

ДВА ТИПА ПОТОКОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

Вернова Е.С.¹, Тясто М.И.¹, Баранов Д.Г.²

¹*Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, Санкт-Петербург, Россия*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*

TWO TYPES OF MAGNETIC FIELD FLOWS IN THE PHOTOSPHERE OF THE SUN

Vernova E.S.¹, Tyasto M.I.¹, Baranov D.G.²

¹*IZMIRAN, St. Petersburg Filial, St. Petersburg, Russia*

²*A.F. Ioffe Physical-Technical Institute, St. Petersburg, Russia*

The distribution of magnetic fields of positive and negative polarities over the surface of the Sun was studied on the basis of synoptic maps NSO Kitt Peak (1976–2016). Cyclic variations of the magnetic field polarity have been observed associated with two types of magnetic field flows in the photosphere. Rush-to-the-Poles (RTTP) form near the maximum of solar activity with the sign of following sunspots. The lifetime of RTTP is ~3 yr, during which time they drift from latitudes 30° – 40° to the pole, causing the polarity change of the Sun's polar field. Another type of variations has the form of series of flows with individual flows of 0.5–1 yr and with alternating polarity (ripples). Ripples are located in time between two RTTP and drift from the equator to latitudes ~ 50°. Magnetic field variations were considered in 6 intervals along latitude +33° in the northern and -33° in the southern hemispheres. The time change of the field strength was approximated by the sinusoidal function. The period of variation of ripples is 1.1 yr for the N-hemisphere and 1.3 yr for the S-hemisphere. The amplitude of variation is above average for three of the six intervals where the polar field had a positive sign. The results show that such cyclic variations are an intrinsic feature of the magnetic field of the photosphere.

DOI: 10.31725/0552-5829-2022-41-44

Магнитное поле Солнца лежит в основе всех проявлений солнечной активности (СА). Различные величины магнитного поля определяют многообразие солнечных явлений от солнечных пятен до фонового поля. Магнитные поля следуют 22-летнему магнитному циклу, который представляет собой закон изменения полярности (закон Хейла) и проявляется в смене знака полярного поля около максимума СА и в смене знака ведущего и ведомого пятен в минимуме СА.

Для исследования распределения магнитных полей положительной и отрицательной полярностей по поверхности Солнца мы использовали синоптические карты NSO Kitt Peak (1978–2016). Путем усреднения синоптических карт по долготе весь массив карт приводился к одной диаграмме широта-время, которая наглядно отображает картину распределения магнитных полей, и ее изменение на протяжении нескольких циклов СА. На

диаграмме широта-время можно видеть потоки магнитного поля двух типов:

а) Потоки Rush-to-the-Poles (RTTP), которые образуются около максимума солнечной активности и имеют знак хвостовых пятен. Время жизни этих потоков ~ 3 лет, в течение которых они смещаются от широт 30° – 40° до полюса, вызывая переполюсовку полярного поля. б) Можно видеть также циклические структуры в виде серии наклонных полос. Эти полосы соответствуют потокам магнитного поля, дрейфующим от экватора к полюсам. Это явление рассмотрено в работах [1, 2]. В работе [2] эти узкие потоки, с чередующейся полярностью, названы «ripples» (рябь, мелкие волны). Мы установили, что ripples располагаются по времени между двумя потоками RTTP и смещаются в ходе дрейфа по широте от экватора до 50° . Протяженность отдельного потока в серии 0.5–1 г.

Однако присутствие на диаграмме сильных магнитных полей (бабочки Маундера) скрывает детали распределения слабых полей и мешает изучению свойств ripples. Для учета вклада слабых магнитных полей на синоптических картах были оставлены без изменения магнитные поля $|B| \leq 5$ Гс с насыщением при $B > +5$ Гс и при $B < -5$ Гс. Трансформированные таким образом синоптические карты были использованы для построения диаграммы широта-время.

