

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР И СПЕЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА

QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS OF SMALL-SCALE MAGNETIC STRUCTURES AND A SPECIFIC METHOD FOR MEASURING THE DIFFERENTIAL ROTATION OF THE SUN

И. Живанович

Главная астрономическая обсерватория РАН,
Пулково, Санкт-Петербург, Россия, ivanzhiv@live.com
Астрономический институт им. В.В. Соболева,
Санкт-Петербургский государственный университет,
Петергоф, Россия, ivanzhiv@live.com

А. Риехокайнен

Университет Турку, Обсерватория Туорла,
Каарина, Финляндия, alerie@utu.fi

А.А. Соловьев

Главная астрономическая обсерватория РАН,
Пулково, Санкт-Петербург, Россия, solov.a.a@mail.ru
Калмыцкий государственный университет,
Элиста, solov.a.a@mail.ru

В.И. Ефремов

Главная астрономическая обсерватория РАН,
Пулково, Санкт-Петербург, Россия, slavae_sun@mail.ru

I. Zhivanovich

Central Astronomical Observatory RAS at Pulkovo,
Saint Petersburg, Russia, ivanzhiv@live.com
V.V. Sobolev Astronomical Institute,
Saint Petersburg State University,
Peterhof, Russia, ivanzhiv@live.com

A. Riehoainen

University of Turku, Tuorla Observatory,
Kaarina, Finland, alerie@utu.fi

A.A. Solov'ev

Central Astronomical Observatory RAS at Pulkovo,
Saint Petersburg, Russia, solov.a.a@mail.ru
Kalmyk State University,
Elista, Russia, solov.a.a@mail.ru

V.I. Efremov

Central Astronomical Observatory RAS at Pulkovo,
Saint Petersburg, Russia, slavae_sun@mail.ru

Аннотация. Для изучения дифференциального вращения Солнца с помощью эффекта p2p на основе движений мелкомасштабных магнитных структур в фотосфере были использованы данные SDO/HMI с угловым разрешением 1". Показано, что стабильный p2p-артефакт, присущий данным ПЗС-матрицы SDO/HMI, может быть эффективным средством для измерения скорости различных трассеров на Солнце. В частности, в сочетании с анализом Фурье он позволяет исследовать дифференциальное вращение Солнца на различных широтах. Скорости дифференциального вращения, полученные по магнитограммам SDO/HMI с помощью данного метода, хорошо совпадают с полученными ранее из наземных наблюдений.

Ключевые слова: физика Солнца, мелкомасштабные магнитные структуры, дифференциальное вращение Солнца.

Abstract. The SDO/HMI data with an angular resolution of 1 arcsec have been used to explore the differential rotation on the Sun, using an original "p2p" effect on the basis of the movement of small-scale magnetic structures in the photosphere of the Sun. It is shown that a stable p2p artifact inherent in the SDO/HMI data can be an effective tool for measuring the speed of various tracers on the Sun. In particular, in combination with the Fourier analysis, it allows us to investigate the differential rotation of the Sun at various latitudes. The differential rotation curve obtained from the SDO/HMI magnetograms by this method is in good agreement with the curves obtained earlier from ground-based observations.

Keywords: solar physics, small-scale magnetic structures, differential rotation of the Sun.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование квазипериодических колебаний различных структур на Солнце в активных областях и вне их играет важную роль в изучении физических параметров солнечной атмосферы [Foullon et al., 2009; Yuan et al., 2011]. Хорошо известны осцилляции Солнца с периодом 3–10 мин, которые можно интерпретировать как распространение МГД-волн вдоль магнитных трубок в активных солнечных образованиях [Thomas et al., 1984; Chelpanov et al., 2015, 2016]. Кроме того, колебания с периодами от 20–40 мин до десятков часов были обнаружены

в спектрах мощности солнечных магнитных элементов: солнечных пятен, волокон и факелов [Efremov et al., 2010; Solov'ev, Kirichek, 2014; Smirnova et al., 2013; Kolotkov et al., 2017].

Регулярные периодические процессы, наблюдаемые на Солнце, дают нам надежный эталон времени. Регулярный процесс — это не только гармонические колебания, но и любой процесс, в котором спектр фундаментальной моды четко определен и устойчив. Один из таких процессов, называемый эффектом p2p, имеет место во всех наблюдениях, когда используются дискретные детекторы, например ПЗС. В частности, этот эффект проявляется в наблюдатель-

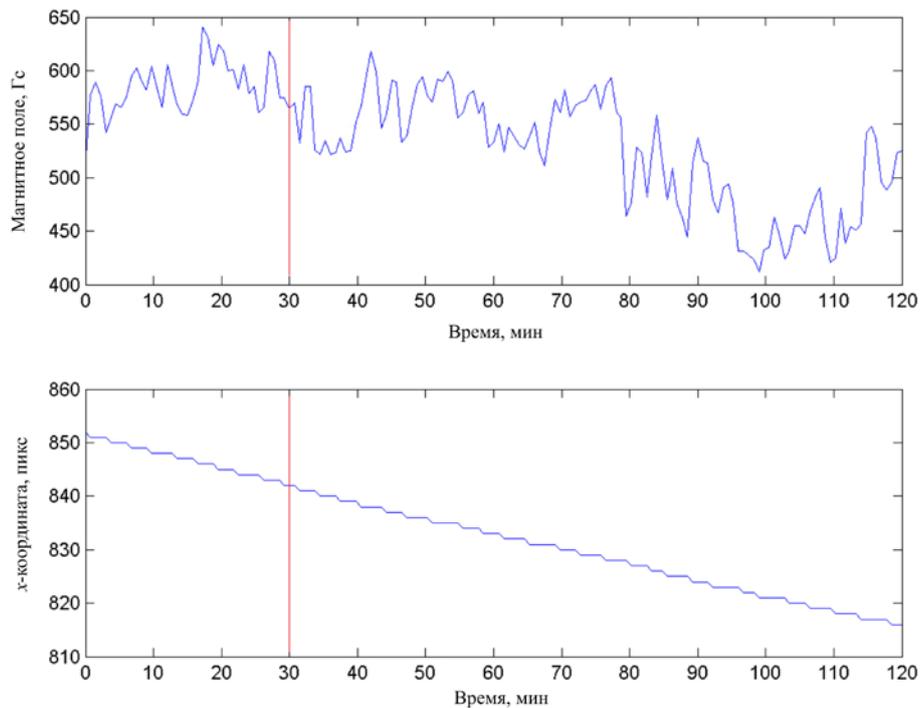


Рис. 1. Временные ряды значения экстремального магнитного поля (верхняя панель) и временные ряды x-координаты этой точки (нижняя панель). Вертикальная черта отделяет фрагмент, более крупно показанный на рис. 2

