

УДК 523.98

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 1999 г. А. Л. Морозова, М. И. Пудовкин, Ю. В. Черных

Научно-исследовательский институт физики С.-Петербургского государственного университета, С.-Петербург

Поступила в редакцию 03.02.98 г.

После доработки 20.07.98 г.

Представлена попытка сопоставления динамических характеристик движения Солнца и уровня его активности. Исследованы вариации динамических характеристик движения Солнца относительно барицентра солнечной системы с 1100 по 2045 гг. в сопоставлении с изменением уровня солнечной активности и вариациями климата Земли. Отмечено совпадение периодов “аномального” поведения характеристик, описывающих эти три процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о том, имеет ли солнечная активность исключительно внутрисолнечную природу или ее вариации отражают динамические процессы всей солнечной системы, обсуждается уже достаточно долго, но до сих пор не получил более или менее обоснованного ответа. Еще в прошлом веке многие исследователи Солнца (Р. Кэррингтон, Г. Шпёрер, Р. Вольф и др.) обращали внимание на близость среднего периода солнечной активности (11.13 лет) и периода обращения Юпитера вокруг Солнца (11.86 лет) и пр. Большое количество работ было посвящено сравнению отдельных периодических составляющих активности Солнца и периодов и полупериодов обращения различных планет, повторяемости их конфигураций и т.д. [1]. Основное влияние приписывалось вариациям приливной силы планет, которые вызывают в атмосфере Солнца вихревые возмущения. Однако подобная гипотеза оказалась несостоятельной, поскольку, как показали вычисления, приливные воздействия планет не в состоянии увеличить радиус Солнца более, чем на 1 мм.

Тем не менее, совместное движение планет приводит к значительным смещениям центра Солнца относительно центра масс солнечной системы: $\Delta \approx 0.01-2.19R_{\odot}$, R_{\odot} – радиус Солнца [1–3]. Кроме того, сильные вариации испытывают и другие динамические характеристики движения Солнца. Современное состояние солнечной системы, движение планет, периоды их обращения и прочее – результат длительной эволюции, и было бы несколько опрометчиво предполагать, что эта эволюция не оказала влияния на саму звезду и ее внутренние магнитогидродинамические процессы. По-видимому, некоторые характерные черты вариаций солнечной активности могут нести на

себе отпечаток этих длительных эволюционных процессов.

В настоящей работе представлена попытка выделить те особенности вариаций движения Солнца относительно центра масс солнечной системы (барицентра), которые находят свои отражения в изменениях солнечной активности и климата Земли. Еще раз следует подчеркнуть, что авторы не рассматривают движение Солнца или планет как непосредственную причину солнечной активности, а предполагают, что оба эти явления несут на себе отпечаток одних и тех же процессов.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ СОЛНЦА И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Вариации солнечной активности в связи с движением Солнца относительно барицентра исследовалась во многих работах (например, [1–3]). В частности, в работе [2] подробно рассматривалось изменение расстояния центра масс от центра Солнца, радиуса кривизны солнечной траектории, абсолютных величин и скорости изменения угловых моментов Солнца относительно барицентра (L , dL/dt) и мгновенного центра кривизны солнечной траектории (P , dP/dt). Оказалось, что в вариациях всех этих параметров присутствует период примерно в 178.77 лет. Необходимо отметить, что подтверждения существования подобного “двойного векового” периода в вариациях солнечной активности были получены при анализе среднегодовых чисел Вольфа (Андерсон), эпох экстремумов 11-летних циклов с 1610 г. (Джуркович), сумм длин ветвей роста четных и нечетных 11-летних циклов (Боков) и пр. [4, 5]. В среднем длина этого цикла – 160–200 лет.

