

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ КРУПНЫХ ДОЛГОЖИВУЩИХ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

© 2022 г. А. А. Осипова^{1*}, Ю. А. Наговицын^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Наговицын и др. (2018) выявили две моды зависимости скорости вращения крупных долгоживущих групп солнечных пятен от широты, однако чем именно объясняется феномен двухкомпонентности, осталось необъясненным. В данной работе проверяется предположение о связи скорости дифференциального вращения таких групп с их морфологической структурой. Используются данные Гринвичской обсерватории за промежуток времени 1874–1976 гг. Получено, что кривая дифференциального вращения более быстрой моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 совпадает с кривой дифференциального вращения, полученной для групп, растянутых по долготе (streams), а кривая вращения более медленной моды LLG2 — для групп, состоящих из одного пятна или кластера пятен (singles).

Ключевые слова: группы солнечных пятен, дифференциальное вращение.

DOI: 10.31857/S0320010822110110

ВВЕДЕНИЕ

Дифференциальное вращение Солнца может быть описано законом Фая: $\omega = A + B \sin^2 \varphi$, где A — угловая скорость вращения Солнца на экваторе, B — коэффициент дифференциальности, φ — широта. Иногда в эту формулу добавляется еще один член разложения по полиномам Лежандра — синус широты в четвертой степени. Факт разложения по четным степеням синуса фиксирует симметричность вращения относительно экватора. Дифференциальному вращению, рассчитанному по координатным наблюдениям групп солнечных пятен, посвящено большое количество работ (Обридко, Наговицын, 2017). Оно может зависеть от цикла солнечной активности (Гокхэйл, Сивараман, 1981; Говард, 1976, 1984; Кэмбри, Нишикава, 1990), магнитной структуры (Бальтазар и др., 1986), возраста группы (Годоли, Маццукони, 1979; Тернулло и др., 1981; Ньютон, Нанн, 1951; Гокхэйл, Хиремат, 1984), размера группы (Уорд, 1966; Ховард и др., 1984; Джа и др., 2021), ее эволюции (Куценко, Абраменко, 2021).

В работе Наговицына и др. (2018) предложен новый подход, основанный на рассмотрении ги-

стограмм группированных выборок значений долготных скоростей групп солнечных пятен в последовательных интервалах широт. Такой подход позволяет для данного широтного интервала рассмотреть общее распределение скоростей и выделить современными статистическими методами (Левенберг, 1944; Марквардт, 1963) — так называемый LM-алгоритм — отдельные нормальные моды. В результате было показано, что общую картину можно себе представить как одновременное существование двух фундаментальных мод вращения групп пятен: быстрой T1 и медленной T2. Дифференциальность вращения у них практически одинакова: коэффициент при \sin^2 в законе Фая — 2.87–2.88 град/сут, экваториальная скорость же значительно различается на 0.27 град/сут.

С другой стороны, ранее были выявлены две различающиеся популяции групп солнечных пятен (Дмитриева и др., 1968; Куклин, 1980; Наговицын и др., 2012, 2016, 2017, 2021; Наговицын, Певцов, 2016): мелкие короткоживущие группы SSG и крупные долгоживущие LLG. Рассмотрение долготных скоростей групп пятен в рамках подхода группированных выборок и LM-алгоритма Наговицыным и др. (2018) показало, что SSG связаны

*Электронный адрес: osisasha@mail.ru

с быстрой компонентой вращения, а LLG — и с быстрой, и с медленной.

В этой работе мы пытаемся понять, почему вращению LLG групп соответствуют две компоненты вращения. Иначе говоря, существуют ли свойства групп, которые упорядочивают общую картину? В качестве гипотезы мы предполагаем, что разделение на две выявленные моды вращения у LLG связано с морфологической структурой групп пятен этой популяции.

