

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 535.853.(088.8)

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ П.З.С.-СПЕКТРОГЕЛИОГРАФ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ХРОМОСФЕРЕ СОЛНЦА**

© 2019 г. И. Ф. Никулин^{а,*}, Ф. В. Верещагин^а

^а Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)

Россия, 119991, Москва, Университетский просп., 13

*e-mail: ifn@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 29.10.2018 г.

После доработки 26.12.2018 г.

Принята к публикации 17.01.2019 г.

С целью изучения активных областей и вспышек на Солнце создан многоканальный спектрогелиограф (с.г.г.) на базе охлаждаемой высококачественной п.з.с.-камеры Alta U16M (4096 × 4096) в диапазоне длин волн 0.32–1.10 мкм с очень низким уровнем шумов. С.г.г. предназначен для использования в отделе физики Солнца ГАИШ МГУ на солнечном башенном телескопе АТБ-1. Это позволит получать томографические разрезы с возможностью регистрации поля скоростей течений плазмы на разных уровнях в хромосфере Солнца.

DOI: 10.1134/S003281621904013X

Согласно современным теоретическим представлениям вспышки на Солнце черпают свою энергию из магнитных полей. При этом известную роль (см., например, [1]) играет процесс магнитного пересоединения в низкотемпературной плазме хромосферы, особенно в области температурного минимума. Однако, в отличие от хорошо исследованного пересоединения магнитных полей в короне, до сих пор не было наблюдений, демонстрирующих этот эффект в явном виде, т.е. в виде течений хромосферной плазмы в окрестности так называемых пересоединяющих токовых слоев. Эта перспективная задача подразумевает разработку новых спектральных приборов для регистрации излучения Солнца и новых алгоритмов для быстрой компьютерной обработки данных наблюдений в оптическом диапазоне.

Монохроматические изображения Солнца в свете отдельных спектральных линий (спектрогелиограммы и фильтрограммы) дают обширную информацию о структуре и физических условиях в атмосфере Солнца, распределении полей скоростей и магнитных полей [2–4].

В отделе физики Солнца ГАИШ МГУ для оперативного получения монохроматических изображений активных образований в солнечной атмосфере был создан ряд спектрогелиографов (с.г.г.) с возможностью их применения на любом солнечном спектрографе [5–7]. Уже около 20 лет работает с.г.г. на п.з.с.-линейке (п.з.с. — приборы

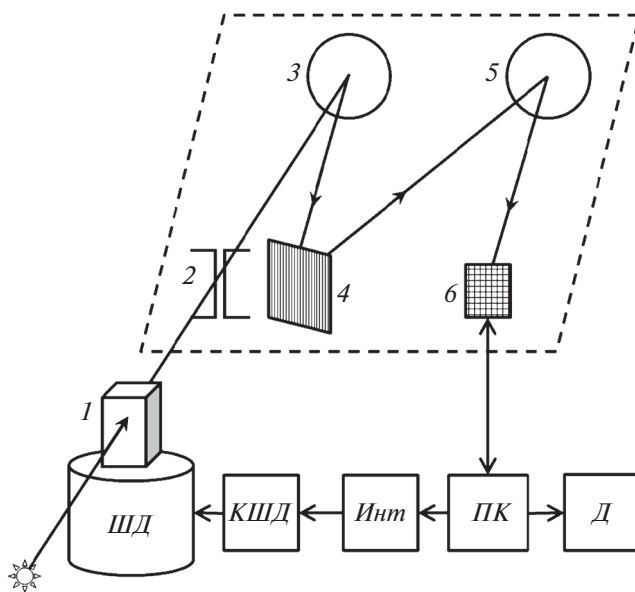


Рис. 1. Схема многоканального спектрогелиографа на п.з.с.-матрице. 1 – призма развертки; 2 – входная щель спектрографа; 3 – коллиматор; 4 – дифракционная решетка; 5 – камерное зеркало; 6 – п.з.с.-матрица; ПК – персональный компьютер, Д – дисплей, Инт – интерфейс, КШД – контроллер шагового двигателя ШД. Штриховой линией выделены элементы спектрографа.

