

СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА И ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ

© 2023 г. В. Н. Обридко^{1,*}, Д. Д. Соколов^{1,2}, М. М. Кацова³

¹ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: obridko@izmiran.ru

Поступила в редакцию 09.08.2023 г.

После доработки 23.10.2023 г.

Принята к публикации 23.10.2023 г.

Показано, что использование описания солнечного цикла, учитывающего нечетную зональную гармонику магнитного поля Солнца, позволяет углубить наши знания о двух важных аспектах солнечной активности: во-первых, уточнить и расширить предсказания на ближайшее будущее эволюции циклической активности Солнца; во-вторых, сформулировать программу мониторинга спектрофотометрических характеристик излучения звезд, подобных Солнцу, нацеленную на получение новой информации об их магнитных полях.

Ключевые слова: солнечный цикл, звезды поздних спектральных типов

DOI: 10.31857/S000462992312006X, **EDN:** CZRBNF

1. ВВЕДЕНИЕ

Классическое описание цикла солнечной активности состоит во взаимодействии главной дипольной составляющей солнечного полоидального магнитного поля и тороидального магнитного поля. При этом физическое содержание этих составляющих магнитного поля предполагается интуитивно явным и не подвергается специальному анализу. Однако реальная картина, представленная в расширенном солнечном цикле, намного сложнее моделей и требует существенной детализации. Здесь мы развиваем концепцию расширенного солнечного цикла, выясняя, какие зональные гармоники ответственны за особенности распространения в экваториальном и полярном направлении в трассерах поверхностной активности. В результате мы приходим к выводу, что зональные гармоники с $l = 5$ играют решающую роль в разделении явлений обоих типов, связанных с нечетными зональными гармониками.

Согласно исходной простой схеме максимум экваториального поля совпадает с переполусовой полярного поля, и оба полушария антисимметричны по знаку поля. В этой простой и ясной схеме остаются пока не объясненными до конца некоторые особенности солнечной активности, в частности, почему наблюдаются циклы разной высоты, как все-таки возникают пятна, какова природа активных долгот. Эта схема и ее обобще-

ния работают с зональными характеристиками и потому анализируются суперсиноптические карты, в которых всякая зависимость от долготы исчезает.

В рамках наших исследований мы распространяем это описание так, чтобы оно опиралось на понятие расширенного солнечного цикла. Это понятие появилось в литературе в 1988 г. [1, 2]. В это же десятилетие появились наблюдения, показывающие, что магнитная активность одного цикла может сосуществовать одновременно с магнитной активностью предыдущего цикла, причем время этого перекрытия может достигать семи лет [3]. Согласно наблюдениям поверхности Солнца, расширенный солнечный цикл начинается во время максимума солнечных пятен на высоких широтах и состоит из относительно короткой ветви, распространяющейся к полюсу (называемой “бег к полюсу” (Rush-to-the-Poles, RTP)), и длинной ветви, распространяющейся к экватору, которая проходит через солнечный минимум и следующий солнечный цикл (см. [4, 5] и приведенные там ссылки).

Итогом многолетних тщательных наблюдений, каталогизации и конкретных работ поколений выдающихся наблюдателей того времени и явилось представление о расширенном солнечном цикле как о едином целом, сформированном наблюдаемыми пространственно-временными

структурами. Некоторые из этих структур, естественно, интерпретируются как магнитные по своей природе явления, такие как протуберанцы и волокна (см., напр., [6–9]) и эфемерные активные области (см., напр., [10]), так же как и большинство структур при наблюдениях зеленой линии в короне Солнца (см., напр., [11]), тогда как происхождение других, таких как зональные структуры торсионных колебаний (см., напр., [12–14]), еще не вполне ясно. Отметим также результаты долговременного мониторинга геомагнитных данных, которые обнаруживают черты, согласующиеся с картиной перекрывающихся по времени циклов магнитной активности Солнца [15, 16].

В недавней работе нашей группы [17] эта картина расширенного солнечного цикла дополнена следующими чертами:

1. Исходная парадигма солнечного динамо разумно соответствует описанию 11-летнего цикла солнечной активности с помощью первых двух нечетных зональных гармоник крупномасштабного магнитного поля Солнца.

2. С другой стороны, в рамках концепции расширенного солнечного цикла это описание нуждается в определенной модификации и уточнении. Во время фазы перекрытия на поверхности Солнца сосуществуют три волны активности, что приводит к появлению и усилению нечетной зональной гармоники с $l = 5$.

3. Максимальное значение амплитуды гармоники с $l = 5$ сильно уменьшается во время последних четырех циклов солнечной активности подобно амплитуде цикла, получаемой по солнечным пятнам. Особенно сильно в наблюдениях после 2000 г. падает величина гармоники, соответствующей коэффициенту Гаусса g_{50} , что соответствует низкому циклу 24. Конечно, четыре цикла вряд ли стоит рассматривать как убедительную статистику, однако, кажется разумным ожидать, что и цикл 25 не будет много выше цикла 24.

По своему смыслу эти выводы основаны на текущих наблюдениях, которые вносят в них свои уточнения. Такие уточнения, появившиеся после выхода работы [17], приведены ниже и составляют одну из целей данной работы.

Другая цель работы связана с тем, что на примере солнечного цикла формируется представление о циклах активности звезд поздних спектральных типов. Естественно, наблюдательная база о магнитной активности этих звезд, на которую опираются эти представления, носит гораздо более обобщенный характер, чем описанная выше схема расширенного солнечного цикла. Поэтому важно сформулировать, что из этого сложного описания представляется плодотворным сравнивать с теми данными о магнитной актив-

ности звезд, которые имеются сейчас или представляется возможным получить в обозримом будущем.

2. РОЛЬ И СМЫСЛ ПЯТОЙ ГАРМОНИКИ

Центральную роль в предлагаемом описании феномена солнечного цикла занимает зональная гармоника $l = 5$. Рассмотрим ее поведение более подробно.