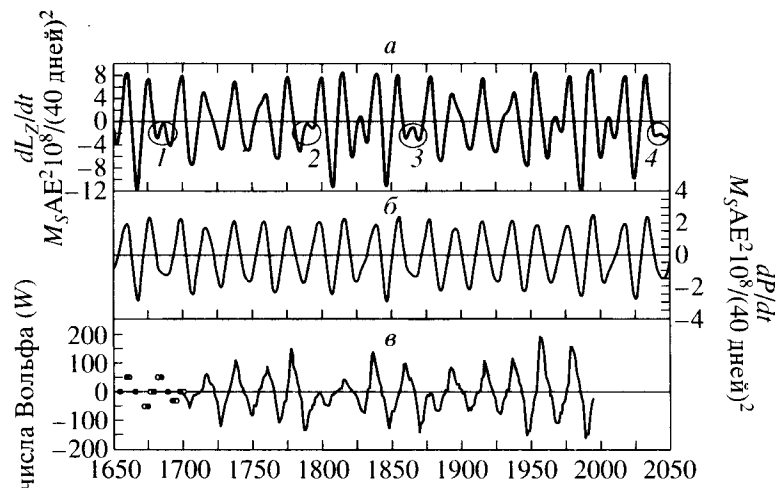


Рис. 1. Вариации производных по времени от соответствующих угловых моментов Солнца (dL_z/dt и dP/dt) с 1650 по 2050 г. (а, б) и знакопеременный ряд чисел Вольфа, построенный в соответствии со знаком вариации dP/dt (в). Цифрами отмечены периоды “аномального” поведения кривой dL_z/dt . Черные кружки – даты экстремумов 11-летнего цикла солнечной активности в XVII в. по Шоуву, незаполненные кружки – даты экстремумов по Глайсбергу [4].

Кроме того, значительное внимание было уделено изучению 22-летнего солнечного магнитного цикла (цикла Хейла) в связи с вариациями динамических параметров Солнца. На основании данных об элементах орбит планет солнечной системы [6], вслед за [2], были вычислены координаты Солнца относительно центра масс солнечной системы $R(x, y, z)$, скорость $V(x, y, z)$ и радиус кривизны траектории Солнца $\rho(x, y, z)$. При этом использовалась система координат, в которой плоскость XY соответствовала плоскости эклиптики, а ось X направлена на точку весеннего равноденствия:

$$R(x, y, z) = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}; \quad (1)$$

$$V(x, y, z) = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}; \quad (2)$$

$$\rho(x, y, z) = \frac{V^3}{\Delta}; \quad (3)$$

параметр Δ определяется следующим образом:

$$\Delta = \sqrt{(\dot{y}\ddot{z} - \dot{z}\ddot{y})^2 + (\dot{z}\ddot{x} + \dot{x}\ddot{z})^2 + (\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x})^2};$$

Соответственно выражения для угловых моментов Солнца относительно барицентра (L_z) и мгновенного центра кривизны (P) имеют вид (поскольку X и Y -компоненты L на два порядка меньше, чем L_z , то дальнейший анализ производился только для Z -компоненты углового момента Солнца относительно барицентра):

$$L_z = (x\dot{y} - y\dot{x}); \quad (4)$$

$$P = \rho V. \quad (5)$$

В качестве единицы массы использовалась масса Солнца (M_s), единицы длины – астрономическая единица (АЕ), а единицы времени – 40 дней (в соответствии с [2]).

Для сопоставления вариаций динамических параметров Солнца и его активности использовался Цюрихский ряд годовых чисел Вольфа с 1700 г. по настоящее время, а также даты экстремумов солнечной активности до 1700 г. – т. н. ряд Шоува и ряд Глайсберга [4].

Чтобы подчеркнуть смену полярности ведущих пятен групп в смежных циклах, числам Вольфа (W) приписывался знак, выбранный в соответствии со знаком магнитного поля ведущих пятен групп в северном полушарии Солнца (для четных циклов – знак минус, для нечетных – плюс). Оказалось, что принятое правило приводит к тому, что почти на всем промежутке с 1700 по 1996 г. знак W совпадает со знаком dP/dt за исключением периода примерно с 1800 по 1880 г. Границы этого интервала совпадают с аномальными изломами на кривой изменения углового момента Солнца относительно барицентра (dL/dt).

На рис. 1(а–в) представлены вариации производных по времени от соответствующих угловых моментов Солнца (dL_z/dt , dP/dt) с 1650 по 2050 г. На нижней панели (рис. 1в) приведен знакопеременный ряд чисел Вольфа, построенный в соответствии со знаком вариаций dP/dt ([2]). На основании анализа этих данных автор [2] высказал предположение о возможных “сбоях” хейловского магнитного цикла около 1780–1810 гг. и 1865–1885 гг. – когда, по всей видимости, два соседних 11-летних солнечных цикла имели одинаковую полярность магнитного поля ведущих пятен групп [2]. Имеющиеся в настоящее время экспе-

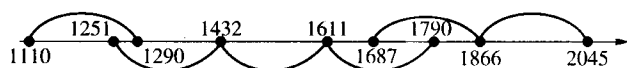


Рис. 2. Схема повторяемости аномальных изломов кривой dL_z/dt и возникновения 179- и 540-летних периодов.