Ранее Уорд (1966), используя данные Гринвичской обсерватории за промежуток 1935–1944 г. о морфологическом типе групп, разделил их на три класса в зависимости от сложности морфологической структуры и вытянутости по долготе. Он показал, что вытянутые по долготе группы вращаются быстрее правильных, почти круглых групп. Бальтазар и др. (1986) показали, тоже по гринвичским данным, но за промежуток 1940–1968 г., что скорость дифференциального вращения групп солнечных пятен зависит от цюрихского класса группы, где одиночные крупные группы типов H и J вращаются медленнее всего, а типы C и D — наиболее быстрые.

ДАННЫЕ

Для определения скоростей дифференциального вращения по группам пятен популяции LLG относительно кэррингтоновской системы координат используем длительные данные Гринвичской обсерватории (RGO, <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>, Уиллис и др., 2013) за все время существования этой программы наблюдений с 1874 по 1976 г.

Согласно Наговицыну и Певцову (2016), популяции групп пятен, площади которых образуют два логнормальных распределения, разделяются по времени жизни: SSG существуют ≤ 5 дней, LLG > 5 дней. Для каждой группы, принадлежащей LLG популяции, имеются данные о ее кэррингтоновской долготе L для всех дней наблюдений. Мы строим зависимость долготы от времени $L = L(t)$, и приближаем полученную картину с помощью метода наименьших квадратов линейным уравнением $L = a + bt$, где b является скоростью ω_C долготного дифференциального вращения относительно кэррингтоновской сетки координат. На модуль скорости долготных скоростей накладываем ограничение сверху 2.5 град/сут. Морфологический тип группы определяем в день максимального развития группы, когда площадь группы максимальна.

Скорость дифференциального вращения ω_C рассчитывается относительно системы гелиографических долгот Кэррингтона, которая вращается

с периодом 25.38 сут (Аллен, 1977). Для перевода ω_C в сидерическую скорость дифференциального вращения используем $\Delta\omega = 360$ град/25.38 сут = 14.18 град/сут, так что сидерические скорости дифференциального вращения $\omega = \omega_C + \Delta\omega$.

Проанализируем морфологическую структуру групп солнечных пятен. Каждой группе с 1874 по 1976 г. в Гринвиче присваивался тип, описывающий морфологическую структуру (Уиллис и др., 2013):

0 = одиночное пятно;

1 = одиночное пятно с несколькими мелкими пятнами;

2 = пара пятен;

3 = пара пятен с несколькими мелкими пятнами;

4 = растянутое по долготе пятно;

5 = растянутое по долготе пятно с отдельным одиночным пятном;

6 = растянутое по долготе пятно с двумя отдельными пятнами;

7 = кластер пятен или группа сложной формы;

8 = два кластера пятен или групп сложной формы;

9 = прочее, не подпадающее под описание других типов.

В своей известной работе Уорд (1966) разделил эти типы групп на три смысловых класса:

— одиночные (singles) — гринвичские типы групп пятен 0, 1, 7;

— двойные (doubles) — типы 2, 3, 8;

— растянутые по долготу (streams) — типы 4, 5, 6.

Повторим разбиение групп на морфологические классы аналогично Уорду, но для всего времени проведения гринвичских наблюдений. Тип 9 мы не включали в рассмотрение, как и Уорд (1966), поскольку в этом типе содержатся группы морфологической структуры, не подпадающие под описание какого-либо из типов 0–8. В табл. 1 приведено полученное количество групп разных типов.

Всего нами было получено долготных скоростей групп пятен для типов: одиночные (singles) — 5249, двойные (doubles) — 1429, растянутые по долготу (streams) — 4174. Далее для каждого из трех типов в избранных интервалах широт, следуя подходу Наговицына и др. (2018), была найдена среднестатистическая скорость вращения. А именно, сначала производился 2D-биннинг долготных скоростей со следующими параметрами: по синусу широты $\sin \varphi \in [-0.625; 0.625]$, $\Delta \sin \varphi = 0.05$, $\omega \in [-2.55; 2.55]$, $\Delta \omega = 0.1$. Затем для каждой широты каждого интервала $\sin \varphi$ распределение скоростей группированной выборки предполагалось нормальным, и с помощью LM-алгоритма находились его среднее и ошибка этого значения, которые присваивались данному среднему синусу широты $\sin \varphi$ как локальная скорость дифференциального вращения $\omega = \omega(\sin \varphi)$.