ных данных SDO/HMI (SDO — Solar Dynamics Observatory, HMI — Helioseismic and Magnetic Imager) [Scherrer et al., 2012]. Это паразитный эффект, т. е. артефакт, но он имеет стабильный характер, и поэтому мы можем использовать этот артефакт как эффективный инструмент для изучения различных временных процессов на Солнце. В частности, в данной работе артефакт p2p используется в качестве метода определения скорости трассеров на поверхности Солнца.

1. АРТЕФАКТ p2p

Артефакт p2p проявляется следующим образом: экстремальный отсчет (интенсивность, магнитное поле и т. д.) постепенно перемещается от одного пикселя к соседнему и в течение некоторого времени проецируется на границу между двумя пикселями. В пикселе, в котором недавно фиксировалось максимальное значение интенсивности, записывается меньшее значение интенсивности. Однако информация по-прежнему считывается из этого пикселя и дает локальный минимум на уровне сигнала. Затем экстремальный отсчет переходит к следующему пикселю, и максимальное значение восстанавливается. Процесс регулярного перехода экстремальной точки распределенного объекта от одного пикселя дискретной матрицы к другому дает ложную периодичность в сигнале. Этот эффект назван p2p (pixel-to-pixel) [Efremov et al., 2010, 2018]. Очевидно, что на «непрерывных» приемниках (например, на фотографических пластинах) такой артефакт появиться не может.

Более детально эффект p2p описан в работе [Efremov et al., 2018]. Обычно размер области с экстремальным отсчетом магнитного поля сопоставим с размером пикселя или меньше него. На рис. 1 на

верхней панели представлен типичный временной ряд, полученный для напряженности магнитного поля. На нижней панели показан временной ряд горизонтальной координаты точки с экстремальным значением магнитного поля на матрице.

На нижней панели рис. 1 (см. также рис. 2) четко видна структура типа лестницы. Кажется, что экстремальное значение не смещается вдоль матрицы (фактически происходит движение этой точки, но его не видно из-за конечного размера пикселя матрицы). Затем происходит скачкообразный переход экстремального значения к следующему пикселю. Важно отметить, что ширина ступеньки соответствует периоду артефакта p2p.

На рис. 2 более крупно представлены фрагменты временных рядов с рис. 1 для лучшей визуализации p2p-эффекта. Видно, что средний период временных вариаций магнитного поля (верхняя панель рис. 2) соответствует средней ширине ступеней (нижняя панель рис. 2).

Разумеется, эффект p2p обнаруживается не только для горизонтальной координаты. Он проявляется для обеих координат, как показано на рис. 3. Горизонтальное направление матрицы SDO/HMI соответствует широте, вертикальное — долготе.

Как видно на рис. 3, скорость перемещения артефакта p2p по вертикальной координате (меридиональная составляющая) составляет 1.5 пикселя в час. Для горизонтальной составляющей (когда объект движется вдоль круга широт) скорость составляет около 20 пикселей в час. Таким образом, скорость движения p2p-артефакта по меридиану (при фиксированной долготе) значительно меньше скорости движения по определенной широте. В силу этого в данной работе мы будем использовать только горизонтальную составляющую артефакта p2p.

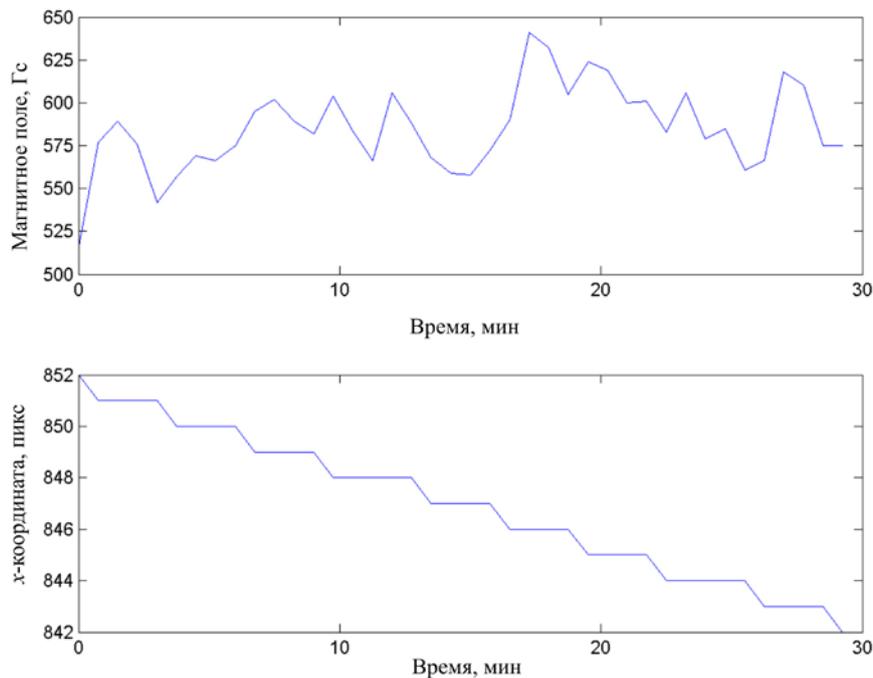


Рис. 2. Фрагменты временных рядов экстремальных значений магнитного поля (верхняя панель) и x-координаты этой точки (нижняя панель)

