

*А.В.Ерофеева*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ ПРИ НАБЛЮДЕНИЯХ ФОТОСФЕРЫ СОЛНЦА**

Регулярные наблюдения фотосферы Солнца на Уссурийской обсерватории велись с 1956 года по единой методике Службы Солнца с использованием фотосферно-хромосферного телескопа АФР. Начиная с 2002 года, ежедневная съемка фотогелиограмм на пластинки была заменена съемкой изображения Солнца на цифровую камеру С-3000 фирмы «Olympus» (размер ПЗС матрицы 2048×1536 пикселов), установленную на телескопе-рефракторе системы Кудэ фирмы Карл-Цейсс. В течение трех месяцев – июля, августа и сентября 2002 года – съемки велись параллельно на фотопластинки и на цифровую камеру. Это было сделано для того, чтобы выявить возможные расхождения между результатами обработки изображений, полученными на двух столь разных фотоприемниках. После того, как был произведен корреляционный анализ различных индексов солнечной активности, определенных по двум видам изображений, патрульные наблюдения были полностью перенесены на цифровую камеру. Настоящая статья представляет результаты первого года работы фотосферной группы по новой методике наблюдений.

### *ТЕЛЕСКОП И ОБОРУДОВАНИЕ*

Телескоп Кудэ-рефрактор (диаметр объектива 150 мм, фокусное расстояние 2000 мм) оснащен тепловым фильтром для уменьшения потока излучения Солнца и дополнительным устройством для крепления фотокамеры, которое описано в [1]. Устройство помещается вблизи фокальной плоскости телескопа и представляет собой коробку в форме параллелепипеда, внутри которой в фокальной плоскости телескопа натянута суточная нить, за нею установлен перестраивающий объектив Гелиос-44, предназначенный для

сопряжения телескопа и цифровой камеры (см. [1]). Перестраивающий объектив позволяет уменьшить изображение Солнца до размеров ПЗС матрицы, причем собственный несъемный объектив камеры при съемке сфокусирован на бесконечность. Положение суточной нити проверяется ежедневно, и при необходимости коррекции ее можно поворачивать, а также перемещать в плоскости, перпендикулярной оптической оси телескопа.

При подготовке к съемке изображение Солнца выводится с цифровой камеры на монитор компьютера, что позволяет получить изображение солнечного диска большего масштаба, нежели на мониторе камеры. Этот способ визуального контроля позволяет также определить момент наилучшего изображения, при котором следует производить съемку.

Нами были исследованы некоторые параметры цифровой камеры и оптической системы телескоп-камера, имеющие существенное значение для работы. Во-первых, исследована нелинейность кривой передачи яркости цифровой камеры. Как известно, ПЗС матрицы сами по себе линейны в очень широком диапазоне освещенностей, однако аналого-цифровые преобразователи цифровых камер, подобных нашей, являются нелинейными (что, очевидно, сделано специально, чтобы обеспечить передачу большого диапазона яркостей фотографируемых объектов при сравнительно небольшом числе битов на пиксел). Как показало исследование, кривая передачи яркости у камеры близка к логарифмической, то есть значение пиксела пропорционально логарифму яркости соответствующей точки фотографируемого объекта. Отсюда следует вывод (который подтверждается практикой), что съемку фотогелиограмм следует делать с небольшой недодержкой, чтобы диапазон значений пикселов полученного изображения укладывался в диапазон от 0 до 180–200 (в режиме с 256 градациями), что соответствует сравнительно слабонелинейному участку кривой передачи яркости. В противном случае наиболее яркие части изображения оказываются слишком мало контрастными, и даже преобразование шкалы к линейной не дает хорошего эффекта ввиду квантованности значений пикселов. На рис. 1 показана кривая передачи яркости цифровой камеры.

