

СООТНОШЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ СОЛНЕЧНОГО ПЯТНА И ЕГО ТЕНИ: ДВЕ ПОПУЛЯЦИИ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

© 2024 г. Ю. А. Наговицын^{1,2*}

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

² Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию: 14.04.2024 г.

После доработки 04.05.2024 г.; принята к публикации 06.05.2024 г.

Рассмотрены группы солнечных пятен гринвичского типа 0 — одиночные пятна. Показано, что, кроме ранее отмеченных свойств групп пятен, разделяющихся на две популяции: крупных долгоживущих LLG и мелких короткоживущих SSG, такие группы — одиночные пятна — различаются характером связи общей площади пятна S с площадью тени U . Отношение S/U для всей популяции LLG этого класса может считаться постоянным и составляет $Q_{LLG} = 5.756 \pm 0.039$. Соотношение S и U для популяции SSG определяется степенным законом $S = (5.569 \pm 0.093)U^{0.8957 \pm 0.0040}$. Различие у популяций структурных свойств пятен вместе с другими, найденными ранее различиями их физических свойств, не противоречит гипотезе о формировании магнитного потока двух разных популяций пятен в разных зонах: глубинном тахоклине и приповерхностном лептоклине.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечные пятна.

DOI: 10.31857/S0320010824050051, EDN: MYBQVV

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные пятна изучаются с помощью телескопа более 400 лет. До этого имеются упоминания об их наблюдении невооруженным глазом: в Китае (еще до начала новой эры), Японии, Греции, Персии, Англии, России. Но именно с изобретением и применением телескопа появилась возможность изучать их строение.

Солнечное пятно занимает от одной до нескольких сотен и тысяч миллионных долей площади видимой полусферы (мдп) и имеет выраженную темную тень, а также несколько менее темную полутень, окаймляющую ее. Полную площадь пятна будем обозначать S , площадь тени U . Измерениям параметра структуры пятна — отношению величин S/U посвящен целый ряд работ, большая часть из них приведена в табл. 1.

В порядке уточнения заметим, что некоторые из авторов в этой таблице (например, Вальдмайер) измеряли параметр \sqrt{Q} — отношение не площадей S и U , а диаметров (общего и тени). В этом случае мы привели соответствующие значения к системе Q . Ориентируясь на средние значения разных авторов, можно вычислить среднее по всей табл. 1: $Q = 5.3 \pm 1.1$.

После работы (Хэйл, 1908а,б) мы знаем, что пятна образуются благодаря концентрации сильного (до нескольких тысяч гаусс) магнитного поля. Тень и полутень отображают поверхностную конфигурацию

этого физического параметра. В то же время, мы не знаем точно, как выглядит магнитное поле солнечных пятен под поверхностью Солнца. Существует две точки зрения — “моноклиновая” и “кластерная”. Первая восходит к (Каулинг, 1955), который предположил, что пятно — это моноклиновая колонна силовых линий (трубка магнитного потока), которая сопротивляется давлению окружающего газа. Согласно второй, по (Спруит, 1981), усовершенствованному предыдущие представления (Паркер, 1979) и (Мейер и др., 1977), сверху вниз трубка потока однородна до определенной глубины, а потом распадается на отдельные мелкие трубки, “привязанные” к основанию зоны конвекции.

Также вызывает вопросы проблема области (областей) генерации магнитного поля в динамо-процессе. Основное число исследователей полагают, что генерация происходит в глубинном слое близ основания конвективной зоны, называемом “тахоклином”. (Бранденбург, 2005) же предположил существование динамо, распределенного по конвективной зоне. Интересен подход к конвективной зоне с магнитным полем и турбулентными потоками плазмы как к нелинейной динамической диссипативной системе, в которой развивается самоорганизация (Абраменко, 2020; Абраменко, Сулейманова, 2024).

