

## ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА

Е.В. Девятова, В.И. Мордвинов, Л.А. Плюснина, В.М. Томозов

### THE LARGE-SCALE MAGNETIC FIELDS DYNAMICS OF THE SUN

E.V. Devyatova, V.I. Mordvinov, L.A. Plyusnina, V.M. Tomozov

В работе по данным Стэнфордской Гринвичской обсерваторий предпринята попытка обнаружения долгоживущих особенностей в распределении крупномасштабных магнитных полей Солнца, которые могли бы быть обусловлены волнами Россби.

Using the Stanford Solar and Greenwich Observatory synoptic charts of the photospheric magnetic field in the 21–24 solar cycles we make an attempt detect the long-lived large-scale features in the magnetic field distributions that might shed light on the source of the Rossby wave generation.

#### Введение

Волны и вихри Россби представляют собой крупномасштабные возмущения с горизонтальными размерами порядка радиуса Солнца, динамика которых определяется  $\beta$ -эффектом – зависимостью параметра Кориолиса от широты. Результаты исследований указывают на то, что волны Россби в тонком подфотосферном слое могут играть заметную роль в динамике солнечной активности [Lou, 2000]. Для распространения волн Россби необходимы пониженная вязкость и устойчивая стратификация среды. На Солнце этим условиям удовлетворяет также область тахоклина в основании конвективной зоны, источниками неустойчивости в которой могут быть возмущения толщины слоя и/или долготные неоднородности среднего течения [Мордвинов и др., 2012; 2013], обусловленные внешним воздействием на область тахоклина (например, при диффузии реликтового поля). Видимым проявлением волн и вихрей Россби могут быть крупномасштабные структуры магнитного поля, не связанные с солнечной цикличностью. Подобные структуры, если они существуют, должны проявляться как в максимуме, так и в минимуме солнечной активности. Кроме того, следует ожидать, что такие структуры не испытывают дифференциального вращения и имеют одинаковую скорость на разных широтах.

Цель этой работы – поиск таких крупномасштабных структур магнитного поля, существующих в течение длительных промежутков времени вплоть до нескольких солнечных циклов.

#### Данные и метод

Для анализа использовались данные измерений магнитного поля в 21–24-м солнечных циклах Стэнфордской обсерватории [Duvall et al., 1979; Ноексема, 1995] и, кроме того, ряды гринвичских данных за период с 1878 по 2005 г. Эти ряды данных представляют собой ежедневные суммированные по диску Солнца значения площадей солнечных пятен как для полного солнечного диска, так и отдельно по полушариям.

Для того чтобы выделить устойчивые крупномасштабные структуры магнитного поля, синоптические карты магнитных полей были обработаны следующим образом: данные за каждый оборот сглаживались по времени (такое сглаживание одновременно является сглаживанием и по долготам) с

целью выделения крупномасштабной составляющей поля. Затем выбирались широтные зоны, в которых нас интересовало поведение крупномасштабной составляющей магнитного поля. В выбранной широтной зоне находилась суммарная величина магнитного поля вдоль каждой долготы за оборот. Подбором значений периода вращения можно определить скорость вращения крупномасштабных структур, характерную для выбранной широтной зоны. Затем были построены диаграммы «время – долгота» (диаграммы Ховмеллера) за период с 21-го по 24-й солнечный цикл (с 1976 по 2013 г.).

Ряды ежедневных значений площадей пятен Гринвичской обсерватории с целью устранения высокочастотного шума и низкочастотного тренда были подвергнуты процедуре вейвлет-фильтрации. Поскольку основной интерес представляют временные масштабы, близкие к периоду вращения Солнца, то были исключены высокочастотная (характерный временной масштаб менее 8 сут) и низкочастотная (более 32 сут) составляющие. Используемый нами метод вейвлет-фильтрации подробно описан в работах [Mordvinov et al., 2000; Мордвинов и др., 2001]. Для того чтобы наглядно отобразить долготное положение областей усиленной активности в распределении солнечных пятен по диску, были сформированы двумерные массивы, в которых одно из измерений – развертка событий по долготе – соответствует одному обороту, а второе представляет собой развертку по времени в оборотах.