На рис. 1 показана синоптическая карта магнитного поля. На ней видно распространение к полюсу магнитного потока, стартующее от широт $\theta = -30^\circ$ и $\theta = +30^\circ$. Это явление, которое принято называть “бегом к полюсу” (Rush-to-the-Poles, RTTP), в основном связано с крупномасштабными полями. При достижении полюса RTTP сменяет предыдущую волну, что приводит к переполусовке полярного поля. Кроме того, хорошо известна волна, идущая от средних широт к экватору. Полярная и экваториальная волны являются почти одновременно, и преимущественная полярность магнитного поля в них противоположная. В какие-то моменты на Солнце сосуществуют две волны Rush-to-the-Poles с противоположными знаками поля. Одна из них уже почти достигла полюса, другая только что возникла в средних широтах. В эти моменты на Солнце в каждом полушарии существуют три зоны сменяющейся полярности магнитного поля.

На первый взгляд не совсем ясно, почему именно одна из зональных гармоник так выделена. В качестве примера рассмотрим подробнее ситуацию на суперсиноптической карте вблизи 1999 г. (см. рис. 1). На северном полюсе все еще наблюдается волна положительной полярности, которая началась в 1989 г. (т.е. на фазе роста 22 цикла) и в течение 13 лет до 2002 г. (т.е. фактически до максимума 23 цикла) перемещается к полюсу. В то же самое время начиная 1999 г. существует на средних широтах другая волна отрицательной полярности, которая также 13 лет дрейфует к полюсу вплоть до 2012 г. (т.е. до восходящей ветви 24 цикла). В том же 1999 г. возникает третья волна, которая в отличие от двух первых не является строго униполярной, однако преобладает в ней все-таки положительная полярность, соответствующая полярности головных пятен в активных областях. Эта волна перемещается к экватору. В результате в каждом полушарии в этот момент наблюдаются три зоны перемежающейся полярности. Взаимодействие этих трех магнитных систем в целом продолжается с 1989 по 2005 г., т.е. 16 лет. Таким образом, существует период, когда одновременно присутствуют все три типа волн, в это время на видимом диске Солнца, в целом, наблюдаются 6 перемежающихся зон, что в точности соответствует зональной гар-

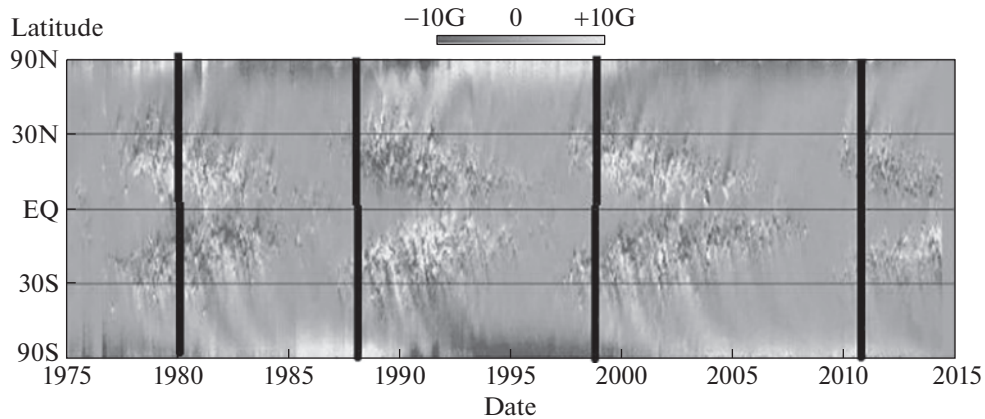


Рис. 1. Суперсиноптическая карта по данным обсерватории Китт Пик (белый цвет — положительная полярность, темный — отрицательная). Вертикальные линии указывают положение максимумов пятой гармоники, ось ординат — синус широты, горизонтальные линии отмечают широты 30° , 0° , -30° .

монике с $l = 5$. Мы называем этот интервал времени фазой перекрытия (the overlapping phase). Далее мы увидим, что фазу перекрытия можно количественно описать с помощью пятой зональной гармоники, которую в этой связи можно назвать высотой зоны перекрытия.

Для построения рис. 1 мы использовали данные John Wilcox Stanford Observatory (WSO), начавшиеся в мае 1976 г. (кэррингтоновский оборот 1641) и продолжающиеся до настоящего времени¹. При построении рисунка мы разложили полученное в наблюдениях на WSO поверхностное магнитное поле Солнца по соответствующим гармоническим коэффициентам и представили временную эволюцию соответствующих коэффициентов на протяжении последних четырех циклов солнечной активности. Мы проанализировали синоптические карты WSO для компонента фотосферного магнитного поля вдоль луча зрения, разложенного в сумму присоединенных полиномов Лежандра P_{ml} [18].

Все компоненты магнитного поля в заданной точке сферического слоя между фотосферой и т.н. поверхностью источника можно в потенциальном приближении восстановить из компонента вдоль луча зрения. Поверхность источника определяется как сферическая поверхность, на которой все магнитные линии становятся радиальными. Считается, что она лежит на расстоянии $R_s = 2.5R_\odot$ от центра Солнца ($R_\odot$ — радиус Солнца). При этом использовалась классическая схема, в которой предполагается, что потенциальное приближение допустимо и для нижней граничной поверхности, т.е. на уровне фотосферы. На рис. 2 показана реальная структура поля

пятой гармоники 1 июня 1999 г. Отчетливо видны все шесть зон.

Далее, следуя [19] (см. также [20]), мы вычисляем средний квадрат радиального компонента магнитного поля на сфере радиуса R . Используя ортогональность полиномов Лежандра, мы вычисляем интегралы по сферической поверхности и получаем результат в замкнутой форме. Для примера мы выписываем результат вычислений на поверхности фотосферы $i(B_r)|_{R_\odot}$ и на поверхности источника $i(B_r)|_{R_s}$:

$$i(B_r)|_{R_\odot} = \sum_{lm} (l+1 + l\zeta^{2l+1})^2 2l+1 (g_{lm}^2 + h_{lm}^2), \quad (1)$$

$$i(B_r)|_{R_s} = \sum_{lm} (2l+1) \zeta^{2l+4} (g_{lm}^2 + h_{lm}^2), \quad (2)$$

где $\zeta = R_\odot/R_s$, откуда следует, что вклад l -й моды в среднее магнитное поле Солнца содержит все коэффициенты с данным l . Мы принимаем $R_s = 2.5R_\odot$, т.е. $\zeta = 0.4$. Выбирая подходящие значения l и m в этих соотношениях, мы получаем вклады соответствующих гармоник магнитного поля в среднеквадратичное значение магнитного поля на соответствующей поверхности. Результаты расчетов показаны на рис. 3.