В той или иной степени глубинная структура пятна связана с его поверхностной конфигурацией. Мы рассмотрим в настоящей статье особенности соотно-

*Электронный адрес: nag-yury@yandex.ru

Таблица 1. Значения отношения полной площади пятна к площади тени Q по данным разных авторов

Автор	Q	Автор	Q
Николсон (1935)	5.7	Брандт и др. (1991):	
Вальдмайер (1939)	5.5 ± 1.5	– для крупных пятен	4.1
– по Вольферу (1882, 1883)	3.6	– для мелких пятен	5.2
Тандберг-Ханссен (1956)	5.9 ± 1.0	Анталова (1991)	5.7
Йенсен и др. (1955):		Бек и Чапмэн (1993)	≈ 5.0
– вблизи максимума цикла	5.3	Мартинез-Пиллет и др. (1993)	4.9 ± 0.6
– вблизи минимума	6.3	Уотсон и др. (2011)	2.5 – 5
Эдвардс (1957)	6.1 – 6.5	Хатауэй (2013)	3 – 7
Рингнес (1964)	3.5 – 6.2	Джа и др. (2019)	5.5 – 6.6
Гокхэйл и Цван (1972)	5.9 ± 1	Чоудхури и др. (2024):	5.5 – 6.5
Ошерович и Гарсия (1989)	4 ± 1	– для очень больших пятен	
Стейнеггер и др. (1990)	4.6	(> 5000 мдп)	8.3

шения наблюдаемых площадей пятна в целом и его тени (ядра).

2. ДВЕ ПОПУЛЯЦИИ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Ранее было показано, что площади групп солнечных пятен образуют би-логнормальное распределение, и мы можем говорить о двух популяциях групп. Первые работы принадлежали группе Г. В. Кукулина (Дмитриева и др., 1968; Кукулин, 1980). Затем были работы (Наговицын и др., 2012; Наговицын, Певцов, 2016, 2021). Кроме того, было показано, что популяции разделяются по времени жизни (Наговицын, Певцов, 2016), по величине магнитного поля (Наговицын, Певцов, 2016; Наговицын и др., 2017), по вращению и меридиональным движениям (Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А., 2018; Наговицын и др., 2023), по изменениям так называемого тилт-угла с широтой (Наговицын и др., 2021а). Было высказано предположение (Наговицын, Певцов, 2016), что популяции групп пятен различаются местоположением области их генерации: крупные долгоживущие, названные LLG, образуются в тахоклине, а мелкие короткоживущие SSG – в близповерхностной зоне, также обладающей значительным радиальным градиентом скорости вращения и иногда называемой “лептоклином” (Годьер, Розело, 2001).

Далее мы продолжим поиск различий свойств двух популяций, фокусируясь на структурных различиях пятен.

3. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И ВРЕМЯ ЖИЗНИ ГРУПП ПЯТЕН

Вначале отметим, что две популяции выделяются не только для групп пятен, но и для собственно пятен. Кроме нашей работы (Наговицын и др., 2012), отметим здесь работу (Тлатов, Певцов, 2014). В качестве наблюдательного материала в нашей работе мы

взяли данные Гринвичского каталога (Уиллис, 2013) за весь период его существования: 1874–1976 гг. Мы рассмотрели группы, состоящие из одиночных пятен (гринвичский тип 0). Следуя идеологии “образующих” (generative) индексов (Наговицын и др., 2021b), отражающих производительность солнечного динамо, среди этих групп мы отобрали те, которые достигли максимума площади своего развития в пределах видимых долгот $[-70^\circ, +70^\circ]$, и рассмотрели площадь тени U и общую площадь пятна S на момент достижения этого максимума.

Далее, следуя подходу работы (Наговицын, Певцов, 2021), мы произвели рандомизацию точности измерений наблюдаемых площадей (1 мдп). Такая процедура позволяет избежать лакун при статистическом исследовании распределений площадей в логарифмах при малых значениях (разница между $\log(1)$ и $\log(2)$ – 0.3, между $\log(2)$ и $\log(3)$ – 0.18 и т.д., что создает трудности при формировании группированных выборок с малым бином).

Как мы уже отмечали, (Наговицын, Певцов, 2016) показали, что время жизни является параметром, разделяющим распределение площадей групп пятен на два отдельных логнормальных распределения, названные SSG и LLG. Это было показано для групп пятен всех гринвичских типов вместе. Покажем, что это заключение выполняется и для интересующего нас гринвичского типа 0, т.е. групп, состоящих из одного пятна. Для этого найдем при логарифмических абсциссах параметры гауссиан

$$f(\log x) = \frac{A_{1,2}}{W_{1,2}\sqrt{\pi/2}} \exp\left[-\frac{2(\log x - X_{1,2})^2}{W_{1,2}^2}\right], \quad (1)$$

