

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 520.2/8

### ВТОРАЯ ВЕРСИЯ СОЛНЕЧНОГО СПЕКТРОМАГНИТОГРАФА ИЗМИРАН. ЧАСТЬ 1. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

© 2011 г. И. Е. Кожеватов, **Б. А. Иошпа\***, В. Н. Обридко\*, Е. А. Руденчик\*, Е. Х. Куликова

*Научно-исследовательский радиофизический институт  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25*

*\*Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН  
Россия, 142090, Троицк Московской области  
E-mail: kozh-ie@mail.ru; ruden\_ea@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.01.2011 г.

Описана вторая версия солнечного спектромагнитографа ИЗМИРАН, предназначенного для измерений полного вектора магнитного поля и лучевых скоростей в солнечной фотосфере. В отличие от традиционных схем в описываемом спектромагнитографе используется параллельный анализ спектра и поляризации оптического излучения. Последнее стало возможным благодаря разработанным авторами методам прецизионной калибровки схем с многоэлементными приемниками излучения. Новая схема спектромагнитографа позволяет измерять параметры Стокса двух магнитоактивных линий с точностью, ограниченной только квантовыми шумами приемников.

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Задача измерения магнитных полей на Солнце является одной из самых важных в солнечной астрофизике. Именно измерения магнитного поля лежат в основе прогноза солнечных вспышек и корональных выбросов массы, которые приводят к возникновению магнитных бурь на Земле. Магнитные бури, в свою очередь, приводят к нарушениям в работе целого ряда технологических систем. Без прогноза потоков высокоэнергичных частиц от Солнца, основой которого являются измерения магнитных полей, невозможна никакая продолжительная деятельность в космосе.

Однако проблема адекватного измерения магнитных полей на Солнце еще очень далека от своего решения. Это связано с тем, что магнитное поле на звездах непосредственно нельзя измерить. Только подробный анализ характеристик поляризации может дать информацию о всех компонентах магнитного поля. Таким образом, по существу, современный магнитограф – это высокоточный поляриметр.

Но одних измерений поляризации все равно недостаточно. Дело в том, что поляризация в спектральной линии возникает в результате переноса излучения в атмосфере звезды и зависит не только от характеристик поля, но и от физических условий в области образования линии. Таким образом, современный прибор для измерения магнитного поля должен давать всю информацию как о поляризации, так и о контуре спектральной линии. По существу, мы должны одновременно с измерением магнитного поля в рамках самосогласованной задачи строить пол-

ную модель атмосферы звезды в точке измерения, включая не только параметры магнитного поля, но и температуру, плотность, скорость и градиенты этих величин по глубине.

Очевидно, что магнитографы, которые использовали данные в двух точках крыла линии или даже среднее значение вдоль всего крыла, не создают предпосылок, в силу малости информации, ни для постановки, ни для решения этой задачи. Необходима подробная информация обо всех характеристиках интенсивности и поляризации внутри спектральной линии.

В данной статье описаны особенности новой схемы спектромагнитографа ИЗМИРАН (разд. 2) и его функциональная схема (разд. 3), анализатор поляризации параллельного типа (разд. 4), а также даны теоретические оценки точности измерения параметров Стокса и магнитных полей и приведены результаты наблюдений, подтверждающие эти оценки (разд. 5).

#### 2. ОСОБЕННОСТИ НОВОЙ СХЕМЫ СПЕКТРОМАГНИТОГРАФА ИЗМИРАН

Большая часть современных магнитографов имеет в качестве приемников излучения двумерные матрицы. Тем не менее, даже при наличии матричных приемников с количеством элементов более миллиона, приходится выбирать, на что в первую очередь направить возникшие возможности. Дело в том, что для регистрации двумерной магнитограммы требуется трехмерный массив данных, включающий, кроме двумерных пространственных координат, еще и спектр излуче-

ния в линии. Кроме того, этот спектр должен быть зарегистрирован в шести вариантах, что необходимо для последующего поляризационного анализа.

Несоответствие размерности одновременно регистрируемых массивов с размерностью требуемых ставит исследователей перед необходимостью выбора одного из двух вариантов.

Фильтровые магнитографы позволяют одновременно регистрировать интенсивность излучения по двум координатам поверхности Солнца. В этом случае реализуется максимальное пространственно-временное разрешение, поскольку не тратится время на сканирование по диску Солнца. Однако при этом теряется время при сканировании по спектру. Кроме того, в силу низкого разрешения фильтров удается на профиле линий регистрировать не более двух-трех спектральных элементов.

Спектромагнитографы позволяют одновременно регистрировать с высоким разрешением спектр по всему профилю одной или даже нескольких линий. В этом случае реализуется максимальное спектрально-временное разрешение. Естественно, что по одной из пространственных координат (перпендикулярной высоте входной щели спектрографа) должно проводиться сканирование.

В описываемой версии магнитографа ИЗМИРАН выбор был сознательно сделан в пользу получения более полной информации о профилях спектральных линий, т.е. спектромагнитографической схемы. Отметим, что на данный момент солнечный телескоп ИЗМИРАН оснащен одним из самых совершенных автоматизированных гидрирующих устройств [1, 2]. В дополнение к этому для автоматизированной взаимной привязки данных, полученных в результате сканирования по одной из пространственных координат, был разработан регистратор положения входной щели спектрографа относительно особенностей и деталей хромосферы над областью регистрации фотосферных магнитных полей. В результате, основным недостатком спектромагнитографических схем, связанный с невозможностью одновременной регистрации по двум пространственным координатам Солнца, нивелируется точной работой гидрирующей системы.

