} и Q, для 21 – 24-го циклов мы вычислили зависимость средних для фазы роста и спада значений V_{mer} от средних значений широты Q. Для фазы роста средняя широта (см. рис. 15) изменяется в диапазоне $\approx 28 - 32$ град. (скорость $V_{mer} \sim 10 - 11 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$), для фазы спада изменяется в диапазоне $Q \approx 15 - 18$ град. (скорость $V_{mer} \sim 7 - 8 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$).

На рис. 16 – 22 представлены основные корреляционные связи между параметрами меридиональ-

12 ⁸ 6 1 11 M/c⁻¹, (23) 21 – 24 никлы 11 M/c 10 9 Vmer, 8 8 Vmer, 7 7 6 20 16 18 22 24 26 28 30 32 34 36 **Q**, град.

Рис. 15. Широтный профиль меридиональной скорости *V_{mer}* для 23-го цикла (**п**), широтный профиль средней меридиональной скорости *V_{mer}* для фазы роста и спада активности в 21 – 24-м циклах (**•**). Тонкая непрерывная линия – широтный профиль, рассчитанный по формуле (1)

ной циркуляции и экспериментальными параметрами, определяющими солнечную активность.

Корреляционные зависимости, представленные на рис. 16 – 22, показывают связь меридиональной циркуляции с параметрами солнечного цикла.

1. Реализуется положительная корреляционная связь ($R \approx 0.98$) между длительностью фазы роста $T_{\rm p}$ и фазы спада $T_{\rm cn}$ и временной динамикой градиента меридиональной скорости **grad** $V_{mer}(t)$. Увеличение отрицательного градиента V_{mer} приводит к уменьшению длительности фазы роста $T_{\rm p}$ и фазы спада $T_{\rm cn}$ (см. рис. 16). Такую динамику градиента **grad** V_{mer} и длительности цикла формирует взаимная динамика градиентов меридиональной скорости и градиента тороидального поля (см. рис. 19). Для фазы роста между градиентами реализуется отрицательная линейная корреляция ($R \approx -0.95$), увеличение отрицательного градиента **grad** V_{mer} (скорость уменьшается) сопровождается увеличе-



Рис. 16. Взаимная динамика градиента меридиональной скорости gradV_{mer} и длительности фазы роста T_p(●) и фазы спада T_{сп}(■) активности. Коэффициент корреляции для обеих фаз R ~ 0.98



Рис. 17. Сравнение динамики: a – полярного магнитного поля $B_{pol}(n)$ для минимума n-цикла с динамикой максимальных значений $B_{tormax}(n + 1)$ (**n**) и SSN_{max}(n + 1) (**o**) для n + 1-цикла. Коэффициенты корреляции: $R \sim 0,99$ для $B_{pol}(n)$ и $B_{tormax}(n + 1)$ и $R \sim 0,92$ для $B_{pol}(n)$ и SSN_{max}(n + 1); δ – меридиональной скорости $V_{mer}(n)$ для максимума n-цикла с динамикой максимальных значений в n + 1-цикле следующих параметров: 1 – максимума тороидального магнитного поля $B_{tormax}(n + 1)$ (**n**) ($R \sim 0,95$); 2 – максимального числа солнечных пятен SSN_{max}(n + 1) ($R \sim 0,94$) (**o**); 3 – максимума полярного магнитного поля $B_{polmax}(n + 1)$ ($R \sim 0,92$) (\blacktriangle)

нием положительного градиента **gradB**_{tor} (скорость увеличивается). Магнитные структуры с большим полем двигаются медленнее, длительность фазы роста T_p уменьшается. Для фазы спада реализуется положительная корреляция ($R \approx 0.8$) градиентов **grad** V_{mer} (<0) и **gradB**_{tor}(<0), при увеличении отрицательного **grad** V_{mer} длительность T_{cn} уменьшается.

