

ВРАЩЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА УРОВНЕ ФОТОСФЕРЫ СОЛНЦА

А.С. Куценко, В.И. Абраменко, Д.В. Литвишко

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, п. Научный, Крым, Россия
alex.s.kutsenko@gmail.com

ROTATION OF ACTIVE REGIONS ON THE SOLAR PHOTOSPHERE

A.S. Kutsenko, V.I. Abramenko, D.V. Litvishko

Crimean Astrophysical Observatory RAS, Nauchny, Crimea, Russia
alex.s.kutsenko@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты измерений скорости вращения 864 активных и 322 эфемерных областей на Солнце, наблюдавшихся в 2010–2016 гг. Подтверждено, что более крупные активные области имеют тенденцию вращаться медленнее по сравнению с небольшими. Наш анализ рекуррентных и униполярных активных областей позволяет предположить, что скорость вращения активной области не меняется в течение всей эволюции. Этот результат находится в противоречии со многими предыдущими выводами и может дать информацию о физическом процессе генерации и эволюции магнитного поля внутри конвективной зоны.

Ключевые слова: Солнце, дифференциальное вращение, активные области.

Abstract. We present the measurement results of the rotation rate of 864 active and 322 ephemeral regions observed from 2010 to 2014. We confirmed previous conclusions drawn by other authors regarding slower rotation of larger active regions. Our analysis of recurrent and unipolar active regions revealed no changes in the rotation rate. We presume that the rotation rate remains constant during the evolution of an active region. This inference is not in agreement with previous results. We suppose that our conclusions may provide constraints for the understanding of physical mechanisms of generation and evolution of the magnetic field within the bulk of the convection zone.

Keywords: Sun, differential rotation, active regions.

ВВЕДЕНИЕ

Дифференциальное вращение Солнца было впервые обнаружено 400 лет назад по движению групп пятен на зарисовках Галилео Галилея [Paterno, 2010]. Скорость вращения на поверхности Солнца максимальна на экваторе и уменьшается при приближении к полюсам. К настоящему времени существует три основных метода измерения дифференциального вращения [Beck, 1999]: метод трассеров, который подразумевает отслеживание положений выбранных структур на поверхности и измерение их скорости движения; спектроскопический метод, основанный на измерении доплеровских смещений спектральных линий в плазме на поверхности Солнца; к третьему можно отнести методы гелиосейсмологии. В отличие от первых методов гелиосейсмология позволяет оценить скорость вращения не только на поверхности, но и по всей глубине конвективной зоны. Наименьшая скорость вращения плазмы определяется на глубине $0.72R_{\odot}$. При уменьшении глубины скорость вращения постепенно увеличивается, достигая максимума на глубине $0.95R_{\odot}$, затем снова уменьшается при приближении к поверхности.

Интересно, что скорость вращения трассеров заметно превосходит скорость вращения плазмы на поверхности Солнца [Howard, Harvey, 1970]. Поскольку трассеры так или иначе связаны с магнитными структурами, указанное несоответствие часто объясняют в рамках гипотезы укоренения магнитных жгутов (напр. [Hirmath, 2002]). Предположительно, корни магнитных жгутов формируются в некотором слое конвективной зоны, скорость вращения которого превосходит скорость вращения на поверхности. Более быстрое вращение корней приводит к более быстрому вращению всей магнитной

структуры по сравнению со скоростью плазмы в приповерхностных слоях.

Группы пятен, пожалуй, наиболее часто используются в качестве трассеров для изучения дифференциального вращения. Сами группы показывают ряд особенностей. Установлено, что более крупные обычно вращаются медленнее небольших (напр., [Howard et al., 1984]). Наблюдается также зависимость скорости вращения группы от ее возраста. Однако в этом вопросе пока нет определенного согласия. Ряд исследователей установили, что группы пятен замедляются со временем (напр. [Zappala, Zuccarello, 1991]). Некоторые работы, наоборот, выявляют ускорение групп пятен во время эволюции.

В методе измерения скорости вращения групп пятен существует серьезный недостаток: из-за более быстрой диссипации хвостовой части центр тяжести группы смещается в сторону ведущего пятна [Petrovay, 1993; Kutsenko, Abramenko, 2021]. Такое смещение приводит к искусственному ускорению вращения. Затем при полном распаде хвостовой части, центр тяжести начинает вращаться со скоростью ведущей части группы, что может трактоваться как замедление.

В отличие от изображений в белом свете, магнитограммы позволяют более корректно определить геометрию и положение активной области. В данной работе мы описываем результаты измерений скоростей вращения активных и эфемерных областей, выполненных по картам магнитных полей.