где $X_{1,2}$ – положения максимумов, $W_{1,2}$ – удвоенные средние квадратические отклонения, $A_{1,2}$ – суммарные площади. Вначале по всей выборке, для всех

значений площадей (и соответственно времен жизни) проведем методом Левенберга–Марквардта (Левенберг, 1944; Марквардт, 1963) – МЛМ – процедуру расчета логнормальных компонентов (рис. 1а, табл. 2, второй столбец). Затем разделим выборку на две: для пятен с временами жизни $T \leq 5$ дней согласно (Наговицын, Певцов, 2016) – это популяция SSG, и для пятен с $T \geq 6$ дней – это популяция LLG. Для обеих выборок отдельно с помощью МЛМ найдем параметры одиночных гауссиан (см. рис. 1б и табл. 2, столбцы 3 и 4). Сравним оба подхода к выделению популяций групп рассматриваемого типа 0. Последний столбец табл. 2 представляет собой t -статистику сравнения первого столбца со вторым и третьим:

$$t_{\text{OBS}} = \frac{|X - Y|}{\sqrt{SE_X^2 + SE_Y^2}}, \quad (2)$$

где X и Y – средние сравниваемых величин, а SE_X, SE_Y – стандартные ошибки их средних.

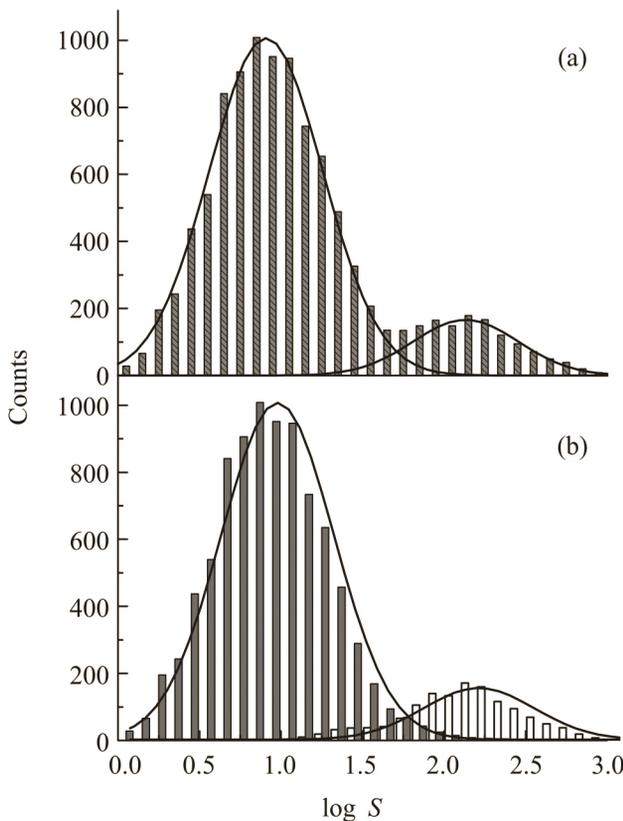


Рис. 1. (а) – Распределение логарифмов площадей (в м.д.п.) групп солнечных пятен гринвичского типа 0 (заштрихованные столбики); фитурующие кривые получены МЛМ в предположении смеси двух гауссиан; (б) – Распределения логарифмов площадей тех же групп пятен отдельно для времен жизни $T \leq 5$ дней (темные столбики) и $T \geq 6$ дней (светлые); фитурующие кривые проведены МЛМ для популяций индивидуально.

Все значения наблюдаемого t_{OBS} для всех параметров меньше 0.5. При уровне значимости $\alpha = 5\%$ и имеющего числа степеней свободы $k = 15$ критическое значение распределения Стьюдента $t_C = 2.1$, следовательно, нет оснований отвергать гипотезу о совпадении двух способов получения распределений площадей SSG и LLG популяций для групп гринвичского типа 0 (одиночных пятен).

Таким образом, мы показали, что критерий разделения групп пятен на популяции для гринвичского типа 0 такой же, как у (Наговицын, Певцов, 2016): у SSG $T \leq 5$ дней и у LLG $T \geq 6$ дней.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛНОЙ ПЛОЩАДИ ПЯТНА ОТ ПЛОЩАДИ ТЕНИ ДЛЯ ПОПУЛЯЦИЙ

Рассмотрим для SSG и LLG популяций отдельно зависимость

$$\log S = f(\log U), \quad (3)$$

взяв только пятна с $U \geq 1$ мдп. На рис. 2 представлена полученная картина.