Таблица 1. Количество групп пятен популяции LLG различных типов

Тип	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество	2327	1632	806	420	2024	1138	1012	1290	203	1367

Таблица 2. Результаты использования t -критерия Стьюдента для проверки гипотезы о совпадении кривых дифференциального вращения различных типов на уровне значимости 5%, M_1 и M_2 — средние арифметические, m_1 и m_2 — стандартные ошибки среднего, t — наблюдаемое значение t -критерия (2), T_{cr} — наблюдаемое значение t -критерия

Ряды	$M_1 - M_2$	$m_1^2 + m_2^2$	t	T_{cr}
Singles – T2	0.0041	1.05162×10^{-4}	0.40	2.09
LLG2 – T2	–0.01374	2.02476×10^{-4}	0.97	2.09
Streams – T1	–0.0156	0.00103	0.49	2.09
LLG1 – T1	–0.00679	0.00392	0.11	2.09
Singles – LLG2	0.01783	3.07638×10^{-4}	1.02	2.09
Streams – LLG1	–0.00881	0.00495	0.13	2.09

Здесь следует сделать важное методическое замечание. В недавней работе Куценко и Абраменко (2021) по данным SDO/HMI показано, что при эволюции некоторых групп пятен на видимой полусфере Солнца от полноценной биполярной конфигурации до стадии, когда хвостовая часть в белом свете пропадает, происходит сдвиг средних координат группы, что должно приводить к завышению истинной (средневзвешенной по магнитному потоку) скорости вращения. Это существенное замечание, поэтому мы оценили вклад таких групп в статистику. Всего групп популяции LLG за 102 года наблюдений 12 197. Среди них 3993 группы, представляющие типы 0 и 1 в максимальной стадии развития, а оставшихся групп неуниполярных типов 2–8 в максимальной стадии развития — 8204. Далее из них нами были отобраны те группы, которые завершили эволюцию как униполярные — в последний день их наблюдения. С типами 0 и 1 таких групп было 792: 700 типа 0 и 92 типа 1. Таким образом, получаем, что частотность случаев, описанных Куценко и Абраменко (2021), в общей статистике всего 9.7%, и это вряд ли изменит общую картину наших статистических распределений.

КРИВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ ГРУПП ПЯТЕН РАЗЛИЧНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Результирующие данные о дифференциальном вращении показаны на рис. 1. Там же приведены

кривые дифференциального вращения быстрой и медленной модах T1 и T2 из статьи Наговицына и др. (2018) в приближении $\omega = A + B \sin^2 \varphi$ — пунктир. Им соответствуют формулы

$$\omega_{T1} = (14.616 \pm 0.013) - (2.88 \pm 0.13) \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

$$\omega_{T2} = (14.3499 \pm 0.0039) - (2.869 \pm 0.043) \sin^2 \varphi.$$

Также на рис. 1 нанесены данные о быстрой и медленной моде крупных долгоживущих групп пятен LLG1 и LLG2 из той же статьи. Можно отметить, что группы различных морфологических типов ложатся на разные кривые вращения. На рис. 1 видно, что группы, состоящие из одного пятна или кластера пятен, вращаются медленнее всех, двойные или биполярные группы вращаются чуть быстрее, и самые быстрые — это растянутые по долготе группы пятен. Также можно заметить, что кривые вращения групп типа singles (состоящих из одного пятна или кластера пятен) лежат ближе к более медленной моде T2, а streams (растянутых по долготе) — к более быстрой моде T1. В следующем пункте проверим это предположение. Так как малочисленный тип двойных или биполярных групп составляющий всего 13% от общего рассматриваемого числа групп, лежит между модами T1 и T2, в дальнейшем анализе этот тип рассматривать не будем.

