

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ СОЛНЦА,  
ДАННЫЕ ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИИ  
И ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ЯЧЕЕК СУПЕРКОНВЕКЦИИ**

**Живанович И., Соловьев А.А., Ефремов В.И.**

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

**DIFFERENTIAL ROTATION OF THE SUN,  
DATA OF HELIOSEISMOLOGY  
AND ESTIMATION OF DEPTH OF SUPERGRANULATION CELLS**

**Zhivanovich I., Solov'ev A.A., Efremov V.I.**

*Central astronomical observatory of RAS (Pulkovo), St. Petersburg, Russia*

*The «pixel-to-pixel» (p2p) artifact, arising from the discrete nature of matrix receivers, sets an independent frequency standard. This new standard can be used to study the differential rotation of the Sun by tracking the movement such tracers as small-scale solar faculae (Zhivanovich et al. 2019). The results obtained are in good agreement with ground-based observations of sunspots and line-of-sight velocities, but when they are compared with the data of modern helioseismology, they turn out to be significantly overestimated. This may be due to the fact that magnetic tracers (small sunspots, faculae) are captured by the magnetic network of supergranulation, which, due to the presence of such phenomenon as leptocline in the upper part of the convective zone, rotates faster than the uppermost, surface layers of the Sun, the angular velocity of which is recorded by helioseismological methods. Knowing the structure of leptocline, within the framework of such a model, one can estimate the depth of the lower, most dense, boundary of the superconvection cell, which determines the speed of rotation of the entire superconvection network. This assumption gives a reasonable estimate of about 30 Mm.*

**DOI: 10.31725/0552-5829-2020-101-104**

### **1. Введение**

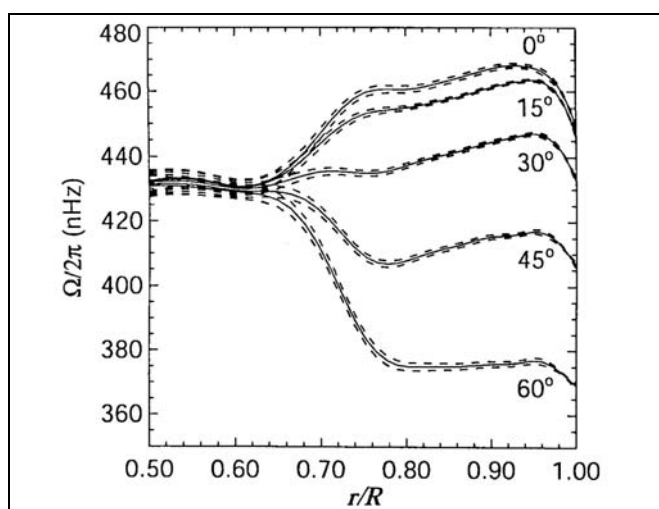
В данных, получаемых с помощью дискретного приемника (такого как CCD матрица), присутствует артефакт «pixel-to-pixel» (p2p) [1, 2]. Артефакт p2p возникает оттого, что экстремальный отсчет (напряженности, интенсивности и т. д.) перемещается с течением времени от одного пикселя к соседнему вследствие движения распределенного объекта по плоскости дискретного приемника. В течение некоторого времени экстремальный отсчет проецируется на область между двумя пикселями, в результате чего записывается отличное от экстремального значение напряженности. Однако информация продолжает считываться с матрицы приемника, что дает локальный минимум (или максимум) в исследуемом сигнале.

Артефакт p2p задает независимый стандарт частоты и за счет этого позволяет определять скорости движения различных трассеров. Например, при использовании мелкомасштабных магнитных структур на Солнце (та-

ких как поры, факелы, факельные гранулы) можно определить скорости их перемещения по диску. Факелы, как и пятна, отражают дифференциальное вращение Солнца. Таким образом, благодаря артефакту  $r^2\tau$  и применяя Фурье анализ временных рядов с экстремальным значением напряженности магнитного поля в различных факелах, распределенных по широтным зонам, можно построить кривую дифференциального вращения Солнца.

## 2. Данные гелиосейсмологии

Такая кривая, построенная по мелкомасштабным магнитным структурам, была получена нами в работах [4, 5]. В них показано, что найденная кривая неплохо согласуется с наземными наблюдениями по пятнам и лучевым скоростям. В то же время, сравнивая полученные скорости дифференциального вращения с данными, которые дает гелиосейсмология (рис. 1) [3], мы получили, что скорости вращения, измеренные нами по мелкомасштабным магнитным трассерам с помощью частотного артефакта  $r^2\tau$ , оказались завышены. Это показано на рис. 2.