#### Результаты

По синоптическим картам магнитных полей были построены и проанализированы диаграммы «время – долгота» в различных вариантах. Изменялся период первоначального сглаживания по времени (долготе), затем производилось условное разделение полей на «сильные» и «слабые», а также варьировалась ширина вырезаемой полосы широт.

Крупномасштабные долгоживущие структуры, соответствующие ожидаемым образованиям, были обнаружены в средних широтах северного полушария в слабых магнитных полях (см. рис. 1).

На рис. 1 отчетливо выделяются особенности магнитного поля, проявляющиеся приблизительно в одном и том же долготном интервале на протяжении всего рассматриваемого времени, т. е. в течение трех

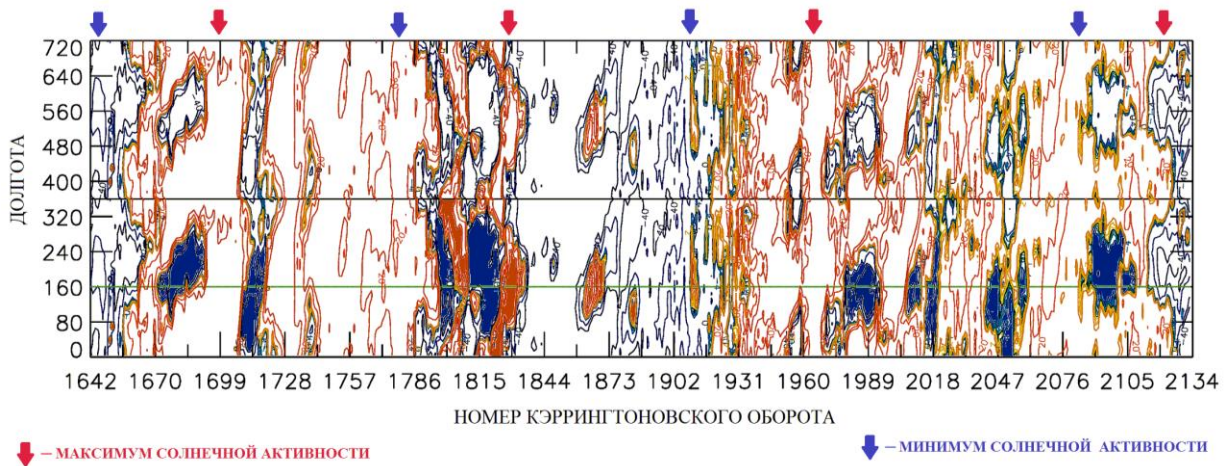


Рис. 1. Диаграмма «время – долгота» для широтной зоны от 45 до 50° N, построенная для слабого магнитного поля. Сглаживание исходных данных производилось по 31 точке. Нанесены изолинии магнитного поля -40, -20, -4, -2, -1, 0, 1, 2, 4, 20, 40 мкТл. По оси абсцисс отложены кэррингтоновские обороты. Долгота по оси ординат отложена дважды.

с лишним оборотов. Была сделана попытка выяснить, обладают ли данные особенности тенденцией к проявлению на какой-либо определенной фазе солнечного цикла. Анализ рис. 1 такой тенденции не выявил: долгоживущие особенности проявляются как на фазе роста, так и на фазе спада активности Солнца.

Попытка выявить подобные долгоживущие особенности в сильных магнитных полях не увенчалась успехом. На рис. 2 приведена диаграмма «время – долгота», построенная для сильных магнитных полей в том же широтном интервале, что и диаграмма на рис. 1. Устойчивые крупномасштабные структуры, характерные для слабых полей, здесь также не проявились. Подобный вывод можно сделать и в отношении поведения сильных полей в других широтных зонах Солнца.