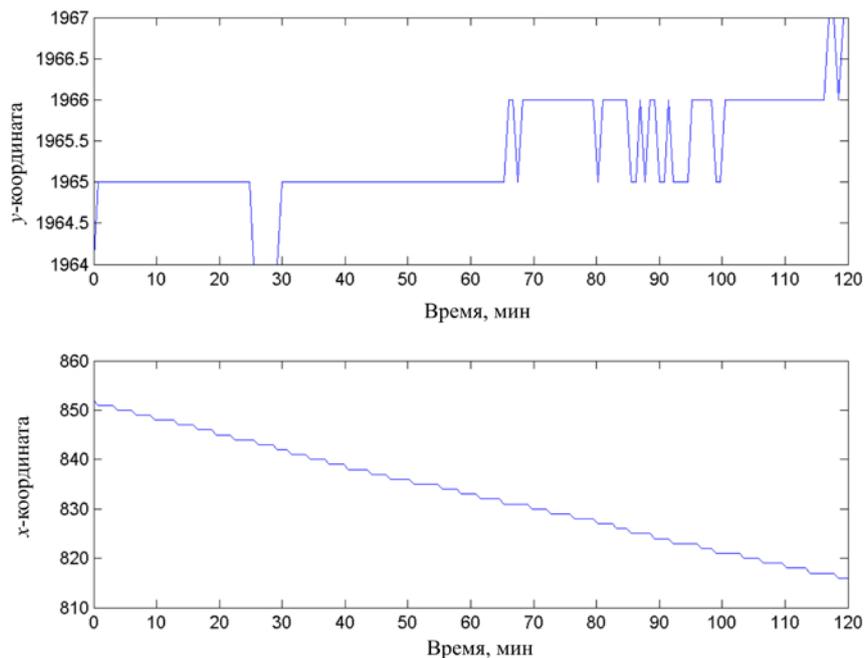


Рис. 3. Оба направления p2r-эффекта: верхняя панель — долготная составляющая, нижняя панель — широтная составляющая

2. ПЕРИОД АРТЕФАКТА p2r И КРИВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА

2.1. Наблюдательные данные

В этой работе мы использовали данные SDO/HMI с пространственным разрешением 1". Это дает нам возможность работать с мелкомасштабными (угловые размеры 5–10") магнитными структурами (см. рис. 4). Выбирались такие мелкомасштабные

магнитные структуры, в которых магнитное поле находилось в диапазоне 200–1000 Гс. Эти структуры использовались в качестве маркеров при построении кривой дифференциального вращения Солнца. Мы использовали два временных ряда, полученных по данным SDO/HMI за 27.06.2015 в следующих интервалах времени:

- 14:00:00–16:00:00 UT;
- 10:00:00–12:00:00 UT.

Кроме этого, были использованы три единичных стабильных крупных солнечных пятна:

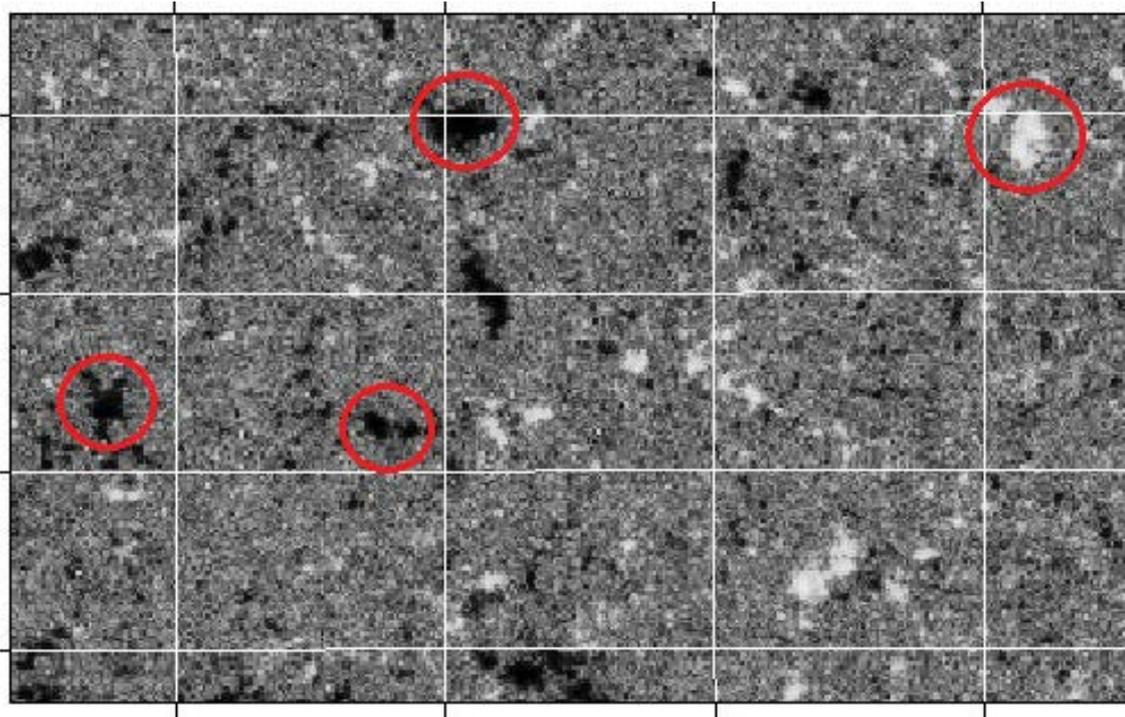


Рис. 4. Фрагмент магнитограммы SDO/HMI с мелкомасштабными магнитными структурами (отмечены красными кругами)

- 26.06.2013, 05:12:00–07:12:00 UT, NOAA 11777;
- 18.01.2013, 14:36:00–16:36:00 UT, NOAA 11658;
- 05.08.2013, 21:48:00–23:48:00 UT, NOAA 11809.

Все данные SDO/HMI брались с временным разрешением 45 с. Это связано с тем, что период р2р-артефакта составляет 3–7 мин. Таким образом, временной шаг 45 с позволяет надежно выявить р2р-артефакт. Заметим, что, помимо временного разрешения 45 с, есть и другие временные каденции (12 мин и 1 ч), но при их использовании артефакт р2р уже нельзя выявить, поскольку его период становится меньше шага дискретизации временного ряда.