Первая версия спектромагнитографа ИЗМИРАН работала с 2002 по 2005 гг. [3]. За это время подтверждена эффективность основных идей, использованных при реализации спектромагнитографа. Получено большое количество карт поперечной и продольной компонент магнитного поля и поля скоростей в различных активных областях.

Практика расчетов магнитных полей показала, что информация, заложенная в профилях параметров Стокса, входит в противоречие с просты-

ми теориями образования магнитоактивных линий (например, с теорией Унно [4]), и для корректной интерпретации эксперимента крайне важно проводить наблюдения одновременно в двух и более линиях.

Были выявлены и конструктивные недостатки спектромагнитографа. Конвективные воздушные потоки внутри магнитографа и захваченные ими пылинки вызывали неконтролируемое изменение пространственного распределения освещенности п.з.с.-матрицы и, как следствие, систематические ошибки в определении значений магнитных полей и лучевых скоростей полей. Использование в качестве блока согласующих линз распиленных частей одной линзы приводило к значительному повышению уровня трудно контролируемого рассеянного света. Кроме того, использование этой схемы сильно ограничивало поле зрения в спектральной области.

Поэтому было принято решение о разработке следующей версии спектромагнитографа, в которой, во-первых, изменена схема анализатора поляризации, а во-вторых, все оптические элементы анализатора погружены в иммерсионную жидкость. В результате этих доработок в новой версии спектромагнитографа:

- спектральное поле зрения увеличилось от 1.2 до 2.5 Å, что позволяет проводить наблюдения одновременно в двух магнитоактивных линиях FeI:  $\lambda = 6301.5 \text{ Å}$  и  $\lambda = 6302.5 \text{ Å}$ ;

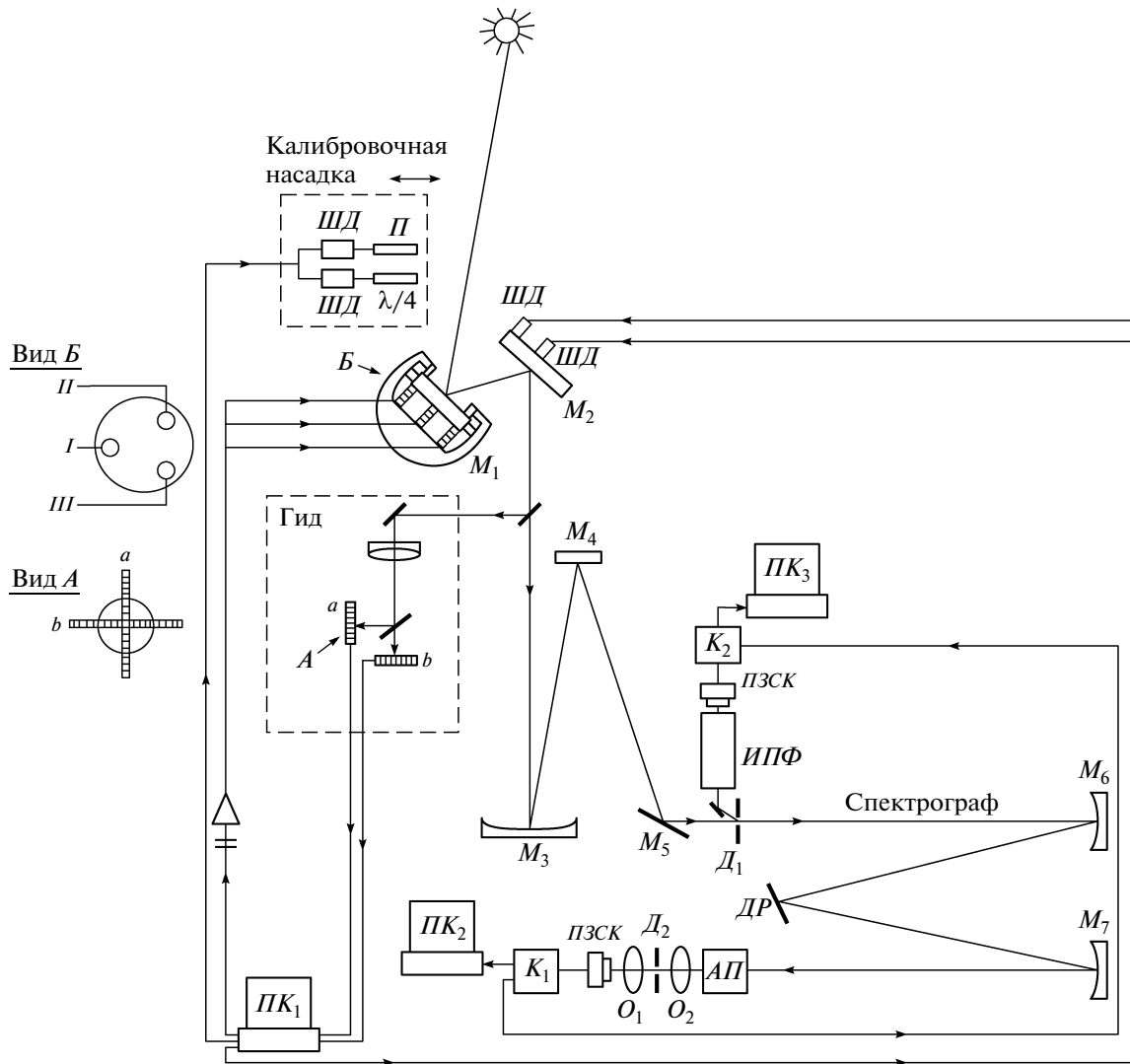
- в 4–5 раз снизился пространственный шум в распределении интенсивности света на п.з.с.-матрице;

- примерно в 2 раза снизился уровень рассеянного света и улучшилась равномерность его распределения.