С целью дальнейших поисков были использованы ряды гринвичских данных о суммированных по диску значениях площадей солнечных пятен за 1878–2005 гг. Интервал долгот на Солнце, в котором в течение продолжительного времени солнечная активность проявляется больше, чем в соседних интервалах, принято называть активной долготой (АД) [Витинский и др., 1986]. Для того чтобы определить положения и скорости вращения наиболее долгоживущих АД, были найдены периоды, при которых наблюдался наименьший разброс значений АД от цикла к циклу [Plusnina, 2010]. Разрешение по периоду было равно 0.001 сут. Для выделения интересных нас крупномасштабных долгоживущих образований значения площадей пятен, прошедшие фильтрацию по частоте, сглаживались разными окнами: от 30 до 90° по долготе и от 9 до 27 оборотов по времени с шагом 10° по долготе и один оборот по времени. Было выяснено, что полученные результаты не зависят от степени усреднения при указанных размерах окон сглаживания. Вычисления были проведены для фаз роста солнечного цикла без разделения по полушариям. Фаза роста определялась как промежуток времени от минимума до максимума цикла солнечной активности. На рис. 3, а в виде

долготно-временных диаграмм представлены результаты определения периода вращения, обеспечивающего наименьший разброс активности по долготе от цикла к циклу. Темными пятнами на диаграммах обозначено повышение активности относительно фонового уровня. На редкость стабильное положение АД наблюдалось на фазе роста при вращении с периодом 27.965 сут, по крайней мере, для десяти циклов солнечной активности.

На рис. 3, б активные долготы представлены в более привычном виде – как кривые распределения солнечной активности (площади пятен) по долготе за соответствующие интервалы времени. Они представляют собой результат суммирования площади пятен вдоль каждой долготы и деления на число оборотов Солнца. Следует отметить, что кривые определены по исходным, прошедшим частотную фильтрацию, но не усредненным по пространству данным о площадях пятен. Следовательно, они не содержат искажений, которые могут возникнуть на краях двумерного массива в результате скользящего сглаживания окнами разного размера. Более тонкой линией обозначено распределение площади с учетом только мощных групп пятен: из рассмотрения исключены данные о ежедневных суммированных по диску площадях солнечных пятен, значения которых не превышали 1000 м.д.п.

Легко определить, что в 90-градусном интервале долгот вблизи максимума распределения на фазе роста десяти циклов солнечной активности сосредоточены чуть больше 36 % всех событий. Если ограничиться только мощными событиями с ежедневными значениями площади пятен по диску более 1000 м.д.п., то доля событий в 90-градусном долготном интервале вблизи максимума возрастет почти до 40 % от общего числа мощных событий. Это не удивительно, поскольку именно мощные события создают эффект «перенаселенности» в АД. Превышение активности в АД над активностью в соседних 90-градусных долготных интервалах составило 12–14 %.

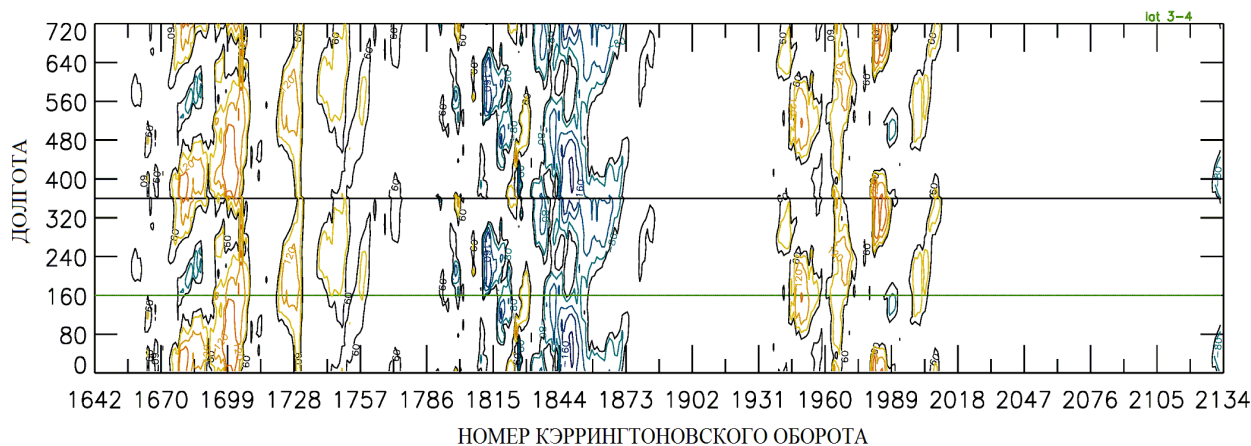


Рис. 2. Диаграмма «время – долгота» для широтной зоны от 45 до 50° N, построенная для сильного магнитного поля. Сглаживание исходных данных произведено по 31 точке. Нанесены изолинии магнитного поля –320, –240, –160, –120, –80, –60, 60, 80, 120, 160, 240, 320 мкТл. По оси абсцисс отложены кэррингтоновские обороты. Долгота по оси ординат отложена дважды.

