

УДК 523.94

**Дифференциальное вращение элементов
общего магнитного поля Солнца**

С. И. Гопасюк, Л. Б. Дёмкина

Изучается структура элементов общего магнитного поля Солнца по наблюдениям его продольной составляющей, измеренной по линии Fe I λ 525.02 нм с высоким пространственным разрешением на башенном солнечном телескопе (БСТ) Крымской астрофизической обсерватории АН СССР в сентябре 1986 г. Обнаружено, что восточно-западная асимметрия элементов общего поля различна на низких и высоких гелиографических широтах. Сидерическая скорость вращения магнитных элементов, найденная по этой асимметрии, составляет примерно 1.93 км/с на широте 17° и 1.47 км/с на широте 40° северного полушария. Полученные величины свидетельствуют о близости угловых скоростей вращения магнитных элементов и K -короны на соответствующих широтах. Сделан вывод: элементы общего магнитного поля Солнца, как и K -корона, показывают более твердотельное дифференциальное вращение, чем фотосферная плазма.

DIFFERENTIAL ROTATION OF SOLAR MAGNETIC FIELD ELEMENTS, by Gopasyuk S. I., Demkina L. B.—The structure of the solar magnetic field elements is studied using high resolution observations of the longitudinal magnetic field in Fe I λ 525.02 nm line. The observations were carried out at the Solar Tower Telescope of the Crimean Astrophysical Observatory in September, 1986. The east-west asymmetry of the magnetic field elements is found to be different on different latitudes. Sidereal rotation rates of the magnetic field elements are estimated to be about 1.93 km/s on 17° N latitude and 1.47 km/s on 40° N latitude. These values evidence for a close coincidence of angular rotation rates of the magnetic elements and K corona on their associated latitudes. It is concluded that the solar magnetic field elements as well as K corona have more rigid-body differential rotation than that of the photospheric plasma.

Общее магнитное поле Солнца со времени возникновения этого понятия представлялось в виде диполя, ориентированного примерно вдоль оси вращения NS: избыток одной полярности поля в одной полусфере, избыток противоположной полярности — в другой. В 1963 г. А. Б. Северный [3] при наблюдениях с высоким пространственным разрешением обнаружил, что общее магнитное поле состоит из отдельных ячеек — элементов. Эти ячейки магнитного поля имеют различные размеры, напряженности и полярности. Определенные закономерности, которым подчиняются элементы общего поля, выявлены многими исследованиями (см., например, [2, 4]).

На основании изучения структуры элементов общего магнитного поля Солнца по наблюдениям с высоким ($1 \times 4''$ и $1 \times 1''$) пространственным разрешением, выполненным в Крымской астрофизической обсерватории в 1975 и 1986 гг., обнаружено поджатие магнитного поля элементов с их западной стороны, которое интерпретировано как движение магнитных элементов к западу относительно окружающей их фотосферной плазмы [1]. Относительная скорость элементов общего поля, наблюдаемых вблизи центра диска, оценена в 50—60 м/с [1], что с учетом определений доплеровской скорости вращения фотосферных экваториальных зон [7] составляет примерно 2.5—3 % ее величины.

Понятен интерес к вопросу о широтной зависимости скорости вращения магнитных элементов. С этой целью в сентябре 1986 г. на БСТ с двойным магнитографом выполнялась программа наблюдений продольной составляющей магнитного поля в избранных участках невозмущенной фотосферы размером, как правило, $150 \times 150''$, расположен-

ных на центральном меридиане (центры участков) на разных широтах северного полушария. В этой работе приводятся результаты обработки наблюдений в линии Fe I λ 525.02 нм в течение шести дней: 12, 13 и 15 сентября — на широте $\varphi \approx 40^\circ$; 14, 16 и 18 сентября — на широте $\varphi \approx 17^\circ$.

Средние значения асимметрии магнитных элементов в направлении восток — запад на разных уровнях напряженности поля

Дата (1986 г.)	Широта	Число элементов	$\overline{(r_{OE}-r_{OW})_A}$	$\overline{(r_{OE}-r_{OW})_B}$
12 сентября	41°	22	0.18±0.17''	0.11±0.14''
13 »	40	27	0.44±0.24	0.18±0.23
14 »	17	28	0.35±0.23	0.00±0.19
15 »	40	34	0.56±0.24	0.18±0.17
16 »	14	15	0.07±0.32	-0.10±0.16
18 »	18	85	0.39±0.14	-0.04±0.10
$\langle \Delta r \rangle_{17}$	17	128	0.35±0.12	-0.04±0.08
$\langle \Delta r \rangle_{40}$	40	83	0.42±0.14	0.16±0.11