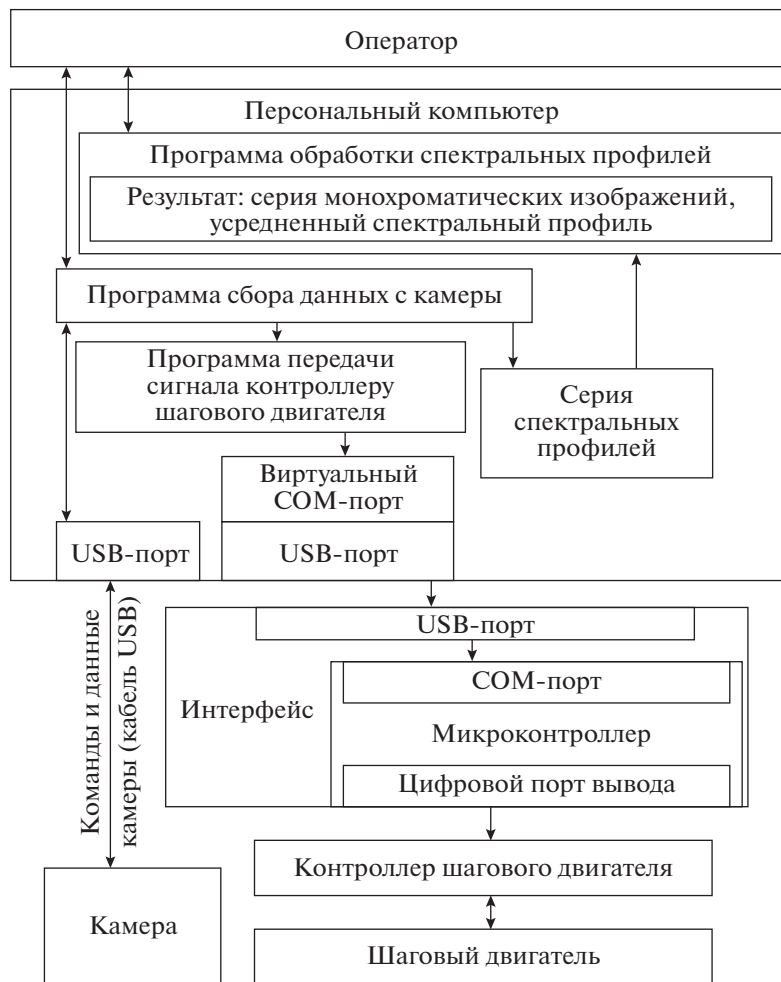


Рис. 2. Схема регистрации и управления.

с зарядовой связью), на котором регистрируются изображения в бальмеровской серии водорода, в у.ф.- и и.к.-линиях ионизованного кальция, в линии HeI 10830 Å, а в последние годы и магнитные поля в линии FeI 6302 Å

Кроме регистрации спектров п.з.с.-линейка при установке вдоль спектральной линии может регистрировать монохроматический спектральный разрез. Набор таких разрезов через равные промежутки по поверхности Солнца дает монохроматическое распределение яркости этой области в любой заданной линии во всем диапазоне чувствительности линейки. В данном случае сканирование участка солнечной поверхности осуществляется вращением четырехгранной призмы шаговым двигателем по командам с компьютера.

С.г.г. на п.з.с.-линейке позволили эффективно наблюдать в линиях разного температурного диапазона вспышки и выбросы, поля доплеровских скоростей, а также получать двумерные распределения магнитных полей. Скорость получения спектрогелиограмм от 0.5 до 3 мин при поло-

се пропускания от 0.1 до 0.5 Å. Наблюдения проводились на башенном солнечном телескопе АТБ-1 ГАИШ МГУ.

Диаметр объектива телескопа 0.3 м, фокусное расстояние 15 м, фокус спектрографа 10 м, дисперсия в первом порядке 1.6 Å/мм. Спектральное разрешение спектрографа АТБ-1 около 150000 в первом порядке, что вполне достаточно для обычной работы с.г.г. в сильных спектральных линиях. Призма развертки изображения изготовлена из плавленого кварца и имеет поперечное сечение $60 \times 60 \text{ мм}^2$, что позволяет без существенных искажений и виньетирования получать изображения участков Солнца размером $6 \times 9'$ ($26 \times 40 \text{ мм}$ при диаметре диска Солнца 140 мм).