2. В динамике солнечной активности реализуется определенная цепочка взаимосвязей, некоторая эмпирическая зависимость (см. рис. 17, *a*): величина полярного поля **B**_{nol} *п*-цикла формирует для *n* + 1-цикла число SSN_{max} ($R \approx 0.92$) и величину максимума тороидального магнитного поля \mathbf{B}_{tormax} ($R \approx 0.96$), которые в свою очередь формируют величину нового полярного поля для максимума SSN в *n* + 2-цикле. Такого типа эмпирическая зависимость реализуется и для меридиональной скорости V_{mer} (см. рис. 17, б): величина меридиональной скорости V_{mer}(n) для n-цикла определяет для n + 1-цикла величину полярного поля \mathbf{B}_{pol} $(R \approx 0.92)$, величину максимума тороидального поля \mathbf{B}_{tor} ($R \approx 0.95$) и максимальное число солнечных пятен SSN ($R \approx 0.94$). Фактически динамика меридиональной скорости является управляющим параметром в реализации цикличности числа солнечных пятен, в том числе и в цикличности полярного поля.

3. Реализуется положительная корреляционная связь ($R \approx 0.91$ и $R \approx 0.87$ соответственно для фазы роста и спада) между градиентом меридиональной скорости $\mathbf{grad}V_{mer}$ и динамикой градиента широты gradQ(t) тороидального поля **B**_{tor} (см. рис. 18, *a*). Это означает, что динамика $\mathbf{grad}V_{mer}$ (как и динамика градиента $\operatorname{grad} Q$) фактически отражает динамику скорости движения (скорости дрейфа V_{dr}) солнечных пятен в цикле. Между меридиональной скоростью V_{mer} и скоростью V_{dr} для фазы роста $(R \approx 0.9)$ и фазы спада $(R \approx 0.7)$ реализуется положительная корреляция (см. рис. 18, б). Средние для фазы роста и фазы спада меридиональная скорость и скорость дрейфа, соответственно, равны: $V_{mer} \approx 10,5$ и 7,4 м·с⁻¹, $V_{dr} \approx 1,22$ и 0,76 м·с⁻¹, то есть спад активности происходит приблизительно на 30-35 % медленнее, чем рост активности. Следует отметить, что результаты, полученные для определенного параметра при анализе разных корреляционных зависимостей, дают величины в пределах, как правило, 10 – 15 %. Для 25-го цикла были вычислены следующие параметры: $SSN_{max} \approx 140 \pm 14$, $T_{\rm p} \approx 5,4$ года $\pm 0,2$, $V_{mer} \approx 10,26$ ~ 10,5 м·с⁻¹, $V_{dr} \approx 0,91$ ~ 1,17 м·с⁻¹, максимум 25-го цикла предполагается в первой половине 2025 года.



Рис. 18. Взаимная динамика: a – градиента меридиональной скорости grad $V_{mer}(t)$ и градиента широты grad Q(t) тороидального магнитного поля для фазы роста (•) ($R \approx 0,9$) и спада (•) ($R \approx 0,87$); δ – меридиональной скорости V_{mer} и скорости дрейфа V_{dr} для фазы роста (•) ($R \approx 0,9$) и спада (•) ($R \approx 0,7$).

Для фазы роста скорость V_{mer} (*n*-цикл) сопоставлена со скоростью V_{dr}(*n* + 1) для *n* + 1-цикла



Рис. 19. Взаимная динамика градиента меридиональной скорости gradV_{mer} и градиента тороидального магнитного поля gradB_{tor} для фазы роста (●) (*R* ≈ 0,95) и спада активности (■) (*R* ≈ 0,8)



Рис. 20. Взаимная динамика градиента меридиональной скорости grad V_{mer} и градиента полярного магнитного поля grad \mathbb{B}_{pol} для фазы роста (•) ($R \approx 0,94$) и спада (**u**) ($R \approx -0,87$)



Рис. 21. Взаимная динамика: a – градиента меридиональной скорости grad V_{mer} и длительности фазы роста (•) и фазы спада активности ($\mathbf{\nabla}$); градиента широты gradQ и длительности фазы роста ($\mathbf{\Delta}$) и фазы спада активности (\mathbf{m}); δ – периода цикла и суммы градиентов меридиональной скорости \sum grad V_{mer} (•) для фазы роста и спада активности ($R \approx 0.98$) и суммы градиентов широты \sum gradQ тороидального магнитного поля (\mathbf{m}) для фазы роста и спада ($R \approx 0.82$)



