

УДК 523.98

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ НА СОЛНЦЕ ПО ДВИЖЕНИЯМ ТРАССЕРОВ

С.В. Олемской, Л.Л. Кичатинов

DETERMINATION OF MERIDIONAL CIRCULATION ON THE SUN FROM TRACERS'S MOTIONS

S.V. Olemskoy, L.L. Kitchatinov

Показано, что стандартные методы определения меридионального течения на Солнце по движениям трассеров дают погрешность, связанную с неоднородностью распределения трассеров по широте. Предложен простой метод устранения этой погрешности. Применение метода к определению меридиональной циркуляции по движениям солнечных пятен приводит результат в согласие с гелиосейсмологическими данными о меридиональном течении.

It is shown, that standard methods of detecting meridional current on the Sun by tracer movements give an error related to the inhomogeneity in distribution of tracers over latitude. The simple method of exception of this error is suggested. Application of the method to detecting the meridional circulation from sunspot motions brings the in agreement with helioseismology data on the meridional flow.

Введение

Содержание настоящей работы относится к трассерам произвольной природы, но для определенности рассматриваются солнечные пятна.

Собственные движения пятен являются объектом достаточно частых исследований практически с середины XIX столетия. Систематические исследования меридиональных течений по смещениям солнечных пятен проводились Туоминеном [1–3]. Он использовал данные гринвичского каталога за разные периоды, отдельно исследуя короткоживущие группы пятен и группы пятен с продолжительностью жизни более одного оборота Солнца.

Основная закономерность, прослеживаемая как в работах Туоминена, так и в более поздних исследованиях и являющаяся на сегодняшний день общепринятым фактом, состоит в следующем: пятна с $|u| < 16^\circ$ движутся к экватору, а пятна, расположенные на более высоких широтах, – к полюсу. В свою очередь, данные, полученные другими способами, дают отличную от описанной выше систему меридиональных течений. Доплеровские измерения показывают течение к полюсам на солнечной поверхности [4]. Гелиосейсмология подтверждает наличие такого течения вплоть до глубин около 12 тыс. км, но наряду с ним присутствует также относительно медленное сходящееся течение к области широт с наибольшей частотой образования солнечных пятен [5].

Цель данной работы – показать, что традиционные методы определения меридионального течения по трассерам, в частности по движениям пятен, по всей вероятности, подвержены методической ошибке. Ошибка, как показано в следующем разделе, возникает из-за неоднородности распределения трассеров по широте. Предложен простой метод ее устранения. Применение этого метода приводит меридиональную циркуляцию, определяемую по трассерам, в соответствие с данными гелиосейсмологии.

Данные и метод

В настоящей работе использовались данные гринвичского каталога о гелиографических координатах неrecurрентных (короткоживущих) солнечных пятен за 1875–1946 гг.

Скорость меридионального смещения групп пятен определялась по формуле

$$V = R \frac{\varphi(t_1) - \varphi(t_2)}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

где $\varphi(t_2)$ – значение широты рассматриваемого смещения в конечный момент времени t_2 , а $\varphi(t_1)$ – соответствующее значение в начальный момент t_1 .

Положительные значения скорости означают движение к южному полюсу, а отрицательные – к северному. По стандартной методике полученное значение скорости относят к средней широте

$$\bar{\varphi} = \frac{\varphi(t_1) + \varphi(t_2)}{2}, \quad (2)$$

что мы и сделали в первом случае. Во втором случае, для того чтобы исключить описанное выше влияние неоднородности распределения пятен, полученную скорость относим не к $\bar{\varphi}$, а к $\varphi(t_1)$ – значению широты в момент появления пятна. Далее широтная зона появления солнечных пятен ($0-40^\circ$) была разделена на 10 интервалов, по 4° каждый. Было найдено среднее арифметическое значение скорости для каждого интервала. Для оценки «доверительных интервалов» средних значений были рассчитаны их стандартные отклонения. Расчеты проводились отдельно для северного и южного полушарий, а также для четных и нечетных циклов активности.

Рассмотрим теперь более подробно, как ложная скорость появляется в меридиональной циркуляции, определяемой методом трассеров, и как этого избежать. Как уже отмечалось, скорость для отдельного пятна определяется по формуле (1), затем это значение скорости усредняется по ансамблю трассеров. Точнее, усреднение проводится по пятнам, относящимся к отдельным широтным интервалам. Тем самым находится скорость меридионального течения как функция широты.