Точность измерений напряженности магнитного поля для HMI/SDO составляет 10 Гс. В то же время дисперсия вариаций магнитного поля на рис. 1, 2 составляет менее 10 Гс. Как уже говорилось выше, рассматриваемые в данной работе вариации магнитного поля, вызванные артефактом р2р, фактически не являются изменением поля в магнитной структуре, а связаны с дискретностью приемника излучения (в случае с данными SDO/HMI — ПЗС-матрицы). Таким образом, хотя точность измерений напряженности магнитного поля и дисперсия вариаций магнитного поля оказываются близки, стабильное поведение периода артефакта р2р позволяет отделить его от шумовых колебаний. Правда, наблюдались случаи, когда ширина ступеньки была нестабильной и менялась в ходе наблюдений. В этих случаях шумовая компонента заглушала артефакт р2р. Такие нестабильные объекты не включались нами в исследование. Основным критерием выбора мелкомасштабных структур в данной работе является именно стабильность ширины ступенек, наблюдаемых во временном ряду x -координаты экстремальной точки (нижние панели рис. 1, 2).

Следует отметить, что в оба временных ряда данных мы включали только различные мелкомасштабные магнитные структуры, т. е. мы не использовали дважды объекты, которые попадали в исследуемые области в течение указанных промежутков времени.

2.2. Построение временных рядов точек экстремальных значений магнитного поля

Чтобы построить временные ряды точек экстремальных значений, из всего солнечного диска мы вырезали определенную область, расположенную вблизи центрального меридиана (10° – 15° от центрального меридиана) и около видимого экватора (удаление не более 60°). Данная область на матрице делилась на полоски шириной 20 пикселей. В каждой из этих полосок выбиралась наиболее стабильная и сильная мелкомасштабная магнитная структура. Для всех полос, полученных для рассмотренных магнитограмм, строились временные ряды экстремальных значений магнитного поля и вертикальные и горизонтальные координаты точки с экстремальным значением на матрице. Координаты использовались как маркер устойчивости положения выбранной мелкомасштабной структуры. При устойчивом положении магнитной структуры скачки вертикальной координаты экстремальной точки во время наблюдений не должны превышать 1–2 пикселей. Горизонтальная координата четко отражает ступенчатую структуру. Для всех исследуемых объектов выбирались временные интервалы, где они находились в устойчивой позиции. Однако в отдельных случаях магнитные элементы оказывались неустойчивыми, т. е. колебания координат экстремальной точки превышали 5–10 или более пикселей.

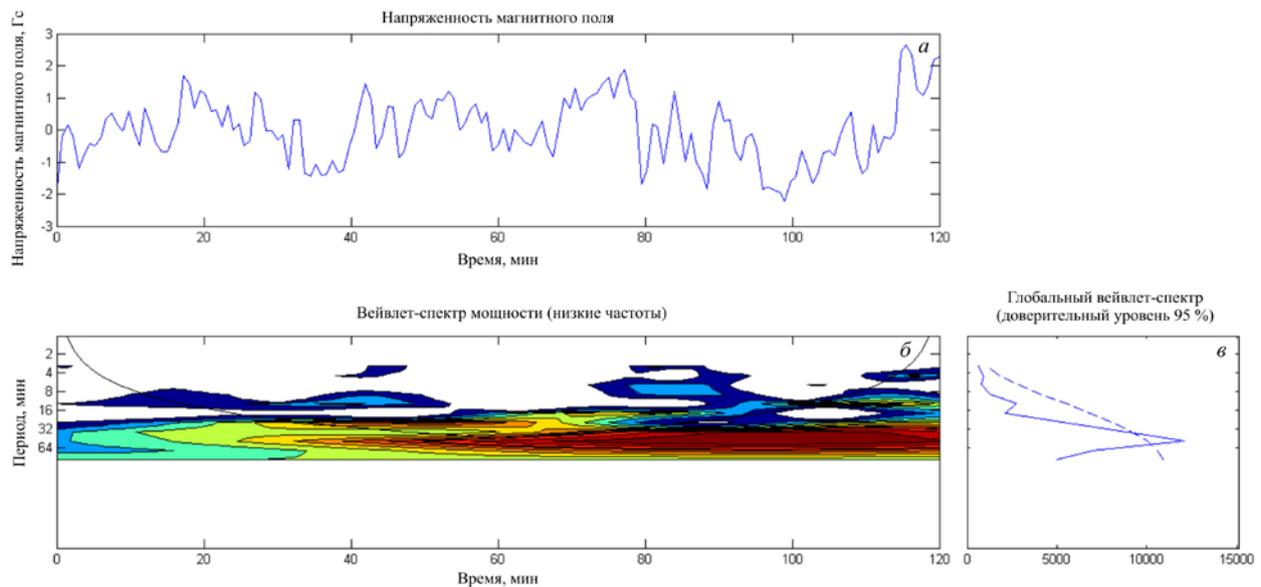


Рис. 5. Временной ряд экстремальных значений напряженности магнитного поля (а) в мелкомасштабной магнитной структуре, расположенной на широте 9.3°, и его вейвлет-спектры (б, в). Штриховой линией (в) отмечен уровень значимости

Причины такой нестабильности могут быть разными: диссипация мелкомасштабной магнитной структуры, возникновение в выбранной области нового магнитного потока и т. д. Такие магнитные структуры исключались нами из рассмотрения.

В конечном счете нами были отобраны и использованы 120 различных стабильных мелкомасштабных магнитных структур, для которых длины временных рядов варьировали в диапазоне от 1 до 2 ч.

2.3. Период p2r и другие периоды в диапазоне от 3–5 до 30–40 мин

Для каждой выбранной мелкомасштабной магнитной структуры находились типичные периоды артефакта p2r из временного ряда координаты x путем усреднения ширины ступенек. Такое усреднение необходимо, потому что, несмотря на стабильный характер магнитного элемента, небольшие изменения положения экстремальной точки структуры магнитного поля все же наблюдались из-за процессов в окружающем пространстве, таких, в частности, как конвективное движение грануляции. Во временных рядах координаты x эти небольшие флуктуации будут приводить к изменению ширины ступенек (удлинению или укорачиванию).

