

УДК 523.9—327

Фотоэлектрический дифференциальный метод измерения вращения Солнца

В. М. Григорьев, Р. М. Ильгамов

Предложен метод определения скорости вращения солнечной поверхности, являющийся применением дифференциального способа измерения лучевой скорости движения солнечной плазмы. В основу метода положено измерение разности лучевых скоростей двух элементов солнечного диска, расположенных симметрично относительно проекции центрального меридиана на одной гелиографической широте. Эта разность пересчитывается во вращательную скорость на данной гелиографической широте. Выведены необходимые расчетные формулы, выполнена оценка вклада в сигнал составляющих, связанных с движением Земли вокруг Солнца и ее вращением вокруг своей оси. Оценены ошибки, обусловленные неточным совпадением линии сканирования и проекции оси вращения Солнца. Кратко описаны программы наблюдений и обработки получаемого цифрового материала, приведены результаты пробных наблюдений.

A PHOTOELECTRIC DIFFERENTIAL METHOD FOR MEASURING THE ROTATION OF THE SUN, by Grigor'ev V. M., Il'gamov R. M.— A method to observe the velocity of surface rotation in the Sun being an extension of the differential technique for measuring the line-of-sight velocity of the solar plasma is presented. The method relies on measuring the difference in line-of-sight velocities of two solar disk elements which lie symmetrically about the central meridian projection at the same heliographic latitude. The value of this difference is converted into rotational velocity at a given heliographic latitude. The corresponding computational formulas are derived and an estimate is made of the contribution into the signal of the components associated with the motion of the Earth around the Sun and its axial spin. Errors introduced by the misalignment of the scanning line and the solar rotation axis projection are evaluated. A brief account is given of the observing program and how digitized data are treated. Results of trial observations are discussed.

Введение. Методы, применяемые для исследования вращения солнечной атмосферы, делятся на две группы: измерение положения долгоживущих образований на солнечной поверхности в разные моменты времени и измерение доплеровских сдвигов спектральной линии. Обе группы методов имеют недостатки. В частности, на положение спектральной линии влияют также такие факторы: суточное вращение Земли, ее движение по орбите, локальные скорости в солнечной атмосфере, турбулентность воздуха в спектрографе и др.

Предлагаемый метод основан на дифференциальном способе измерения доплеровских сдвигов спектральной линии [5], который имеет ряд преимуществ перед абсолютными методами измерения ее положения. В значительной мере устраняется влияние шумов спектрографа, дрейфов, связанных с деформацией элементов конструкции спектрографа и телескопа, влияние земной атмосферы. Полностью исключаются эффекты красного смещения, суточного вращения Земли, остается только вклад орбитального движения Земли, который следует учитывать.

Дифференциальный метод измерения скорости вращения солнечной атмосферы реализован на солнечном телескопе оперативных прогнозов Саянской солнечной обсерватории СибИЗМИР, описанном в [1, 3].

Основы метода. Принцип дифференциального измерения скорости вращения заключается в непосредственном измерении разности лучевых составляющих скорости вращения двух областей, расположенных сим-

метрично относительно центрального меридиана. Измеренная разность лучевых скоростей пересчитывается в скорость вращения на данной гелиографической широте. Принцип измерения показан на рис. 1.

Перед щелью спектрографа установлена система из двух пластинок кальцита, развернутых одна относительно другой на 90° . Плоскость двоения всей системы перпендикулярна плоскости центрального меридиана Солнца. С помощью такого устройства на щель спектрографа приходит свет от двух участков солнечной поверхности, расположенных

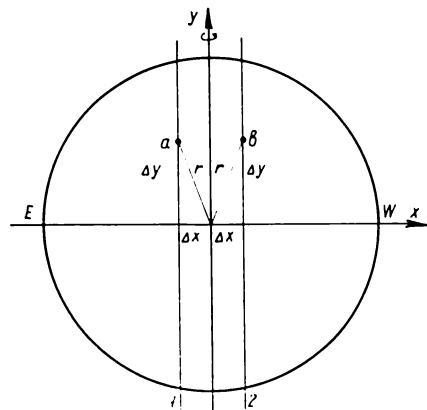
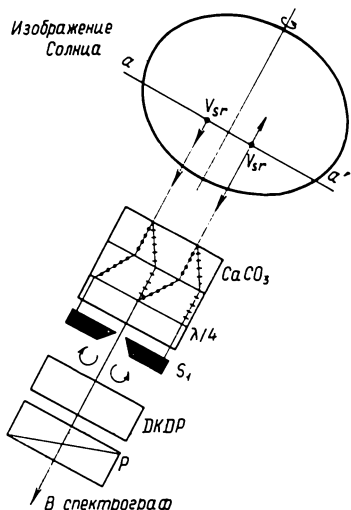