С переходом от п.з.с.-линейки к п.з.с.-камере U16M фирмы Arogee появилась возможность строго одновременной монохроматической регистрации в каждой точке профиля избранной линии. Для ускорения процесса и экономии объемов памяти при каждом шаге двигателя регистрируется только непосредственно сам профиль линии

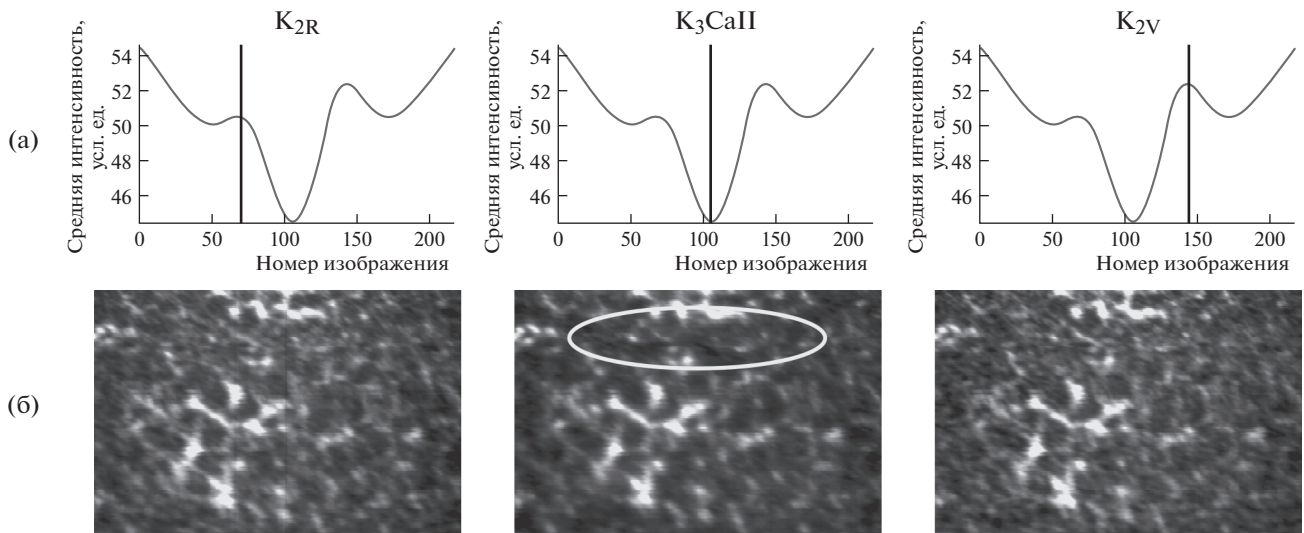


Рис. 3. Характерные кадры из последовательности 280 кадров: № 69, № 106, № 144: **а** – усредненный спектральный профиль с маркером длины волны; **б** – монохроматическое изображение соответствующего участка Солнца (эллипсом обозначено волокно, отсутствующее в крыльях).

(без далеких крыльев). В зависимости от задачи таких профилей регистрируется от 150 до 400.

На рис. 1 представлена схема многоканального спектрогелиографа.

Принцип действия прибора (рис. 1): сформированное телескопом изображение Солнца через призму развертки 1 направляется на входную щель 2 спектрографа, далее на зеркало коллиматора 3, разлагается на спектральные компоненты дифракционной решеткой 4, которые затем фокусируются зеркалом камеры 5 на п.з.с.-матрице 6. Сигнал с п.з.с.-матрицы запоминается персональным компьютером ПК, обрабатывается программой сбора данных с камеры (рис. 2), и сформированное изображение выводится на дисплей Д. После вывода очередного кадра с п.з.с.-матрицы, через интерфейс *Инт* на контроллер шагового двигателя КШД подается сигнал поворота призмы развертки 1 шаговым двигателем ШД для подготовки к регистрации следующего спектрального разреза.

