

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Бадалян О. Г., Обридко В. Н.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
им. Н.В. Пушкова, Троицк, Москва, Россия*

DIFFERENTIAL ROTATION OF THE SOLAR CORONAL MAGNETIC FIELD

Badalyan O.G., Obridko V.N.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

We have considered the differential rotation of the solar corona at different distances from the center of the Sun. For this purpose, we calculated the magnetic field in the corona by the standard method at all latitudes up to $\pm 75^\circ$ with a step of 5° at the distances from 1.0 to 2.45 solar radii for the period 1976–2004. For each day, we calculated the radial and tangential components and, then, found the field strength. The subsequent analysis was carried out using the periodogram technique. For each series of the field magnitudes, we calculated periodograms with a one-year window at a step of 3 solar rotations. Thus, we determined the rotation periods of the corona at 7 distances from the center of the Sun in the range of heliolatitudes under consideration. The results of calculations were used to map the distribution of the rotation periods of the corona at different distances from the center. The maps show how the rotation period changes depending on the distance and on the phase of the activity cycle. It is obtained that the rotation rate is the greatest (the smallest period) at the minimum of the cycle at small distances and the smallest at the middle of the ascending branch at large distances. The strongest differentiability of the rotation is observed at the minimum of the cycle, particularly, at small distances. As the distance increases, the differentiability decreases in all phases of the cycle. According to present-day theories, the rotation of the solar corona reflects the rotation of subphotospheric layers. Higher layers of the corona represent the rotation of deeper layers of the Sun. The results obtained in our work show that either the depth of generation of magnetic fields of various scales or the very process and amplitude of their generation change during an activity cycle.

Методика расчетов и основные результаты

Для изучения изменения дифференциального вращения солнечной короны с расстоянием от центра Солнца было рассчитано магнитное поле на 7 выбранных расстояниях от основания короны до поверхности источника. Расчет магнитного поля проводился в потенциальном приближении по стандартной методике (см. [1]). На каждый день в период с 1976 по 2004 гг. вычислялись радиальная и тангенциальная компоненты поля, по которым затем находилась напряженность (модуль) поля как корень квадратный из суммы квадратов двух компонент. Эти ряды данных использовались для последующего анализа.

Для нахождения периодов вращения короны использовался периодограммный анализ. Периодограммы рассчитывались в скользящем окне длиной 1 год, с шагом 3 оборота Солнца (81 день). Такие расчеты были выполнены на каждом выбранном расстоянии для широт от 0° до $\pm 75^\circ$ с шагом 5° . Затем в каждом окне выбирался период колебания гармонической функции с максимальной амплитудой и принимался за синодический период вращения короны на данном расстоянии и на данной широте. В результате были получены данные о периодах вращения короны в зависимости от времени, от широты и от расстояния от центра Солнца.

Для получения общего результата применим метод наложенных эпох, используя понятие фазы цикла активности. Фаза здесь определена как

$$\Phi = (\tau - m) / (|M - m|).$$

Здесь τ – текущий момент времени, M и m – моменты ближайших максимума и минимума 11-летнего цикла, соответственно. Таким образом, согласно этому определению, фаза равна 0 в минимуме каждого цикла активности и ± 1 максимуме. Фаза положительна на возрастающей ветви и отрицательна на убывающей ветви цикла. Приведение данных для нескольких циклов активности к зависимости от фазы цикла имеет смысл метода наложения эпох. При этом, конечно, предполагается, что развитие активности во всех циклах происходит по однотипному сценарию.