### 3. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА СПЕКТРОМАГНИТОГРАФА ИЗМИРАН

Функциональная оптическая схема спектромагнитографа ИЗМИРАН (рис. 1) содержит типичные для всех солнечных магнитографов общие составляющие: солнечный телескоп, спектральное устройство, анализатор поляризации и устройства приема, регистрации и обработки данных. Такое сочетание элементов и узлов обусловлено необходимостью решения определенного круга задач, требуемых для получения солнечных магнитограмм: с пространственной селекцией данных измерений и спектрально-поляризационным анализом излучения. Последнее является необходимым, поскольку измерение магнитных полей в солнечной фотосфере осуществляется, как правило, путем оценки эффекта Зеемана в фотосферных магнитоактивных линиях.

Солнечный телескоп ИЗМИРАН представляет собой типичный башенный целостный теле-



**Рис. 1.** Функциональная схема спектромагнитографа ИЗМИРАН. Телескоп:  $M_1$  – целостатное зеркало;  $M_2$  – дополнительное зеркало;  $M_3$  – главное зеркало;  $M_4$  – ньютоновское зеркало;  $M_5$  – поворотное зеркало. Гид:  $a$ ,  $b$  (вид  $A$ ) – п.з.с.-линейки;  $ШД$  – шаговые двигатели;  $I$ ,  $II$ ,  $III$  (вид  $B$ ) – пьезострикционные элементы;  $ПК_1$  – компьютер управления телескопом. Спектрограф:  $D_1$  – входная щель;  $M_6$  – коллиматорное зеркало;  $ДР$  – дифракционная решетка;  $M_7$  – камерное зеркало;  $D_2$  – выходная щель. Основной канал регистрации:  $АП$  – анализатор поляризации;  $O_1$ ,  $O_2$  – блок согласования масштабов;  $ПЗСК$  – п.з.с.-камера;  $K_1$  – контроллер;  $ПК_2$  – компьютер. Канал оптической привязки данных:  $D_1$  – зеркальная щель;  $ИПФ$  – интерференционно-поляризационный фильтр, настроенный на линию  $H_{\alpha}$ ;  $ПЗСК$  – п.з.с.-камера;  $K_2$  – контроллер;  $ПК_3$  – компьютер для получения изображения в линии  $H_{\alpha}$ . Калибровочная насадка:  $П$  – поляризатор;  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка;  $ШД$  – шаговые двигатели.

скоп. Схема его подробно описана в [3]. Фокусное расстояние главного зеркала  $M_3$ , находящегося в основании башни, в сочетании с ньютоновским зеркалом  $M_4$  составляет 17 м. Относительное отверстие телескопа, определяемое отношением входной апертуры (30 см) к фокусу, составляет  $\sim 1/60$ . Наиболее примечательными особенностями телескопа, отличающими его от других аналогичных телескопов, являются широкополосное гидрирующее устройство (гид), выполняющее одновременно функции гида и компенсатора дрожаний изображений Солнца [1, 2], и калибровочная насад-

ка для тестирования поляризационных свойств всего оптического тракта магнитографической схемы.

Изображение Солнца размером 170 мм строится на входной щели дифракционного спектрографа. Схема спектрографа также является типичной для солнечных спектрографов. Она включает в себя коллиматорное  $M_6$  и камерное  $M_7$  зеркала с фокусами 10 м и дифракционную решетку  $ДР$ , рабочая апертура которой  $150 \times 150$  мм с периодом 600 штрихов/мм. Спектрограф имеет дисперсию во втором порядке  $0.8 \text{ \AA}/\text{мм}$ . Спектральное разрешение спектрографа, определяемое дифракцион-

ной решеткой, составляет  $\lambda/(600 \cdot 150) = \lambda/90000 = 0.066 \text{ \AA}$ .

Весьма важным элементом магнитографа является канал оптической привязки данных к элементам и деталям хромосферы. Для этого щетки входной щели  $D_1$  спектрографа сделаны зеркально отражающими. Это позволяет не прошедшее в спектрограф излучение направить в канал получения изображений хромосферы в линии  $H_\alpha$ . Для получения изображений хромосферы используются интерференционно-поляризационный фильтр ИПФ фирмы "Opton", п.з.с-камера фирмы "Proscan" (Германия) с числом пикселей матрицы  $1024 \times 1024$  с размерами  $14 \times 14$  мкм, контроллер камеры  $K_1$  и компьютер ПК<sub>3</sub>.

Важность канала хромосферных изображений определяется возможностью как оперативного наблюдения за проявлениями вспыхивающей активности, так и последующей взаимной привязки данных измерений для получения двумерных изображений магнитограмм. Такую привязку осуществляет специальная программа, использующая алгоритм двумерного коррелятора. С этой целью обеспечивается синхронная регистрация данных на выходе магнитографа и изображений хромосферы, на которых видно текущее положение входной щели спектрографа относительно деталей хромосферы.