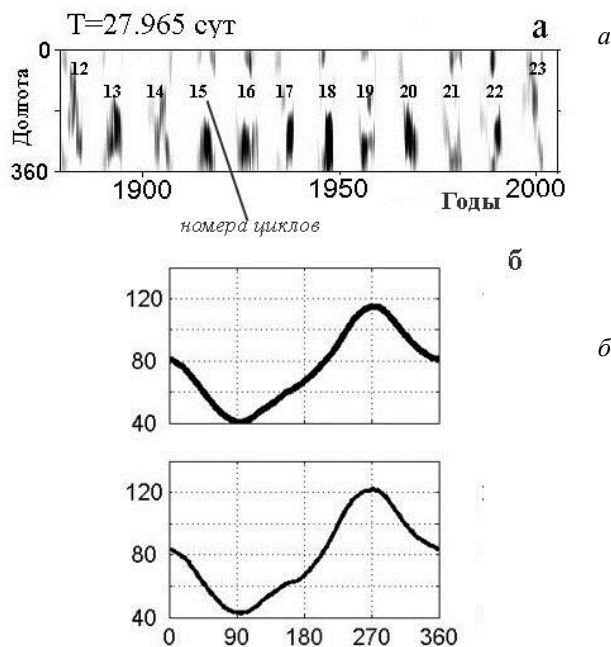


Рис. 3. Распределение максимумов активности на долготно-временных диаграммах для периода вращения 27.965 сут на фазе роста (а); распределение по долготе сумм площадей пятен вдоль каждой долготы на диаграмме, деленное на число оборотов Солнца (б).

### Выводы

Был выполнен поиск крупномасштабных структур магнитного поля (активных долгот), существующих в течение длительных интервалов времени (вплоть до нескольких солнечных циклов). Анализ синоптических карт магнитного поля позволил обнаружить такие структуры в слабых магнитных полях в средних широтах северного полушария. Подобные структуры в южном полушарии и в сильных магнитных полях обнаружены не были.

Анализ гринвичских данных о суммарных по диску значениях площадей солнечных пятен за период с 1878 по 2005 г. позволил выявить долгоживущие активные долготы, устойчиво наблюдавшиеся на фазе роста солнечной активности при вращении с периодом 27.965 сут, по крайней мере, в течение десяти циклов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. С. 258–277.
- Мордвинов А.В., Плюснина Л.А. Солнце в эпоху смены знака магнитного поля // Труды ГАО РАН. СПб., 2001. С. 289.
- Мордвинов В.И., Девятова Е.В., Томозов В.М. Гидродинамические неустойчивости в тахоклине, обусловленные вариациями толщины слоя // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. С. 3–8.
- Мордвинов В.И., Девятова Е.В., Томозов В.М. Гидродинамические неустойчивости в тахоклине, обусловленные вариациями толщины слоя и неоднородностями среднего потока // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 23 (в печати).
- Duvall Jr., Scherrer T.L., Svalgaard P.H., et al. Average photospheric poloidal and toroidal magnetic field components near solar minimum // Solar Phys. 1979. V. 61. P. 233–245.

Hoeksema J.T. The large-scale structure of the heliospheric current sheet during Ulysses epoch // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 72. P. 137–148.

Lou Yu-Qing. Rossby-type wave-induced periodicities in flare activities and sunspot areas or groups during solar maxima // *Astrophys. J.* 2000. V. 540, N 2. P. 1102–1108.

Mordvinov A.V., Plyusnina L.A. Cyclic changes in solar rotation inferred from temporal changes in the mean magnetic field // *Solar Phys.* 2000. V. 197, N 1. P. 1–9.

Plyusnina L.A. Determination of the rotation periods of solar active longitudes // *Solar Phys.* 2010. V. 261, N 2. P. 223–232.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*