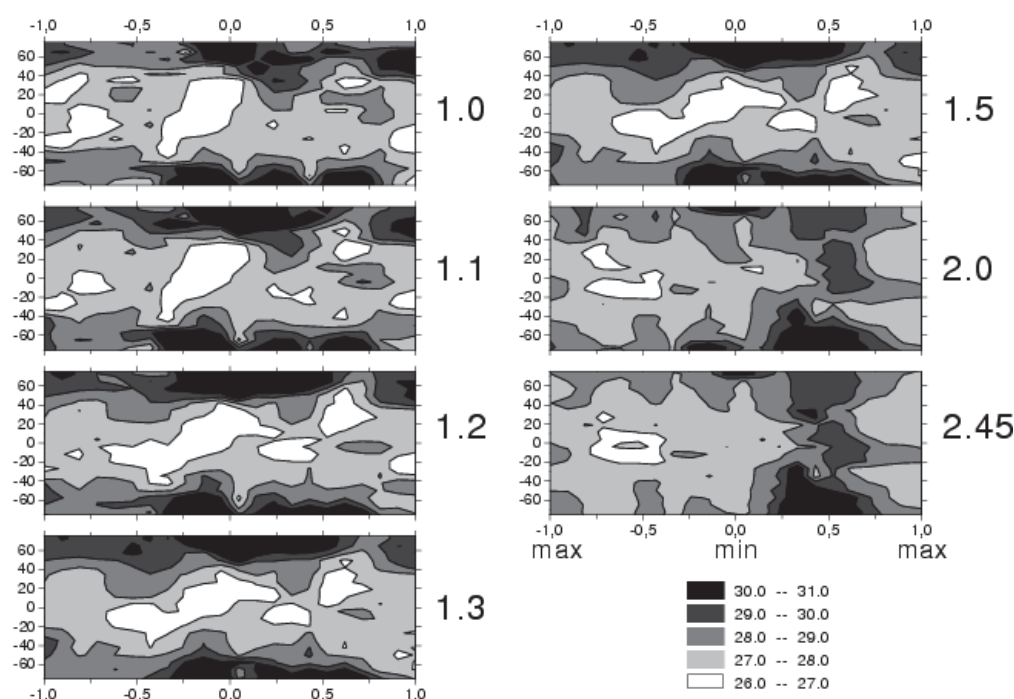


Рис. 1. Карты распределения периодов вращения солнечной короны на карте фаза цикла – широта, рассчитанные для разных расстояний от центра Солнца. Расстояния в радиусах Солнца указаны справа от каждой карты. Внизу справа дана шкала периодов.

На рис. 1 показаны карты распределения синодических периодов вращения магнитного поля короны для различных расстояний от центра

Солнца. Эти карты построены для некоторого среднего цикла активности, что позволяет сделать использование понятия фазы. На рис. 2 приведены средние распределения периодов вращения в зависимости от широты для ряда расстояний. Даны кривые для разных фаз цикла. Сплошные кривые – фаза 0 (минимум), пунктирные – фаза 0.4 (близко к середине ветви роста), точечные – фаза 0.8 (вблизи максимума). Рис. 2 показывает, что средние зависимости от широты представляют собой кривые типа параболы большей или меньшей глубины. Самая глубокая кривая на левом рисунке (расстояние 1.1 радиуса Солнца) относится к минимуму цикла активности, иначе говоря, в минимуме период вращения наиболее сильно изменяется при переходе от экватора к высоким широтам (дифференциальность вращения короны наибольшая). Из рис. 1 и 2 видно, что с высотой в короне уменьшаются период и диапазон периодов вращения. На больших высотах большую часть цикла наблюдаются периоды в диапазоне 27–28 дней. Только в середине фазы роста в течение короткого интервала времени наблюдаются преимущественно большие значения периодов.

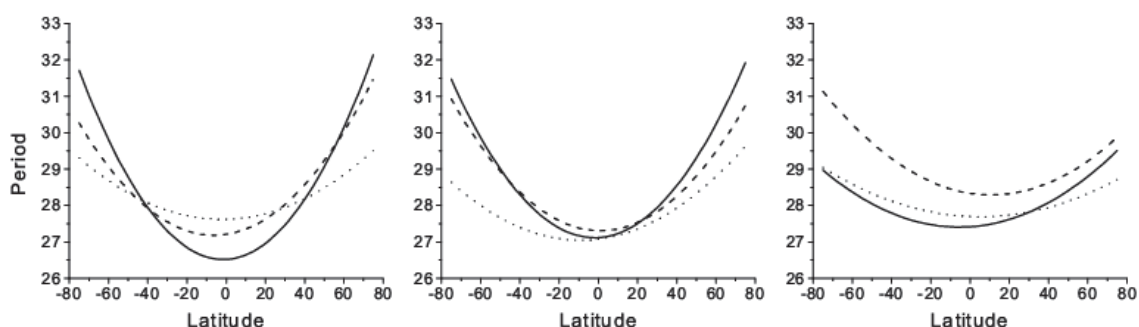


Рис. 2. Зависимости синодических периодов вращения короны для разных фаз цикла на расстояниях 1.1, 1.5 и 2 радиуса от центра Солнца (слева направо).