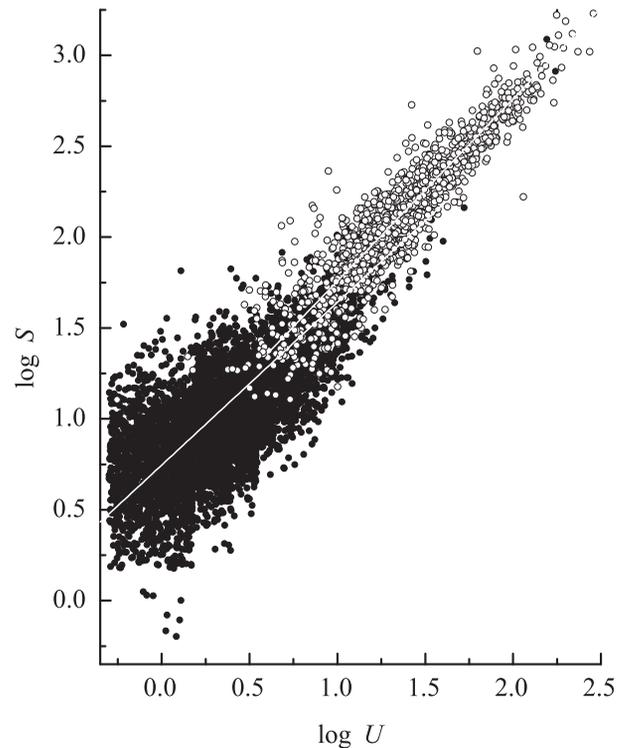


Рис. 2. Зависимость логарифмов площадей пятен от логарифмов площади их теней. Темные кружки – популяция SSG, светлые – LLG. Прямые соответствуют формулам (5), (6)

Мы видим, что зависимости логарифмов (3) отдельные для SSG и LLG популяций могут быть представлены линейными соотношениями, а это значит, что зависимости самих величин S от U степенные:

$$S = aU^b, \quad (4)$$

Таблица 2. Значения параметров формулы (1) для рис. 1

Параметр формулы (1)	Общее распределение	Для $T \leq 5$ дней отдельно	Для $T \geq 6$ дней отдельно	t_{OBS}
X_1	0.9081 ± 0.0055	0.9047 ± 0.0048		0.47
W_1	0.695 ± 0.012	0.6918 ± 0.0096		0.21
A_1	877 ± 13	871 ± 11		0.35
X_2	2.133 ± 0.033		2.140 ± 0.013	0.20
W_2	0.649 ± 0.069		0.681 ± 0.026	0.43
A_2	135 ± 12		131.1 ± 3.4	0.32

причем только для $b = 1$ можно говорить о постоянном коэффициенте $Q = S/U$. С применением МЛМ:

$$a_{\text{SSG}} = 5.569 \pm 0.093, \quad b_{\text{SSG}} = 0.8957 \pm 0.0040, \quad R = 0.841, \quad (5)$$

$$a_{\text{LLG}} = 5.70 \pm 0.20, \quad b_{\text{LLG}} = 1.0022 \pm 0.0071, \quad R = 0.946 \quad (6)$$

(R — коэффициент корреляции). Статистическое отличие коэффициентов a формулы (4) для популяций не значимо. Для коэффициентов степеней b в то же время получаем по формуле (2) $t_{\text{OBS}} = 13(!)$, что опровергает статистическую гипотезу о совпадении (5) и (6) по крайней мере с $\alpha < 0.001$.

Для популяции крупных долгоживущих пятен статистически $b = 1$, и параметр Q можно рассчитать по МНК или МЛМ (для линейного случая оценки эквивалентны) из линейной регрессии $S = QU$. Получаем

$$Q_{\text{LLG}} = 5.756 \pm 0.039, \quad (7)$$

что находится в согласии с данными табл. 1. В случае популяции мелких пятен соотношение S и U определяется степенным законом (4) с коэффициентами (5).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей статье мы продолжили обоснование положения о том, что солнечные пятна образуют две физически различающиеся популяции с разным происхождением.