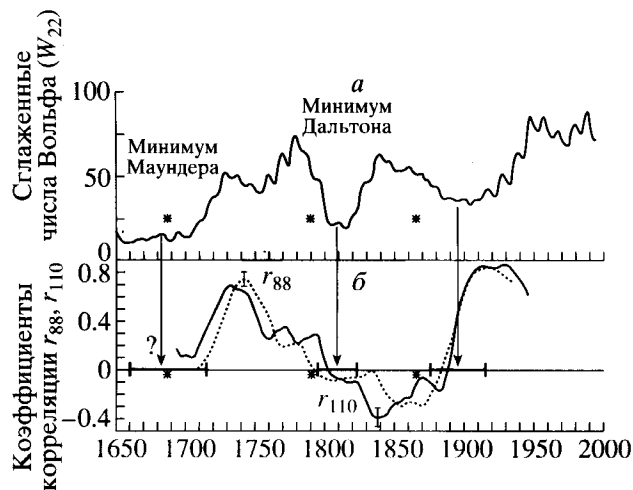


Рис. 3. Климатические вариации и солнечная активность: сглаженные 22-летним скользящим средним вариации чисел Вольфа (а) и коэффициенты корреляции между вариациями чисел Вольфа и индексами весенних температур, вычисленные по скользящим 88-ми (r_{88}) и 110-летним (r_{110}) интервалам (б). Звездочками отмечены периоды "аномального" поведения кривой dL_z/dt . Жирными линиями на оси абсцисс и стрелками (б) отмечены периоды пониженной солнечной активности. Пунктир — эпохи изменения характера 22-летних вариаций климатических индексов (см. в тексте).

риментальные данные об изменении магнитного поля Солнца не в состоянии ни подтвердить, ни опровергнуть эту гипотезу. В работе [2] автором был также предсказан еще один "сбой" — 20-й и 21-й циклы (по Цюрихской нумерации) должны были иметь одинаковую полярность. Однако этого не произошло. Как будет показано ниже, такой "сбой" может произойти, если вышеизложенное предположение ([2]) верно, по-видимому, не раньше 2045–2070 гг.

В [2] автором было отмечено, что подобные "сбои" хейловского цикла следуют за аномальными изломами кривой dL_z/dt (отмечены на рисунке цифрами). Однако отсутствие подобных нарушений в 1830-х и 1970-х гг. и более подробный анализ данных, представленных на рис. 1, позволяют сделать вывод о том, что подобные "сбои" хейловского цикла следуют только за теми аномальными изломами производной углового момента Солнца относительно барицентра солнечной системы, при которых величина dL_z/dt не меняет знака (в данном случае $dL_z/dt \leq 0$). В течение всего

400-летнего периода кривая dL_z/dt имеет четыре аномальных излома указанного типа, т.е. с сохранением знака dL_z/dt : около 1687, 1790, 1866 и 2045 гг., и мы можем предположить, что два соседних цикла солнечной активности, которые придутся на период 2045–2070 гг. будут иметь одинаковую полярность ведущих пятен групп — произойдет нарушение закона Хейла.

Анализ вариаций dL_z/dt с 1100 по 2050 гг. показывает, что на этот период приходится девять аномальных изломов кривой, при которых производная dL_z/dt не меняет знака. Они имели или будут иметь место в 1110, 1251 (вероятно), 1290, 1432, 1611, 1687, 1790, 1866 и 2045 гг. Соответственно, период повторяемости этих событий колеблется от 39 до 179 лет. Однако, этот ряд можно разбить на три группы (рис. 2) — 1110, 1290 гг.; 1251, 1432, 1611, 1790 гг.; 1687, 1866, 2045 гг. — таким образом, что для каждой группы период составляет 179–181 г. ([2] — период 178.77 лет) и имеет достаточно сложную структуру: иногда новый цикл начинается в то время, когда предыдущий еще не закончился. За последние 1000 лет такие наложения одного цикла на другой произошли два раза: между 1251 и 1290 гг. и между 1687 и 1790 г. Если предположить, что подобные перекрытия циклов имеют регулярный характер, включая в себя три 179-летних цикла, как это показано на рис. 2, то можно предположить существование 540-летнего периода в вариациях углового момента Солнца.