Рис. 1. Схема устройства для измерения скорости вращения Солнца. Кристалл DKDP и призма Глана P образуют анализатор круговой поляризации; aa' — линия разведения лучей в кристалле кальцита; S_1 — входная щель спектрографа

Рис. 2. Измерение разности лучевых скоростей точек a и b , находящихся на линиях сканирования 1 и 2. Ось y координатометра совпадает с проекцией оси вращения Солнца. Точки a и b лежат на одной гелиографической широте

симметрично относительно центрального меридиана. После системы из пластинок кальцита и $\lambda/4$ фазовой пластинки свет от одной области солнечной поверхности имеет левокруговую поляризацию, от другой — правокруговую. Анализатор круговой поляризации магнитографа, расположенный за щелью, пропускает свет поочередно от одной и другой области. Поскольку эти участки солнечной поверхности имеют противоположно направленные составляющие на луч зрения, исследуемая спектральная линия оказывается смещенной то в синюю, то в красную сторону спектра в соответствии с тактом работы электрооптического анализатора. Таким образом, мы имеем схему измерения, аналогичную измерению продольной составляющей магнитного поля. Расстояние между двумя последовательными положениями спектральной линии пропорционально скорости вращения солнечной поверхности. Регистрация проводится в канале продольной составляющей поля солнечного магнитографа. Изменения скорости вращения с изменением гелиографической широты измеряются путем сканирования изображения Солнца вдоль проекции оси вращения. Рассмотрим рис. 2. Через x и y обозначены оси прямоугольной системы координат устройства сканирования — координатометра. Ось y направлена вдоль проекции оси вращения Солнца. Вдоль прямых 1 и 2, параллельных оси y , при сканировании перемещаются точки солнечного диска a и b , между которыми измеряется разность лучевых скоростей.

Для расчета разности лучевых скоростей в двух элементах солнечного диска мы используем формулы и обозначения, приведенные в

[4]. Измеренную в данной точке солнечного диска лучевую скорость можно представить суммой нескольких составляющих:

$$V_0 = V_{sr} + V_{er} + V_{eo} + V_{sm} + V_{ls}, \quad (1)$$

где V_0 — измеренная лучевая скорость; составляющие: V_{sr} — скорости вращения Солнца; V_{er} — скорости наблюдателя вследствие вращения Земли; V_{eo} — вследствие орбитального движения Земли; V_{sm} — локальных движений вещества; V_{ls} — за счет эффектов края.

Обозначим компоненты лучевой скорости, относящиеся к одному элементу изображения, индексом 1, ко второму — индексом 2. Тогда разность лучевых скоростей в этих точках будет равна разности соответствующих составляющих

$$\Delta V_0 = \Delta V_{sr} + \Delta V_{er} + \Delta V_{eo} + \Delta V_{sm} + \Delta V_{ls}. \quad (2)$$

Рассмотрим каждую составляющую отдельно, чтобы оценить их вклад в измеряемый сигнал и получить общее выражение для вычисления скорости вращения на данной широте. При этом полагаем, что оба элемента изображения Солнца расположены симметрично относительно центрального меридиана, т. е. направление сканирования точно совпадает с проекцией оси вращения Солнца.