Гармоники с $l = 1$ и $l = 3$ ведут себя вполне в соответствии с классическими представлениями теории динамо, т.е. они следуют эволюции полярного магнитного поля и находятся в антифазе с изменениями числа солнечных пятен. Напротив, гармоника с $l = 5$ ведет себя существенно иначе и максимальна как раз в начале минимума полярного магнитного поля [17].

Суммируя, можно сказать, что незадолго до обращения знака полярного магнитного поля как крупномасштабное, так и сравнительно мелко-

¹ <http://wso.stanford.edu/forms/prsyn.html>

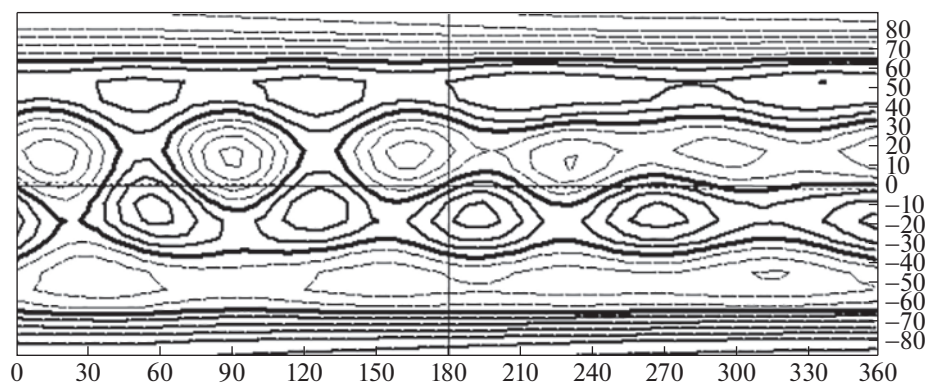


Рис. 2. Структура поля на фотосфере с учетом только пятой гармоники. Показан один оборот, центрированный на 1 июня 1999 г.

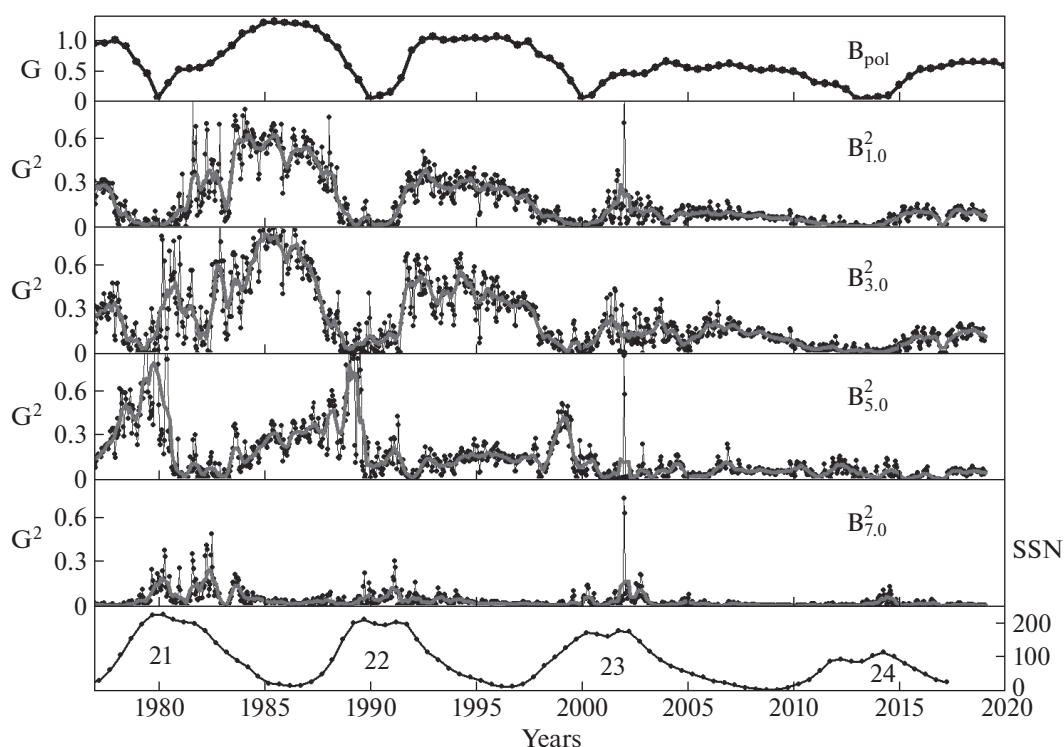


Рис. 3. Временная эволюция среднеквадратичного значения магнитного поля, связанного с первыми нечетными осесимметричными гармониками до $l = 7$ [21]. На самой нижней панели приведены временные вариации числа солнечных пятен (SSN) в ходе солнечного цикла; на самой верхней панели — временная эволюция полярного магнитного поля.

масштабные магнитные поля появляются практически одновременно на поверхности фотосферы (фаза перекрытия). Появившись практически одновременно, эти поля далее ведут себя по-разному. Крупномасштабный компонент как униполярное образование распространяется к полюсам Rush-to-the-Poles. В результате возникают две волны противоположных полярностей, распространяющихся по поверхности Солнца. Напротив, локальное магнитное поле представлено би-

полярными образованиями, распространяющимися к экватору. Формально, разделение обоих типов волн связано количественно с гармоникой с $l = 5$.