Рис. 22. Временная динамика числа солнечных пятен SSN, скорости меридиональной циркуляции V_{mer}/10 (▼) и скорости дрейфа V_{dr} (▲) солнечных пятен в цикле. Скорости V_{mer} и V_{dr} показаны для фазы роста и спада активности. Для фазы роста скорость V_{mer}(n) для *n*-цикла сопоставлена со скоростью V_{dr}(n + 1) для *n* + 1-цикла. Тонкие линии показывают временную динамику числа солнечных пятен

4. Временная динамика градиента меридиональной скорости формирует динамику полярного поля (см. рис. 20), определяет скорость распада полярного поля и скорость формирования нового полярного поля. Для фазы роста реализуется положительная корреляция ($R \approx 0,94$) для градиента полярного поля gradB_{pol} и градиента меридиональной скорости $gradV_{mer}$ (оба градиента отрицательные). Увеличение отрицательного $\mathbf{grad}V_{mer}$ значительно ускоряет процесс распада полярного поля (отрицательный gradB_{nol} увеличивается). Для фазы спада активности реализуется отрицательная корреляция $(R \approx -0.97)$ градиента V_{mer} (grad $V_{mer} < 0$) и grad \mathbf{B}_{pol} (>0). При уменьшении отрицательного градиента $\mathbf{grad}V_{mer}$ положительный градиент gradB_{pol} увеличивается, новое \mathbf{B}_{pol} формируется быстрее.

5. Анализ динамики в цикле числа солнечных пятен и динамики средних градиентов широты $\operatorname{grad}Q(t)$ и градиентов средней меридиональной скорости $\operatorname{grad} V_{mer}(t)$ показал связь этих параметров с динамикой длительности фазы роста и фазы спада в цикле числа солнечных пятен (см. рис. 4 для gradQ(t) и рис. 16 для grad V_{mer}). Полученные для разных процессов зависимости показали одинаковую динамику длительности для фазы роста и спада. Между градиентами $\mathbf{grad}V_{mer}$ и $\mathbf{grad}Q(t)$, формирующими длительности фаз активности, реализуется положительная корреляция: для фазы роста $R \approx 0.83$, для фазы спада $R \approx 0.87$ (см. рис. 21, *a*). Динамика градиентов $\mathbf{grad}Q$ и $\mathbf{grad}V_{mer}$ определяет длительность обеих фаз активности, очевидно, что сумма градиентов \sum gradQ для фазы роста и спада и сумма градиентов $\sum gradV_{mer}$ для фазы роста и спада должны давать период цикла (см. рис. 21, б). Коэффициент корреляции между $\sum grad Q$ и $\sum grad V_{mer} R \approx 0.7$. Некоторый обобщенный результат исследования связи динамики солнечных пятен (динамики солнечной активности) с динамикой крупномасштабного магнитного поля Солнца представлен в виде графика на рис. 22. Солнечный цикл можно представить как временную динамику трех параметров: числа солнечных пятен SSN, скорости дрейфа V_{dr}, широты тороидального магнитного поля в источнике и скорости меридиональной циркуляции V_{mer}. Анализ взаимной корреляции динамики отдельных структур крупномасштабного магнитного поля Солнца (тороидальных магнитных потоков в источнике и на поверхности, скорости меридиональных потоков) и динамики солнечных пятен показал, что параметры этих магнитных полей формируют временную динамику солнечной активности (длительность фазы роста и спада активности, динамику в цикле числа солнечных пятен, динамику полярного поля).

