ЗАКОН ДЖОЯ И ДВЕ ПОПУЛЯЦИИ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Наговицын Ю.А.^{1,2}, Осипова А.А.¹, Певцов А.А.^{1,3}

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

²Государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия

³National Solar Observatory, Boulder, CO 80303, USA

JOY'S LAW AND TWO SUNSPOT GROUP POPULATIONS

Nagovitsyn Yu.A.^{1,2}, Osipova A.A.¹, Pevtsov A.A.^{1,3}

¹Central Astronomical Observatory of the RAS, St Petersburg, Russia

²St Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St Petersburg, Russia

³National Solar Observatory, Boulder, CO 80303, USA

We considered changes in the angle of inclination to the equator of the sunspot groups' axes (tilt angle β) based on the data from Catalog of Solar Activity by R.S. Gnevysheva. It is shown that it is necessary to take into account changes of the heliographic grid with latitude to calculate the tilt angle. Based on the calculation of various estimates of a typical or «average in the broad sense» values of β in selected intervals of latitudes φ a new approach to the experimental determination of the dependence $\beta = f(\varphi)$ is proposed. For all sunspot groups, the classical linear Joy's law is only a first approximation and only for $\varphi \in (-25^\circ; +25^\circ)$, outside this interval it is non-linear. Separate consideration of large long-living groups (LLG) and small short-living groups (SSG) showed that their dependence $\beta = f(\varphi)$ is radically different in the steepness of the linear sections (the slope of LLG is higher) and behavior for $|\varphi| > 25^\circ$. Results suggest a real difference in the properties of the two populations and do not contradict the hypothesis of different localization of subsurface zones of their formation in the framework of the distributed dynamo.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-243-246

Тилт-угол

Ведущие пятна в обоих полушариях Солнца располагаются ближе к экватору, чем хвостовые [1]. Угол между экватором и осью группы, соединяющей ведущее и хвостовое пятна противоположных полярностей, и называется тилт-углом α . Он растёт с широтой φ . Эта закономерность называется законом Джоя. Основные выражения, которыми приближают зависимость тилт-угла от широты — линейная $\alpha \sim \varphi$ [2–6], $\alpha \sim \sin \varphi$ [2, 6] и $\sin \alpha \sim \sin \varphi$ [8–9]. Заметим, что сетка долгот сужается от экватора к полюсам, и нужно учитывать косинус разности долгот λ ведущего и хвостового пятен [3, 9–10]. Все рассмотренные виды зависимостей априори принимались монотонными, и даже при наличии отклонений от линейности на высоких широтах ими часто пренебрегали, списывая на ошибки определения γ [3, 5–6, 10]. Хотя такие отклонения находили неоднократно, им не уделялось достаточного внимания [11].

Данные и их обработка

Мы использовали данные «Каталога солнечной деятельности» Р.С. Гневышевой [12] с 1954 по 1989 (данные для 1988 года отсутствовали).

Большинство авторов вычисляли тилт α по формуле $\tan \alpha = -\Delta\varphi / \Delta\lambda$, где $\Delta\varphi = \varphi_p - \varphi_f$, $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_f$, p – ведущее, f – хвостовое пятна. В этом случае длина оси группы составляет $L_\alpha = \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta\lambda)^2}$. В [9] было замечено, что сетка гелиографических долгот сужается от экватора к полюсам, и поэтому была предложена другая формула для вычисления скорректированного тилт-угла β : $\tan \beta = -\Delta\varphi / (\Delta\lambda \cos \varphi)$. Тогда длина оси группы будет $L_\beta = \sqrt{(\Delta\varphi)^2 + (\Delta\lambda \cos \varphi)^2}$. Для наших данных оказалось, что $L_\alpha = (7.19 \pm 0.13) + (0.0480 \pm 0.0070) \varphi$, а $L_\beta = (7.56 \pm 0.12) + (0.0020 \pm 0.0066) \varphi$. Таким образом, L_α на уровне 6σ увеличивается с широтой по мере сужения гелиографической сетки, что странно и требует специального объяснения явления. В то же время коэффициент наклона в зависимости $L_\beta(\varphi)$ статистически не отличается от нуля, то есть L_β является статистическим инвариантом широты. Таким образом, следуя [3, 9–10] мы будем использовать выражение $\tan \beta = -\Delta\varphi / (\Delta\lambda \cos \varphi)$ для вычисления тилт-угла.

Распределение тилт-угла по широте

Интервальные оценки имеют ограниченное применение: они, безусловно, справедливы, если мы имеем дело со случайными ошибками. В то же время, если величина имеет реальный физический интервал изменения (например, разброс широт в бабочках Маундера), доверительные интервалы – не статистические, а физические – мера естественного разброса параметров явления. Таким образом, для нас ключевым понятием становятся средние значения.