Система управления и регистрации спектрогелиографа (рис. 1 и 2) состоит из следующих блоков:

- IBM PC-совместимый персональный компьютер (ПК);
- подключенная к порту USB компьютера п.з.с.-камера Argee Alta U16M;
- подключенный к другому USB-порту компьютера интерфейс (*Инт*), изготовленный на основе аппаратно-программного средства построения простых систем автоматики и робототехники ArduinoNano и соединенный с контроллером шагового двигателя.

Программное обеспечение системы регистрации и управления включает (рис. 1 и 2) операционную систему Windows7 Professional персонального компьютера с установленным драйвером виртуального последовательного порта интерфейса и следующие программы: сбора данных с камеры MaximDL; передачи сигнала контроллеру шагового двигателя; управления микроконтроллером интерфейса на основе программных библиотек Arduino Software (IDE); обработки спектральных профилей на основе библиотек программы ImageJ [8, 9].

Перед началом наблюдений оператор задает режим регистрации – вводит в программу сбора данных с камеры параметры прохода (количество спектральных профилей в последовательности, время экспозиции каждого профиля), после чего запускается цикл регистрации спектральных профилей.

В этом цикле программой сбора данных с камеры многократно повторяются следующие действия: регистрация камерой изображения профиля линии, загрузка полученного изображения с камеры в память компьютера, запуск программы передачи сигнала контроллеру шагового двигателя для следующего поворота на один шаг.

После получения серии спектральных профилей (координата x изображения определяется номером n профиля в серии) оператор запускает программу преобразования ее в серию монохроматических изображений участка солнечной поверхности в заданных точках профиля.

Программа выполняет следующие операции:

- серия спектральных профилей проходит предварительную обработку: изображения кадрируются, поворачиваются для компенсации непараллель-

ности фотоприемника направлению спектральной щели, масштабируются для обеспечения соответствия пропорций изображений по осям x и y ;

– после предварительной обработки серия спектральных профилей преобразовывается в серию монохроматических изображений (где отображаемая длина волны определяется номером изображения m в серии);

– для наглядного вывода данных на экран монитора на основе серии монохроматических изображений формируется последовательность кадров (рис. 3), содержащих усредненный спектральный профиль с маркером, соответствующим конкретной длине волны данного изображения (рис. 3а) и монохроматическое изображение участка поверхности Солнца (рис. 3б).

На рис. 3б приведены характерные кадры из последовательности снимков в ядре у.ф.-линии ионизованного кальция 3934 А. На центральном изображении в верхней части видно волокно, отсутствующее на боковых изображениях (в крыльях линии).

Данный спектрогелиограф позволяет получать монохроматические изображения на всех регистрируемых длинах волн, т.е. является многоканальным. При изучении активных процессов на Солнце с.г.г. дает возможность сканировать их в линиях различного температурного диапазона, томографировать их по глубине и получать поля скоростей на разных уровнях. Полученную серию монохроматических кадров можно также последовательно просматривать от одного крыла линии до другого с любой удобной для наблюдения

скоростью и точным указанием длины волны на усредненном профиле изучаемой спектральной линии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим Б.В. Сомова за интерес к работе и полезные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-02-00585.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Somov B.V.* Plasma Astrophysics. Part II: Reconnection and Flares. NY: Springer-SBM, 2013.
2. *Nikulin I.F.* // Astron. Astrophys. Transaction. 2016. V. 29. № 4. P. 581.
3. *Никулин И.Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2016. Т. 70. № 1. С. 77.
4. *Nikulin I.F., Dumin Y.V.* // Advances in Space Research. 2016. V. 57. P. 904.
5. *Никулин И.Ф.* // ПТЭ. 1994. № 1. С. 149.
6. *Никулин И.Ф.* // ПТЭ. 1995. № 2. С. 148.
7. *Никулин И.Ф.* // Изв. РАН. Сер. физ. 1996. Т. 60. № 8. С. 179.
8. *Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W.* // Nature methods. 2012. V. 9 (7). P. 671. PMID (on Google Scholar). 22930834
9. *Mutterer J.* (2017). <https://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.3397603.v3>