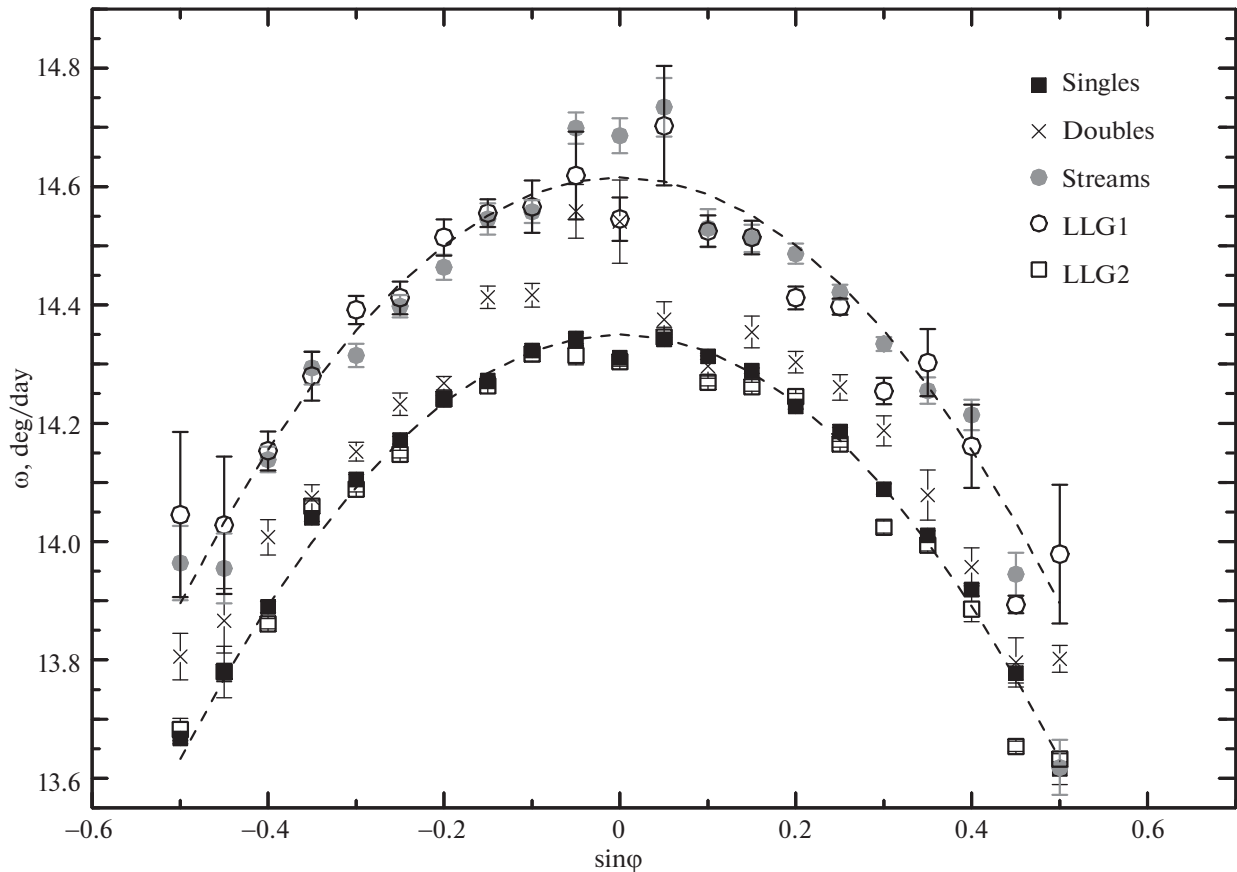


Рис. 1. Кривые вращения для промежутка 1874–1976 гг. для рассмотренных в статье типов групп (черные квадратики — singles, черные крестики — doubles, серые кружки — streams), наложенные на полученные Наговицыным и др. (2018) кривые вращения быстрой и медленной моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 (белые кружки) и LLG2 (светлые квадратики) и моды вращения крупных долгоживущих пятен (верхняя пунктирная линия — более быстрая мода T1, нижняя — более медленная T2 из формулы (1)).