Мы показали, что, кроме ранее отмеченных свойств, популяции групп пятен SSG и LLG различаются для гринвичского типа 0 (одиночные пятна) характером связи общей площади пятна S с площадью тени U . Отношение S/U для популяции LLG этого типа может считаться постоянным и составляет $Q_{\text{LLG}} = 5.756 \pm 0.039$. Соотношение S и U для популяции SSG определяется степенным законом $S = (5.569 \pm 0.093)U^{0.8957 \pm 0.0040}$ и, следовательно, Q для этой популяции зависит от общей площади пятна. Все это говорит о том, что механизм формирования горизонтального компонента магнитного поля у трубки магнитного потока солнечного пятна для популяций различается (например, из-за локализации популяций в разных подфотосферных областях или

из-за того, что продолжительность времени развития трубки потока, соответствующей пятну, различна). Здесь трудно сказать что-либо более определенное, поскольку структуру пятна под фотосферой мы представляем себе не достаточно ясно, хотя имеются работы, ее моделирующие (Косовичев и др., 2000); (Моради и др., 2010; Хотга, Ииджима, 2020; Панжа и др., 2021) и др.). Остается надеяться, что новые ключевые данные гелиосейсмологии и успешное моделирование прояснят вопрос.

В настоящей и предыдущих работах мы указывали на логнормальный характер распределения площадей пятен. Отметим здесь, что логнормальность может быть связана с влиянием конвекции, так что конвективные движения “дробят” магнитный поток (Колмогоров, 1941). Заметим, что на связь логнормального распределения площадей пятен и групп пятен с колмогоровским дроблением обращал внимание еще (Соланки, 2003), хотя и не выделял отдельные популяции. А (Муньос-Харамильо и др., 2015), подтверждая двухкомпонентность распределения площадей групп пятен и их различающееся происхождение, заключали, что хотя популяция крупных групп распределена логнормально, мелкие пятна подчиняются распределению Вейбулла (Вейбул, 1939). Тот факт, что логарифмы площадей пятен популяций представляют собой гауссову смесь, а не единое нормальное распределение, может свидетельствовать о независимости генерации популяций.

Таким образом, различие у популяций структурных свойств пятен вместе с другими, найденными ранее, различиями их физических свойств не противоречит гипотезе о формировании магнитного потока двух разных популяций пятен в разных зонах — глубинном тахоклине и приповерхностном лептоклине, о чем мы упоминали во втором разделе.

Автор выражает благодарность анонимным рецензентам, замечания которых были важны и конструктивны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменко (V. Abramenko), Geomagn. Aeron. **60**, 801 (2020).