При работе магнитографа данные спектрально-поляризационного анализа регистрируются основной п.з.с.-камерой на выходе анализатора поляризации АП одновременно по всей высоте входной щели спектрографа  $D_1$ . П.з.с.-камера основного канала аналогична п.з.с.-камере для получения изображения в линии  $H_\alpha$ . По второй из пространственных координат осуществляется последовательное сканирование. При этом изображение солнечного диска перемещается относительно входной щели спектрографа при помощи поворотов дополнительного зеркала  $M_2$  телескопа шаговыми двигателями ШД и целостатного зеркала  $M_1$  пьезострикционными элементами (I, II, III). Управление процессами сканирования и компенсации дрожаний осуществляется программой специального компьютера ПК<sub>1</sub>. Использование широкополосного гидирующего устройства и канала регистрации хромосферных изображений позволяет в значительной мере нивелировать недостатки, связанные с неодновременной регистрацией всех пространственных точек активной области.

Калибровочная насадка включает в себя  $\lambda/4$  волновую пластинку и линейный поляризатор П, управляемые шаговыми двигателями ШД. Отличительной особенностью принципа калибровки является определение матрицы Стокса сразу всей "оптической стопы", включающей оптику телескопа, спектрографа, анализатора поляризации, объективов  $O_1$ ,  $O_2$  и элементов матрицы п.з.с.-камеры основного измерительного канала. Подроб-

ная схема калибровочной насадки и принцип работы описаны в работе [5].

#### 4. АНАЛИЗАТОР ПОЛЯРИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализатор поляризации является одним из важнейших элементов солнечных магнитографов. При всем разнообразии используемых схемных и конструктивных решений общим для большинства солнечных магнитографов является требование управляемости анализатором поляризации. Чаще всего это осуществляется путем механических манипуляций поляризационными элементами или подачей электрических напряжений с использованием электрооптических эффектов.

Принципиальным отличием анализатора поляризации магнитографа ИЗМИРАН, определившим его схемные и конструктивные особенности, является отсутствие управляемых элементов, так же как и необходимости управления. Все параметры поляризационного оптического излучения (компоненты вектора Стокса) регистрируются одновременно (параллельно). Преимущества такой схемы анализатора поляризации выражаются не только в ее быстродействии, но и в существенном ослаблении влияния факторов нестабильности аппаратуры на результаты спектрально-поляризационного анализа.

Особенно существенным является исключение дрейфов спектрографа. Использование п.з.с.-камеры с большим количеством ( $>10^6$  пикселей) элементов с высоким динамическим диапазоном, а также малая относительная интенсивность излучения, требующая больших экспозиций, настолько снижают частоту опроса матрицы ( $\sim 10$  Гц), что на результатах последовательного поляризационного анализа начинают сказываться все временные нестабильности спектрографа. При параллельном спектрально-поляризационном анализе нестабильности спектрографа вызывают одинаковые смещения для всех участков спектра и во всех поляризациях и поэтому могут быть легко учтены в последующем.

Представляется также важным полная статичность анализатора, повышающая его надежность и обеспечивающая практически неограниченный ресурс. Все это выгодно отличает такой анализатор от аналогичного элемента спектрополяриметра, работающего на спутнике Hinode, где вместо расщепителя используется вращающаяся пластина [6]. Это тем более существенно, что в настоящее время спектромагнитограф ИЗМИРАН рассматривается как прототип магнитографа, который будет использоваться в проекте ИнтерГелиоЗонд. Однако, как будет видно из последующего рассмотрения, такие анализаторы требуют точной взаимной калибровки оптических каналов параллельного анализа.

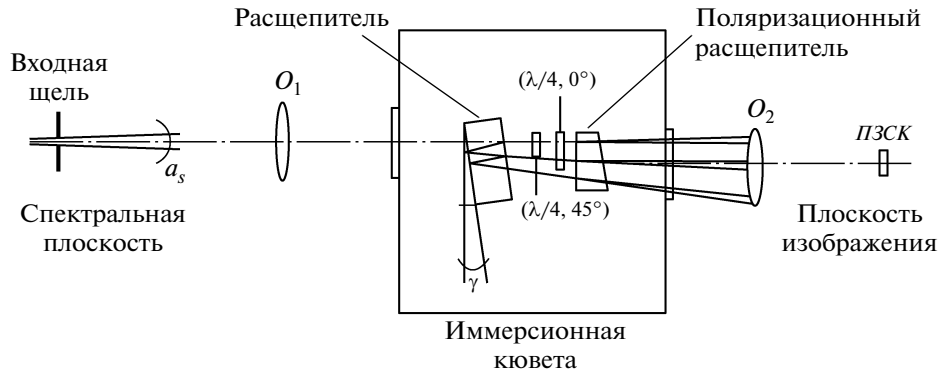


Рис. 2. Оптическая схема анализатора поляризации.

Оптическая схема анализатора поляризации представлена на рис. 2. Схема включает в себя входную щель, коллиматор  $O_1$ , светорасщепитель, две четвертьволновые пластинки, поляризационный расщепитель и объектив  $O_2$ , строящий изображение входной щели на п.з.с.-матрице. Все элементы анализатора поляризации от светорасщепителя до поляризационного расщепителя помещены в герметичную кювету с прозрачными входным и выходным окнами и погружены в иммерсионную жидкость.