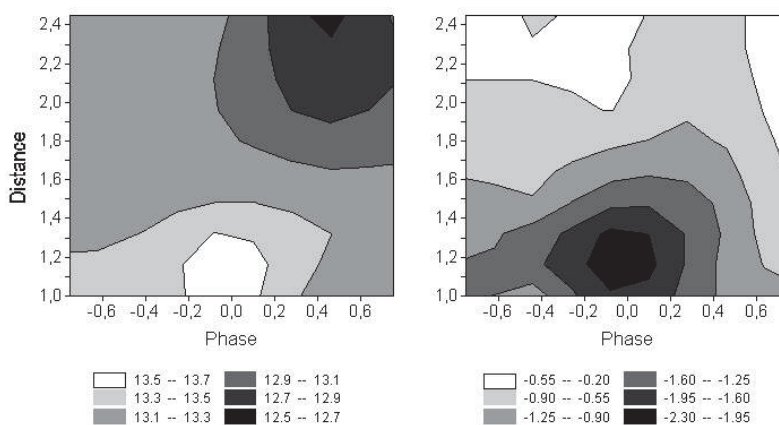


Рис. 3. Распределение коэффициентов a (слева) и b на карте фаза – расстояние.

Используем формулу Фая для дифференциального вращения

$$\omega = a + b \sin^2 \varphi.$$

Здесь ω – угловая синодическая скорость вращения, измеряемая в градусах в сутки. Коэффициент a характеризует собой угловую скорость вращения

Солнца вблизи экватора; b – изменение скорости вращения с широтой. Для b часто употребляется термин дифференциальность или коэффициент дифференциальности и для Солнца он имеет отрицательное значение. Рис. 3 показывает, что самая большая скорость вращения наблюдается на малых расстояниях вблизи минимума, а самая маленькая на больших расстояниях в конце ветви роста.

Вариация характеристик вращения магнитного поля с фазой цикла и с высотой в короне может отражать изменение характеристик слоев генерации поля от времени. Изменение с расстоянием синодических периодов вращения для разных фаз цикла можно проследить на рис. 4.

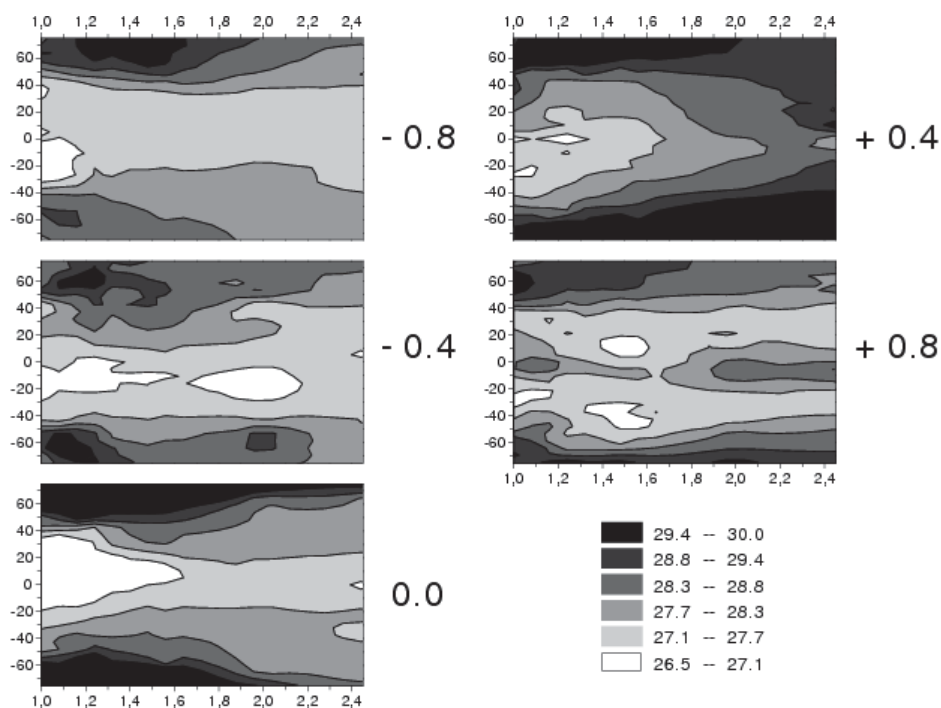


Рис. 4. Зависимость периодов вращения короны от расстояния и от широты. Большими цифрами указана фаза цикла. Слева дана шкала синодических периодов вращения.

Заключение

Согласно современным представлениям, вращение короны отражает вращение подфотосферных слоев (см., например [2]). Более высокие слои короны отражают вращение более глубоких слоев Солнца. Полученные результаты показывают, что в течение цикла или меняется глубина слоев генерации магнитных полей соответствующих масштабов, или изменяется сам процесс и амплитуда их генерации.

Работа поддержана РФФИ, проект 14-02-00308.

Литература

1. Иванов К.Г., Харшиладзе А.П. // Геомагн. Аэрон. 1994, т. 34, с. 22.
2. Kichatinov // 2013. Proc. IAU Symp. 294, 399.