Обсуждение результатов

В работе проведен анализ влияния динамики параметров крупномасштабного магнитного поля Солнца на формирование солнечной активности. Для 21 – 24-го циклов рассмотрены корреляционные связи между некоторыми экспериментальными величинами: динамикой числа солнечных пятен SSN в цикле и временной динамикой следующих параметров: тороидального магнитного поля в области источника (в области тахоклина) – **B**_{torss}, среднеширотного (усредненного по долготе) тороидального магнитного поля – **B**_{tor}, полярного магнитного поля – \mathbf{B}_{pol} , скорости меридиональных потоков – V_{mer} (для керрингтовой системы координат, скорости магнитных структур солнечных пятен). При анализе для всех параметров использованы средние величины для периодов фазы роста и спада активности. Получены следующие результаты:

1. Динамика меридиональной скорости является управляющим параметром в реализации цикличности числа солнечных пятен (цикличности солнечной активности), в том числе и в формировании цикличности полярного поля. В динамике солнечной активности реализуется определенная цепочка взаимосвязей: величина меридиональной скорости $V_{mer}(n)$ для *n*-цикла определяет для n + 1-цикла величину максимума полярного поля **B**_{pol} ($R \approx 0.92$), величину максимума тороидального поля **B**_{tor} ($R \approx 0.95$) и максимальное число солнечных пятен SSN ($R \approx 0.94$). Процесс циклический: V_{mer} для n + 1цикла определяет параметры n + 2-цикла и т. д.

2. Динамика временных градиентов меридиональной скорости $\operatorname{grad} V_{mer}(t)$ определяет длительность фазы роста и фазы спада в цикле числа солнечных пятен (солнечную активность). В течение фазы роста и спада скорость V_{mer} уменьшается, градиенты отрицательные. Средние для фазы роста и спада градиенты **grad** V_{mer} ~ равны -0,45 и -0,67 м·с⁻¹/год. Реализуется положительная корреляционная связь между длительностью фазы роста ($R \approx 0.96$) и спада в цикле числа солнечных пятен SSN ($R \approx 0.97$) и динамикой временных градиентов меридиональной скорости $gradV_{mer}(t)$. Увеличение отрицательного градиента V_{mer} приводит к уменьшению длительности фазы роста T_p и фазы спада T_{сп}. Сумма градиентов меридиональной скорости для фазы роста и фазы спада определяет период цикла.

3. Временная динамика градиента меридиональной скорости формирует динамику полярного поля, определяет скорость распада полярного поля и скорость формирования нового полярного поля. Для фазы роста активности реализуется положительная корреляция (коэффициент корреляции $R \approx 0,94$) для градиента полярного поля **gradB**_{pol} и градиента меридиональной скорости **grad** V_{mer} (оба градиента отрицательные). При увеличении отрицательного **grad** V_{mer} значительно увеличивается отрицательный градиент **gradB**_{pol}, полярное поле быстро уменьшается. Для фазы спада активности реализуется отрицательная корреляция ($R \approx -0,97$) градиента V_{mer} (**grad** $V_{mer} < 0$) и **gradB**_{pol}(>0). При увеличении отрицательного градиента **grad** V_{mer} положительный градиент **gradB**_{pol} увеличивается, новое **B**_{pol} формируется быстрее.

4. Динамика меридионального тороидального магнитного поля формирует динамику полярного поля. Для фазы роста и спада активности реализуется отрицательная корреляция между временной динамикой градиента полярного поля gradB_{pol} и градиентом тороидального поля \mathbf{B}_{tor} ($R \approx -0.95$). Градиенты имеют разные знаки. При росте активности увеличение тороидального поля (увеличение положительного градиента) приводит к уменьшению полярного поля, сформированного в предыдущем цикле (увеличение отрицательного градиента), и соответственно к уменьшению длительности фазы роста, полярное поле спадает быстрее. При спаде активности формирование нового полярного поля (положительный градиент увеличивается) сопровождается уменьшением тороидального поля (отрицательный градиент увеличивается), длительность фазы спада уменьшается, новое полярное поле \mathbf{B}_{pol} формируется быстрее.

5. Реализуется прямая связь между длительностью фазы роста и спада в цикле числа солнечных пятен и временной динамикой градиента широты $dQ(t)/dt - \mathbf{grad}Q(t)$ тороидального поля \mathbf{B}_{torss} в источнике. Для 21 - 24-го циклов среднее значение $\mathbf{grad}Q(t) \approx -3,2$ град./год для фазы роста, для фазы спада $\mathbf{grad}Q(t) \approx -2$ град./год. Соответствующие средние скорости равны $V_{dr} \approx 1,22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и $V_{dr} \approx 0,76 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Эти величины близки к значению параметров, описывающих динамику в цикле центроида площади солнечных пятен, динамику скорости дрейфа в цикле (V_{dr}) полосы солнечных пятен.