Входная щель анализатора одновременно является выходной щелью спектрографа, ограничивающей спектральный интервал анализируемого излучения. Объектив  $O_1$ , в фокусе которого находится входная щель анализатора, ставит в соответствие каждой точке изображения спектра параллельный пучок лучей.

Светорасщепитель делит каждый пучок на три максимально одинаковых по интенсивности пучка с минимальными искажениями поляризации. Хотя неравенство интенсивностей и искажения поляризации учитываются последующей калибровкой, требование идентичности пучков на выходе светорасщепителя не является излишним.

Конструктивно светорасщепитель выполнен в виде прямоугольной призмы из кварца с плоскопараллельными рабочими гранями. Наклон призмы по отношению к оси падающего светового пучка и ее толщина подобраны так, чтобы шаг расщепления исключал возможность взаимного блендирования (наложения) выходных пучков. Кроме того, между рабочими гранями призмы существует “клин”, позволяющий строить из пучков неперекрывающиеся изображения.

Коэффициенты отражения различных участков граней подобраны из требования равенства пучков по интенсивности. При подборе угла наклона призмы к пучкам и состава светоделительных отражательных покрытий учитывалось также требование минимальности искажений поляризации, хотя, как мы уже отмечали, все факторы

неидеальности учитываются последующей калибровкой всей схемы.

Как видно из рис. 2, первый из пучков, выйдя из светорасщепителя без отражений, проходит последовательно две четвертьволновые пластинки, повернутые друг относительно друга на угол  $45^\circ$ , второй пучок, испытав два отражения в светорасщепителе, проходит через одну четвертьволновую пластинку, а третий пучок после четырех отражений проходит прямо на поляризационный расщепитель. Комбинация четвертьволновых пластинок, используемых в схеме, является типичной. Отличие состоит в том, что в известных анализаторах поляризации пучок через комбинацию четвертьволновых пластинок проходит последовательно в результате управления анализатором поляризации. В представленной схеме пучок, проходя через элементы комбинации, последовательно делится на шесть частей, и на выходе анализатора для каждого из них строится отдельное изображение. При этом состояние анализатора остается постоянным, и анализ поляризации проводится параллельно. Отметим также, что четвертьволновые пластины выполнены как элементы “нулевых порядков”, что определяет их широкополосность и высокую светосилу.

Назначением поляризационного расщепителя является разнесение по углам пучков с ортогональной линейной поляризацией. Углы расщепления рассчитаны так, чтобы в последующем изображении спектров, полученные в разных поляризациях, строились без взаимного блендирования. Поляризационный расщепитель, являющийся анализатором линейной поляризации, выполнен из шпата. Конструкция таких расщепителей также хорошо известна в практике поляризационных измерений.

Комбинация четвертьволновых пластин и анализатора линейной поляризации дает при идеальном исполнении этих элементов следующие интенсивности в каждом из шести пучков на выходе анализатора поляризации:

$$I + Q; \quad (1)$$

$$I - Q; \quad (2)$$

$$I + V; \quad (3)$$

$$I - V; \quad (4)$$

$$I + U; \quad (5)$$

$$I - U. \quad (6)$$

Здесь  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  – параметры Стокса в соответствии с общепринятыми обозначениями. Для получения четырех параметров Стокса  $I$ ,  $Q$ ,  $U$ ,  $V$ , определяющих полный вектор Стокса, в принципе достаточно четырех линейно независимых комбинаций интенсивностей. Тем не менее, используются именно шесть представленных комбинаций. Причина заключается в том, что выражения (1)–(6) позволяют получить наиболее важные для оценки эффекта Зеемана параметры ( $Q$ ,  $U$ ,  $V$ ) путем соответствующих вычитаний интенсивности в каналах регистрации, что в свою очередь позволяет эффективно исключить из конечных результатов любые аддитивные помехи, способные приводить к систематическим ошибкам. Такой способ улучшения соотношения сигнал/шум аналогичен по своей природе модуляционному способу, который реализуется в последовательных схемах анализа.

Высота всех элементов анализатора поляризации, начиная от входной щели и кончая поляризационным расщепителем, рассчитывается такой, чтобы обеспечить прохождение изображения спектра высотой 20 мм. Поскольку фокусные расстояния коллиматорного и камерного зеркал спектрографа одинаковы, то это соответствует ~200" на изображении солнечного диска (при фокусном расстоянии телескопа ~17 м).

Использование иммерсионной жидкости, в которую погружены элементы анализатора поляризации, преследует сразу две цели: снижение уровня интенсивности лучей, отраженных от прозрачных граней, и защиту от пылинок поверхности элементов. Последнее является особенно важным для параллельных схем анализа, поскольку пылинки способны нарушить идентичность условий распространения пучков, в том числе и после калибровки. Что касается уменьшения влияния отраженных от граней пучков, то это особенно важно для уменьшения интерференционных эффектов в плоскопараллельных поляризационных пластинах.

Коэффициент преломления иммерсионной жидкости, в качестве которой использовано вакуумное масло, весьма близок к коэффициенту преломления кварца, из которого изготовлено большинство элементов анализатора поляризации.

Назначением объектива  $O_2$  и п.з.с.-камеры является получение и регистрация шести изображений спектра на выходе спектрографа в шести различных поляризациях, приблизительно описываемых выражениями (1)–(6). Поскольку все оптические поверхности анализатора являются плоскими, то

пучки, сформированные объективом  $O_1$ , остаются параллельными и на выходе из анализатора, и все шесть изображений строятся в фокальной плоскости объектива  $O_2$ .