Однако возникает вопрос: к какой широте следует относить скорость (1)? Очевидно, что ответ на этот вопрос может иметь значение, только если $\varphi(t_1)$ и $\varphi(t_2)$ относятся к различным широтным интервалам, т.е. когда трассер в ходе смещения за время $t_2 - t_1$

пересекает границу между двумя выбранными интервалами широты. Стандартная процедура заключается в том, что скорость (1) следует относить к среднему значению, при этом и возникает ложная циркуляция, как видно из рис. 1. Ясно, что число трассеров, вторгающихся в некоторый из выбранных интервалов широты через границу, в сторону которой направлен градиент плотности трассеров, будет в среднем больше, чем число трассеров, вторгающихся через другую границу. Поэтому будет присутствовать ложное течение в направлении, противоположном градиенту плотности трассеров.

Имеется, однако, простой способ избежать граничных эффектов и связанной с ними ложной циркуляции: нужно величину скорости (1) относить к начальной широте $\varphi(t_1)$. Тогда из-за диффузии вследствие случайных блужданий ложная скорость не будет возникать, а вторжения трассеров из соседних широтных интервалов не будут иметь значения.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 показано изменение среднего меридионального движения нерекуррентных групп солнечных пятен в зависимости от широты без разделения на четные и нечетные циклы активности. Сплошные линии показывают среднюю меридиональную скорость для того случая, когда меридиональные смещения были отнесены к начальным широтам $\varphi(t_1)$, а пунктирные линии – меридиональные скорости для случая, когда смещения пятен были отнесены к средней широте $\bar{\varphi}$. Видно, что движение пятен почти антисимметрично относительно экватора. На рис. 2, б и последующих рисунках результаты представлены с осреднением по полушариям так, что $|V(-\varphi)| = |V(\varphi)|$. Наибольшие значения скоростей отмечаются в диапазоне широт 35–40°, но эти результаты менее надежны из-за небольшого числа событий, порядка 10 (величина ошибки превышает ± 0.05 град/сут), тогда как для низких широт число событий больше тысячи.

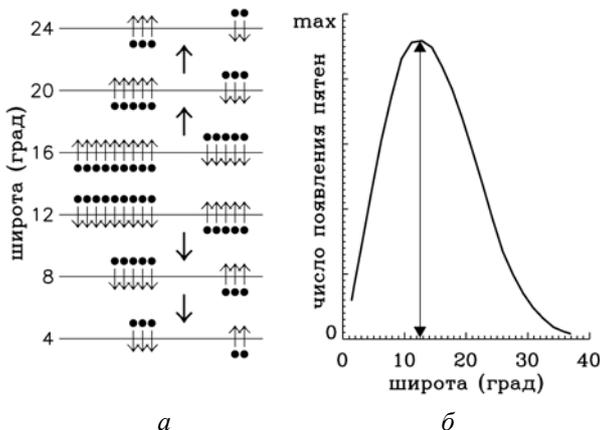


Рис. 1. а – влияние граничных эффектов на определение результирующих меридиональных движений. Точками условно обозначены солнечные пятна на границах широтных зон, а стрелками – направления их движений; б – характерное неоднородное распределение пятен по гелиошироте.

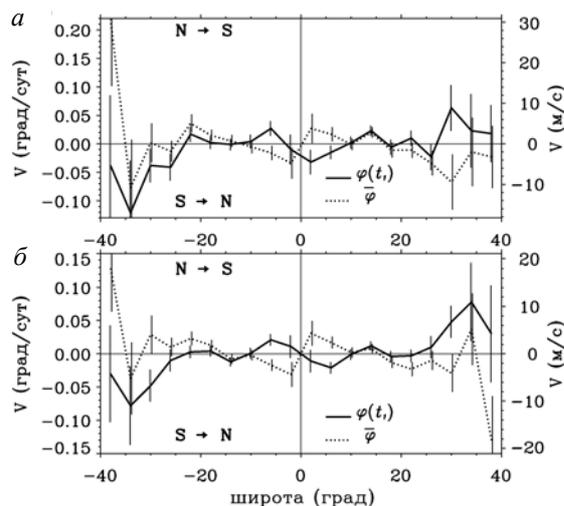


Рис. 2. Меридиональное движение солнечных пятен для циклов активности 11–18 без усреднения по полушариям (а) и с усреднением (б). В области положительных значений движение направлено к южному полюсу, а в области отрицательных – к северному полюсу. Вертикальные линии показывают величину стандартной ошибки.

Меридиональное движение, рассчитанное по стандартной методике, хорошо согласуется с результатами Туоминена, полученными как для рекуррентных, так и для короткоживущих групп пятен [1–3], а также с результатами более поздних работ [6–9]. В этом случае найденное течение представляет собой растекание вещества от широт (± 15 – 20°) к экватору и полюсам.