На следующем этапе необходимо получить все наблюдаемые периоды колебаний магнитного поля, содержащиеся в наблюдаемых временных рядах экстремальных значений напряженности магнитного поля. К этим временным рядам были применены вейвлет Морле 5-го порядка и преобразование Фурье. На рис. 5 показан типичный вейвлет-спектр, а на рис. 6 — фурье-спектр для магнитной структуры, расположенной на широте 9.3°. Как показывает рис. 5, в, выявленный вейвлет-анализом меньший период 12.4 мин находится ниже уровня значимости, а больший период 49.6 мин — выше уровня значимости. На рис. 6 мы видим следующие периоды: 3.4, 4.1, 4.8, 6, 8.6, 20 мин.

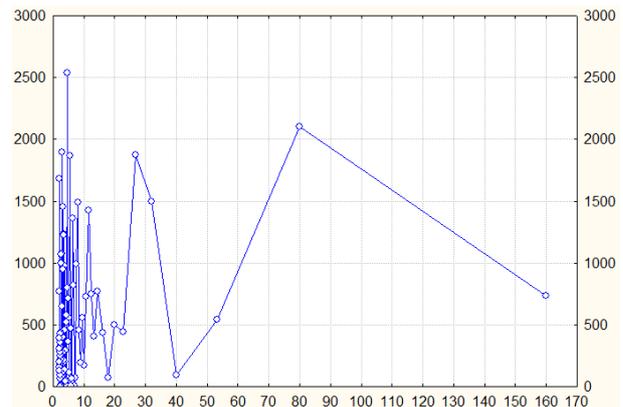


Рис. 6. Спектр Фурье временного ряда экстремальных значений напряженности магнитного поля в мелкомасштабной магнитной структуре, расположенной на широте 9.3°. На оси X отмечено число кадров, и для того чтобы найти период, это значение должно быть умножено на 0.75

Можно видеть (рис. 5, 6), что спектр Фурье имеет лучшее разрешение по частоте, чем вейвлет-спектр.

Поскольку, используя вейвлет-преобразование, нельзя различить периоды артефакта p2r и периоды 3–10-минутных колебаний, вызванных распространением МГД-волн вдоль магнитных силовых линий, для выявления всех периодов для каждого рассматриваемого объекта применялся метод Фурье.

Обнаруженные периоды можно разделить на три группы: 1) периоды артефакта p2r (2–8 мин); 2) периоды, обусловленные распространением МГД-волн (3–10 мин); 3) периоды низкочастотных колебаний (10–40 мин), физическая природа которых может объясняться как воздействием грануляции [Thomas et al., 1984], так и проявлением собственных колебаний магнитных структур как целостных объектов [Efremov et al., 2010, 2018; Smirnova et al., 2013; Solov'ev, Kirichek, 2014].

Данные SDO/HMI имеют пространственное разрешение 1", а разрешение ПЗС-матрицы составляет

4096×4096 пикселей. Это дает нам периоды артефакта p_{2p} от 2 до 8 мин, что попадает в диапазон известных 3–5-минутных колебаний [Thomas et al., 1984]. Оба типа периодов проявляются в колебаниях магнитного поля исследуемых структур. Возникает проблема, каким образом различать эти два близких типа колебаний. К счастью, эту проблему можно решить. Дело в том, что временные ряды координаты x , в отличие от рядов магнитного поля, не содержат периоды 3–10 мин, вызванные влиянием конвекции, а содержат только периоды, порожденные эффектом p_{2p} . Благодаря этому можно найти типичные периоды p_{2p} для каждой магнитной структуры и отделить периоды артефакта p_{2p} от 3–10-минутных периодов, обусловленных распространением МГД-волн. Различие в физическом характере этих двух типов колебаний проявляется также в том, что период артефакта имеет ярко выраженную зависимость от широты объекта, а для периодов колебаний, вызванных распространением волн, выраженной широтной зависимости нет. Этот эффект хорошо иллюстрирует рис. 7. На верхней панели показано распределение периодов 3–10-минутных колебаний. Как видим, эти периоды не зависят от гелиошироты. На нижней панели приведено распределение периодов p_{2p} , имеющее выраженную зависимость от гелиошироты. Это позволяет четко различать две группы периодов.

2.4. Соотношение угловой скорости с периодом p_{2p}

Мы использовали периоды p_{2p} для оценки скорости дифференциального вращения Солнца. Эти периоды могут быть пересчитаны в единицы угловой скорости (град/день) следующим образом:

- длина круга равных широт рассчитывается по формуле $l_{\theta} = 2\pi R_0 \cos \theta$, где l_{θ} — длина круга равных широт; R_0 — радиус Солнца, км; θ — широта мелкомасштабной структуры;

- размер пикселя в километрах для любой широты вычисляется из соотношения $\frac{R_0}{sizePX} = \frac{x}{1 \text{ пикс.}}$,

где x — размер пикселя в километрах; $sizePX$ — радиус солнечного диска на матрице в пикселях (1872 пикселя);

- теперь, когда длина круга равных широт и размер одного пикселя в километрах известны, связь между масштабом поверхности Солнца в километрах и масштабом изображения на матрице в пикселях может быть получена по формуле $\beta = 360x/l_{\theta}$, где β — масштаб изображения на матрице в пикселях;

- наконец, можно найти угловую скорость Ω , град/день, с использованием периода артефакта $P_{p_{2p}}$: $\Omega = 24 [\text{ч}] \cdot 60 [\text{мин}] \cdot \beta / P_{p_{2p}}$.