2. Абраменко, Сулейманова (V. Abramenko and R. Suleymanova), *Solar Phys.* **299**, 31 (2024).
3. Анталова (A. Antalová), *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia.* **42**, 319 (1991).
4. Бек, Чапмэн (J.G. Beck and G.A. Chapman), *Solar Phys.* **146**, 49 (1993).
5. Бранденбург (A. Brandenburg), *Astrophys. J.* **625**, 539 (2005).
6. Брандт и др. (P.N. Brandt, W. Schmidt, and M. Steinegger), *Solar Phys.* **129**, 191 (1991).
7. Вальдмайер (M. Waldmeier), *Astron. Mitt. der Eidgenössischen Sternwarte Zürich.* **14**, 439 (1939).
8. Вейбул (W. Weibull), *A Statistical Theory of the Strength of Materials.*, Ingeniörsvetenskapsakademiens handlingar (Generalstabens litografiska anstalts förlag, 1939).
9. Годьер, Розело (S. Godier and J.P. Rozelot), *Solar Phys.* **199**, 217 (2001).
10. Гокхэйл, Цван (M.H. Gokhale and C. Zwaan), *Solar Phys.* **26**, 52 (1972).
11. Джа и др. (B.K. Jha, S. Mandal, D. Banerjee), *Solar Phys.* **294**, 72 (2019).
12. Дмитриева и др. (M.G. Dmitrieva, M. Копецкý, and G.V. Kuklin), *Structure and Development of Solar Active Regions.* **35**, 174 (1968).
13. Йенсен и др. (E. Jensen, J. Nord, and T.S. Ringnes), *Astrophys. Norwegica.* **5**, 167 (1955).
14. Каулинг (T.G. Cowling), *MNRAS.* **106**, 218 (1946).
15. Колмогоров (А.Н. Колмогоров), *Докл. АН СССР.* **31**, 2 (1941).
16. Ку克林 (G.V. Kuklin), *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* **31**, 224 (1980).
17. Левенберг (K. Levenberg), *Quarterly of Appl. Math.* **2**, 164 (1944).
18. Марквардт (D. Marquardt), *SIAM J. Appl. Math.* **11**, 431 (1963).
19. Мартинез-Пиллет и др. (V. Martinez Pillet, F. Moreno-Insertis, and M. Vazquez), *Astron. Astrophys.* **274**, 521 (1993).
20. Мейер и др. (F. Meyer, H.U. Schmidt, and N.O. Weiss), *MNRAS.* **179**, 741 (1977).
21. Моради и др. (H. Moradi, C. Baldner, A.C. Birch, et al.), *Solar Phys.* **267**, 1 (2010).
22. Муньос-Харамильо и др. (A. Muñoz-Jaramillo, R.R. Senkpeil, J.C. Windmueller, et al.), *Astrophys. J.* **800**, 48 (2015).
23. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and W.C. Livingston), *Astrophys. J.* **758**, L20 (2012).
24. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А. и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, et al.), *Astron. Lett.* **42**, 703 (2016).
25. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Astron. Nachr.* **338**, 26 (2017).
26. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova), *Astron. Lett.* **44**, 202 (2018).
27. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *MNRAS.* **501**, 2782–2789 (2021a).
28. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Osipova, and E.Yu. Nagovitsyna), *Solar Physics.* **296**, 32 (2021b).
29. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Solar Phys.* **298**, 108 (2023).
30. Наговицын, Певцов (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys J.* **833**, 94 (2016).
31. Наговицын, Певцов (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys J.* **906**, 27 (2021).
32. Никольсон (S. Nicholson), *Publ. Astron. Soc. Pac.* **45**, 51 (1933).
33. Ошерович, Гарсия (V.F. Osherovich and H.A. Garcia), *Astrophys. J.* **336**, 468 (1989).
34. Панжа и др. (M. Panja, R. Cameron, and S.K. Solanki), *Astrophys. J.* **893**, 113 (2021).
35. Паркер (E.N. Parker), *Astrophys. J.* **230**, 905 (1979).
36. Рингнес (T.S. Ringnes), *Astrophys. Norwegica.* **8**, 303 (1964).
37. Соланки (S. Solanki), *Astron. Astrophys. Rev.* **11**, 153 (2003).
38. Спруит (H.C. Spruit), *Physics of Sunspots.* (Ed. L.E. Sram, J.H. Thomas, National Solar Obs., Sunspot, NM, 1981), p. 98, 359
39. Стейнеггер и др. (M. Steinegger, J.A. Bonet, and M. Vazquez), *Solar Phys.* **171**, 303 (1997).
40. Тандберг-Ханссен (E. Tandberg-Hanssen), *Astrophys. Norwegica.* **5**, 207 (1956).
41. Тлатов, Певцов (A.G. Tlatov and A.A. Pevtsov), *Solar Phys.* **289**, 1143 (2014).
42. Уиллис (D.M. Willis, H.E. Coffey, R. Henwood, E.H. Erwin, D.V. Hoyt, M.N. Wild, and W.F. Denig), *Solar Phys.* **288(1)**, 117 (2013).
43. Уотсон (F.T. Watson, L. Fletcher, and S. Marshall), *Astron. Astrophys.* **533**, A47 (2011).
44. Хатауэй (D.H. Hathaway), *Solar Phys.* **286**, 347 (2013).
45. Хотта, Ииджима (H. Hotta and H. Iijima), *MNRAS.* **494**, 2523 (2020).
46. Хэйл (G.E. Hale), *Astrophys. J.* **28**, 100 (1908).
47. Хэйл (G.E. Hale), *Astrophys. J.* **28**, 315 (1908).
48. Чоудхури и др. (P. Chowdhury, A. Kilcik, A. Saha, J.P. Rozelot, V. Obridko, and R. Erdelyi), *Solar Phys.* **299**, 19 (2024).
49. Эдвардс (A.W.F. Edwards), *Observatory.* **77**, 69 (1957).