Программа наблюдений и порядок обработки данных были такие же, как в нашем предыдущем исследовании [1]. Сканирование участка проводилось вдоль линии экватора и в перпендикулярном к ней направлении. При этом сигналы поля регистрировались при прямом и обратном направлениях сканирования, т. е. в направлении с запада на восток и с востока на запад, а также с севера на юг и с юга на север. Постоянная времени канала записи поля составляла 1 с. Расстояние между соседними сканами — 1 или 2'' (в разные дни). Щель спектрографа — $1 \times 1''$. Скорость сканирования — 2''/с. Шумы не превышали 0.3—0.4 мТл.

Здесь мы использовали наблюдения со сканами только вдоль линии экватора. По данным наблюдений выделялись все элементы общего поля Солнца с максимальным значением напряженности 1.5 мТл и больше. В дальнейшем отбирались те из них, которые считались изолированными на уровне 0.4 мТл, т. е. элементы только с одним максимумом напряженности внутри изолинии 0.4 мТл. Кроме того, дополнительно брались и такие элементы, которые можно было достаточно уверенно отделить один от другого (когда они разделены по внутренним, более высоким по напряженности изолиниям, а общий участок изолинии 0.4 мТл был незначителен и приходился не на направление восток — запад).

В каждом выделенном элементе непосредственно по регистрограмме сигналов магнитного поля вдоль линии экватора, т. е. в направлении восток — запад, определялись расстояния от центра элемента (точки на регистрограмме, где напряженность поля максимальная) до его восточного (r_{OE})_B и западного (r_{OW})_B краев на изолиниях 0.4 и 0.8 мТл. Затем для каждого элемента находилась разность между расстояниями к востоку и западу по изолинии 0.4 мТл и отдельно по изолинии 0.8 мТл, т. е. величины $(r_{OE} - r_{OW})_B$. Внутри каждого наблюдаемого на данной широте участка определялось среднее значение разности $\overline{(r_{OE} - r_{OW})_B}$. В таблице представлены даты наблюдений, гелиографическая широта центра наблюдаемого участка (на центральном меридиане), число выделенных в нем изолированных элементов, средние по всем элементам участка значения разности $(r_{OE} - r_{OW})_A$ (граница элементов берется по изолинии 0.4 мТл) и такая же величина по изолинии 0.8 мТл. Кроме того, даны сводные данные $\langle \Delta r \rangle = \langle (r_{OE} - r_{OW})_B \rangle$ по участкам, наблюдаемым на широтах 17 и 40°. Разности $(r_{OE} - r_{OW})_B$ для каждого дня наблюдений, сгруппированные по широте наблюдаемого участка, представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, если граница элементов берется на уровне $B=0.4$ мТл, то все соответствующие разности $(r_{OE}-r_{OW})_4$ (сплошная кривая) положительны, т. е. расстояние к востоку в среднем по всем элементам участка больше расстояния к западу. Это означает, что по изолинии 0.4 мТл элементы представляют собой образования, несимметричные в направлении восток — запад относительно их центров как на широте 17° , так и на широте 40° . При переходе в глубь элемента изолиния 0.8 мТл проявляется по-разному в элементах на более низких и более высоких широтах: величина $(r_{OE}-r_{OW})_8$ (штриховая кривая)

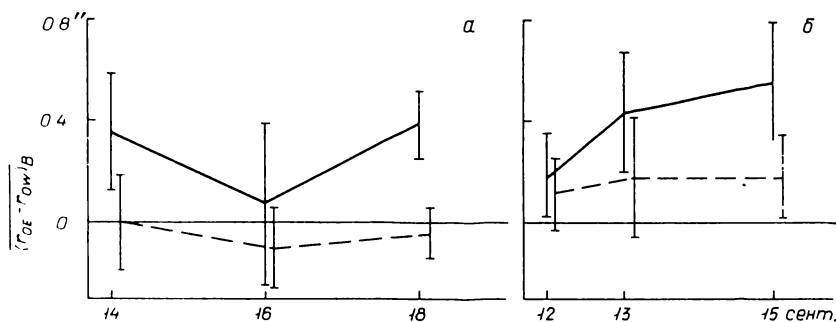


Рис. 1. Восточно-западная асимметрия магнитных элементов, наблюдаемых на центральном меридиане на широтах $\varphi \approx 17^\circ$ (а) и $\varphi \approx 40^\circ$ (б). Напряженность магнитного поля $B=0.4$ мТл (сплошные линии) и $B=0.8$ мТл (штриховые). Сдвиг оси абсцисс сделан для наглядности, момент наблюдений один и тот же