Максимум пятой гармоники выражен в виде довольно острого пика, совпадающего по времени с относительно коротким периодом сосуществования всех трех волн в каждом полушарии. Выход ближайшей к полюсу волны и ее исчезновение и означают переполюсовку полярного по-

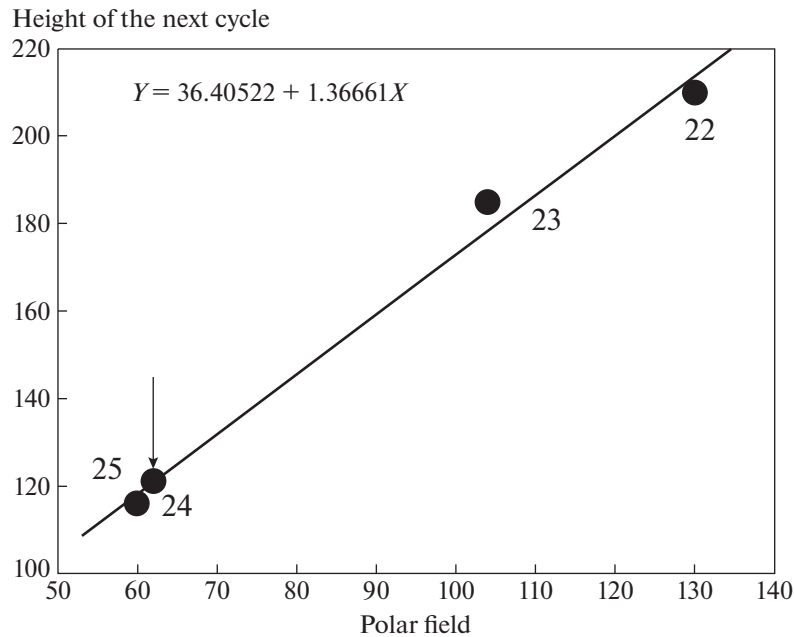


Рис. 4. Связь между максимальным значением полярного поля B_{pol} перед циклом и высотой предстоящего цикла солнечных пятен. Ожидаемое значение для цикла 25 показано стрелкой.

ля. С этого момента на Солнце наблюдаются только две волны в каждом полушарии и гармоники с $l = 5$ практически исчезает.

Заметим, что эти максимумы зональной гармоник с $l = 5$ четко выражены в 21, 22 и 23 циклах, но почти не заметны в 24 цикле. Это совпадает с удлинненным затянувшимся минимумом и вообще с довольно невнятной структурой после 2012 г. (см. рис. 3).

Видно, что значение B^2 для пятой гармоники в течение всего периода после 2000 г. не превышает $0.1 G^2$. Заметим, что сам по себе 24 цикл был во многих отношениях аномальным, в частности он был сильно искажен асимметрией. Максимумы в северном и южном полушариях были разнесены настолько далеко, что в отличие от других циклов суммарная величина чисел пятен SSN была сильно понижена.

Ситуация с поведением пятой гармоники вплоть до 2022 г. сильно напоминала ситуацию перед 24 циклом и именно поэтому в работе [17] было высказано предположение, что цикл 25 не может быть значительно более высоким, чем цикл 24.

3. ОЦЕНКА ВЫСОТЫ И ДАТЫ ЦИКЛА 25

Ситуация с прогнозом 25 цикла стала несколько яснее уже после выхода в свет статьи [17]. Прежде всего, можно использовать данные о поведении полярного поля. Связь высоты полярно-

го поля с высотой следующего солнечного цикла является наиболее физически обоснованной и опирающейся на основные представления о солнечном динамо (подробнее см. обширные обзоры [22, 23]).

На рис. 4 показана линейная связь между максимальным значением полярного поля B_{pol} перед циклом (обычно вблизи минимума SSN) и высотой предстоящего цикла солнечных пятен (SSN) на основе данных за 4 последних цикла. Связь между этими величинами показана на рис. 4 и аппроксимируется соотношением

$$SSS_{\text{max}} = 36.405 + 1.3666 B_{\text{pol}}. \quad (3)$$

Наблюдаемое максимальное значение B_{pol} достигнуто летом 2019 г. и составит $65 \mu T^2$. Отсюда прогнозируемое значение SSN в 25 цикле составляет 125.2. Это всего на 8.8 единицы выше, чем в 24 цикле (116.4).

Заметим, что характер вариации пятой гармоники в самое последнее время тоже стал более упорядоченным (см. рис. 5). При этом, однако, максимальное значение, достигнутое в 2022.5 г., составляет $0.98 G^2$, что почти на порядок ниже, чем максимальные значения этой гармоники в 21 и 22 циклах. Это скорее всего говорит, что механизм генерации трех волн, о котором сообщалось выше, работает недостаточно эффективно.

² <http://wso.stanford.edu/Polar.html>

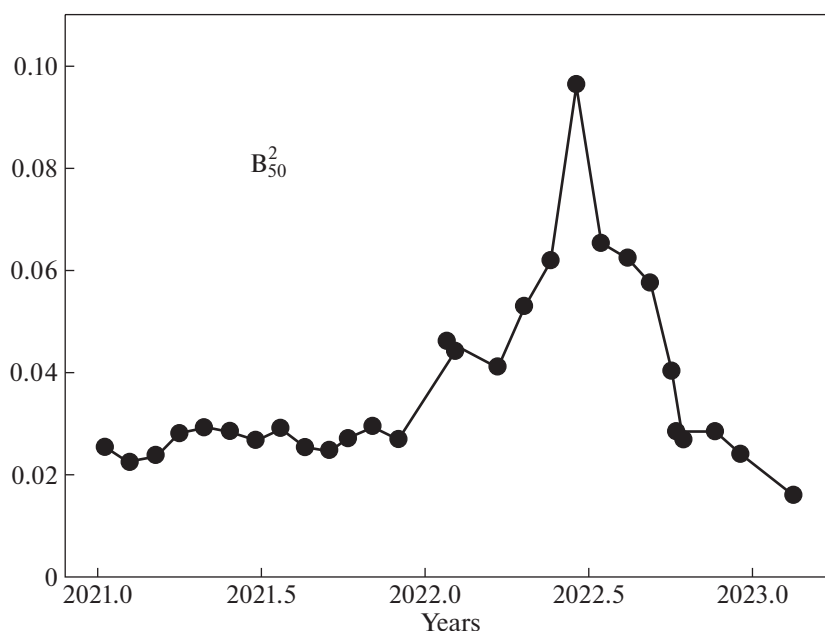


Рис. 5. Зависимость квадрата амплитуды пятой зональной гармоники в течение последних двух лет.