Разность составляющих скорости вращения Солнца по лучу зрения

$$\Delta V_{sr} = V_r(B) \cos B_0 (\sin L_2 - \sin L_1). \quad (3)$$

где $B_1 = B_2 = B$, L_1 , L_2 — гелиографические широта и долгота точек 1 и 2 солнечного диска; $V_r(B)$ — линейная скорость вращения на данной широте; B_0 — гелиографическая широта Земли. Гелиографические координаты точек 1 и 2 могут быть найдены из таких выражений:

$$\sin B = \sin B_0 \cos \rho + \cos B_0 \sin \rho \cos (-\theta), \quad (4)$$

$$\sin L = -\sin \rho \sin \theta \sec B, \quad (5)$$

где ρ — угол между направлением из центра Солнца на центр Земли и направлением в наблюдаемую точку солнечной поверхности: $\rho = \arcsin(r/r_0) - Fr$. Здесь F — число радиан, соответствующее единице координатной сетки координатометра; r_0 — радиус изображения Солнца в единицах координатометра; r — радиус-вектор точек a и b , равный $r = (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$; Δx , Δy — координаты точки в единицах координатометра; Δx — фиксировано и равняется половине величины разведения лучей кристаллом кальцита; Δy — изменяется при сканировании; θ — позиционный угол радиуса-вектора r .

После простых преобразований выражение (3) в прямоугольной системе координат координатометра запишется в следующем виде:

$$\Delta V_{sr} = 2V_r(B) \cos B_0 \sec B \sin \rho (\Delta x/r). \quad (6)$$

Следующая составляющая:

$$\Delta V_{er} = V_e (\sin H_2 \cos \delta_2 - \sin H_1 \cos \delta_1), \quad (7)$$

где V_e — линейная скорость суточного вращения Земли на широте наблюдателя; H — часовой угол луча зрения, положительный к западу от меридиана наблюдателя; δ — склонение луча зрения. При вычислениях ΔV_{er} в прямоугольной системе координат используем следующие выражения:

$$H_{1,2} = H_0 - F (\Delta y \sin P \pm \Delta x \cos P) / \cos \delta_{1,2},$$

$$\delta_{1,2} = \delta_0 + F (\Delta y \cos P \mp \Delta x \sin P),$$

где H_0 , δ_0 — часовой угол и склонение центра диска Солнца; P — позиционный угол оси вращения Солнца.

Составляющая, вносимая орбитальным движением Земли, дается выражением

$$\Delta V_{eo} = V_{orb} (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (8)$$

где V_{orb} — линейная сидерическая скорость движения Земли по около-солнечной орбите; λ — эклиптическая долгота наблюдаемой области солнечного диска.

Выражение (8) в прямоугольной системе координат преобразуется к виду

$$\Delta V_{eo} = 2V_{orb} F \Delta x \cos(P + \varphi). \quad (9)$$

Угол φ между направлениями из центра солнечного диска на северный полюс эклиптики и небесный полюс определяется формулой $\operatorname{tg} \varphi =$

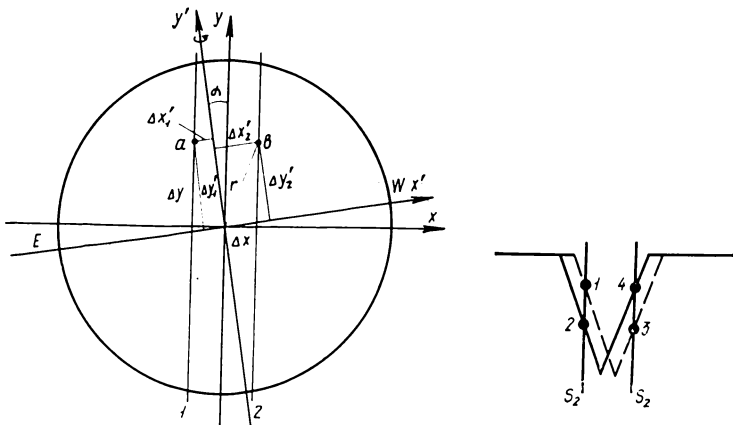


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для случая несовпадения оси y с проекцией оси вращения. Точки a и b лежат на разных гелиографических широтах

Рис. 4. Схема формирования сигнала разности лучевых скоростей. Участки 1, 2, 3, 4 составляющих расщепления спектральной линии соответствуют разным состояниям электрооптического модулятора и дефлектора

$= \operatorname{tg} \varepsilon \cos \lambda_0$, где ε — угол между плоскостью эклиптики и плоскостью небесного экватора; λ_0 — эклиптическая долгота центра солнечного диска.