Рис. 1. Изменение с широтой β_{AM} , β_{ME} , β_{LM} и β_{MO}

Рассмотрим понятие «типичного» значения β для выбранного интервала широт. Видами такого типичного или «среднего в широком смысле» значения β могут быть β_{AM} (среднее арифметическое выборки), β_{ME} (медиана), β_{MO} (мода), β_{LM} (положение центра наивероятной гауссианы группированной выборки, оно может быть найдено на основе подхода Левенберга-Маркуардта). Построим изменения величин β_{AM} , β_{ME} , β_{LM} и β_{MO} с широтой – см. рис. 1.

Заметим, что классический линейный закон Джоя выполняется только в пределах широт от -25° до $+25^\circ$, для более высоких широт наблюдается резкое снижение $|\beta|$ практически до нуля на $\varphi \sim 45^\circ$. $\beta_{\text{МО}}$ (светлые треугольники) подвергается значительным флуктуациям, и мы его в дальнейшем не используем.

Изменение тилт-угла с широтой для двух популяций групп солнечных пятен

В [13] было показано, что группы солнечных пятен (и главные пятна в группах) образуют две различные популяции: крупные долгоживущие (> 5 дней) LLG и мелкие короткоживущие (≤ 5 дней) SSG. В этих же работах было высказано предположение о том, что за их образование отвечают две отдельные зоны на Солнце: глубинная тахоклин (LLG) и приповерхностная лептоклин (SSG). Если это предположение верно, то можно ожидать различного поведения тилт-угла с широтой у разных популяций.

Применим наш подход к LLG и SSG популяциям отдельно – рис. 2 иллюстрирует полученные результаты для изменения β с широтой для LLG (a) и SSG (b) популяций. Шаг по широте 2.5° с перекрытием 5° . Из рис. 2 видно, что зависимости тилта от широты для LLG и SSG достаточно сильно отличаются: чисто эмпирически у LLG изменения можно представить

Рис. 2. Изменение с широтой тилт-угла для LLG (a) и SSG (b) групп пятен. Точечные линии – 95%-й доверительный интервал, штриховые – прогнозный.

синусоидой $\beta = (7.24 \pm 0.13) \sin[(3.63 \pm 0.090)\varphi]$, $k = 0.986 \pm 0.017$, где k – коэффициент корреляции. А для SSG больше подходит линейная зависимость (как в классическом правиле Джоя) $\beta = (0.2248 \pm 0.0099)\varphi$, $k = 0.857 \pm 0.057$. Остаточная дисперсия в первом случае в 3.7 раза меньше

(1.9 против 7.1). Это, вероятно, происходит от того, что число имеющихся значений для определения тилт-угла у LLG на порядок больше (малые SSG группы достаточно редко имеют выраженную биполярную конфигурацию).

Если сравнить коэффициенты регрессии для линейного участка, получаем $b_{LLG} = 0.3570 \pm 0.0048$, $b_{SSG} = 0.274 \pm 0.016$, и на уровне 5σ наклоны прямых у LLG и SSG различаются.

Выводы

В данной статье обосновано, что для вычисления тилт-угла нужно учитывать изменение гелиографической сетки с широтой. Предложен новый подход к экспериментальному нахождению зависимости $\beta = f(\varphi)$. Для использованных данных по всем группам пятен классический линейный закон Джоя представляет собой лишь первое приближение и только для широт φ от -25° до $+25^\circ$. Рассмотрение отдельно крупных долгоживущих LLG и мелких короткоживущих SSG групп пятен показало, что зависимость $\beta = f(\varphi)$ имеет у них разный характер: для LLG она приближается синусоидой, а для SSG она линейна, что не противоречит гипотезе о том, что эти популяции образуются в пространственно разделенных областях на Солнце.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-02-00088) и Программы крупных проектов Министерства науки и высшего образования РФ (проект №13.1902.21.0039).

Литература

1. Hale G.E. et al. // *Astrophys. J.*, 1919, V. 49, 153.
2. Norton A.A., P.A. Gilman // *Astrophys. J.*, 2005, V. 630, 1194.
3. Dasi-Espuig M. et al. // *Astron. Astrophys.*, 2010, V. 518, 7.
4. Li J., Ulrich R.K. // *Astrophys. J.*, 2012, V. 758, 115.
5. Ivanov V.G. // *Geomagn. Aeron.*, 2012, V. 52, 999.
6. Pevtsov A.A. et al. // *Sp. Sci. Rev.*, 2014, V. 186, 285.
7. Stenflo J.O., Kosovichev A.G. // *Astrophys. J.*, 2012, V. 745, 129.
8. Leighton R.B. // *Astrophys. J.*, 1969, V. 156, 1.
9. Wang Y.-M., Sheeley Jr. N.R. // *Astrophys. J.*, 1991, V. 375, 761.
10. Howard R.F. // *Sol. Phys.*, 1991, V. 136, 251.
11. Tlatova K. et al. // *Sol. Phys.*, 2018, V. 293, id. 118.
12. http://www.gaoran.ru/database/csa/groups_r.html.
13. Nagovitsyn Y.A., Pevtsov A.A. // *Astrophys. J.*, 2016, V. 833, 9.