

ОСОБЕННОСТИ ПРАВИЛА ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВРЕМЕН ЖИЗНИ И ПЛОЩАДЕЙ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

© 2019 г. Ю. А. Наговицын^{1,2*}, В. Г. Иванов¹, А. А. Осипова¹

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

²Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 14.07.2019 г.; после доработки 07.08.2019 г.; принята к публикации 13.08.2019 г.

С использованием “Каталога солнечной деятельности” Р.С. Гневышевой (1954–1978 гг.) правило Гневышева–Вальдмайера исследовано по выборке из 7696 нереккуррентных и 566 рекуррентных групп солнечных пятен. Максимальное зафиксированное время жизни группы составило 160 дней. Общее для всех времен жизни правило Гневышева–Вальдмайера имеет форму $A_{\max} = (12.1 \pm 0.70)LT$ (A_{\max} — максимальная площадь группы за время существования, LT — время жизни группы). Однако оказалось, что общее правило отклоняется от полученной линейной формы для популяции короткоживущих мелких групп пятен SSG: оно имеет значимый нелинейный скейлинговый вид $A_{\max} = (8.02 \pm 0.41)LT^{(1.105 \pm 0.022)}$. Для популяции долгоживущих крупных групп пятен LLG имеет место линейная форма $A_{\max} = (12.9 \pm 1.1)LT$. Рассмотрение только рекуррентных групп с временами жизни больше 40 дней дает значение $A_{\max} = (13.93 \pm 0.41)LT$

Ключевые слова: Солнце, солнечная активность, солнечные пятна, солнечно-звездные аналогии.

DOI: 10.1134/S032001081910005X

ВВЕДЕНИЕ

Прямую пропорциональность между максимальной площадью группы пятен и ее временем жизни, названную в дальнейшем правилом Гневышева–Вальдмайера, впервые получил Гневышев (1938) и сформулировал Вальдмайер (1955): $A_{\max} = aLT$, где A_{\max} — максимальная за время существования площадь группы пятен в миллионных долях полусферы (м.д.п.), LT — время жизни группы в сутках, а a — параметр, равный 10 м.д.п./день по данным Гринвичской обсерватории за 1912–1934 гг. В статистику были включены группы, наблюдавшиеся один раз в течение половины солнечного оборота, и так называемые рекуррентные группы, наблюдавшиеся более одного оборота. Петровой, ван Дриель-Гестели (1997) рассмотрели правило Гневышева–Вальдмайера по данным Дебреценской обсерватории за 1977–1978 гг. для 128 рекуррентных групп пятен площадью более 10 м.д.п., отстоящих от центрального меридиана не более чем на 72° и $LT > 5$ дней, и получили несколько больший коэффициент $a = 10.89 \pm 0.18$ м.д.п./день.

Блантер и др. (2006) построили зависимость для Гринвичских данных за 1874–2006 гг. для нереккуррентных групп, рассматривая, в том числе, $LT < 1$ дня, и получили коэффициент a , в 3 раза превышающий значения, полученные ранее. Такое отличие нельзя объяснить учетом короткоживущих групп, так как Наговицын и др. (2019) для частично совпадающего ряда (Гринвичские данные за 1874–1976 гг. и данные Кисловодской горной астрономической станции за 1976–2019 гг.) для $LT < 7$ дней получили $a = 10.3 \pm 0.5$ м.д.п./день. Хенвуд и др. (2010) для Гринвичских данных за период 1874–1976 гг. и гелиоцентрического угла $\theta < 60^\circ$ по 841 рекуррентной группе получили $a = 11.73 \pm 0.26$ м.д.п./день. Наговицын и др. (2019) также использовали автоматизированный алгоритм поиска рекуррентных групп, который позволил выявить 578 групп. Было получено, что для всех групп, в том числе и нереккуррентных, коэффициент в правиле Гневышева–Вальдмайера $a = 13.0 \pm 1.1$ м.д.п./день. Важно отметить, что в данной работе приведено объяснение, почему правило Гневышева–Вальдмайера лучше визуализировать в координатах $\log_{10} A_{\max} \sim \log_{10} LT$ (Петровой, ван Дриель-Гестели, 1997; Намеката и

*Электронный адрес: nag-yury@yandex.ru

др., 2019) — распределение площадей групп пятен для различных времен жизни лучше описывается логнормальным распределением, а не нормальным. В цитируемых работах подтверждена линейная форма правила Гневышева–Вальдмайера.