Что касается даты максимума, мы можем использовать даты переполусовок полярного поля. Согласно классической модели даты переполусовок и максимумов циклов должны совпадать или по крайней мере быть близкими по времени. На рис. 6 показан временной лаг между моментами переполусовок полярного поля T_p и датами максимумов SSN ($T_{\max}$). Лаг вычислялся как разность $T_{\max}$ и T_p , положительные значения показывают, что переполусовка произошла раньше максимума цикла пятен, отрицательные значения лага указывают на запаздывание переполусовки. Значения лага вычислялись отдельно для северного полюса (незаполненные кружки на рисунке), южного (треугольники) и суммарной кривой (квадраты).

Оказалось, что в относительно высоких (по крайней мере средних по высоте) 21 и 22 циклах максимум числа пятен или совпадает, или несколько опережает переполусовку. А в малых (23 и в особенности в 24) переполусовка происходит на 1.0–1.5 года раньше. Заметим, что само понятие точной даты максимума цикла довольно условно. Обычно датой максимума называют месяц, когда кривая сглаженных по 13 месяцам чисел солнечных пятен достигает своего максимального значения. Однако в течение довольно длительного времени значения на кривой отличаются от максимального значения довольно слабо, всего на несколько единиц. Поэтому правильнее было бы говорить о фазе максимума. Поскольку сегодня уже известна дата переполусовки в начале 25 цикла в северном полушарии (март 2023 г.),

можно ожидать фазу максимума 25 цикла от конца 2023 г. до второй половины 2024 г. Это значительно раньше, чем предполагалась ранее дата, ориентированная на простую 11-летнюю повторяемость (2025 или начало 2026 г.).

Таким образом, максимум может быть раньше, чем полагали, уже в 2023 г. и его высота (125.2) всего на 9 единиц выше, чем в 24 цикле. При этом самая ранняя дата начала фазы максимума — это ноябрь–декабрь 2023 г.

Следующий вопрос, на который в скором будущем могут дать ответ наблюдения, состоит в том, сохраняется ли для этого цикла правило Гневывшева-Оля. Дело в том, что существуют несколько формулировок этого правила [24]. Исходная формулировка правила гласит, что сумма чисел солнечных пятен за цикл в четных циклах ниже, чем в последующих нечетных [25]. Позднее это правило было распространено на максимальные за цикл месячные значения. В этой формулировке правило было нарушено в паре циклов 22–23. Если наши расчеты верны, правило Гневывшева-Оля в этой формулировке подтвердится в паре циклов 24–25, хотя превышение 25 цикла над 24 невелико. Однако из наших расчетов следует, что ветвь роста в 25 цикле будет очень короткой (4.0–4.5 лет), что значительно короче, чем ветвь роста 24 цикла (около 5.5 лет). Поэтому нет уверенности, что правило в классической формулировке для интегральной суммы числа пятен за цикл подтвердится в паре 24–25. Здесь особую роль может сыграть длительность фазы максимума,

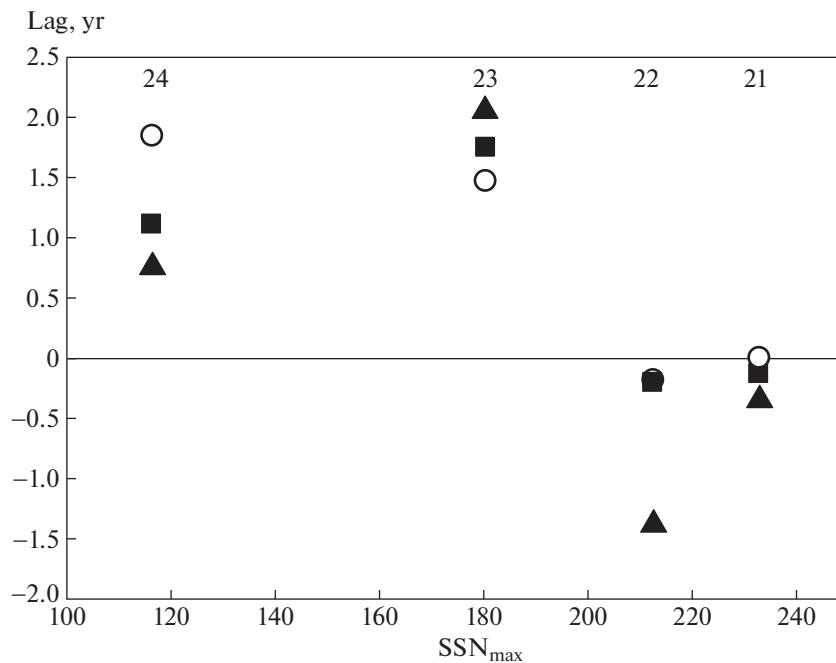


Рис. 6. Зависимость величины лага (т.е. разности между $T_{\max}$ и T_p) от максимального числа солнечных пятен $SSN_{\max}$: положительные значения показывают, что переполусовка произошла раньше максимума цикла пятен, отрицательные значения лага указывают на запаздывание переполусовки. Значения лага вычислялись отдельно для северного полюса (незаполненные кружки на рисунке), южного (треугольники) и суммарной кривой (квадраты).

которая в 24 цикле была очень большой (почти 3 года).

Краткое изложение результатов этого раздела опубликовано в качестве экспресс-информации в работе [26].

4. ВОЗМОЖНЫЙ СЦЕНАРИЙ НАБЛЮДЕНИЯ СТРОЕНИЯ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ ЗВЕЗД ПОЗДНИХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ

Кроме проблемы предсказания циклической солнечной активности, естественным назначением описанной выше структуры солнечного цикла кажется описание того, что именно стоит наблюдать для понимания природы активности у звезд, более или менее напоминающих по своему строению Солнце, т.е. звезд поздних спектральных типов. В настоящее время на основании спектрофотометрических данных и прежде всего данных H–K проекта [27] и идейно близких к нему проектов [28] известно, что ряд звезд поздних специальных типов обнаруживают циклы, похожие на солнечный цикл. В частности, они имеют длительности, сопоставимые с длительностью солнечного цикла. Наличие циклов, похожих на солнечный, у звезд, сходных с Солнцем по своим физическим характеристикам, представляется естественным, хотя, конечно, обнаружение этих циклов явилось фундаментальным достижением

астрономии. В то же время значительное число звезд, наблюдавшихся в ходе этих проектов, хотя и обнаруживают временные вариации изучаемых в ходе этих проектов спектральных линий, не демонстрируют выраженных циклов. Наряду с основными циклами у некоторых звезд выявлено одновременное существование вторичных циклов (см., напр., [29, 30]). Изучение архивных временных рядов, которые удастся собрать для отдельных звезд [31, 32], показывает, что вместо циклического поведения флуктуации могут образовывать непрерывный спектр вариаций.