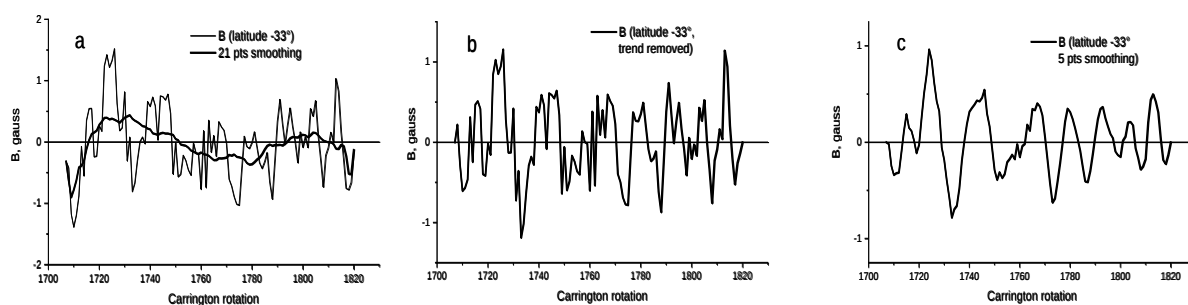


Рис. 1. (а) Изменение магнитного поля ($|B| \leq 5$ Г) в интервале S1 на широте -33° южного полушария (тонкая линия). Тренд был определен в результате скользящего сглаживания по 21 точке (жирная линия). (б) Магнитное поле после вычитания тренда. (с) Магнитное поле, сглаженное по 5 точкам после вычитания тренда.

Для анализа ripples были рассмотрены изменения магнитного поля на широтах $+33^\circ$ и -33° . Были отобраны 6 интервалов времени между максимумами циклов 21–24: 3 в N-полушарии (N1, N2, N3) и 3 в S-полушарии (S1, S2, S3). Эти интервалы соответствуют периодам между соседними RTTP. В этих интервалах отчетливо проявлялось чередование полярности потоков (ripples). Однако при ближайшем рассмотрении выясняется, что это явление довольно сложное, и за несколько циклов СА параметры вариаций испытывают значительные изменения. Время жизни этих вариаций меняется в течение 1978–2016 годов от 6 лет до 11 лет в северном и южном полушариях. Приблизительные оценки периода и амплитуды вариаций также

показали, что эти параметры существенно изменяются для 6 участков N1, N2, N3, S1, S2, S3. Для количественных оценок этих параметров необходимо было подвергнуть данные предварительной обработке, которая включала бы как самые короткие, так и трендовые вариации из первичных

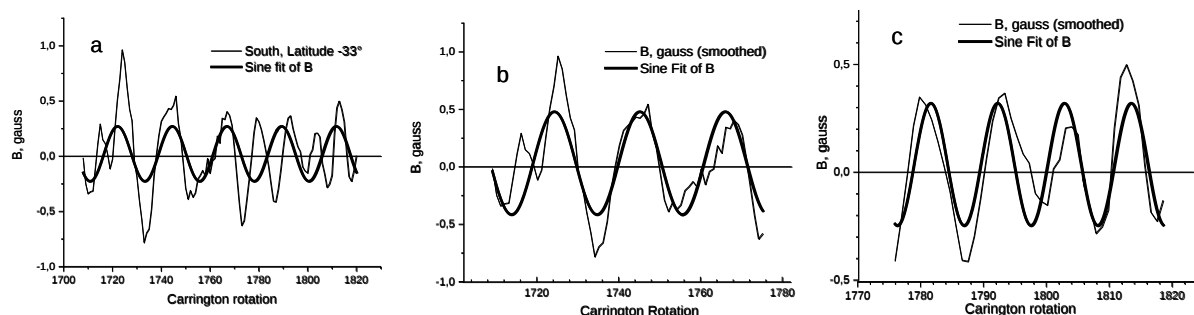


Рис. 2. Аппроксимация изменений магнитного поля синусоидальной функцией: (а) для всего интервала S1; (b) и (с) – аппроксимируемый интервал делится на две части – до и после минимума СА. Заметна разница в периодах вариаций для частей (b) и (с).

данных, поскольку нас интересовали вариации с периодом от одного года до нескольких лет. Для выделения этих вариаций была принята следующая методика обработки данных. В качестве примера возьмем изменение магнитного поля на широте -33° южного полушария в интервале S1 (рис. 1а, тонкая линия). Каждая точка кривой соответствует одному кэррингтоновскому обороту. Тренд первичных данных был определен методом скользящего сглаживания по 21 точке (рис. 1а, жирная линия). После вычитания тренда (см. рис. 1b) данные сглаживались по 5 точкам (оборотам). В результате такой обработки из рядов данных были исключены как самые медленные, так и самые быстрые изменения магнитного поля, и мы могли наблюдать вариацию в интересующем нас интервале периодов в «чистой» форме (рис. 1с). Такой обработке подвергались временные зависимости напряженности магнитного поля на широтах $+33^\circ$ и -33° для 6 выбранных интервалов времени. После этого появилась возможность оценить амплитуду и период, аппроксимируя «очищенные» данные синусоидальной функцией. Изменения магнитного поля для интервалов N1, N2, N3, S1, S2, S3 были аппроксимированы функцией вида:

$$y = y_0 + A \cdot \sin(2\pi \cdot (t - t_c) / T), \quad (1)$$

где A – амплитуда, T – период вариации и t_c – сдвиг фазы. Рис. 2а показывает аппроксимацию данных для интервала S1. Оказалось, что период вариаций заметно меняется не только от одного интервала к другому, но и в пределах одного интервала, т.е. в течение времени ~ 10 лет (в нашем примере в течение интервала S1), что приводит к большой погрешности в оценке периода. Поэтому интервалы были разделены на две части с точкой разделения вблизи минимума солнечного цикла (1986 г.), и аппроксимация выполнялась независимо для каждой из двух частей. На рис. 2b,c показано,

что аппроксимация двух частей интервала S1 по отдельности дает лучшую точность определения периода вариации. Данные остальных интервалов обрабатывались аналогично, после чего были определены период и ампли-

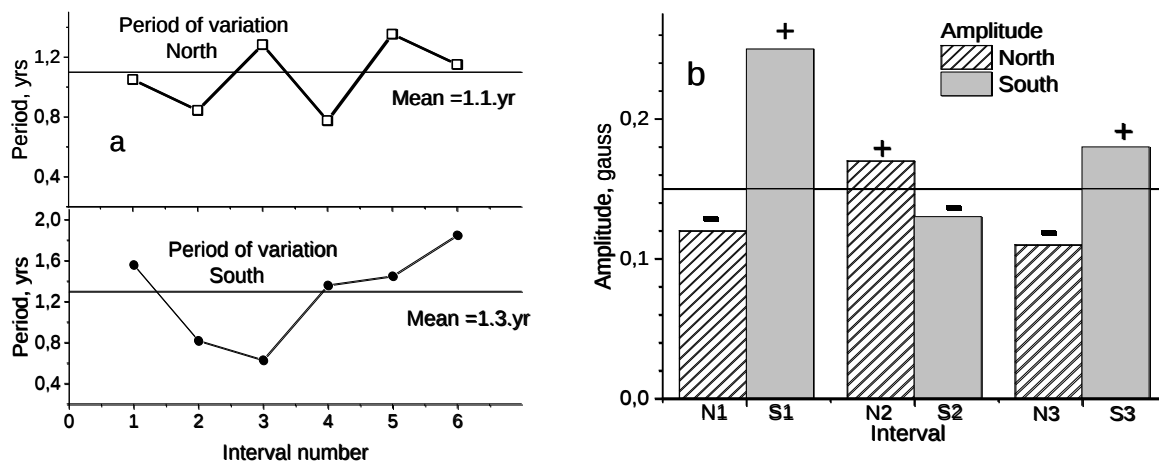


Рис. 3. а) Периоды вариаций для северного и южного полушарий. Каждый интервал N1, N2, N3, S1, S2, S3 был разбит на две части, для которых период вариации определялся независимо. (б) Амплитуда вариаций для двух полушарий. Амплитуда выше в полушарии, в котором полярное поле положительно.

туда вариаций. Этот анализ показал, что период вариаций изменяется в течение интервалов N1, N2, N3, S1, S2, S3, причем в северном полушарии в каждом интервале до минимума солнечной активности, период вариаций был больше, чем после минимума (рис. 3а). В южном полушарии такой эффект проявился только в одном из трех интервалов. В среднем период вариации составлял 1.1 г. для N-полушария и 1.3 г. для S-полушария.

На рис. 3б в виде гистограммы представлена амплитуда вариаций в двух полушариях Солнца: северное полушарие обозначено штриховкой, южное – сплошной заливкой. Определённая закономерность наблюдалась в соотношении амплитуд вариаций двух полушарий (рис. 3б): амплитуда была выше для того полушария, в котором полярное поле было положительно (знак полярного поля указан для каждого из 6 временных интервалов N1, N2, N3, S1, S2, S3 в верхней части гистограммы). Этот эффект говорит о связи вариаций полярности с 22-летним магнитным циклом Солнца. Полученные результаты показывают, что чередование полярности магнитного поля является устойчивой особенностью распределения магнитных полей в фотосфере. Однако природа этого явления в настоящее время не получила объяснения.

Литература

1. Vecchio A., Laurenza M., Meduri D., et al. // ApJ, 749, 27, 2012.
2. Ulrich R.K., Tham Tran // ApJ, 768:189, 2013.