Демонстрируя простоту, это правило важно для солнечно-звездных аналогий. Например, пользуясь спецификой фотометрической кривой для переменных звезд типа RS Гончих Псов, Холл и Хенри (1994) показали, что наблюдается прямая пропорциональность между размером пятен и их временем жизни. К сожалению, современные возможности наблюдений не всегда достаточны для отслеживания эволюции отдельного пятна на поверхности избранной звезды, но, предполагая, что эмпирическое соотношение между параметром запятненности звезды и временем жизни пятен применимо к звездам аналогично правилу Гневышева–Вальдмайера для Солнца, можно, например, построить зависимость времени жизни пятна для звезд с различными эффективными температурами (Саванов, 2019). Также правило Гневышева–Вальдмайера позволяет оценить коэффициент диффузии, требуемый для моделирования магнитных циклов на Солнце и звездах (Намеката и др., 2019). Наблюдаемые значения коэффициента a реализуются, вероятно, только при условии аномальной магнитной диффузии на масштабах супергрануляции (Брэдшоу Хартиган, 2014).

ДАнные НАБЛЮДЕНИЙ

Рекуррентные — долгоживущие — группы солнечных пятен изучены достаточно слабо, прежде всего из-за того, что для их идентификации приходится прилагать дополнительные усилия: в базах данных солнечных пятен под одним номером объединяются наблюдения группы в течение одного прохода по диску Солнца. Чаще всего рекуррентные группы ищутся по определенному алгоритму (Брайса и др., 2002; Наговицын и др., 2019) — гелиоцентрические координаты группы в течение двух последовательных проходов по диску Солнца должны отличаться не более чем на определенное значение. Однако такой алгоритм, руководствуясь близостью координат, может включать в итоговый ряд пары групп, не являющиеся рекуррентными. Также могут быть потеряны группы, обладающие отличием собственных движений от стандартного дифференциального вращения, или группы с собственной эволюцией.

В данной работе мы используем уникальный каталог рекуррентных групп солнечных пятен, созданный Р.С. Гневышевой (“Список повторяющихся групп” в Каталоге солнечной деятельности, Труды Главной Астрономической Обсерватории в Пулковке) за 1954–1978 гг. Преимущество данного ряда состоит в том, что выбор рекуррентных групп производился вручную, т.е. минимизированы ошибки, когда две нереккуррентные группы объединяются в одну рекуррентную вследствие близости координат в соседних оборотах. Используемая база данных содержит 566 рекуррентных групп. Также в данной работе используются данные о группах солнечных пятен Пулковского каталога солнечной деятельности (Интерактивная база данных по солнечной активности в системе Пулковского “Каталога солнечной деятельности”) за тот же период времени (http://www.gaoran.ru/database/csa/groups_r.html) — 7696 групп.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В каталоге Р.С. Гневышевой приведены времена жизни как рекуррентных групп с точно определенным временем жизни, когда моменты рождения и исчезновения зафиксированы, так и групп, которые появлялись или исчезали на невидимой стороне Солнца. Во втором случае в каталоге приведены оценки LT (верхний и нижний пределы). Для таких групп мы в качестве LT использовали среднее значение оценок.

Наговицыным и др. (2019) показано, что для различных времен жизни моды (наиболее часто встречающиеся значения) распределений площадей в 2–3 раза меньше их математических ожиданий (средних значений), а сами распределения — асимметричные и явно не нормальные. В то же время распределения логарифмов площадей близки к нормальным и практически симметричны. Поэтому при усреднениях площадей для данных времен жизни следует использовать логарифмическое среднее.

Далее, в нашем распоряжении имеются 7696 однооборотных групп (рекуррентные группы были удалены из данной статистики) и 566 рекуррентных. Если мы будем строить регрессии по начальным данным, они будут фактически соответствовать однооборотным группам, поскольку их более чем в 13 раз больше. Поэтому мы пошли тем же путем, как и в работе Наговицына и др. (2019): для разных времен жизни использовалось

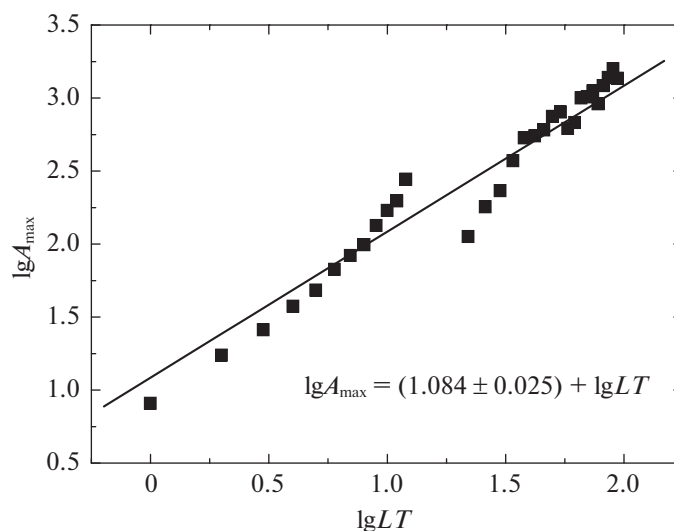


Рис. 1. Правило Гневывшева–Вальдмайера для всего диапазона продолжительностей жизни групп пятен.