Считается, что природа рассматриваемых звездных циклов активности и других похожих вариаций связана с индукционными эффектами и входит в круг явлений, изучаемых в теории гидромагнитного динамо (хотя, конечно, бывают звезды с реликтовым магнитным полем, каковыми, по-видимому, являются Ap-звезды (см., напр., [33]). Парадигма, в рамках которой обычно обсуждаются проблемы переменной активности звезд поздних спектральных типов, состоит в том, что конфигурация возбуждаемого работой звездного динамо магнитного поля подобна конфигурации магнитного поля Солнца. Эта точка зрения была естественна для первых (удачных) попыток обнаружить такие циклы. В исключительных случаях на основании имеющихся данных для конкретных звезд удастся хотя бы в грубых чертах

восстановить широтно-временной портрет циклической активности, и он действительно оказывается похож на солнечный (см., напр., [34]). Однако существует много звезд поздних спектральных типов, для которых есть основания считать, что строение их магнитного поля и циклической активности сильно отличается от солнечных. Например, широко распространено представление о том, что магнитная активность карликов типа М заметно отличается от солнечной (см., напр., [35]), хотя вопрос о том, в чем именно состоит это отличие, остается открытым. Другим примером является обнаружение звезд, сопоставимых с Солнцем, но имеющих килогауссовы магнитные поля (см., напр., [36]) или демонстрирующих гораздо более сильные, чем на Солнце, вспышки [37]. Все это заставляет считать, что следующим шагом в исследовании звездного магнетизма должно быть наблюдательное выявление возможности возбуждения на них существенно иных магнитных конфигураций, чем на Солнце, либо наблюдательное доказательство того, что все реально существующие конфигурации подобны солнечным.

Имеющиеся в теории модели звездного динамо допускают весьма разнообразные конфигурации магнитного поля, возбуждаемого механизмом динамо, сходным с тем, которое работает на Солнце (это в разнообразных обстоятельствах отмечалось практически всеми специалистами, моделировавшими сферические динамо, но в качестве одной из первых ссылок можно назвать работу [38]), хотя, конечно, в рамках численных симуляций трудно доказать, что такие конфигурации действительно возникают на звездах. С другой стороны, можно привести теоретические аргументы в пользу того, что все близкие по физическим свойствам к Солнцу звезды должны иметь магнитное поле, подобное солнечному (ср., напр., [39]). Очевидно, что разрешение описанной ситуации должно быть проведено наблюдательными методами с помощью построения на основе наблюдений широтно-временных диаграмм звездной активности для представительной выборки звезд поздних спектральных типов. Поскольку проблема имеет достаточно общий характер, эта выборка не обязательно должна содержать лишь звезды, очень близкие по своим свойствам к Солнцу.

Замечательно, что имеющиеся наблюдательные возможности, прежде всего, техника обратных доплеровских изображений, известных с 80-х годов прошлого века [40], в принципе позволяет решать подобные проблемы, тем более, что при построении таких диаграмм интересно лишь широтное распределение звездных пятен и не нужно определять их звездную долготу.

Предлагаемая программа требует мониторинга звездной активности, сопоставимого по длительности с наблюдениями Н–К проекта. Замечательно, что начало работы этого проекта предшествовало созданию техники обратных доплеровских изображений. При этом нужно фиксировать, какие именно черты в описанном выше сценарии солнечного цикла предполагается сравнивать с данными о звездной активности, поскольку обнаружить в ходе подобного мониторинга все богатство строения солнечного цикла дело далекого будущего. Именно это и составляет цель данного раздела.

Идея предлагаемого мониторинга состоит в том, что, опираясь лишь на температурные, а не магнитные данные, и восстанавливая широтно-временное распределение звездных пятен на протяжении двух-трех циклов звездной активности, можно с разумной степенью уверенности судить о том, насколько циклическая активность данной звезды похожа на солнечную. Эта идея, естественно, отталкивается от фундаментальной зональной модели распределения звездных пятен, развитой Алексеевым и Гершбергом [41], однако мы концентрируем внимание не на том, как разумно описать ограниченным числом параметров распределение пятен, а на том, с какими магнитными конфигурациями они связаны, и что это говорит о работе звездного динамо.

При этом достаточно восстанавливать на основе обратных доплеровских изображений не положение индивидуальных пятен, а положение той широтной полосы Θ , в которой эти пятна возникают, контраст полосы по сравнению с остальной поверхностью звезды K , ее полуширину θ и эволюцию этих параметров на протяжении цикла звездной активности. Одновременно должен, конечно, выясняться вопрос, наблюдается ли подобная полоса в каждом полушарии по отдельности или возникает общая полоса активности для обоих полушарий вблизи звездного экватора.

Поясним, как по поведению этих параметров можно судить о том, насколько циклическая активность данной звезды близка к солнечной. Присутствие одной полосы активности вблизи звездного экватора, не распадающейся на две индивидуальные полосы для каждого полушария, указывало бы на наличие магнитной конфигурации с симметрией не дипольного, а квадрупольного типа. Физическая основа такого теста состоит в том, что тороидальный компонент среднего магнитного поля с дипольной симметрией обращается в нуль на звездном экваторе, а для квадрупольных конфигураций он не обязана обращаться в нуль. Подобные конфигурации возникают в моделях звездного динамо наряду с обычными квадрупольными, однако до сих пор не выявлены в наблюдениях. Они обсуждаются в литературе

(см., напр., [42]). В архивных наблюдениях солнечной активности подобный эпизод известен в XVIII в. [43], хотя качество наблюдений того времени не позволяет с уверенностью настаивать на реальности этого эпизода.