6. В процессе развития активности меридиональная скорость V_{mer} и скорость дрейфа постепенно уменьшаются, градиенты отрицательные. Для фазы роста ($R \approx 0,91$) и спада ($R \approx 0,87$) активности реализуется положительная корреляция между градиентами **grad** $V_{mer}(t)$ и **grad**Q(t). Положительная корреляция реализуется также и между абсолютными величинами V_{mer} и V_{dr} , можно предположить, что временная динамика меридиональной скорости определяется временной динамикой широты солнечных пятен в цикле (V_{dr}).

7. Взаимная динамика тороидальных потоков и меридиональной скорости определяет процесс меридиональной циркуляции. Для фазы роста активности реализуется отрицательная корреляция $(R \approx -0.95)$ между временным градиентом меридиональной скорости $gradV_{mer}(<0)$ и градиентом тороидального поля $gradB_{tor}(>0)$. Магнитные структуры с большим полем движутся медленнее. Для фазы спада активности реализуется положительная корреляция ($R \approx 0.8$) между временным градиентом меридиональной скорости $\operatorname{grad} V_{mer}(<0)$ и градиентом тороидального поля $gradB_{tor}(<0)$. На поверхности меридиональный поток движется к полюсу, для фазы роста и фазы спада средние скорости V_{mer} соответственно равны ~10,5 и ~7,4 м·с⁻¹. В зоне источника меридиональный поток движется к экватору, для фазы роста и фазы спада средние скорости соответственно равны ~1,22 и ~0,76 м \cdot с⁻¹.

Полученные результаты показывают, что временная динамика тороидального магнитного поля и меридиональной скорости определяют параметры солнечной активности. Временную динамику средних для фазы роста и спада параметров солнечной активности (длительность фазы роста и спада числа солнечных пятен, скорость дрейфа солнечных пятен, число SSN в максимуме цикла, цикличность динамики полярного поля) можно в численном виде сопоставить с временной динамикой средних для фазы роста и спада величин тороидального магнитного поля и меридиональной скорости.

Литература

1. Hathaway, D. H. Variations in the Axisymmetric Transport of Magnetic Elements on the Sun: 1996 - 2010 / David H. Hathaway, Lisa Rightmire. – DOI : 10.1088/0004-637X/729/2/80 // The Astrophysical Journal. – 2011. - Vol. $729:80. - N_{\odot} 2. - 9$ p.

2. Imada, S. Effect of Magnetic Field Strength on Solar Differential Rotation and Meridional Circulation / S. Imada, M. Fujiyama. – DOI : 10.3847/2041-8213/aad904 // The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Vol. 864:L5.– No 1.–5 p.

3. Meridional Flow in the Sun's Convection Zone is a Single Cell in Each Hemisphere / L. Gizon, R. H. Cameron, M. Pourabdian [et al.]. – DOI : 10.1126/science.aaz7119 // Science. – 2020. – Vol. 368. – Iss. 6498. – P. 1469–1472.

4. Observing and Modeling the Poloidal and Toroidal Fields of the Solar Dynamo / R. H. Cameron, T. L. Duvall Jr.,

M. Schüssler [et al.]. – DOI : 10.1051/0004-6361/201731481 // A&A. – 2018. – Vol. 609. – № A56. – 6 p.

5. Observationally Guided Models for the Solar Dynamo and the Role of the Surface Field / Robert H. Cameron, Manfred Schüssle. – DOI : 10.1007/s11214-023-01004-7 // Space Science Reviews. – 2023. – Vol. 219. – № 60. – 33 p. 6. Sunspot Number // Solar Influences Data Analysis Center : [website]. – Brussels. – URL : https://www.sidc.be/SILSO/datafiles (дата обращения: 12.05.2025).

7. Формирование солнечной активности в процессе развития динамо-механизма/ И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2022. – Т. 191. – № 6. – С. 12–25. – URL : https://jurnal.vniiem.ru/text/191/12-25.pdf (дата обращения: 12.05.2025).