Дополнительно комбинация объективов  $O_1$  и  $O_2$  позволяет согласовать масштабы изображения спектра на выходе спектрографа с размерами приемной матрицы п.з.с.-камеры. Это осуществляется путем выбора фокусных расстояний объективов  $O_1$  и  $O_2$ . Расширение спектрального участка позволяет получать данные о воздействии магнитного поля сразу на две фотосферные магнитоактивные линии нейтрального железа FeI:  $\lambda = 6301.5 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 6302.5 \text{ \AA}$ . Кроме того, в зоне регистрации оказываются еще две линии атмосферного кислорода  $O_2I$ :  $\lambda = 6302.0 \text{ \AA}$  и  $\lambda = 6302.76 \text{ \AA}$ .

Регистрация спектров атмосферных молекул в данной схеме магнитографа имеет большое значение. Они играют роль точек отсчета (реперов) при определении доплеровских смещений солнечных спектральных линий, а также используются в процедурах калибровки. Пример шести изображений спектра при наличии на входной щели спектрографа солнечного пятна приведен на рис. 3.

Отметим, что, несмотря на принятые меры по выравниванию интенсивности пучков в различных каналах (подбором коэффициентов деления в расщепителе и т.д.), непосредственно использовать данные детектирования интенсивности для последующей оценки компонент вектора Стокса с требуемой точностью не удалось. Причиной тому является не только неидентичность условий распространения излучения по сечению пучков, но и существенная неидентичность приемных элементов п.з.с.-матрицы – пикселей. Это та самая обратная сторона медали, с которой приходится иметь дело при использовании схем параллельного спектрально-поляризационного анализа. Получение данных об интенсивностях требует специальной калибровочной процедуры, включающей дополнительные эксперименты и тщательного анализа с привлечением специально разработанных для этой цели алгоритмов. Основной целью калибровочных процедур является учет пространственных особенностей всей регистрирующей схемы магнитографа и получение возможности сопоставления “истинных”, “неиспорченных” схемой распределений интенсивностей. В силу специфики предварительной обработки данных спектромагнитографов процедура обработки будет описана в следующей статье [7].

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 4 приведены результаты измерения параметров Стокса в области слабого магнитного поля. Видно, что в параметрах  $Q$ ,  $U$  и  $V$  отсутствуют

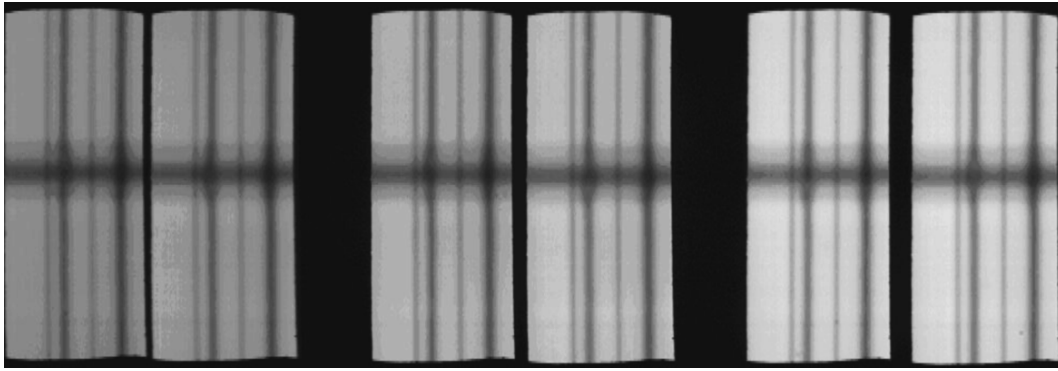


Рис. 3. Изображения входной щели магнитографа в шести поляризациях при наличии на входной щели спектрографа солнечного пятна.