2.5. Дифференциальное вращение Солнца

В нашем исследовании получены два распределения угловых скоростей: первое было рассчитано по средней ширине ступенек во временном ряду координаты x (левая верхняя панель на рис. 8); второе — по периодам, полученным из спектра Фурье (правая верхняя панель на рис. 8). Данные (с указанием ис-

точника), на основе которых получены показанные на рис. 8 распределения дифференциального вращения, а также используемые коэффициенты аппроксимации представлены в таблице. Для этих распределений аналитические аппроксимации проводились по формуле, предложенной в [Zirin, 1988]:

$$\Omega = A - B \sin^2 \theta - C \sin^4 \theta. \quad (1)$$

Здесь Ω — скорость дифференциального вращения, град/день; θ — широта; A, B, C — коэффициенты аппроксимации.

Дифференциальное вращение является регулярным и стабильным процессом, поэтому для его изучения необходимо было выбрать наиболее стабильные мелкомасштабные магнитные структуры. Из 120 изученных нами объектов были выбраны 25 наиболее стабильных мелкомасштабных магнитных структур, для которых изменение ширины ступенек во временных рядах координаты x не превышает двух пикселей. Результат представлен на рис. 8. Полученное распределение скорости дифференциального вращения и аппроксимирующее распределение симметричны относительно экватора, поэтому мы предпочли построить распределения на интервале широт от 0° до 50° .

Некоторое несоответствие между кривыми скорости дифференциального вращения в экваториальной области, по-видимому, объясняется тем, что классические кривые были получены для солнечных пятен, число которых вблизи солнечного экватора невелико.

Если построить такие распределения для всех 120 объектов, отобранных изначально, то результат будет точно таким же, но дисперсия распределений увеличится примерно в 2.7 раза. Это указывает на то, что отклонения, наблюдаемые в движениях изучаемых малых магнитных элементов, носят случайный характер и должны объясняться главным образом эффектами грануляции.

ВЫВОДЫ

1. Изначально мы пытались применить описанный выше метод изучения дифференциального вращения Солнца к солнечным пятнам. Однако оказалось, что для солнечных пятен этот метод дает низкую точность, поскольку в центральных частях пятен, где магнитное поле более или менее однородно, положение экстремального отсчета напряженности магнитного поля подвержено большим случайным флуктуациям. В результате ошибка в определении положения максимального отсчета составляет не менее нескольких пикселей. Напротив, для мелкомасштабных магнитных структур ошибка в определении положения экстремального значения обычно составляет не более 1–2 пикселей. По этой причине для исследования дифференциального вращения Солнца использовались только мелкомасштабные магнитные структуры.

2. В работе показано, что стабильный p_{2p} -артефакт, присущий данным матрицы SDO/HMI, в сочетании с фурье-анализом является эффективным средством для измерения скорости различных трассеров на Солнце.

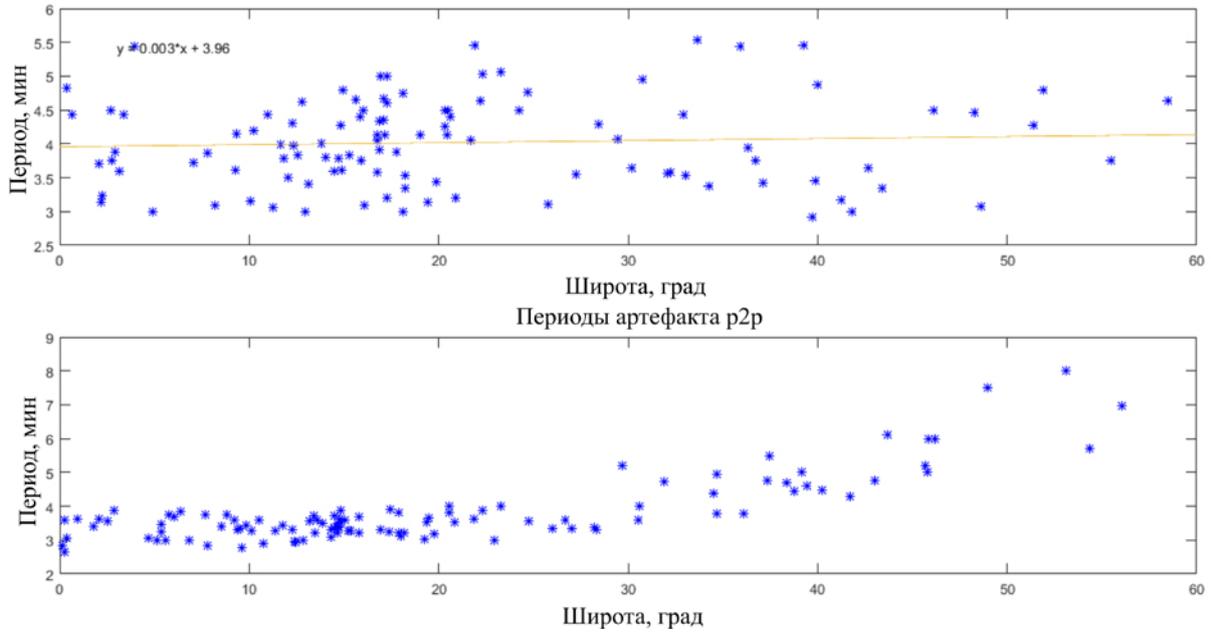


Рис. 7. Распределение периодов колебаний 3–10 мин (на верхней панели) и периодов артефакта p2r (нижняя панель) в зависимости от гелиошироты