В этой связи можно отметить, что и в вариациях солнечной активности отмечается существование примерно 600-летнего периода. Такие выводы были сделаны после анализа асимметрии 11-летних циклов (Глайсберг, $T \approx 600$ лет), вариаций концентрации космогенного радионуклида ^{14}C (Ривин, $T \approx 600$ лет) и числа полярных сияний (Шоув, $T \approx 554$ года) [4, 5].

Дальнейшее сопоставление эпох аномального поведения производной углового момента L_z (т.е. характеристики движения Солнца) с вариациями солнечной активности показало, что за последние 300 лет подобные "аномалии" в поведении dL_z/dt предшествовали "вековым" минимумам солнечной активности (либо началам новых "вековых" циклов). На рис. 3а представлены сглаженные 22-летним скользящим средним числа Вольфа (W_{22}), а звездочками отмечены периоды "аномалий" в поведении dL_z/dt .

Достаточно давно [1] уже было высказано предположение о том, что длительная эволюция солнечной системы могла привести к синхронизации не только движения ее элементов (Солнце, планеты и пр.), но и внутренних процессов на Солнце, ответственных за изменение его активности. Можно предположить, что движение планет, вариации движения Солнца относительно ба-

рицентра (например, dL_z/dt и dP/dt) и уровня солнечной активности суть разные следствия одних и тех же процессов и, следовательно, могут иметь общие черты. В частности, возможно предсказание на основе вычисленных вариаций динамических характеристик движения Солнца относительно барицентра некоторых “особенностей” в изменении солнечной активности, таких как глубокие минимумы (наподобие минимумов Дальтона, Маундера, Шперера и т.д.) или начала новых вековых циклов (рис. 3а). С другой стороны, поскольку имеющиеся с начала XX в. данные об изменении магнитного поля Солнца не могут ни подтвердить, ни опровергнуть гипотезу, высказанную в [2] относительно существования “сбоев” 22-летних магнитных циклов Хейла, мы вынуждены оставить открытым вопрос о правомерности такой гипотезы. Авторы подчеркивают, что в данном случае они имеют в виду 22-летнее изменение полярности магнитного поля ведущих пятен групп, а не правило Гневышева–Оля, характеризующее различие корреляций суммы среднегодовых чисел Вольфа в парах четный-нечетный и нечетный-четный 11-летние циклы. Если же говорить о возможности изменения правила Гневышева–Оля в связи с длительными минимумами или началами новых вековых циклов, то в настоящее время появляются некоторые положительные свидетельства [8].

ВАРИАЦИИ КЛИМАТА И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

Связь климата с солнечной активностью изучается достаточно давно, хотя до сих пор вызывает сильные споры.

В работе [9] были исследованы вариации климатических индексов в Швейцарии в XVIII–XX вв. в ходе 22-летнего цикла солнечной активности. Температура и количество осадков в Швейцарии были представлены в виде градуированных индексов (Graduated Index, GI) $[-3, \dots, +3]$ как для температуры, так и для увлажненности с 1525 по 1989 гг. Данные по индексам осадков в Швейцарии были составлены К. Пфистером и коллегами, Бернский Университет, Швейцария [10–12] и получены через World Data Center A-Paleoclimatology, NGDC, NOAA. Для периода 1750–1989 гг. GI вычислялись на основании непосредственных измерений температуры воздуха и количества осадков. Месячные, сезонные и годовые значения индекса имеют значения от -3 до $+3$. Для сезонов GI определялись как среднее для соответствующих месяцев (с градацией 0.3 между $+3$ и -3). Аномалии соответствовали $|GI| \geq 2.3$. Среднегодовые значения GI определялись из осреднения среднемесячных (более подробное описание GI см. [9]).

Анализ показал, что характер 22-летних вариаций индексов температуры и увлажненности

этого региона Европы в некоторые сезоны года изменялся в течение 300-летнего периода дважды: на рубеже XVIII–XIX вв. и XIX–XX вв. (отмечены на рис. 3 пунктиром). Как видно из рис. 3а (сглаженные 22-летним скользящим средним вариации чисел Вольфа с 1700 г.), это эпохи пониженной солнечной активности и начала новых вековых циклов. Кроме того, этим периодам предшествовали “аномалии” движения Солнца относительно барицентра (dL_z/dt) – отмечены звездочками.