ДААННЫЕ И МЕТОДЫ

Метод кольца станций удобен для исследований вариаций КЛ, он прост и эффективен. Это практически «безмодельный» подход, использующий высокоши-

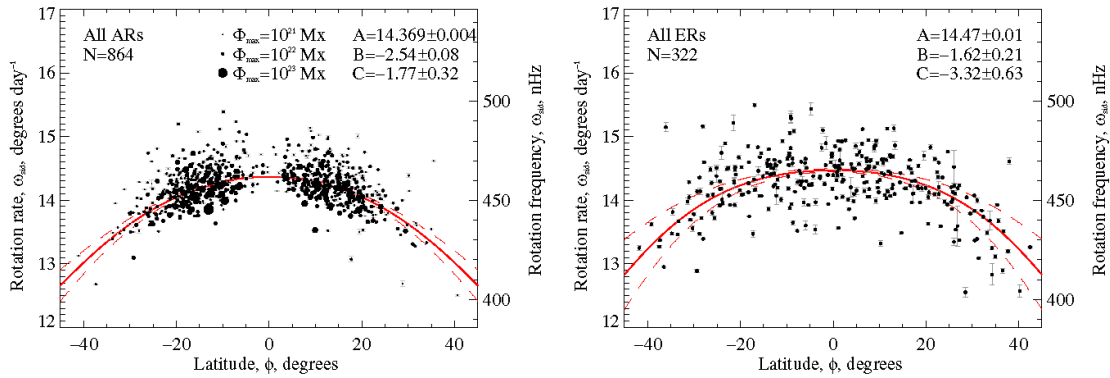


Рис. 1. Зависимость от широты скорости вращения активных (слева) и эфемерных (справа) областей. Размер кружка пропорционален максимальному магнитному потоку трассера. Красная кривая — наилучшая аппроксимация распределений выражением (1). Значения констант в градусах/день приведены на панелях

ротные мониторы в достаточно узком кольце широт. Различия вариаций КЛ, регистрируемых этими мониторами, определяются различиями их долготы, и это позволяет просто и наглядно представлять долготную зависимость вариаций. Сравнивая вариации КЛ на НМ, можно видеть, как со временем меняется их долготное распределение. Также этот метод можно применять для выделения предвышлений и предпонижений интенсивности КЛ, предшествующих многим форбуш-эффектам [Munakata et al., 2005; Parailiou et al., 2012a, б].

Как было указано выше, не все станции НМ подходят для использования в методе кольца станций. В общем виде, ряд ограничений для выбора станций следующий: жесткость геомагнитного обреза <4 ГВ; высота станции над уровнем моря <1200 м; приемные коэффициенты для северо-южной составляющей векторной анизотропии по абсолютной величине <0.55.

При использовании метода кольца станций важным моментом является выбор базового периода, относительно которого вычисляются вариации скорости счета НМ. Для подходящей базы необходимо отсутствие форбуш-эффектов и значительных изменений анизотропии КЛ и спокойная геомагнитная обстановка.

Мы используем данные скорости счета НМ из базы данных NMDB [<http://www01.nmdb.eu>] и непосредственно с серверов станций, которые не входят в NMDB.

ДАнные И МЕТОды

Детальное описание метода представлено в работе [Kutsenko, 2021]. Для анализа мы использовали магнитограммы продольного поля полного диска Солнца, полученные инструментом HMI SDO. На магнитограмме вручную выделялись трассеры — активные и эфемерные области, которые затем автоматически распознавались на последующих и предыдущих магнитограммах. Выделенные участки карт магнитного поля сохранялись в кубы данных для каждого трассера.

Для определения центра трассера отдельно вычислялись средневзвешенные по плотности магнитного потока центры противоположных магнитных полярно-

стей. В расчете использовались только пиксели, плотность потока в которых превышала 100 Гс см^{-2} . Центр трассера определялся как геометрический центр двух противоположных магнитных полярностей. Положение центра трассера в координатах пикселей магнитограммы переводилось в гелиографические координаты — широту и долготу на поверхности Солнца.

Для измерения синодической скорости вращения проводилась линейная аппроксимация зависимости долготы трассера от времени. Сидерическая скорость вращения вычислялась путем прибавления к синодической слагаемого, учитывающего взаимное движение Солнца и Земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В общей сложности были измерены скорости вращения 864 активных и 322 эфемерных областей, наблюдавшихся с 2010 по 2017 г. Максимальный магнитный поток трассеров варьировал от $0.5 \cdot 10^{20}$ до $1.24 \cdot 10^{23}$ Мкс.