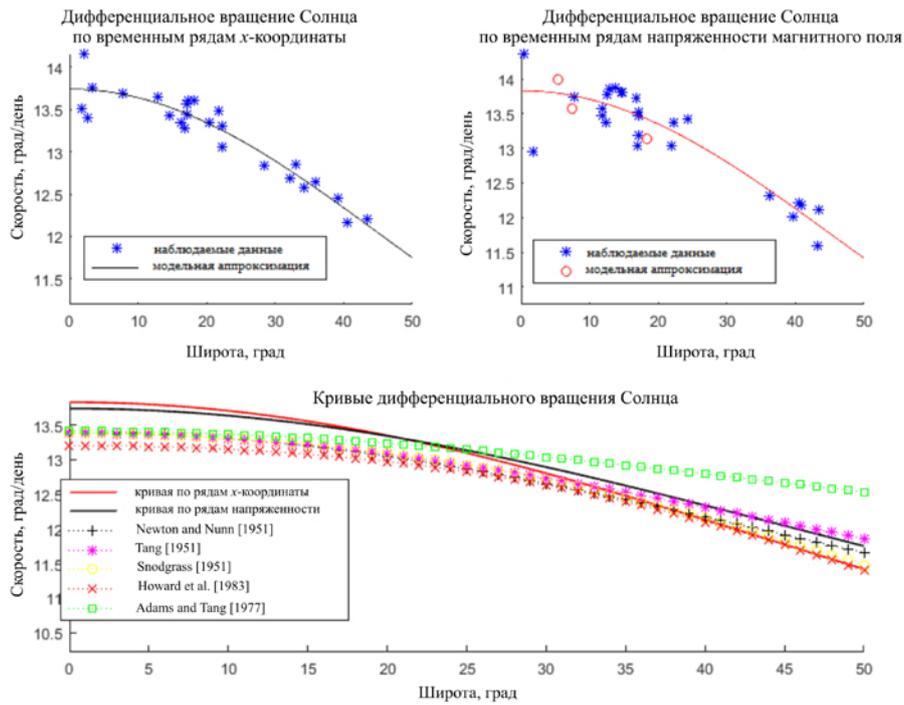


Рис. 8. Дифференциальное вращение Солнца. Кружками на правой верхней панели отмечены скорости дифференциального вращения Солнца, полученные классическим методом с использованием солнечных пятен

Данные	A	B	C	Источник
Солнечные пятна	14.38	2.96	0	Newton and Sunn [1951])
Солнечные пятна	14.37	2.60	0	Tang [1981]
Магнитное поле	14.37	2.30	1.62	Snodgrass [1983]
Спектроскопия	14.19	1.70	2.36	Howard et al. [1983]
Факелы	14.4	1.5	0	Adams, Tang [1977]
x-координата	14.7	3.39	0	данная работа
Магнитное поле	14.8	4.115	0	данная работа

3. Кривые дифференциального вращения, полученные по мелкомасштабным магнитным структурам с использованием р2р-эффекта на основе данных SDO/HMI, совпадают с кривыми, полученными ранее по наземным наблюдениям. В качестве преимущества данного метода следует отметить, что мелкомасштабные структуры равномерно распределены по солнечному диску. Еще одно преимущество данного метода состоит в том, что для получения результата можно использовать данные за 1–2 ч, а не за несколько дней наблюдений. Период артефакта р2р (3–7 мин) укладывается в данный временной интервал 10–20 раз, что позволяет говорить о его достаточно точном определении.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность команде SDO за возможность использования материалов высокого разрешения. Работа поддержана грантами РФФИ (проекты № 18-02-00168, 18-32-00555). А.А. Соловьев благодарит за поддержку Российский научный фонд (проект № 15-12-20001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adams W., Tang F. Differential rotation of short-lived solar filaments // *Solar Phys.* 1977. V. 55, iss. 2. P. 499–504. DOI: [10.1007/BF00152590](https://doi.org/10.1007/BF00152590).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. New method to measure the tracer's speed on the Sun // *Astron. Rep.* 2015. V. 59, iss. 11. P. 968–973. DOI: [10.1134/S106372915090036](https://doi.org/10.1134/S106372915090036).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Influence of the magnetic field on oscillation spectra in solar faculae // *Solar Phys.* 2016. V. 291, iss. 11. P. 3329–3338. DOI: [10.1007/s11207-016-0954-6](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0954-6).
- Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A. Investigation of long-period oscillations of sunspots with ground-based (Pulkovo) and SOHO/MDI data // *Solar Phys.* 2010. V. 267. P. 279. DOI: [10.1007/s11207-010-9651-z](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9651-z).
- Efremov V.I., Solov'ev A.A., Parfinenko L.D., et al. Long-term oscillations of sunspots and a special class of artifacts in SOHO/MDI and SDO/HMI data // *Astrophys. Space Sci.* 2018. V. 363, iss. 3, 61. DOI: [10.1007/s10509-018-3284-3](https://doi.org/10.1007/s10509-018-3284-3).
- Foullon C., Verwichte E., Nakariakov V.M. Ultra-long-period oscillations in EUV filaments near to eruption: two-wavelength correlation and seismology // *Astrophys. J.* 2009. V. 700, iss. 2. P. 1658–1665. DOI: [10.1088/0004-637X/700/2/1658](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/2/1658).
- Freij N., Dorotović I., Morton R.J., et al. On the properties of slow MHD sausage waves within small-scale photospheric magnetic structures // *Astrophys. J.* 2016. V. 817, iss. 1, 44. DOI: [10.3847/0004-637X/817/1/44](https://doi.org/10.3847/0004-637X/817/1/44).
- Howard R., Adkins J.M., Boyden J.E., et al. Solar rotation results at Mount Wilson. Part 4: Results // *Solar Phys.* 1983. V. 83, iss. 2. P. 321–338.
- Kolotkov D.Y., Smirnova V.V., Strelakova P.V., et al. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun // *Astron. Astrophys.* 2017. V. 598, L2. DOI: [10.1051/0004-6361/201629951](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629951).
- Newton H.W., Nunn M.L. The Sun's rotation derived from sunspots 1934–1944 and additional results // *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1951. V. 111, iss. 4. P. 413–421. DOI: [10.1093/mnras/111.4.413](https://doi.org/10.1093/mnras/111.4.413).
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO) // *Solar Phys.* 2012. V. 275, iss. 1–2. P. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).
- Smirnova V.V., Efremov V.I., Parfinenko L.D., et al. Artifacts of SDO/HMI data and long-period oscillations of

sunspots // *Astron. Astrophys.* 2013. V. 554, A121. DOI: [10.1051/0004-6361/201220825](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220825).

Snodgrass H.B. Magnetic rotation of the solar photosphere // *Astrophys. J.* 1983. V. 270. P. 288. DOI: [10.1086/161121](https://doi.org/10.1086/161121).

Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations // *Astrophys. Space Sci.* 2014. V. 352, iss. 1. P. 23–42. DOI: [10.1007/s10509-014-1881-3](https://doi.org/10.1007/s10509-014-1881-3).

Tang F. Rotation rate of high-latitude sunspots // *Solar Phys.* 1981. V. 69. P. 339.

Thomas J.H., Cram L.E., Nye A.H. Dynamical phenomena in sunspots. I. Observing procedures and oscillatory phenomena // *Astrophys. J.* 1984. V. 285. P. 368–385.

Yuan D., Nakariakov V.M., Chorley N., Foullon C. Leakage of long-period oscillations from the chromosphere to the corona // *Astron. Astrophys.* 2011. V. 533, A116. DOI: [10.1051/0004-6361/201116933](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116933).

Zirin H. *Astrophysics of the Sun*. Cambridge University Press, 1988. 448 p.

REFERENCES

- Adams W., Tang F. Differential rotation of short-lived solar filaments. *Solar Phys.* 1977, vol. 55, iss. 2, pp. 499–504. DOI: [10.1007/BF00152590](https://doi.org/10.1007/BF00152590).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. New method to measure the tracer's speed on the Sun. *Astron. Rep.* 2015, vol. 59, iss. 11, pp. 968–973. DOI: [10.1134/S1063772915090036](https://doi.org/10.1134/S1063772915090036).
- Chelpanov A.A., Kobanov N.I., Kolobov D.Y. Influence of the magnetic field on oscillation spectra in solar faculae. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, iss. 11, pp. 3329–3338. DOI: [10.1007/s11207-016-0954-6](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0954-6).
- Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A. Investigation of long-period oscillations of sunspots with ground-based (Pulkovo) and SOHO/MDI data. *Solar Phys.* 2010, vol. 267, pp. 279. DOI: [10.1007/s11207-010-9651-z](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9651-z).
- Efremov V.I., Solov'ev A.A., Parfinenko L.D., Riehoainen A., Kirichek E., Smirnova V.V., Varun Y.N., Bakunina I., Zhivanovich I. Long-term oscillations of sunspots and a special class of artifacts in SOHO/MDI and SDO/HMI data. *Astrophys. Space Sci.* 2018, vol. 363, iss. 3, 61. DOI: [10.1007/s10509-018-3284-3](https://doi.org/10.1007/s10509-018-3284-3).
- Foullon C., Verwichte E., Nakariakov V.M. Ultra-long-period oscillations in EUV filaments near to eruption: two-wavelength correlation and seismology. *Astrophys. J.* 2009, vol. 700, iss. 2, pp. 1658–1665. DOI: [10.1088/0004-637X/700/2/1658](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/2/1658).
- Freij N., Dorotović I., Morton R.J., Ruderman M.S., Karlovský V., Erdélyi R. On the properties of slow MHD sausage waves within small-scale photospheric magnetic structures. *Astrophys. J.* 2016, vol. 817, iss. 1, 44. DOI: [10.3847/0004-637X/817/1/44](https://doi.org/10.3847/0004-637X/817/1/44).
- Howard R., Adkins J.M., Boyden J.E., Cragg T.A., Gregory T.S., Labonte B.J. Solar rotation results at Mount Wilson. Part 4: Results. *Solar Phys.* 1983, vol. 83, iss. 2, pp. 321–338.
- Kolotkov D.Y., Smirnova V.V., Strelakova P.V., Riehoainen A., Nakariakov V.M. Long-period quasi-periodic oscillations of a small-scale magnetic structure on the Sun. *Astron. Astrophys.* 2017, vol. 598, L2. DOI: [10.1051/0004-6361/201629951](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629951).
- Newton H.W., Nunn M.L. The Sun's rotation derived from sunspots 1934–1944 and additional results. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 1951, vol. 111, iss. 4, pp. 413–421. DOI: [10.1093/mnras/111.4.413](https://doi.org/10.1093/mnras/111.4.413).
- Scherrer P.H., Schou J., Bush R.I., Kosovichev A.G., Bogart R.S., Hoeksema J.T., Liu Y., Duvall T.L. Jr., Zhao J., Title A.M., Schrijver C.J., Tarbell T.D., Tomczyk S. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, iss. 1–2, pp. 207–227. DOI: [10.1007/s11207-011-9834-2](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9834-2).

Smirnova V.V., Efremov V.I., Parfinenko L.D., Riehoikainen A., Solov'ev A.A. Artifacts of SDO/HMI data and long-period oscillations of sunspots. *Astron. Astrophys.* 2013, vol. 554, A121. DOI: [10.1051/0004-6361/201220825](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220825).

Snodgrass H.B. Magnetic rotation of the solar photosphere. *Astrophys. J.* 1983, vol. 270, pp. 288. DOI: [10.1086/161121](https://doi.org/10.1086/161121).

Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and long-term eigen oscillations. *Astrophys. Space Sci.* 2014, vol. 352, iss. 1, pp. 23–42. DOI: [10.1007/s10509-014-1881-3](https://doi.org/10.1007/s10509-014-1881-3).

Tang F. Rotation rate of high-latitude sunspots. *Solar Phys.* 1981, vol. 69, p. 339.

Thomas J.H., Cram L.E., Nye A.H. Dynamical phenomena in sunspots. I. Observing procedures and oscillatory phenomena. *Astrophys. J.* 1984, vol. 285, pp. 368–385.

Yuan D., Nakariakov V.M., Chorley N., Foullon C. Leakage of long-period oscillations from the chromosphere to the corona. *Astron. Astrophys.* 2011, vol. 533, A116. DOI: [10.1051/0004-6361/201116933](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116933).

Zirin H. *Astrophysics of the Sun*. Cambridge University Press, 1988, 448 p.

Как цитировать эту статью

Живанович И., Риехокайнен А., Соловьев А.А., Ефремов В.И. Квазипериодические колебания мелкомасштабных магнитных структур и специальный метод измерения дифференциального вращения Солнца. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 4–12. DOI: [10.12737/szf-51201901](https://doi.org/10.12737/szf-51201901).