Оценка полуширины полосы магнитной активности θ позволяет оценить, какая зональная гармоника магнитного поля возбуждается механизмом звездного динамо. Например, на Солнце, как показывают наблюдения среднего магнитного поля на солнечной поверхности, доминирует гармоника $l = 5$, что соответствует ширине полосы активности около 30° . В самом деле, зональная гармоника с индексом l разбивает поверхность сферы на $l + 1$ полос. Диполь имеет две полосы — два полушария, квадруполь — три и т.д. При $l = 5$ на сфере возникает $l + 1 = 6$ полос (см. рис. 2), на каждую из которых при $l = 5$ приходится $180^\circ/6 = 30^\circ$ (ср. [17]). Это как раз и есть общепринятая зона локальной активности. Так, кэррингтоновское вращение соответствует как раз середине этой зоны (16°). Обычно цикл пятен начинается именно с верхней границы этой зоны, расположенной на широте 30° .

Характер изменения положения широтного центра полосы $\Theta(t)$ позволил бы понять, распространяются ли волны активности к звездному экватору, как это случается на Солнце, или к полюсам звезды, что тоже вполне допустимо в рамках представлений о звездном динамо при определенных распределениях источников звездного динамо (см., напр., [44]).

Наконец, контраст полосы активности по сравнению с остальной частью поверхности звезды позволяет судить о том, насколько вспышечная активность звезды может отличаться от солнечной [45].

Реализацию восстановления магнитной конфигурации на основе наблюдения кривых блеска звезды в различных спектральных линиях естественно строить на основании идей метода обратных доплеровских изображений. Другими словами, предлагается не задавать изначально конечный набор зон пятнообразования, параметры которых подбираются так, чтобы воспроизвести наблюдаемые кривые блеска, а рассматривать плотность вероятности нахождения пятна на данной широте (или близкую по смыслу величину) как непрерывную функцию широты. Эту функцию нужно искать как решение соответствующей обратной задачи. При этом предполагается включить в процедуру минимизации невязки, описывающей степень несовпадения модели и наблюдений, члены, зависящие от количества и величины деталей искомого распределения методом тихоновской регуляризации или методом максимальной энтропии. Как показывает опыт исполь-

зования подобных методов для картирования распределения температуры на поверхности звезд, это позволяет избежать неравномерной детализации получаемой картины, которая не обоснована реальным состоянием наблюдений, а порождена наблюдательными погрешностями.

Разумеется, мы описываем минимальную программу наблюдений. Возможное дополнение температурных данных магнитными, т.е. поддержка обратных доплеровских изображений обратными зееман-доплеровскими изображениями, естественно, позволяет существенно расширить возможности мониторинга и, например, гораздо более уверенно отличать квадрупольные и дипольные конфигурации магнитного поля, поскольку для них по-разному выглядит правило полярности, аналогичное правилу полярности Хейла. Для квадрупольных конфигураций доминирующая полярность в обоих полушариях звезды совпадает, а смена полярности происходит при переходе от данного цикла к последующему. Напомним, что в истории физики Солнца первоначальная формулировка правила полярности Хейла не потребовала многолетних наблюдений, а была сделана вскоре после первых удачных измерений магнитного поля солнечных пятен.

Формирование представительной выборки для подобного исследования можно провести различными способами, и она не обязательно должна быть ориентирована на звезды, похожие на Солнце. Важно, чтобы эти звезды имели конвективные зоны и обнаруживали бы заметное дифференциальное вращение, поскольку в противном случае обсуждение вопроса о динамо солнечного типа становится бессодержательным. Эту степень свободы можно использовать для того, чтобы облегчить сам процесс наблюдения. Выполнение подобного проекта хотя и является очень трудной задачей, но трудность ее лежит не в создании нового дорогостоящего оборудования. Как показывает опыт выполнения Н-К проекта, центральным вопросом является формирование небольшой, но мотивированной команды исследователей и организационное решение проблемы смены научных поколений в команде.

Сформулируем в сжатом виде отличие предлагаемой программы наблюдений от развивающихся в настоящее время программ.

1. Предлагается сконцентрировать внимание на длительном мониторинге температурных данных у большой, но ограниченной выборки звезд, напоминающих по своим физическим свойствам Солнце, вместо того, чтобы уделять основное внимание расширению списка изученных звезд и разнообразию методов, с помощью которых удается характеризовать магнитное поле каждой звезды в данный момент времени.

2. Перенести основное внимание с изучения распределения магнитного поля по поверхности звезды в данный момент времени на изучения широтно-временного распределения магнитного поля за времена, сопоставимые с длиной нескольких циклов звездной активности.

5. ВЫВОДЫ

Подведем итог приведенного в этой статье обсуждения возможностей уточненного описания солнечного цикла, содержащегося в серии недавних работ нашей группы.

Во-первых, в контексте этого описания, возможно, удастся более точно и надежно предсказывать эволюцию циклической активности Солнца. Первая проверка подобного прогноза может быть проведена уже в ближайшем будущем.