среднеарифметическое значение площади, соответствующее данному диапазону (бину) LT . Бины LT составляли 1 день для однооборотных групп и 4 дня — для рекуррентных.

ОБЩЕЕ ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА

Под общим правилом Гневывшева–Вальдмайера будем понимать линейный закон $A_{\max} = aLT$, построенный для всего диапазона времен жизни групп пятен. На рис. 1 он получен по данным, рассматриваемым в этой статье.

Напомним, что согласно Наговицыну и др. (2019) специфичная форма зависимости на рис. 1 с разрывом и отклонениями от прямой связана с уходом групп пятен за лимб. Первое отклонение (левая часть рис. 1) вызвано тем, что некоторые рекуррентные группы мы ошибочно относим к однооборотным, что завышает среднюю площадь групп в соответствующем интервале времен жизни. Второе отклонение (правая часть рис. 1) вызвано тем, что некоторые из рекуррентных групп с временами жизни больше половины оборота достигают максимальной площади на обратной стороне Солнца, и средняя площадь в соответствующих интервалах занижена.

При потенцировании зависимости на рис. 1 получаем $A_{\max} = (12.1 \pm 0.70)LT$, что удовлетворительно соответствует значению a в работах Хенвуда и др. (2010), Наговицына и др. (2019).

Рассматривая рис. 1, можно предположить, что регрессионная прямая будет лучше описывать наблюдательные данные, если допустить отклонение от линейной формы общего правила Гневывшева–Вальдмайера. В этом случае получаем $\lg A_{\max} = (0.958 \pm 0.062) + (1.095 \pm 0.043) \lg LT$. Видно, что коэффициент наклона отличается от единицы лишь на 2.2σ , поэтому нет статистических причин отказываться от линейной формы в целом. В то же время отмеченные особенности рис. 1 требуют объяснения. Для этого рассмотрим концепцию двух различных популяций групп солнечных пятен.

ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА ДЛЯ ДВУХ ПОПУЛЯЦИЙ ГРУПП ПЯТЕН

Впервые возможное существование двух популяций групп солнечных пятен было отмечено Дмитриевой и др. (1968) и Куклиным (1980). В дальнейшем было подтверждено (Наговицын Певцов, 2016; Наговицын и др., 2016–2018; Осипова Наговицын, 2017), что группы солнечных пятен образуют две популяции: SSG (Small Short-living Groups мелкие короткоживущие) и LLG (Large Long-living Groups крупные долгоживущие). Популяции разделяются по времени жизни: больше и строго меньше 5 дней (Наговицын, Певцов, 2016), магнитному полю главных пятен: больше и меньше 2000 Гс (Наговицын и др., 2016, 2017), вращению: однокомпонентному быстрому и двухкомпонентному быстрому и медленному (Наговицын и др., 2018). Существование двух различных популяций

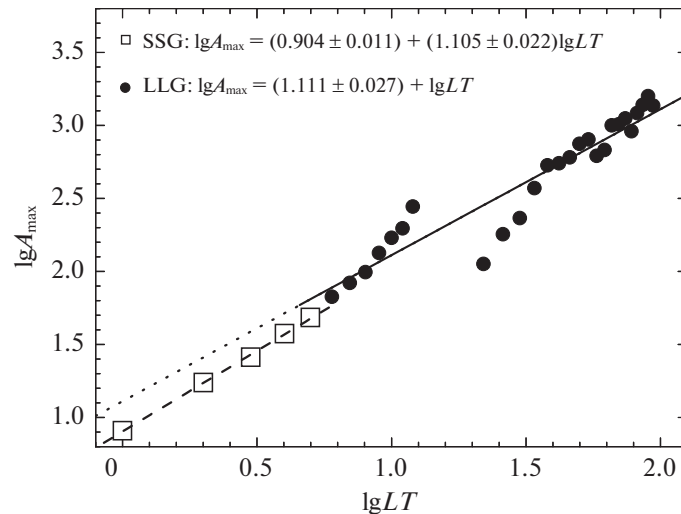


Рис. 2. Правило Гневывшева–Вальдмайера для двух популяций групп солнечных пятен.