Составляющая за счет лимбового красного смещения

$$\Delta V_{ls} = c (1 - \cos \rho_2)^2 - c (1 - \cos \rho_1)^2 = 0, \quad (10)$$

так как $\rho_1 = \rho_2$. Выполнив простые вычисления отдельных составляющих дифференциального сигнала лучевой скорости находим, что ΔV_{er} оказывается ниже предела обнаружения, а ΔV_{eo} необходимо учитывать ($\Delta V_{er} \sim 1$ мм/с, $\Delta V_{eo} \sim 10$ м/с). Составляющая ΔV_{sm} , как и в любом методе, — шумовой сигнал.

Таким образом, оставляя в выражении (2) только составляющие ΔV_{sr} и ΔV_{eo} , получим окончательное выражение для сигнала дифференциальной скорости:

$$\Delta V_0 = 2V_r(B) \cos B_0 \sec B \sin \rho (\Delta x/r) + 2V_{orb} F \Delta x \cos(P + \varphi). \quad (11)$$

Из выражения (11) находим формулу для расчета линейной скорости вращения на данной широте B :

$$V_r(B) = \frac{[\Delta V_0 - 2V_{orb} F \Delta x \cos(P + \varphi)] r \cos B}{2 \cos B_0 \sin [\arcsin(r/r_0) - Fr] \Delta x}. \quad (12)$$

Оценка ошибок при несовпадении линии сканирования с проекцией оси вращения. Измеряемое значение ΔV_0 может подвергаться искажениям из-за несовпадения оси y устройства сканирования с про-

екцией оси вращения Солнца. Необходимо оценить ошибку, вносимую этой неточностью юстировки, для сравнения со значением шума, которое в описываемом методе имеет порядок 1 м/с.

На рис. 3 ось y не совпадает с линией центрального меридиана. Координаты точек a и b (Δx , Δy) необходимо преобразовать в координаты $\Delta x'$, $\Delta y'$ в системе координат, в которой ось y' направлена вдоль проекции центрального меридиана. После этого необходимые вычисления гелиографических координат точек a и b выполняются по формулам (4) и (5), при этом используются прямоугольные координаты $\Delta x'$, $\Delta y'$. Составляющая сигнала, которая определяется скоростью вращения Солнца, в этом случае дается следующим выражением:

$$\Delta V'_{sr} = [V_r(B_2) \sec B_2 \Delta x'_2 - V_2(B_1) \sec B_1 \Delta x'_1] (\sin \rho \cos B_0/r). \quad (13)$$

Для вычисления ошибки нужно взять разность величин $\Delta V'_{sr} - \Delta V_{sr}$, рассчитанных по формулам (13) и (6). Приняв для скорости вращения Солнца выражение, приведенное в [4]:

$$V \text{ [км/с]} = (1.93 - 0.25 \sin^2 B - 0.31 \sin^4 B) \cos B, \quad (14)$$

мы оценили эту ошибку при следующих параметрах: $r_0 = 100$ ед. координатометра; $F = 0.000\ 049$ рад/ед. координатометра; $\Delta x = 6$ ед. координатометра; $\Delta y = 40$ ед. координатометра; $B_0 = 3^\circ$; $\alpha = 1^\circ$. Ошибка $\Delta V'_{sr} - \Delta V_{sr}$ оказалась порядка 0.01 м/с. Аналогично оценена ошибка в определении составляющей сигнала V_{eo} . При тех же параметрах и при $P = 5.8^\circ$, $\lambda_0 = 340^\circ$ она оказалась порядка 0.1 м/с.

Таким образом, ошибка, вносимая в ΔV_0 при реализуемой на телескопе точности установки осей координатометра $\alpha \leq 1^\circ$, оказывается в пределах точности измерений.

Обработка измерений и результаты первых наблюдений. В системе измерения лучевых скоростей кроме анализатора поляризации используется еще электрооптический дефлектор перед выходной щелью магнитографа, благодаря которому проводится поочередный опрос «синего» и «красного» крыльев линии. Прямоугольное модулирующее напряжение, подаваемое на анализатор круговой поляризации, имеет вдвое большую частоту, чем напряжение, подаваемое на дефлектор, так что в один такт работы дефлектора на ФЭУ попадает свет от одного крыла двух противоположно поляризованных составляющих. Формирование сигнала происходит посредством измерения интенсивности в каждом из четырех тактов работы канала регистрации магнитного поля. На рис. 4 соответствующими цифрами обозначены участки контура линии, в которых измеряются интенсивности I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . Эти значения выводятся в цифровом виде на компактную магнитную ленту, на которой цифровая информация располагается по зонам, каждая из которых состоит из 16 строк. Каждая строка содержит пять чисел. Первые четыре числа — значения яркости в каждом такте работы магнитографа, пятое — время их регистрации, отсчитываемое от определенного нуля-пункта, устанавливаемого наблюдателем. Дальнейшие вычисления проводятся на ЭВМ СМ-2.