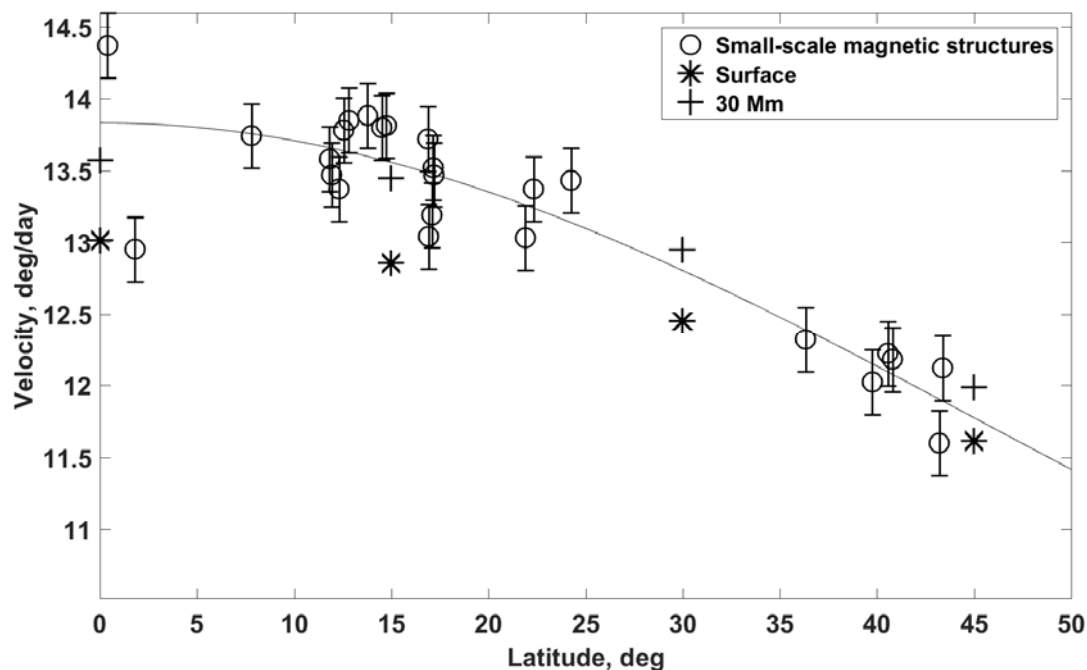
**Рис. 1.** Дифференциальное вращение Солнца по данным гелиосейсмологии [3], представленное в виде зависимости частоты вращения от глубины. Несколькими линиями показаны кривые для различных широт ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$  соответственно сверху вниз). По горизонтальной оси отложена относительная глубина (в долях радиуса Солнца). Рисунок взят из работы [3].

Как видно по рис. 1, дифференциальное вращение солнечных слоев в конвективной зоне проявляется, начиная от тахоклина, с глубины порядка 0.68 радиуса Солнца, затем скорости вращения плавно меняются с глубиной, и недалеко от поверхности резко падают с расстоянием от центра. Этот слой принято называть лептоклином. Благодаря его наличию в верхней части конвективной зоны Солнца, конвективные ячейки супергрануляции вращаются быстрее, чем поверхностные слои.

Мелкомасштабные факельные магнитные структуры на Солнце, очевидно, судя по их динамике, захвачены магнитной сеткой супергрануляции, соответственно с этим, и дифференциальное вращение таких структур будет совпадать с дифференциальным вращением сетки супергрануляции. Для суперконвективной ячейки скорость её углового перемещения по диску Солнца будет, видимо, определяться движением её нижней, наиболее

плотной, границы, т.е. эта ячейка в целом будет двигаться по диску Солнца быстрее, чем самые верхние, поверхностные слои фотосферы.

Зная структуру лептоклина, т.е. распределение угловых скоростей вращения Солнца в зависимости от глубины и широты в верхней части конвективной зоны (рис. 1), и сравнивая её со скоростями вращения, полученным нами по поверхностным мелкомасштабным магнитным трассерам (факелам, факельным гранулам), (рис. 2), мы можем оценить глубину залегания нижней, наиболее плотной, границы ячейки суперконвекции (рис. 3).