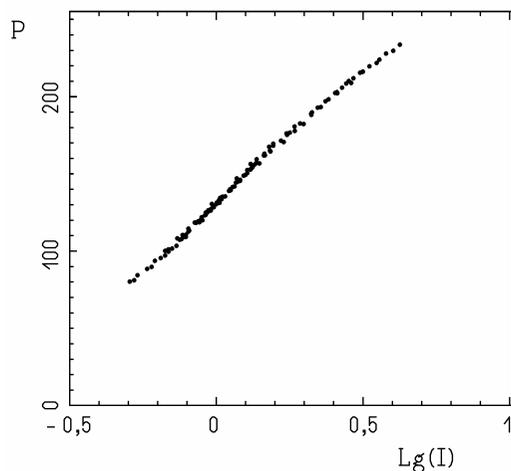


Рис.1. Кривая передачи яркости цифровой камеры: по вертикальной шкале отложено значение пиксела, по горизонтальной шкале – логарифм освещенности

Другой важный параметр – угловое разрешение системы телескоп-камера. Эта величина, очевидно, лимитируется размером пиксела ПЗС матрицы. При условии, что матрица используется с максимальной эффективностью (т.е. диаметр изображения Солнца равен меньшей из ее сторон, содержащей 1536 пикселей), мы теоретически можем получить угловое разрешение не лучше 1,2 угловых секунд. Фотографирование ярких звезд и измерение диаметров их изображений показало, что угловое разрешение фактически составляет 2,5–3 угловых секунд. Сюда входит эффект атмосферных дрожаний, который при дневных наблюдениях вряд ли играет меньшую роль. Поэтому угловое разрешение при съемках Солнца, по видимому, получается не лучше 3 угловых секунд.

Третий из исследованных параметров – дисторсия оптической системы телескоп-камера. Для исследования этого параметра была сделана серия снимков Солнца таким образом, чтобы присутствующая на нем группа из двух небольших, почти круглых пятен располагалась в разных местах кадра вблизи горизонтальной или вертикальной линий, проходящей через его центр, и на различных рас-

стояниях от центра. Измерение расстояния между пятнами вдоль линий, проходящих через центр кадра, и при разных расстояниях группы от центра позволяет определить изменение радиального масштаба в пределах кадра. Эта величина является дифференциальной мерой дисторсии. Рис.2 представляет измерения этой величины. Как можно видеть, линейный масштаб изменяется приблизительно на 8% в пределах той части кадра, которая занята изображением Солнца.

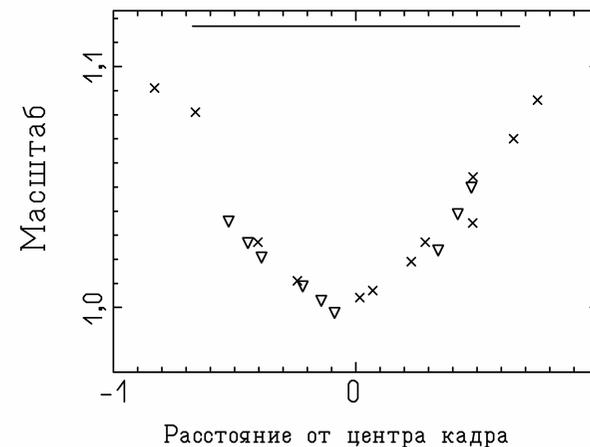


Рис.2. Кривая дифференциальной дисторсии объектива цифровой камеры. По вертикальной оси отложен линейный масштаб по отношению к масштабу в центре кадра. Расстояние от центра дано по отношению к половине горизонтального размера кадра. Горизонтальная линия в верхней части рисунка соответствует изображению солнечного диска

### РЕЖИМ СЪЕМКИ

Цифровая фотокамера имеет два режима съемки – автоматический и с выбором параметров вручную. Для патрульных наблюдений используется второй режим, съемка производится при монохромном изображении. Опытным путем было установлено, что наилучшие изображения получаются при размере диафрагмы объектива

фотокамеры 1:7. Фокусировка телескопа осуществляется периодически путем анализа серии изображений Солнца, полученных при разных положениях фокуса. Карта памяти, используемая в фотокамере, позволяет сделать 6 снимков Солнца в режиме TIFF-формата растровой графики, при размере изображения 2048×1536 элементов.

### ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Полученные изображения вводятся в память компьютера и обрабатываются с помощью специально созданной Д.В.Ерофеевым компьютерной программы. Программа действует в диалоговом режиме, поскольку не все операции обработки снимков могут быть полностью автоматизированы. Автоматически определяется радиус изображения Солнца и положение его центра, и затем производится компенсация потемнения солнечного диска к краю. После этого наблюдатель должен выделить на изображении фотосферные образования (группы пятен и факелы) и произвести ряд действий с целью измерения их параметров. Измерения стандартизованы в рамках патрульной службы и включают определение координат и площадей пятен и факелов, а также подсчет числа пятен в группах. Когда все объекты на изображении отождествлены и измерены, полученные данные выводятся в разных форматах в несколько файлов, информация из которых пересылается постоянным потребителям, среди них ГАО РАН и ежемесячный бюллетень Solar Geophysical Data. Кроме этого полученная информация поступает в базу данных о фотосферном патруле обсерватории. В будущем планируется помещать снимки Солнца на веб-сайт обсерватории.

### СРАВНЕНИЕ СНИМКОВ

Сравнение снимков, полученных параллельно с помощью цифровой камеры и на фотопластинках, проводилось в течение июля-сентября 2002 года. Сравнивались такие параметры групп пятен, как площадь, координаты, число пятен, а также площади факелов.

Координаты пятен, измеренные на фотоснимках и с помощью цифровой камеры, практически совпадают, различаясь только в

пределах случайных ошибок на 0,2°. Что касается остальных параметров, то при их измерениях по двум фотоприемникам имеются заметные расхождения, как случайные, так и систематические.

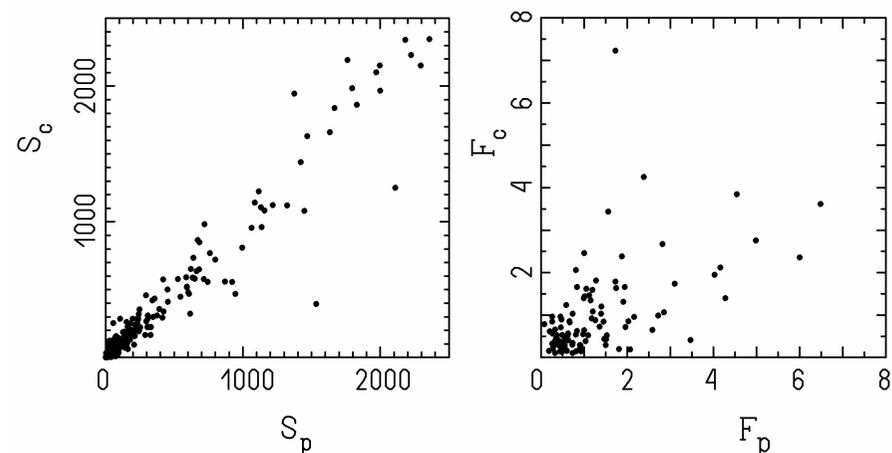


Рис.3. Слева: сопоставление площадей пятен, измеренных с помощью цифровой камеры (вертикальная шкала) и на фотопластинках (горизонтальная шкала). Значения площадей даны в миллионных долях полусферы (м.д.п.) Солнца; справа: сопоставление площадей факелов, измеренных с помощью цифровой камеры (вертикальная шкала) и на фотопластинках (горизонтальная шкала). Значения площадей даны в  $10^3$  м.д.п.

Случайные расхождения между двумя рядами измерений удобно характеризовать коэффициентом корреляции. Коэффициент корреляции был вычислен для значений площадей групп пятен, полученных с цифровой камерой и измеренных на фотопластинках. Сопоставление этих двух рядов измерений можно видеть на рис.3, слева. Коэффициент корреляции между ними равен 0,97, что говорит об их неплохом взаимном согласии. Коэффициент корреляции для рядов числа пятен тоже достаточно велик и равен 0,92 (эти ряды сопоставлены на рис.4).