Когда смещения пятен относились к их начальной широте, что исключает влияние неоднородности их широтного распределения, получается противоположная картина. Такой результат обнаруживается как для полной статистики пятен (рис. 2), так и для четных и нечетных циклов активности по отдельности (рис. 3). В этом случае среднее меридиональное течение направлено к средним широтам зоны пятнообразования. Эти результаты согласуются с гелиосейсмологическими данными о меридиональном течении в верхней (до глубины 12 тыс. км) конвективной зоне Солнца [5]. Гелиосейсмология обнаруживает меридиональное течение к полюсам со скоростью около 20 м/с (0.14 град/сут) и накладывающееся на него стекание вещества к широтам наибольшей магнитной активности со скоростью 2–8 м/с. Возможно, что на той глубине под солнечной поверхностью, где «заякорены» солнечные пятна, сохраняется лишь последнее сходящееся течение.

В то же время использование структур крупномасштабного магнитного поля как трассеров для определения меридиональной циркуляции без исключения погрешностей, связанных с широтной неоднородностью таких трассеров, снова приводит к картине с растеканием вещества к полюсу и экватору от некоторой средней широты [10]. Вероятно, последствия широтной неоднородности в распределении трассеров сказываются одинаково вне зависимости от природы трассеров. Можно надеяться, что соответствующие погрешности для трассеров любого

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

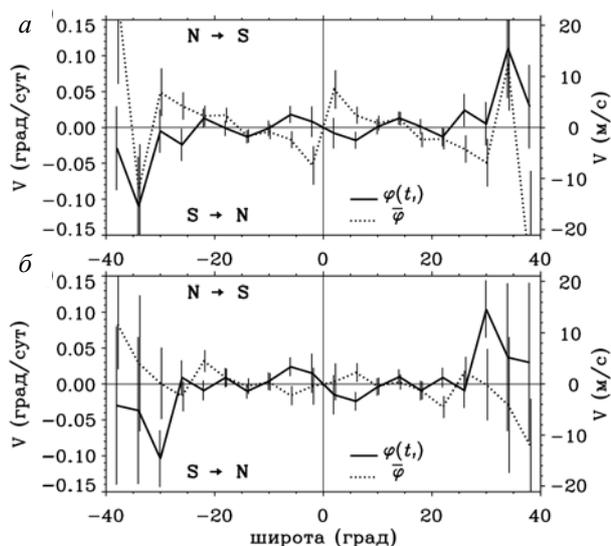


Рис. 3. Меридиональное течение, найденное по движениям солнечных пятен с осреднением по полушариям для нечетных (а) и четных (б) циклов активности. Обозначения те же, что на рис. 2.

вида можно исключить простым способом, предложенным в данной статье. По всей видимости, эти обстоятельства следует учитывать в планируемых измерениях меридиональной циркуляции на звездах методом доплеровских изображений [11], которые в конечном счете будут использовать метод трассеров. Можно отметить, что меридиональные течения на звездах значительно быстрее имеющихся на Солнце [11] и могут играть важнейшую роль в эволюции магнитных полей и формировании глобальных течений [12].

1. Tuominen J. // *Astrophys. J.* 1966. V. 143. P. 266.
2. Tuominen J., Kyrolainen J. // *Solar Phys.* 1982. V. 79. P. 161.
3. Tuominen J., Tuominen I., Kyrolainen J. // *MNRAS.* 1983. V. 205. P. 691.
4. Komm R.W., Howard R.F., Harvey J.W. // *Solar Phys.* 1993. V. 147. P. 207.
5. Zhao J., Kosovichev A. // *Astrophys. J.* 2004. V. 603. P. 776.
6. Balthasar H., Fangmeier E. // *Astron. Astrophys.* 1988. V. 203. P. 381.
7. Lustig L., Wohl H. // *Astron. Astrophys.* 1991. V. 249. P. 528.
8. Kambry M.A., Nishikawa J., Sakurai T. et al. // *Solar Phys.* 1991. V. 132. P. 41.
9. Brajsa R., Wöhl H. // *Hvar Obs. Bull.* 2001. V. 24. P. 125.
10. Latushko S. // *Solar Phys.* 1996. V. 163. P. 241.
11. Mackay D.H., Jardine M., Cameron A.C. et al. // *MNRAS.* 2004. V. 355. P. 1066.
12. Kitchatinov L.L., Rudiger G. // *Astron. Nachr.* 2004. V. 325. P. 496.