Зависимость скорости вращения от широты для проанализированных трассеров показана на рис. 1. Распределения аппроксимировались выражением [Beck, 2000]

$$\omega = A + B \sin^2 \varphi + C \sin^4 \varphi, \quad (1)$$

где ω — скорость вращения; A, B, C — константы; φ — гелиографическая широта. Значения констант приведены на рис. 1. Видно, что эфемерные области показывают больший разброс значений скорости вращения. Для активных областей наблюдается тенденция уменьшения скорости с увеличением магнитного потока: более крупные кружки в среднем расположены ниже. Эфемерные области в среднем вращаются быстрее активных, что еще раз подтверждает зависимость между максимальным магнитным потоком и скоростью вращения.

На рис. 2 показана разница между скоростью вращения трассеров и средней скоростью для данной широты. Видно, что большие активные области в среднем вращаются медленнее. Цветными кружками показаны рекуррентные активные области. Во время эволюции точки на графике смещаются влево вследствие диссипации и потери магнитного

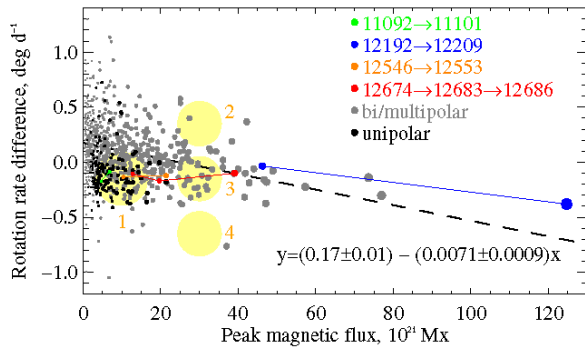


Рис. 2. Разность скорости вращения индивидуальных трассеров и средней скорости вращения для данной широты (1) в зависимости от максимального магнитного потока трассеров. Размер кружков пропорционален максимальному магнитному потоку. Черные кружки — униполярные активные области, серые — мультиполярные. Штриховая линия — наилучшая линейная аппроксимация распределения. Цветные кружки — несколько рекуррентных активных областей. Зона 1 (большой желтый круг) — место расположения большинства униполярных областей. Зоны 2–4 — места, где изначально могли располагаться униполярные активные области

потока. В то же время скорость вращения меняется слабо.

Униполярные активные в основном концентрируются в зоне 1. Предположим, что при диссипации этих областей их скорость вращения уменьшилась. В этом случае в максимуме развития эти области должны были находиться в зоне 2. В случае, если скорость вращения увеличилась, точки мигрировали из зоны 4. Видно, что зоны 2 и 4 заселены слабо, поэтому мы полагаем, что большинство униполярных областей изначально находилось в зоне 3. Следовательно, их скорость вращения практически не изменилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты измерения скоростей вращения активных и эфемерных областей показали, что существует зависимость между максимальным магнит-

ным потоком и скоростью вращения: более крупные области имеют тенденцию вращаться медленнее, что вполне согласуется с рядом более ранних работ.

Согласно нашему анализу, скорость вращения активных областей остается постоянной, что противоречит предыдущим выводам. В рамках гипотезы укоренения магнитных жгутов, можно предположить, что корни магнитных петель, формирующих активную область, остаются на одной глубине и не поднимаются к поверхности, чем ранее объяснялись вариации скорости вращения.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 18-12-00131.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Beck J.G. A comparison of differential rotation measurements. *Solar Phys.* 1999. Vol. 191. P. 47–70.
- Hiremath K.M. Change of rotation rates of sunspot groups during their lifetimes: clues to the site of origin of different flux tubes. *Astron. Astrophys.* 2002. Vol. 386. P. 674–680.
- Howard R., Gilman P.A., Gilman P.I. Rotation of the Sun measured from Mount Wilson white light images. *Astrophys. J.* 1984. Vol. 283. P. 373–384.
- Howard R., Harvey J. Spectroscopic determinations of solar rotation. *Solar Phys.* 1970. Vol. 12. P. 23–51.
- Kutsenko A.S. The rotation rate of solar active and ephemeral regions – I. *MNRAS.* 2021. Vol. 500. P. 5159–5166.
- Kutsenko A.S., Abramenko V.I. Probing the rotation rate of solar active regions: the comparison of methods. *Open Astronomy.* 2021. Vol. 30. P. 219–224.
- Paterno L. The solar differential rotation: a historical view. *Astrophys. Space Sci.* 2010. Vol. 328. P. 269–277.
- Petrovay K. Area-weighting of sunspot group positions and proper motion artifacts. *Astron. Soc. Pacific.* 1993. Vol. 46. P. 123.
- Zappala R.A., Zuccarello F. Angular velocities of sunspot groups and solar photospheric rotation. *Astron. Astrophys.* 1991. Vol. 242. P. 480–487.
- URL: <http://www01.nmdb.eu>.