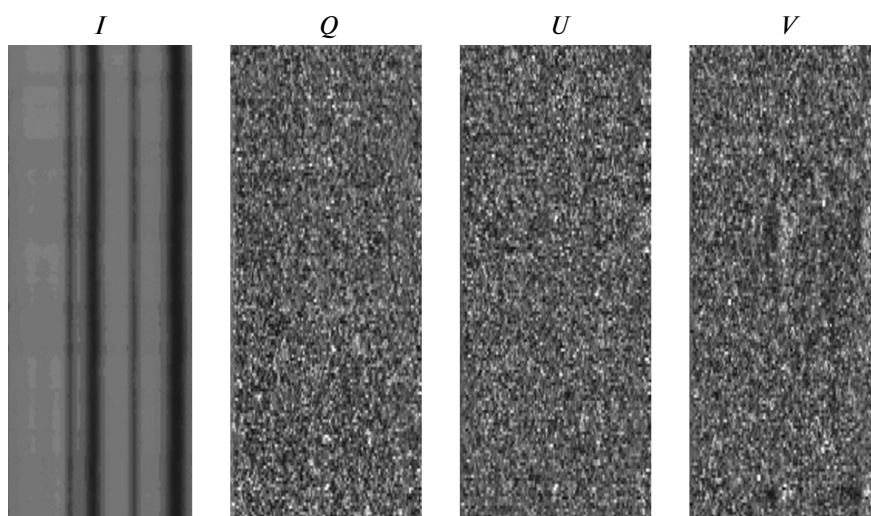


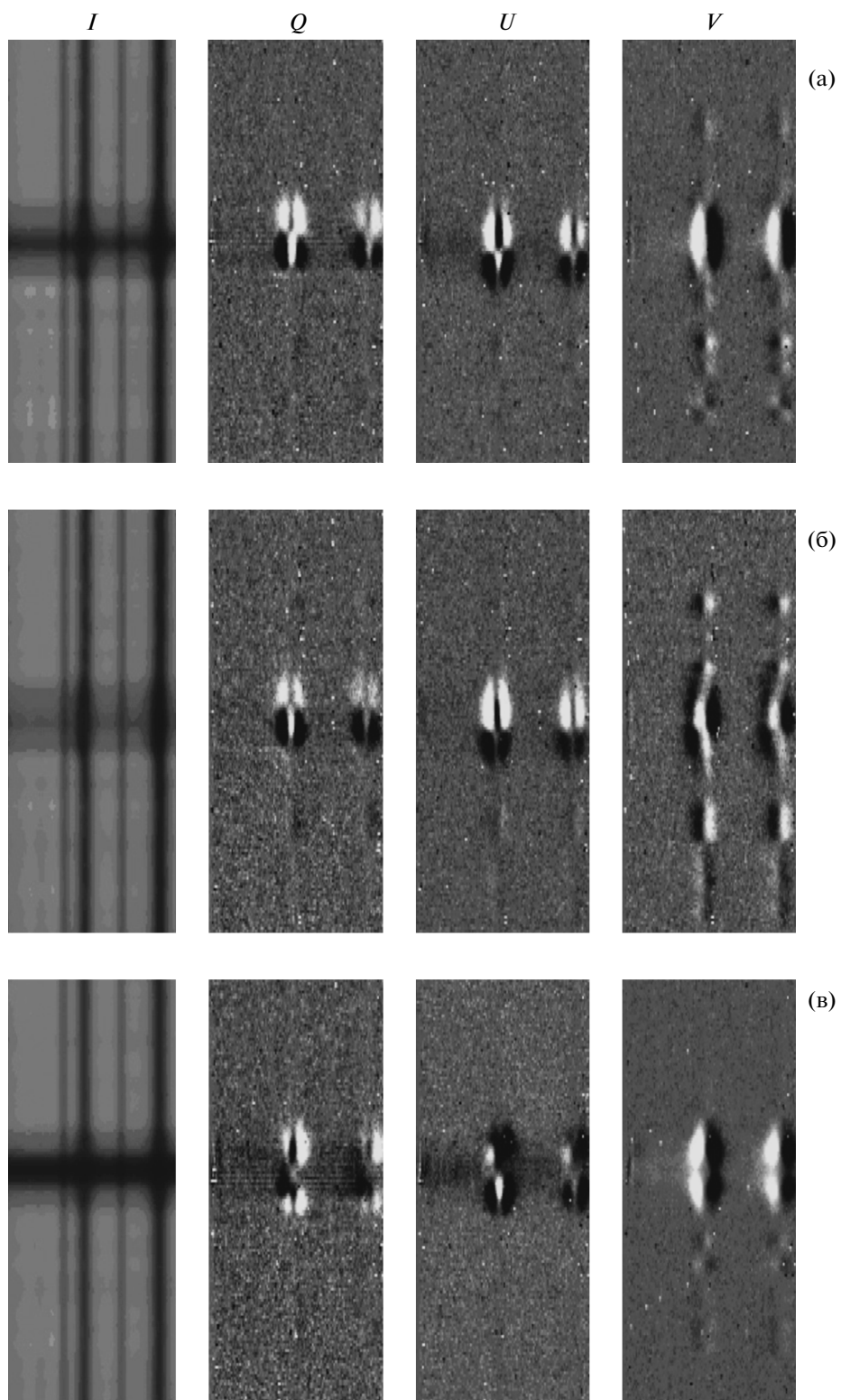
Рис. 4. Результаты измерения параметров Стокса в области Солнца со слабым магнитным полем.

следы артефактов, интерференции и спектральных линий (за исключением проявления слабого продольного поля в  $V$  параметре). По статистическим свойствам  $Q$ ,  $U$ ,  $V$  близки к пространственно-временному белому шуму со среднеквадратичным отклонением (с.к.о.)  $2 \cdot 10^{-3}$  при нормировке континуума на единицу. Предельная емкость пикселей матрицы  $N$  составляет  $4 \cdot 10^5$  электронов, и соответственно с.к.о. квантового шума равно  $N^{-1/2} \approx 1.6 \cdot 10^{-3}$ . Поэтому можно утверждать, что при единичных измерениях спектромагнитограф работает на пределе своих технических возможностей. Дальнейшее повышение точности может быть связано либо со статистической обработкой массива измерений, либо с увеличением емкости пикселя, что потребует увеличения экспозиции.

При световом потоке, обусловленном возможностями телескопа и спектрографа, типичная экспозиция составляет 0.5 с. Технические особенности контроллеров камер позволяют записывать подряд только 90 кадров, что обычно использует-

ся для одного сканирования активной области. Тогда минимальное время между двумя сканами составляет  $\sim 1.5$  мин, что сравнимо с характерными временами динамических процессов в фотосфере. Поэтому статистическая обработка результатов должна учитывать динамику исследуемой области.