8. Тонкая структура периодических вариаций солнечных пятен (17 – 24-й циклы солнечной активности). 1. 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. – URL : https://jurnal.vniiem.ru/text/182/24-31.pdf (дата обращения: 12.05.2025).

9. Solar Polar Fields During Cycles 21 – 23: Correlation with Meridional Flows / P. Janardhan, Susanta K. Bisoi, S. Gosain. – DOI : 10.1007/s11207-010-965 // Solar Phys. – 2010. – Vol. 267. – P. 267–277.

10. Petrie, Gordon J. D. Solar Magnetism in the Polar Regions / Gordon J. D. Petrie. – DOI : $10.10\ 07/lrsp-2015-5\ //$ Living Rev. Solar Phys. – 2015. – Vol. 12. – N 5. – $102\ p$.

11. Evidence That a Deep Meridional Flow Sets the Sunspot Cycle Period / David H. Hathaway, Dibyendu Nandy, Robert M. Wilson [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 589. – P. 665–670.

12. Physical Models for Solar Cycle Predictions / Prantika Bhowmik, Jie Jiang, Lisa Upton [et al.] – DOI : 10.1007/s11214-023-00983-x // Space Science Reviews. – $2023. - Vol. 219. - N_{\rm P} 40. - 34$ p.

13. Hazra, G. Mean Field Models of Flux Transport Dynamo and Meridional Circulation in the Sun and Stars / Gopal Hazra. – DOI : 10.1007/s11214-023-00982 // Space Science Reviews. – 2023. – Vol. 219. – N $_{2}$ 39. – 31 p.

14. Solar cycle-related variation in solar differential rotation and meridional flow in solar cycle 24 / Shinsuke Imada, Kengo Matoba, Masashi Fujiyama [et al.] – DOI : 10.1186/s40623-020-01314-y // Earth, Planets and Space. – 2020. - Vol. 72. - No 182. - 8 p.

Поступила в редакцию 10.04.2025

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. (Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)). Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru. (Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), АО «Корпорация «ВНИИЭМ»). Александр Александрович Мусалитин, старший научный сотрудник, т. (495) 366-01-47, e-mail: lab188@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DYNAMICS OF SOLAR ACTIVITY, MERIDIONAL CIRCULATION, STRUCTURE OF POLAR AND TOROIDAL MAGNETIC FIELDS IN SOLAR CYCLES 21 – 24

E. I. Morozova, A. A. Petrukovich, I. P. Bezrodnykh, A. A. Musalitin

The work is devoted to the study of the relationship between the dynamics of the large-scale magnetic field of the Sun and the dynamics of solar activity, and the influence of the parameters of the meridional circulation on the formation of solar cycles is analyzed. For solar cycles 21–24, the correlation links between the dynamics of the sunspot number and the time dynamics of the following parameters are studied: the toroidal magnetic field in the source region (in the tachocline region), the mid-latitude (longitude-averaged) toroidal magnetic field, the polar magnetic field, and the velocity of meridional flows. Correlation dependencies were calculated separately for the average values of parameters for the gradowth and decline phases, the mutual dynamics of time profiles and the mutual dynamics of time gradients were considered. New results obtained. The paper considers in detail the influence of the mutual dynamics of the meridional velocity and the toroidal magnetic field magnetic field in the dynamic field. In particular, it is shown that for the growth phase, an increase in the positive gradient of the toroidal magnetic field accelerates the growth of the new polar field. Our results allow us to obtain data on the parameters of the meridional circulation based on direct measurements of the dynamics in the sunspot

Key words: toroidal magnetic field, polar magnetic field, meridional circulation, drift velocity, meridional velocity.

References

1. Hathaway, D. H. Variations in the Axisymmetric Transport of Magnetic Elements on the Sun: 1996–2010 / David H. Hathaway, Lisa Rightmire. – DOI : 10.1088/0004-637X/729/2/80 // The Astrophysical Journal. – 2011. – Vol. 729:80. – $N_{\odot} 2.$ – 9 p.