групп пятен было также подтверждено в работе Муноса-Харамиджо и др. (2015).

На рис. 1 видно, что группы с $LT \leq 5$ сут (т.е. популяция SSG) находятся ниже средней зависимости и, более того, наклон прямой для них — другой (т.е. они отклоняются от линейной формы правила Гневывшева–Вальдмайера). Поэтому найдем зависимость максимальных площадей групп от времени жизни отдельно для SSG и LLG (см. рис. 2).

Отметим, что, во-первых, зависимости различаются, а во-вторых, зависимость для SSG в логарифмических осях действительно отклоняется от линейного закона на 5σ . При потенцировании для LLG получаем $A_{\max} = (12.9 \pm 0.8)LT$, а для SSG — $A_{\max} = (8.02 \pm 0.41)LT^{(1.105 \pm 0.022)}$.

Различие в форме правила Гневывшева–Вальдмайера для двух популяций групп солнечных пятен можно попытаться объяснить с точки зрения различных режимов диссипации магнитного поля в них. В работах Соловьева (1991а,б) была предложена модель солнечного пятна с диффузией магнитного поля через тонкий слой на границе между магнитной силовой трубкой пятна и окружающей ее конвективной зоной. В этой модели существуют два режима диссипации магнитного поля пятна: наряду с линейным по времени уменьшением площади для больших пятен наблюдается замедление этого процесса в пятнах небольших размеров. Этот эффект может привести к отклонению от линейного закона Гневывшева–Вальдмайера для небольших пятен в сторону увеличения времени их жизни, что мы и видим в наблюдательных данных.

ПРАВИЛО ГНЕВЫШЕВА–ВАЛЬДМАЙЕРА ДЛЯ РЕКУРРЕНТНЫХ ГРУПП

У Гневывшева (1938) были рассмотрены группы пятен с максимальным временем жизни $LT_{\max} = 40$ дней. Наговицын и др. (2019) увеличили интервал до $LT_{\max} = 90$ дней. В нашей работе это значение составило уже $LT_{\max} = 160$ дней. Посмотрим, как выглядит правило Гневывшева–Вальдмайера для самых долгоживущих и наиболее крупных пятен. Для этого выберем интервал времен жизни 40–160 дней (т.е. LT от 1.5 до 6 оборотов). Полученный график, без каких-либо усреднений — только оригинальные данные — приведен на рис. 3.

Объем выборки достаточно большой: $n = 370$. Закон Гневывшева–Вальдмайера для групп, рассмотренных в этом разделе, выглядит как $A_{\max} = (13.93 \pm 0.41)LT$. Вероятно, для солнечно-звездных аналогий лучше всего подходит именно это значение коэффициента пропорциональности a .

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование “Каталога солнечной деятельности” Р. С. Гневывшевой (1954–1978 гг.) позволило исследовать правило Гневывшева–Вальдмайера для 7696 нерекуррентных и 566 рекуррентных групп солнечных пятен. Максимальное зафиксированное время жизни группы составило 160 дней (6 солнечных оборотов).

Общее для всех времен жизни правило Гневывшева–Вальдмайера имеет форму $A_{\max} = (12.1 \pm 0.70)LT$,

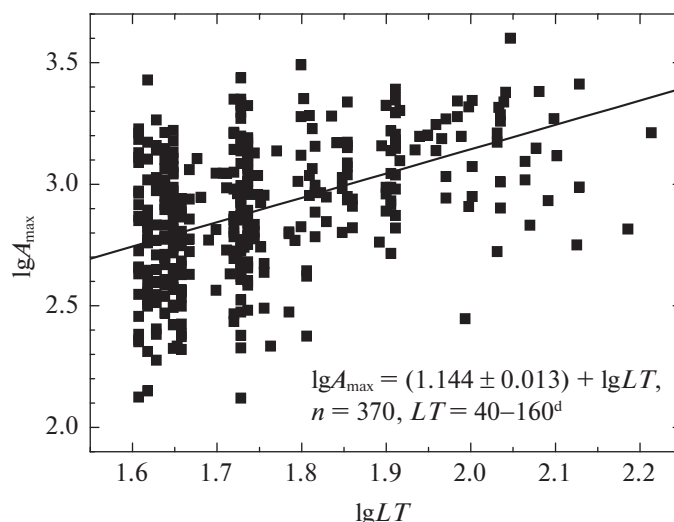


Рис. 3. Правило Гневывшева–Вальдмайера для долгоживущих рекуррентных групп пятен.