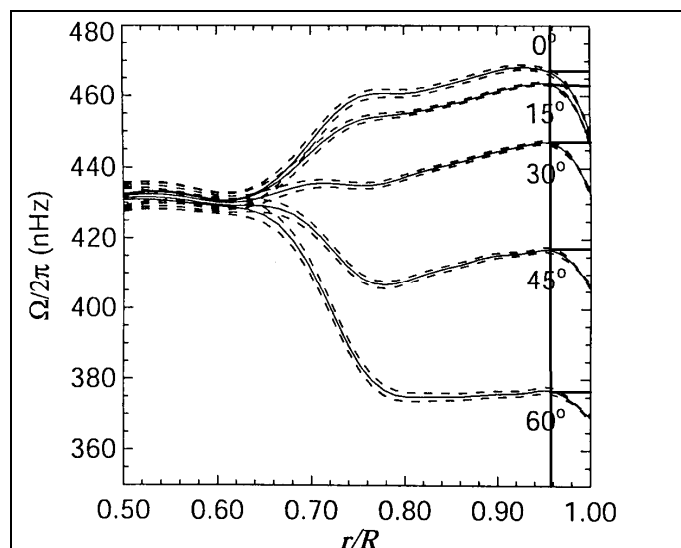


**Рис. 2.** Кривая дифференциального вращения Солнца, полученная для мелкомасштабных факельных структур с помощью артефакта p2r по данным SDO/HMI (кружки с ба-ром). Линией показана аппроксимация наблюдений в виде кривой [4, 5]:

$$V = A - B \sin^2 \theta - C \sin^4 \theta - 0.9865 \frac{\text{deg}}{\text{day}}$$

«Звездочки» – точки с угловыми скоростями вращения, снятыми с гелиосейсмологической кривой для поверхности Солнца на рис. 1. Значком «плюс» показаны угловые скорости вращения на глубине 30 Мм, которые дает лептоклин (см. ниже рис. 3).

На рис. 3 показано, как для глубины около 30 Мм с кривой дифференциального вращения снимаются скорости дифференциального вращения Солнца, которые соответствуют этой глубине. На рис. 2 они помечены крестиками. Как видно, данные, которые дает нам гелиосейсмология, хорошо соотносятся с полученными в работах [4, 5] скоростями дифференциального вращения мелкомасштабных магнитных структур, которые принадлежат к магнитной сетке супергрануляции.



**Рис. 3.** Процедура снятия данных, соответствующих угловой скорости вращения Солнца на глубине 30 Мм (отмечена вертикальной линией, горизонтальными ответвлениями от этой линии показаны соответствующие частоты дифференциального вращения на каждой широте).

### 3. Выводы

Мелкомасштабные магнитные трассеры (малые солнечные пятна, факелы, факельные гранулы), использованные нами в работах [4, 5] для определения дифференциального вращения Солнца, представляют из себя чрезвычайно динамичные, подвижные структуры, подверженные постоянным возмущениям со стороны грануляции и супергрануляции. Это обстоятельство дает нам все основания полагать, что наши мелкомасштабные магнитные трассеры эффективно захватываются сеткой супергрануляции, которая, благодаря наличию лептоклина в верхней части конвективной зоны, вращается несколько быстрее, чем самые верхние, поверхностные слои Солнца. Поэтому сравнивать полученные нами по этим трассерам скорости дифференциального вращения необходимо с угловыми скоростями на глубине залегания ячейки суперконвекции. В рамках таких представлений, зная структуру лептоклина по данным гелиосейсмологии, можно оценить глубину нижней, наиболее плотной, границы ячейки суперконвекции. Получается, что эта глубина составляет около 30 Мм, что практически совпадает с характерным диаметром ячейки. Поэтому такая оценка представляется нам вполне разумной.

### Литература

1. Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A. // Sol. Phys., 2010, **267**, p.279.
2. Efremov V.I., Solov'ev A.A. et al. // Astrophys. & Space Sci., 2018, **363**, p.61.
3. Hove R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F. et al. // Science, 2000, **287**, p.2456.
4. Zhivanovich I., Riehoкainen A. et al. // Solar-Terrest. Phys., 2019, **5**, p.3-10.
5. Живанович И., Риехокайнен А. и др. / Труды всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2016», 2016, с. 109-112.