Во-вторых, опираясь на это описание, удастся сформулировать программу наблюдений магнитной активности звезд, более или менее похожих на Солнце по своим физическим характеристикам, которая хотя и предполагает заметные целенаправленные усилия, сопоставимыми, скажем, с усилиями по выполнению Н–К проекта, однако является выполнимой в ограниченные сроки и позволяющей кардинально усовершенствовать современные представления о природе магнитной активности звезд.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Мы выражаем благодарность Министерству науки и высшего образования за поддержку в соответствии с грантом 075-15-2020-780 (В.Н.О и М.М.К) и 075-15-2022-284 (Д.Д.С).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Dr. Т. Hoeksema за возможность получения данных на сайте <http://wso.stanford.edu>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. C. Altrrock, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **20**, 723 (1988).
2. P. R. Wilson, R. C. Altrrock, K. L. Harvey, S. F. Martin, and H. B. Snodgrass, *Nature* **333** (6175), 748 (1988).
3. J.-L. Leroy and J.-C. Noens, *Astron. and Astrophys.* **120** (2), L1 (1983).
4. A. Kosovichev, V. Pipin, and A. Getling, *AAS Meeting Abstracts* **238**, id. 304.05; *Bull. Amer. Astron. Soc.* **53** (6), id. 2021n6i304p05 (2021).
5. S. W. McIntosh, R. J. Leamon, R. Egeland, M. Dikpati, et al., *Solar Phys.* **296** (12), id. 189 (2021).
6. G. Bocchino, *Mem. Soc. Astron. Ital.* **6**, 479 (1933).
7. R. Hansen and S. Hansen, *Solar Phys.* **44** (1), 225 (1975).
8. P. S. McIntosh, in *The solar cycle*, Proc. of the National Solar Observatory/Sacramento Peak 12th Summer Workshop, edited by K. L. Harvey (San Francisco: ASP, 1992), *ASP Conf. Ser.* **27**, 14 (1992).
9. A. G. Tlatov, K. M. Kuzanyan, and V. V. Vasil'yeva, *Solar Phys.* **291** (4), 1115 (2016).
10. K. L. Harvey and S. F. Martin, *Solar Phys.* **32**, 389 (1973).
11. R. C. Altrrock, *Solar Phys.* **170**, 411 (1997).
12. R. Howard and B. J. Labonte, *Astrophys. J.* **239**, L33 (1980).
13. H. B. Snodgrass and P. R. Wilson, *Nature* **328**, 696 (1987).
14. P. R. Wilson, *Solar and stellar activity cycles* (Cambridge Astrophys. Ser., Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1994).
15. P. N. Mayaud, *J. Geophys. Res.* **80** (1), 111 (1975).
16. J. P. Legrand and P. A. Simon, *Solar Phys.* **70**, 173 (1981).
17. V. N. Obridko, A. S. Shibalova and D. D. Sokoloff, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **523** (1), 982 (2023).
18. V. N. Obridko, D. D. Sokoloff, B. D. Shelting, A. S. Shibalova, and I. M. Livshits, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **492**(4), 5582 (2020).
19. V. N. Obridko and F. A. Yermakov, *Astron. Tsirkulyar* № 1539, 24 (1989).
20. V. N. Obridko and B. D. Shelting, *Sol. Phys.* **137**, 167 (1992).
21. V. N. Obridko, V. V. Pipin, D. Sokoloff, and A. S. Shibalova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **504**(4), 4990 (2021).
22. D. Nandy, P. C. H. Martens, V. Obridko, S. Dash, and K. Georgieva, *Progress Earth and Planetary Sci.* **8** (1), id. 40 (2021).
23. D. Nandy, *Solar Phys.* **296** (3), id. 54 (2021).
24. Ю. А. Наговицын, Е. Ю. Наговицына, В. В. Макарова, *Письма в Астрон. журн.* **35**(8), 625 (2009).
25. М. Н. Гневышев, А. И. Оль, *Астрон. журн.* **23** (1), 18 (1948).
26. V. Obridko, D. Sokoloff, and M. Katsova, *Astron. Tsirkulyar* № 1658 (2023).
27. S. L. Baliunas, R. A. Donahue, W. H. Soon, J. H. Horne, et al., *Astrophys. J.* **438**, 269 (1995).
28. A. C. Baum, J. T. Wright, J. K. Luhn, and H. Isaacson, *Astron. J.* **163** (4), id. 183 (2022).
29. E. Bohm-Vitense, *Astrophys. J.* **657**, 486 (2007).
30. A. Suárez Mascareño, R. Rebolo, and J. I. González Hernández, *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A12 (2016).
31. R. A. Stepanov, N. I. Bondar', M. M. Katsova, D. Sokoloff, and P. Frick, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **495** (4), 3788 (2020).
32. N. I. Bondar' and M. M. Katsova, *Geomagnetism and Aeronomy* **62** (7), 919 (2022).

33. *G. Mathys, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, J. D. Landstreet, D. M. Pyper, and S. J. Adelman*, *Astron. and Astrophys.* **586**, id. A85 (2016).
34. *M. M. Katsova, M. A. Livshits, W. Soon, S. L. Baliunas, and D. D. Sokoloff*, *New Astronomy* **15** (2), 274 (2010).
35. *D. Shulyak, D. Sokoloff, L. Kitchatinov, and D. Moss*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **449** (4), 3471 (2015).
36. *O. Kochukhov*, *Astron. and Astrophys. Rev.* **29** (1), id. 1 (2021).
37. *H. Maehara, T. Shibayama, Y. Notsu, S. Notsu, S. Honda, D. Nogami, and K. Shibata*, *Earth, Planets and Space* **67**, id. 59 (2015).
38. *R. L. Jennings and N. O. Weiss*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **252**, 249 (1991).
39. *L. L. Kitchatinov*, *Res. Astron. and Astrophys.* **22** (12), id. 125006 (2022).
40. *А. В. Гончарский, В. В. Степанов, В. Л. Хохлова, Ф. Г. Ягола*, *Астрон. журн.* **59**, 1146 (1982).
41. *И. Ю. Алексеев, Р. Е. Гершберг*, *Астрон. журн.* **73** (4), 589 (1996).
42. *D. Moss, S. H. Saar, and D. Sokoloff*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **388** (1), 416 (2008).
43. *D. Sokoloff, R. Arlt, D. Moss, S. H. Saar, and I. Usoskin*, in *Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets*, *Proc. IAU Symp.* **264**, 111 (2010).
44. *E. Maiewski, H. Malova, V. Popov, D. Sokoloff, and E. Yushkov*, *Solar Phys.* **297** (11), id. 150 (2022).
45. *M. M. Katsova, V. N. Obridko, D. D. Sokoloff, and I. M. Livshits*, *Astrophys. J.* **936** (1), id. 49 (2022).

SOLAR CYCLE STRUCTURE AND STRUCTURE OF ACTIVITY CYCLES AT LATE TYPE STARES

V. N. Obridko^a, D. D. Sokoloff^{a,b}, and M. M. Katsova^c

^a*IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia*

It is shown that the use of a description of the solar cycle that takes into account the odd zonal harmonic of the solar magnetic field allows us to deepen our knowledge of two important aspects of solar activity: first, to clarify and expand predictions for the near future of the evolution of the cyclic activity of the Sun, second, to formulate a program for monitoring the spectrophotometric characteristics of the radiation of stars like the Sun, aimed at obtaining new information about their magnetic fields.

Keywords: solar cycle, late type stars