принимает близкие и практически равные нулю значения во все дни наблюдений элементов на широте 17° (рис. 1, а). Для элементов на широте 40° разность $(r_{OE}-r_{OW})_8$ остается все еще положительной (рис. 1, б), т. е. элементы общего магнитного поля Солнца на границе 0.8 мТл становятся в направлении восток — запад более симметричными на меньших широтах. Однако они в среднем остаются все еще вытянутыми к востоку относительно их центров (к востоку размеры больше, чем к западу) на большей гелиографической широте (40°).

Для определения напряженности, при которой элементы на широте 40° становятся симметричными к востоку и западу, естественно было бы рассматривать последовательно разности $(r_{OE}-r_{OW})_B$ при переходе к «следующим», более внутренним изолиниям. Но при этом такие изолинии должны оставаться достаточно периферийными, чтобы избежать топологического эффекта верхушки (когда вблизи вершины расстояния до границы по всем азимутам становятся равными). Поскольку «следующая» изолиния (1.2 мТл) может считаться периферийной для элементов с максимальной напряженностью не ниже 2.4 мТл, а таких элементов немного, т. е. статистика недостаточна, использована зависимость обобщенной для широты 40° величины $\langle \Delta r \rangle_{40}$ от напряженности поля B (рис. 2), проведенная по двум точкам (для границ элементов 0.4 и 0.8 мТл). Прямая, проведенная до пересечения с осью абсцисс, таким образом, приближенно определила напряженность B , при которой величина $\langle \Delta r \rangle_{40}$ принимает нулевое значение. Как видно из рис. 2, $\langle \Delta r \rangle_{40} = -6.5 \cdot 10^{-6} B + 0.68$. Величина $\langle \Delta r \rangle_{40}$ равна нулю при $B = 1.046$ мТл. Следовательно, на широте 40° элементы в среднем становятся симметричными к востоку и западу от центров при напряженности $B \approx 1.05$ мТл.

Напомним рассуждения из работы [1] о том, что в состоянии свободного равновесия с окружающей фотосферной плазмой элементы общего магнитного поля должны иметь форму, симметричную относительно положения максимальной напряженности к востоку и западу. Однако, как следует из наблюдений, слабые периферийные поля эле-

ментов поджаты с западной стороны. Деформация периферийного поля доходит до $B \approx 0.8$ мТл для элементов на широте 17° , но периферийное поле такой напряженности все еще поджато с западной стороны в элементах, наблюдаемых на широте 40° , и симметрия элементов на этой широте в среднем наступает при $B \approx 1.05$ мТл. Используя принцип равенства магнитного давления со стороны элементов и динамического напора плазмы, действующего на элементы с западной стороны, $B^2/(8\pi) = 0.5\rho v^2$, можно оценить относительную скорость движения магнитных элементов в фотосферной плазме. Как показано выше, на разных широтах деформация периферийного поля с западной стороны

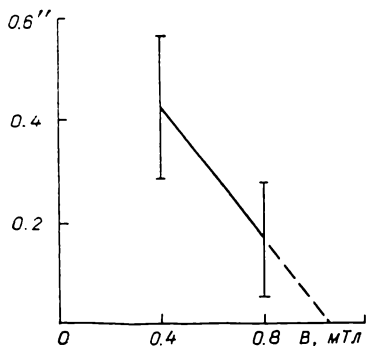


Рис. 2. Зависимость усредненной по всем дням наблюдений асимметрии элементов на широте $\varphi \approx 40^\circ$ от величины напряженности поля на граничной изолинии

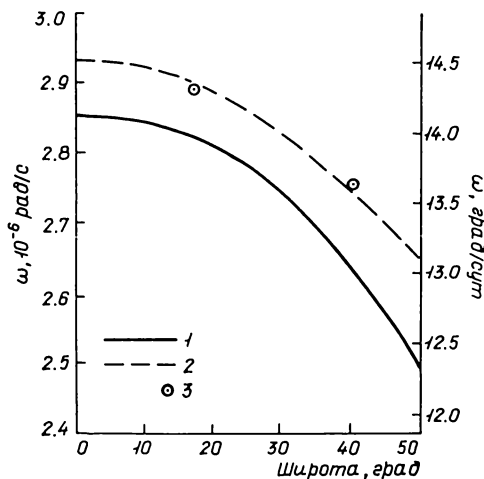


Рис. 3. Широтные зависимости сидерической скорости вращения фотосферной плазмы (1) и К-короны (2) [5, 6]; 3 — результаты, полученные в нашей работе по асимметрии магнитных элементов

элементов различна: $B \approx 0.8$ мТл для широты 17° и $B \approx 1.05$ мТл для широты 40° . При плотности фотосферного газа $\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ кг/м³ относительная скорость магнитных элементов $v = 53$ м/с при $B = 0.8$ мТл и $v = 66$ м/с при $B = 1.05$ мТл.