Программа, обрабатывающая полученные цифровые данные, рассчитывает для каждой строки разность лучевых скоростей, исправленную за среднюю яркость, по формуле

$$\Delta V_0 = k [(I_1 - I_2) + (I_4 - I_3)] / (I_1 + I_2 + I_3 + I_4),$$

где k — калибровочный коэффициент, а затем вычисляет линейную вращательную скорость в соответствии с формулой (12). Эта скорость приписывается определенной гелиографической широте, которая вычисляется программой обработки по формулам (4) и (5) перевода прямоугольных координат в гелиографические. Все необходимые для их расчета коэффициенты либо вводятся в ЭВМ, либо определяются

программным путем для данного дня наблюдений. Перед выполнением основной наблюдательной программы осуществляются некоторые вспомогательные процедуры (калибровка наблюдений, контроль нулевого уровня сигнала, установка нуля отсчета времени). Цифровые данные, полученные при их выполнении, также заносятся на магнитную ленту и обрабатываются в целях нахождения необходимых коэффициентов. Программа включает в себя также процедуры усреднения.

В итоге имеем одномерную матрицу распределения скорости вращения V_r в зависимости от гелиографической широты B . Алгоритм обеспечивает расчет (методом наименьших квадратов) коэффициентов

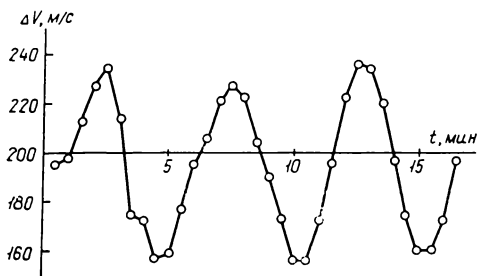


Рис. 5. Зависимость изменения ΔV_0 от времени. Значение ΔV_0 регистрировалось при фиксированном положении изображения Солнца

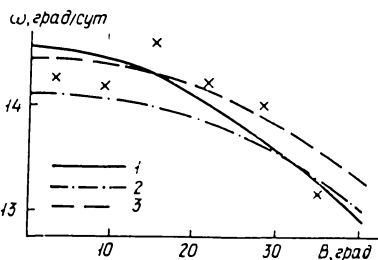


Рис. 6. Зависимость угловой скорости вращения Солнца ω от гелиографической широты B по доплеровским данным разных авторов: 1 — наши результаты (крестиком отмечены непосредственно результаты наблюдений); 2 — кривая вращения, полученная по наблюдениям в обсерватории Маунт-Вилсон [7], 3 — по наблюдениям в обсерватории Станфордского университета [6]

a , b , c формулы $\omega(B) = a + b \sin^2 B + c \sin^4 B$, которая аппроксимирует широтную зависимость угловой скорости вращения Солнца. Кроме того, программа обработки может вычислять значения шума и других величин.

На рис. 5 приведен пример 15-минутной записи сигнала разности лучевых скоростей ΔV_0 , выполненной в локальной области солнечного диска. Каждое значение получено в результате 30-секундного интегрирования. На графике отчетливо видна 5-минутная периодичность изменения величины ΔV_0 . Оказывается, что метод подвержен значительному влиянию локальных 5-минутных солнечных осцилляций, и при измерениях необходимо применять усреднение по временному интервалу в несколько десятков минут.

Измерение скорости дифференциального вращения в зависимости от широты можно выполнять двумя путями. В первом случае осуществляется шаговое сканирование изображения Солнца вдоль проекции центрального меридиана. Скорость сканирования подбирается так, чтобы один скан следовал за другим с интервалом примерно 2.5^m . Сканирование осуществляется многократно в одном и том же направлении для последующего усреднения полученных данных по всему набору сканов.

Во втором случае сигнал регистрируется в нескольких фиксированных точках солнечного диска, расположенных по центральному меридиану. Продолжительность записи в каждой точке кратна 5 мин, обычно 15—20 мин. Зная координаты точек, после обработки получаем скорость вращения в зависимости от гелиографической широты.