На рис. 5 изображены параметры Стокса в различных разрезах одиночного пятна, наблюдаемого 30 июня 2010 г. На рис. 5а приведен случай, когда параметр Стокса  $V$  близок к антисимметричному, а  $Q$  и  $U$  приблизительно симметричны. Однако такое поведение параметров Стокса, скорее, исключение, а, как правило, наблюдается искажение симметрии (кроссовер-эффект). На рис. 5б приведен пример, когда параметр Стокса  $V$  теряет свою антисимметрию, в то время как  $Q$  и  $U$  остаются симметричными. На рис. 5в приведен пример, когда симметрию теряют параметры  $Q$  и  $U$ , в то время как  $V$  остается примерно антисимметричным. Но наиболее типичны слу-



**Рис. 5.** Примеры разреза солнечного пятна: **а** – параметр Стокса  $V$  близок к антисимметричному, а  $Q$  и  $U$  приблизительно симметричны; **б** – параметры Стокса  $Q$  и  $U$  симметричны, а  $V$  – асимметричен; **в** – параметры  $Q$  и  $U$  асимметричны, а  $V$  параметр антисимметричен.



чаи, когда все три параметра Стокса в той или иной мере искажены кроссовер-эффектом.

Более подробное рассмотрение профилей параметров Стокса показывает, что они имеют весьма сложную и тонкую структуру, обусловленную тонкой пространственной структурой параметров плазмы (магнитного поля, поля скоростей, температуры и др.), которые меняются как вдоль, так и поперек луча зрения. При наземных наблюдениях с разрешением хуже 1" главную роль играют изменения параметров поперек луча зрения. В космических наблюдениях с разрешением выше 0.2" изменения параметров как вдоль, так и поперек луча зрения могут оказаться сравнимыми. Неотъемлемой частью спектромагнитографа должен быть комплект программ, позволяющих по тонкой структуре параметров Стокса множества магнитоактивных линий восстанавливать тонкую структуру параметров солнечной плазмы.

Чаще всего для перехода от параметров Стокса к магнитным полям используются формулы Унно [4]. Как минимум, они требуют антисимметрии параметра Стокса  $V$  и симметрии параметров  $Q$  и  $U$ . Из рис. 5б, 5в видно, что отличия реальных профилей линий от модельных столь существенны, что под сомнение попадают многие результаты, полученные ранее при помощи фильтровых и беккоковских магнитографов.

Однако в слабых магнитных полях параметр Стокса  $V$  линейен по продольному полю, и формулы Унно будут адекватны, если справедлива модель Милна—Эдингтона и под магнитным полем понимать среднее поле в области замыкания изображения. В этом случае ошибку определения поля, соответствующую шуму  $V$  параметра, нетрудно рассчитать теоретически. При с.к.о. шума  $V$  параметра, равном  $2 \cdot 10^{-3}$ , с.к.о. шума продольного поля, измеренного по линии 6302.5 Å, составляет примерно 4 Гс.

Параметры  $Q$  и  $U$  квадратичны по поперечному полю, но если формально использовать формулы Унно, то ошибку поля по квантилю 0.7 можно оценить в 120 Гс. Поскольку функция распределение поля не гауссова, то эту величину лучше трактовать как порог чувствительности магнитографа к поперечному полю.

На сайте ИЗМИРАН <http://helios.izmiran.rssi.ru/hellab/magdata/default.htm> приведены карты продольного и поперечного полей в окрестности одиночного пятна, снятые с интервалом ~3.5 мин. Оценка ошибок измерений слабых полей по по-

вторяемости соответствует теоретической, и это подтверждает, что определяющую роль в формировании ошибок играет квантовый шум приемников.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье описана новая версия спектромагнитографа ИЗМИРАН. Результаты первых наблюдений свидетельствуют о том, что благодаря схемным и конструктивным изменениям новая версия прибора превосходит по своим возможностям предыдущую версию. Точность прибора для единичного измерения, соответствующего одному кадру (изображению спектра в шести поляризациях), равна ~4 Гс для продольного поля и ~120 Гс для поперечного. Эта точность ограничивается квантовыми шумами приемника. Дальнейшее повышение точности прибора связано либо с увеличением емкости пикселей приемной матрицы при соответствующем увеличении времени экспозиции, либо со статистической обработкой серии кадров с учетом динамики исследуемой области Солнца. Наиболее важным представляется вывод о том, что данные, получаемые при помощи спектромагнитографов, несут значительно более богатую информацию о состоянии фотосферы, чем классические солнечные магнитографы. Однако, для того чтобы использовать эту информацию в полной мере, необходимо разработать адекватные алгоритмы расчета параметров солнечной плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты РФФИ 11-02-00-259, 10-02-00-960а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Черрагин Н.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 1. С. 120.*
2. *Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Черрагин Н.П. и др. // ПТЭ. 2000. № 1. С. 125.*
3. *Кожеватов И.Е., Обридко В.Н., Руденчик Е.А. и др. // ПТЭ. 2002. № 1. С. 107.*
4. *Unno W. // Publications of Astronomy Society of Japan. 1956. V. 8. P. 108.*
5. *Кожеватов И.Е., Руденчик Е.А., Черрагин Н.П. и др. // ПТЭ. 2004. № 5. С. 103.*
6. [http://solar-b.nao.ac.jp/index\\_e.shtml](http://solar-b.nao.ac.jp/index_e.shtml)
7. *Руденчик Е.А., Обридко В.Н., Кожеватов И.Е., Безрукова Е.Г. // ПТЭ. 2011. № 4. С. 139.*