Таким образом, величина деформации с западной стороны периферийного магнитного поля в элементах и их скорости движения в плазме, направленные к западу, различны для разных гелиографических широт: меньшие относительные скорости имеют элементы в низких широтах, большие — в высоких. Как известно, фотосферная плазма, вращаясь вместе с Солнцем, движется на запад с разной угловой скоростью на разных широтах, испытывая дифференциальное вращение.

Элементы общего магнитного поля, опережая плазму при вращении, также имеют различные относительные скорости на разных широтах. Для согласования данных необходимо оценить их абсолютные скорости на этих широтах. С учетом определений доплеровских скоростей вращения фотосферы на соответствующих широтах [6] оценки абсолютных скоростей вращения дают следующие величины: на широте 17° линейная скорость вращения магнитных элементов $V = 1.93$ км/с, на широте 40° величина $V = 1.47$ км/с. Соответствующие значения сидерической угловой скорости ω (из [6]), нанесенные на график широтной зависимости скоростей вращения, приведены на рис. 3. Сплошной линией показаны результаты по измерению доплеровских скоростей в обсерватории Маунт-Вилсон [6], штриховой — широтная зависимость вращения К-короны, выведенная в [5]. Результаты, полученные в на-

шей работе, хорошо ложатся на штриховую кривую, что свидетельствует о совпадении скоростей вращения на соответствующих широтах магнитных элементов и K -короны.

Таким образом, приходим к заключению, что элементы общего магнитного поля Солнца имеют такое же дифференциальное вращение, как и K -корона, и оно более твердотельное, чем у фотосферной плазмы. Характер вращения K -короны, по-видимому, определяют магнитные поля, пронизывающие все слои атмосферы Солнца вплоть до короны.

1. Гопасюк С. И., Дёмкина Л. Б. Вращение Солнца и структура магнитных элементов // Астрон. журн.— 1987.— 64, вып. 2.— С. 393—397.
2. Гопасюк С. И., Цап Т. Т. Особенности эволюции магнитного поля в невозмущенной атмосфере Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1974.— 49.— С. 3—14.
3. Северный А. Б. О природе магнитных полей на Солнце (тонкая структура поля) // Астрон. журн.— 1965.— 42, вып. 2.— С. 217—232.
4. Северный А. Б. Исследование общего магнитного поля Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.— 1966.— 35.— С. 97—138.
5. Hansen R. T., Hansen S. F., Loomis H. C. Differential rotation of the solar electron corona // Solar Phys.— 1969.— 10, N 1.— P. 135—149.
6. Howard R. Solar rotation // Ann. Rev. Astron. and Astrophys.— 1984.— 22.— P. 131—155.
7. Wilcox J. M., Howard R. Differential rotation of the photospheric magnetic field // Solar Phys.— 1970.— 13, N 2.— P. 251—260.

Крым. астрофиз. обсерватория АН СССР, Научный,
Ин-т зем. магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР, Троицк

Поступила в редакцию 06.10.87,
после доработки 11.12.87

РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 519.683

ИСПРАВЛЕНИЕ АППАРАТУРНЫХ ОШИБОК В ИСХОДНОЙ БРОШЮРЕ ИЗМЕНЕНИЙ / Медведева Т. И., Медведев В. Г.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 5844-В88)

Массив данных фотометрической обработки астронегативов или астронаблюдений, записанный на внешний носитель информации (магнитная лента, перфолента и др.), требует предварительной обработки для устранения аппаратурных ошибок. Описана программа на ФОРТРАН-IV. С ее помощью проводятся исправление ошибок и формирование массива для дальнейших вычислений. Представлен принцип декодировки информации для транскриптора Ф5033.

Авторы считают, что предлагаемую программу можно использовать и для других кодирующих устройств: 1) любое кодирующее устройство впечатывает служебные слова, что позволяет проводить декодировку; 2) программа организована так, что при использовании других кодирующих устройств достаточно изменить значения служебных слов в вызывающей программе.