Что касается площадей факелов, то коэффициент корреляции для этого параметра оказался сравнительно низким и равным 0,55. Сравнение двух рядов площадей факелов показано на рис.3, справа. Низкая корреляция между ними объясняется свойствами факелов

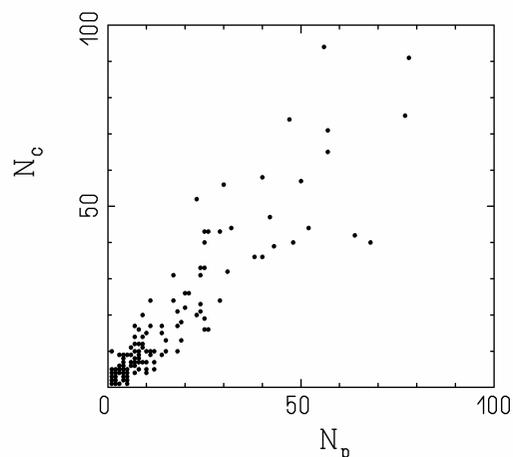


Рис.4. Сопоставление числа пятен в группах, измеренных с помощью цифровой камеры (вертикальная шкала) и на фотопластинках (горизонтальная шкала)

как фотометрических образований – их сравнительно низким контрастом и нечеткостью очертаний. Эти свойства являются причиной значительных случайных ошибок при определении площадей факелов. Кроме того, тепловой фильтр, расположенный перед объективом телескопа, срезает некоторое количество синих лучей, в которых факелы видны лучше всего. Фотопластинки FU-5, на которых ранее получались изображения фотосферы, имели максимальную чувствительность именно в синей части спектра, а при текущих условиях съемки спектральная чувствительность приемника иная, из-за чего факелы видны несколько хуже. Надо заметить, что патрульные наблюдения факелов проводятся в настоящее время только в Усурийской обсерватории, и сравнить наши данные о факелах с данными других наблюдателей не представляется возможным.

Для анализа систематических расхождений между измерениями с помощью двух разных методов мы поступили следующим образом. Обозначим некоторый параметр, измеренный на фотопластинке,  $A_i$ , а тот же параметр, измеренный с помощью цифровой камеры –  $B_i$ , причем  $i$  – номер измеряемого объекта (группы пятен или факела). Мы аппроксимировали статистическую зависимость между  $A_i$  и  $B_i$  прямой, проходящей через начало координат, таким образом,

чтобы на плоскости  $(A, B)$  сумма квадратов расстояний всех точек  $(A_i, B_i)$  от этой прямой была минимальной. Этот метод симметричен относительно сравниваемых рядов измерений, в отличие от метода регрессий. Симметрия желательна ввиду того, что оба сравниваемых ряда имеют довольно большие и сравнимые по величине случайные ошибки. Полученная нашим методом прямая является осью эллипса рассеивания экспериментальных точек, а наклон ее по отношению к осям координат дает коэффициенты, нужные для пересчета измерений в одну систему. Пусть индекс  $P$  обозначает нашу старую фотографическую систему измерений, а индекс  $C$  – новую систему измерений с помощью цифровой камеры. Нами получены следующие соотношения для приведения новых измерений в старую фотографическую систему. Для площадей пятен:

$$S_P = 0,99S_C, \quad (1)$$

для числа пятен в группе:

$$N_P = 0,86N_C, \quad (2)$$

и для площадей факелов:

$$F_P = 1,32F_C. \quad (3)$$

Из этих соотношений можно заключить, что измерения площадей пятен двумя методами практически не имеют систематических различий, тогда как измерения числа пятен в группах, а также площадей факелов, показывают заметные систематические расхождения, что также видно и на графиках рис.3–рис.4.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Капустин Б.А., Корниенко Г.И. Опыт использования цифровых камер для наблюдений и обработки изображений Солнца // Солнечная активность и ее влияние на Землю. Вып. 6. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 75-80.