Приведем результаты многократного растрового сканирования по центральному меридиану. Пространственное разрешение при этом составляло $120''$, время интегрирования сигнала в каждой точке — 8 с. Во время перехода от одной точки к другой сигнал не регистрировался. Наблюдения велись в «немagnitudeчувствительной» линии $\lambda 512.37$ нм.

Калибровочный сигнал создавался путем геометрического разведения лучей кристаллом кальцита, как описано в [2]. Для используемой линии это разведение соответствовало разности лучевых скоростей 1872.7 м/с. Нулевой уровень определялся путем сложения сигналов калибровки, полученных при противоположных знаках модулирующего напряжения на электрооптическом кристалле. Электронный шум каждого отдельного измерения составлял около 3 м/с. Для определения коэффициентов формулы, выражающей закон дифференциального вращения, мы использовали результаты четырех серий пробных измерений, проведенных в июне 1986 г. Каждая серия содержит по 40 сканов с интервалами между ними 2.5 мин. Область сканирования включала гелиографические широты от $B = -42.6$ до $B = 42.8^\circ$. Каждый скан содержит 14 точек, в которых регистрируется сигнал ΔV_0 . По данным этих измерений мы получили следующие выражения, описывающие дифференциальное вращение Солнца на исследуемом широтном интервале: для угловой скорости

$$\omega = 2.944 (\pm 0.04) - 0.78 (\pm 0.18) \sin^2 B \quad [\text{мкрад/с}];$$

для линейной скорости

$$V = [2045 (\pm 30) - 543 (\pm 125) \sin^2 B] \cos B \quad [\text{м/с}].$$

Коэффициент c не рассчитывался, поскольку измерения скорости вращения были ограничены областью низких гелиографических широт.

На рис. 6 показана зависимость изменения угловой скорости вращения от гелиографической широты B . Для сравнения там же даны аналогичные кривые, полученные по наблюдениям вращения Солнца в обсерватории Маунт-Вилсон (данные исправлены за дисперсионную ошибку) [7] и на магнитографе обсерватории Станфордского университета [6]. Как видно из рис. 6, наши данные отличаются большей скоростью экваториального вращения и более быстрым спадом угловой скорости с увеличением гелиографической широты.

Сейчас не следует обсуждать эти отличия. Результаты, полученные в обсерваториях Маунт-Вилсон и Станфордского университета представляя собой среднее по многолетним наблюдениям. Наши данные относятся только к двум дням наблюдений в июне 1986 г. Необходимо отметить достаточно хорошее согласие нашего очень короткого ряда измерений с данными [6, 7]. Отличия, возможно, связаны с реальными временными изменениями вращения Солнца, и требуются дальнейшие длительные наблюдения.

Авторы выражают благодарность С. М. Латушко за помощь в обработке данных.

1. Григорьев В. М., Осака Б. Ф., Кобанов Н. И. и др. Солнечный телескоп оперативных прогнозов (СТОП) // Исслед. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца.—1981.— Вып. 56.— С. 129—139.
2. Демидов М. Л., Кобанов Н. И., Григорьев В. М. Способ калибровки измерений продольного магнитного поля и дифференциальной лучевой скорости // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.— 3, № 4.— С. 85—89.
3. Grigoryev V. M., Demidov M. L., Osaka B. F., Peshcherov V. S. Methods of measuring the general characteristics of the sun employed at the Sayan Solar Observatory // Contrib. Astron. Observ. Skalnaté Pleso.— 1986.— 15, N 2.— P. 513—527.
4. Howard R., Harvey J. Spectroscopic determinations of solar rotation // Solar Phys.— 1970.— 12, N 1.— P. 23—51.
5. Kobanov N. I. The study of velocity oscillation in the solar photosphere using the velocity subtraction technique // Ibid.— 1983.— 82, N 1/2.— P. 237—243.
6. Scherrer P. H., Wilcox J. M., Svalgaard L. The rotation of the Sun: Observation at Stanford // Astrophys. J.— 1980.— 241, N 2.— P. 811—819.
7. Snodgrass H. B., Howard R., Webster L. Recalibration of Mount Wilson Doppler measurements // Solar Phys.— 1984.— 90, N 1.— P. 199—202.