2. Imada, S. Effect of Magnetic Field Strength on Solar Differential Rotation and Meridional Circulation / S. Imada, M. Fujiyama. – DOI: 10.3847/2041-8213/aad904 // The Astrophysical Journal Letters. – 2018. – Vol. 864:L5. – № 1. – 5 p.

3. Meridional Flow in the Sun's Convection Zone is a Single Cell in Each Hemisphere / L. Gizon, R. H. Cameron, M. Pourabdian [et al.]. – DOI : 10.1126/science.aaz7119 // Science. – 2020. – Vol. 368. – Iss. 6498. – P. 1469–1472.

4. Observing and Modeling the Poloidal and Toroidal Fields of the Solar Dynamo / R. H. Cameron, T. L. Duvall Jr., M. Schüssler [et al.]. – DOI: 10.1051/0004-6361/201731481 // A&A. – 2018. – Vol. 609. – No A56. – 6 p.

5. Observationally Guided Models for the Solar Dynamo and the Role of the Surface Field / Robert H. Cameron, Manfred Schüssle. – DOI : 10.1007/s11214-023-01004-7 // Space Science Reviews. – 2023. – Vol. 219. – № 60. – 33 p.

6. Sunspot Number // Solar Influences Data Analysis Center : [website]. – Brussels. – URL : https://www.sidc.be/SILSO/datafiles (date of access: 12.05.2025).

7. Formation of solar activity during the development of the dynamo mechanism / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Electromechanical matters. VNIIEM studies. – Moscow : JSC «VNIIEM Corporation», 2022. – Vol. 191. – \mathbb{N} 6. – P. 12–25. – URL : https://jurnal.vniiem.ru/text/191/12-25.pdf (date of access: 12.05.2025).

8. Fine structure of periodic variations of sunspots (17th – 24th cycles of solar activity). 1. Dynamics of the structure of sunspot variations in the 17th – 24th 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 [et al.] // Electromechanical matters. VNIIEM studies. – Moscow : JSC «VNIIEM Corporation», 2021. – Vol. 182. – N_{2} 3. – P. 24–31. – URL : https://jurnal.vniiem.ru/text/182/24-31.pdf (date of access: 12.05.2025).

9. Solar Polar Fields During Cycles 21 – 23: Correlation with Meridional Flows / P. Janardhan, Susanta K. Bisoi, S. Gosain. – DOI: 10.1007/s11207-010-965 // Solar Phys. – 2010. – Vol. 267. – P. 267–277.

10. Petrie, Gordon J. D. Solar Magnetism in the Polar Regions / Gordon J. D. Petrie. – DOI : 10.10 07/lrsp-2015-5 // Living Rev. Solar Phys. – 2015. – Vol. 12. – $N_{2} 5$. – 102 p.

11. Evidence That a Deep Meridional Flow Sets the Sunspot Cycle Period / David H. Hathaway, Dibyendu Nandy, Robert M. Wilson [et al.] // The Astrophysical Journal. – 2003. – Vol. 589. – P. 665–670.

12. Physical Models for Solar Cycle Predictions / Prantika Bhowmik, Jie Jiang, Lisa Upton [et al.] – DOI : 10.1007/s11214-023-00983-x // Space Science Reviews. – 2023. – Vol. 219. – № 40. – 34 p. 13. Hazra, G. Mean Field Models of Flux Transport Dynamo and Meridional Circulation in the Sun and Stars / Gopal Hazra. – DOI : 10.1007/s11214-023-00982 // Space Science Reviews. – 2023. – Vol. 219. – № 39. – 31 p.

14. Solar cycle-related variation in solar differential rotation and meridional flow in solar cycle 24 / Shinsuke Imada, Kengo Matoba, Masashi Fujiyama [et al.] – DOI : 10.1186/s40623-020-01314-y // Earth, Planets and Space. – 2020. – Vol. 72. – № 182. – 8 p.

 Evgeniya Ivanovna Morozova, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher, t. + 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, t. + 7 (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru. (Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN)).
Innokentii Petrovich Bezrodnykh, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher, t. + 7 (495) 333-20-00, e-mail: d54x@mail.ru.
(Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN)).
JSc «VNIIEM Corporation»).