что находится в соответствии с формой, полученной по Гринвичскому каталогу Наговицыным и др. (2019): $A_{\max} = (13.0 \pm 1.1)LT$.

Оказалось, однако, что общее правило отклоняется от полученной линейной формы для популяции короткоживущих мелких групп пятен SSG: оно имеет значимый нелинейный скейлинговый вид $A_{\max} = (8.02 \pm 0.41)LT^{(1.105 \pm 0.022)}$. Для популяции долгоживущих крупных групп пятен LLG имеет место линейная форма $A_{\max} = (12.9 \pm 0.8)LT$.

Различие в форме правила Гневывшева–Вальдмайера для двух популяций групп солнечных пятен можно объяснить с точки зрения различных режимов диссипации магнитного поля в них.

Форма же рассматриваемого нами правила солнечной активности, полученная только по рекуррентным группам, соответствует максимальному коэффициенту a : $A_{\max} = (13.93 \pm 0.41)LT$. Именно такую зависимость можно рекомендовать для развития солнечно-звездных аналогий, поскольку наблюдаемые в настоящее время на звездах пятна — крупные и долгоживущие.

Авторы выражают благодарность рецензентам за замечания.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 19-02-00088 и 18-32-00555), а также программы ПРАН-Минобрнауки КП19-270.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блантер и др. (E.M. Blanter, J.-L. Le Mouel, F. Perrier, and M.G. Shnirman), *Solar Phys* **237**, 329 (2006).
2. Брайза и др. (R. Brajsa, H. Wohl, B. Vrsnak, D. Ruzdjak, D. Sudar, D. Rosa, and D. Hrztina), *Solar Phys* **206**, 229 (2002).
3. Брэдшоу, Хардиган (S.J. Bradshaw and P. Hartigan), *Astrophys. J.* **795**, 79 (2014).
4. Вальдмайер (M. Waldmeier), *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung* (Becker and Erler kom.-ges., Leipzig, 1941).
5. Гневывшев (M.N. Gnevyshev), *Pulkovo Observ. Circ.* **27**, 37 (1938).
6. Дмитриева и др. (M.G. Dmitrieva, M. Kopecky, and G.V. Kuklin), *IAU Symp. No. 35*, 174 (1968.).
7. Куклин (G.V. Kuklin), *Bull. Astron. Instit. Czech.* **31**, 224 (1980).
8. Мунос-Харамиджо и др. (A. Munoz-Jaramillo et al.), *Astrophys. J.* **804**, 12 (2015)
9. Наговицын Ю.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 773 (2016) [Yu.A. Nagovitsyn, et al. *Astron. Lett.* **42**, 703 (2016)].
10. Наговицын Ю.А., Иванов В.Г., Скорбеж Н.Н., *Письма в Астрон. журн.* **45**, 447 (2019) [Yu.A. Nagovitsyn, V.G. Ivanov, and N.N. Skorbezh, *Astron. Lett.* **45**, 396 (2019)].
11. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 229 (2018) [Yu.A. Nagovitsyn A.A. Pevtsov and A.A. Osipova *Astron. Lett.* **44**, 202 (2018)].

12. Наговицын, Певцов (Yu.A. Nagovitsyn and Alexei A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **833**, 6 (2016).
13. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov and A.A. Osipova), *Astron. Nachrichten* **338**, 26 (2017).
14. Намеката и др. (K. Namekata, et al.), *Astrophys J.* **871**, 13 (2019).
15. Осипова, Наговицын (A.A. Osipova and Yu.A. Nagovitsyn), *Geom. Aeron.* **57**, 1092 (2017).
16. Петровай, ван Дриель-Гестели (K. Petrovay and L. van Driel-Gesztelyi), *Solar Phys.* **176**, 249 (1997).
17. Саванов (I.S. Savanov), *Astrophysics* **62**, 177 (2019)
18. Соловьев А.А., *Астрон. журн.* **68**, 166 (1991a) [A.A. Solov'ev, *Sov. Astron.* **35**, 83 (1991a)].
19. Соловьев А.А., *Астрон. журн.* **68**, 624 (1991b) [A.A. Solov'ev, *Sov. Astron.* **35**, 306 (1991b)].
20. Хенвуд и др. (R. Henwood, S.C. Chapman, and D.M. Willis), *Solar Phys* **262**, 299 (2010).
21. Холл, Хенри (D.S. Hall and G.W. Henry), *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communication* bold(55), 51 (1994).