На рис. 3б представлены изменения коэффициентов корреляции между индексами весенних температур в Швейцарии, которые показали наиболее устойчивую связь с солнечной активностью (сглаженными 22-летним скользящим средним) и числами Вольфа (сглаженными аналогичным образом). Коэффициенты корреляции вычислялись по скользящим 88-ми (r_{88}) и 110-летним (r_{110}) интервалам. Как видно, r_{88} и r_{110} изменяются в широких пределах, но тем не менее, существуют периоды преимущественно положительных или отрицательных значений коэффициентов корреляции. Бросается в глаза тот факт, что коэффициенты корреляции меняют свой знак также во время пониженной солнечной активности – эпохи спада старого и зарождения нового вековых циклов (отмеченные участки на рис. 3б).

Таким образом, три разных процесса (движение Солнца, солнечная активность и вариации климата) имеют “особенности” примерно в одно и то же время. По-видимому, такие совпадения не являются случайными. В качестве рабочей гипотезы можно предположить, что изменение уровня солнечной активности, равно как и вариации параметров движения Солнца относительно барицентра являются результатами эволюции солнечной системы и в этом смысле могут иметь общие свойства (например, совпадение периодов аномального поведения характеристик и параметров, описывающих эти процессы, рис. 3а). При этом не исключено, что в соответствии с гипотезой, высказанной Джоузом в [2], в периоды зарождения нового векового цикла солнечной активности наблюдаются “сбои” 22-летнего магнитного хэйловского цикла. Однако экспериментальные данные об изменении магнитного поля Солнца не позволяют ни подтвердить, ни опровергнуть эту гипотезу.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы вариации динамических характеристик движения Солнца относительно барицентра солнечной системы – производные по времени угловых моментов Солнца относительно барицентра и мгновенного центра кривизны солнечной траектории с 1100 по 2045 гг. в сопоставлении с изменением уровня солнечной активности. На основании проделанного анализа сделано предпо-

ложение, что в районе 2045–2070 гг. возможны аномалии в вариациях солнечной активности. Полученные результаты также свидетельствуют в пользу существования в вариациях dL_z/dt периодов в 179 и 540 лет.

2. Отмечено совпадение периодов аномально-го поведения производной углового момента Солнца относительно центра масс солнечной системы, “особых” периодов в вариациях солнечной активности (глубоких минимумов, начал новых вековых циклов, возможных нарушений цикла Хейла) и эпох изменений знака коэффициентов корреляции между вариациями солнечной активности и климата Земли.

Авторы выражают свою благодарность рецензенту за ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 97-05-64458, и гранта М97-2.5К-70 Министерства общего и профессионального образования России и администрации Санкт-Петербурга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пудовкин М.И., Козлов В.П. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 1977. 312 с.
2. Jose P.D. Sun's motion and Sunspots. // *The Astronomical journal*. 1965. V. 70, № 3. P. 193.
3. Landscheidt T. Solar oscillations, sunspot cycles, and climatic change. // *Weather and climate responses to solar variations*. В. М. McCormac (ed.) Colorado: Colorado Ass. Univ. Press. 1983. 550 p.
4. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука, 1973. 200 с.
5. Витинский Ю.И. Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 123 с.
6. *Астрономический календарь. Постоянная часть*. М.: Наука, 1981. 600 с.
7. Ривин Ю.Р. Вековые вариации солнечной активности по данным ^{14}C // Тр. конф. “Современные проблемы солнечной цикличности”. С.-Петербург, 1997. 390 с.
8. Наговицын Ю.А. Нелинейная математическая модель процесса солнечной цикличности и возможности для реконструкции активности в прошлом // Письма в *Астрономический журнал*. 1997. Т. 23. № 11. С. 851.
9. Пудовкин М.И., Морозова А.Л. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в вариациях индексов температуры и увлажненности в Швейцарии с 1700 по 1989 г. // *Геомагнетизм и аэронамия*. 1999. Т. 39. № 2. С.
10. Pfister C. Das Klima der Schweiz von 1525–1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevölkerung und Landwirtschaft. Bern, 1984.
11. Pfister C. Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. A meteorology for quantifying man made evidence on weather and climate // *Climate since 1500 A. D.* Bradley R.S., Jones P.D. (eds.). London. 1992. P. 118.
12. Pfister C., Kington J., Kleinlogel G. et al. The creation of high resolution spatio-temporal reconstructions of past climate from direct meteorological observations and proxy data. Methodological considerations and results // *Climate in Europe 1675–1715*, Frenzel B., Pfister C., Glaeser B. (eds.). 1994.