СВЯЗЬ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРУППЫ И ДВУХ МОД ВРАЩЕНИЯ LLG

Из рассмотрения рис. 1 мы можем предположить, что более медленная кривая вращения LLG2 совпадает с кривыми вращения singles и T2, а кривая вращения быстрых больших пятен LLG1 — с модами вращения streams и T1. Проверим данное предположение с использованием t -критерия Стьюдента (Гмурман, 1968; Стьюдент, 1908):

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (2)$$

где M_1 и M_2 — средние арифметические, m_1 и m_2 — стандартные ошибки среднего. Значение критического T_{cr} находится по таблице распределения Стьюдента для выбранного уровня значимости. Проверим нашу гипотезу о совпадении кривых дифференциального вращения типа singles с медленной модой вращения популяции LLG2 и фундаментальной модой вращения T2, а также о

совпадении кривых дифференциального вращения типа streams с быстрой модой вращения популяции LLG1 и фундаментальной модой вращения T1. Проверку гипотезы о совпадении будем проверять на уровне значимости 5%, тогда $T_{cr} = 2.09$. Если мы проверяем непротиворечивость этой гипотезы, то для полученных нами с использованием формулы (2) t должно выполняться условие

$$|t| < T_{cr}. \quad (3)$$

Результаты представлены в табл. 2, для всех рассмотренных сравнений рядов выполняется условие (3).

Теперь проверим — уже на 1% уровне значимости — различие мод вращения разных типов групп, находя t и сравнивая его для этого уровня значимости с $T_{cr} = 2.9$. Соответственно, в этом случае должно быть $|t| > T_{cr}$. Результаты представлены в табл. 3. Различие для всех случаев оказывается значимым.

Таким образом, обе проверяемые гипотезы дали положительный результат. Вывод: гипотеза о

Таблица 3. Результаты использования t -критерия Стьюдента для проверки гипотезы о различии кривых дифференциального вращения различных типов на уровне значимости 1%

Ряды	$M_1 - M_2$	$m_1^2 + m_2^2$	t	T_{cr}
Singles – Streams	-0.24539	0.00114	7.3	2.9
Singles – LLG1	-0.2542	0.00402	4.0	2.9
Singles – T1	-0.26099	1.05162×10^{-4}	25	2.9
Streams – LLG2	0.26323	0.00124	7.5	2.9
Streams – T2	0.24949	0.00103	7.8	2.9
LLG1 – LLG2	0.27204	0.00412	4.2	2.9
LLG2 – T1	-0.27883	2.02476×10^{-4}	20	2.9
LLG1 – T2	0.2583	0.00392	4.1	2.9

том, что скорость дифференциального вращения крупных долгоживущих групп солнечных пятен связана с их морфологической структурой, подтверждается.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее Наговицын и др. (2018) подтвердили, вслед за рядом других работ, что скорость дифференциального вращения групп солнечных пятен не является универсальной функцией широты. Обосновывалось предположение о существовании на Солнце двух фундаментальных мод вращения: быстрой T1 и медленной T2. Популяция мелких короткоживущих групп SSG вращается быстро, а популяция крупных долгоживущих групп LLG разделяется на две: на те, скорость вращения которых такая же, как и у SSG, и на те, которые вращаются значительно медленнее.

В нашей статье мы получили, что кривая вращения более быстрой моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 статистически совпадает с кривой дифференциального вращения групп, растянутым по долготе (гринвичский тип — streams), а кривая вращения более медленной моды LLG2 — с кривой дифференциального вращения групп, состоящих из одного пятна или кластера пятен (singles). При этом быстрому вращению соответствует мода T1, а медленному — T2.

Группы гринвичского типа doubles, составляющие по численности не более 13% от общего числа рассмотренных групп, занимают промежуточное положение между модами вращения. Можно предположить, что для них оказывается существенным вклад собственных движений пятен внутри группы.

Таким образом, пренебрегая группами типа doubles, можно заключить, что “раздвоение” кривых дифференциального вращения на моды T1 и

T2 у крупных долгоживущих групп, обнаруженное ранее, обусловлено различием их морфологической структуры.

Работа выполнена при поддержке Программы крупных проектов Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-780). Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К.У., *Астрофизические величины* (М.: Мир, 1977).
2. Бальтазар и др. (H. Balthasar, M. Vazquez, and H. Woehl), *Astron. Astrophys.* **155**, 87 (1986).
3. Говард (R. Howard), *Astrophys. J.* **93**, L159 (1976).
4. Годоли, Маццукони (G. Godoli and P. Mazzucconi), *Solar Phys.* **64**, 247 (1979).
5. Гокхэйл, Сивараман (M.H. Gokhale and K.R. Sivaraman), *J. Astrophys. Astron.* **2**, 365 (1981).
6. Гокхэйл, Хиремат (M.H. Gokhale and K.M. Hiremath), *Astron. Soc. India*, **12**, 398 (1984).
7. Джа и др. (B.K. Jha, A. Priyadarshi, S. Mandal, S. Chatterjee, and D. Banerjee), *Solar Phys.* **296**, 25 (2021).
8. Куценко, Абраменко (A.S. Kutsenko and V.I. Abramenko), *Open Astron.* **30**, 219 (2021).
9. Кэмбри, Нишикава (M.A. Kambry and J. Nishikawa), *Solar Phys.* **126**, 89 (1990).
10. Левенберг (K. Levenberg), *Quarterly of Appl. Math.* **2**, 164 (1944).
11. Маквардт (D. Marquardt), *SIAM J. Appl. Math.* **11**, 431 (1963).
12. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Osipova, and A.A. Pevtsov), *MNRAS* **501**, 2782 (2021).

13. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Astron. Nachr.* **338**, 26 (2017).
14. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and W. Livingston), *Astrophys. J. Lett.* **758**, L20 (2012).
15. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 773 (2016) [Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, A.G. Tlatov, E.V. Miletskii, and E.Yu. Nagovitsyna, *Astron. Lett.* **42**, 703 (2016)].
16. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 229 (2018) [Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, *Astron. Lett.*, **44**, 202 (2018)].
17. Наговицын, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **833**, 94 (2016).
18. Ньютон, Нанн (H.W. Newton and M.L. Nunn), *MNRAS* **111**, 413 (1951).
19. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А., *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб: ВВМ, 2017).
20. Стьюдент (Student), *Biometrika*, **6**, 1 (1908).
21. Тернулло и др. (M. Ternullo, R.A. Zappala, and P. Zuccarello), *Solar Phys.* **74**, 111 (1981).
22. Уиллис и др. (D.M. Willis, H.E. Coffey, R. Henwood, E.H. Erwin, D.V. Hoyt, M.N. Wild, and W. Denig), *Solar Phys.* **288**, 117 (2013).
23. Уорд (F. Ward), *Astrophys. J.* **145**, 416 (1966).
24. Хатавей и др. D.H. (Hathaway, R.M. Wilson, and E.J. Reichmann), *Solar Phys.* **211**, 357 (2002).
25. Ховард и др. (R. Howard, P.I. Gilman, and P.A. Gilman), *Astrophys. J.* **283**, 373 (1984).
26. Хэйс (W. Hays), *Statistics* (Cengage Learning, 1994).
27. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>