

УДК 520.24; 681.51

СОЛНЕЧНЫЙ ТЕЛЕСКОП ОПЕРАТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ*

В. С. Пещеров¹, В. М. Григорьев¹, П. М. Свидский², А. Н. Бевзов³,
К. И. Будников³, С. В. Власов³, А. А. Зотов³, В. Н. Котов³,
А. К. Китов¹, А. А. Лубков³, С. А. Лылов³, С. В. Перебейнос³

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291
E-mail: vsp@iszf.irk.ru

²Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова,
129128, Москва, ул. Ростокинская, 9
E-mail: svidsky@mail.ru

³Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: lubkov@iae.nsk.su

Рассматриваются функциональные и метрологические характеристики нового солнечного телескопа, предназначенного для получения количественных данных о крупномасштабных магнитных полях (КМП) Солнца. Полная автоматизация процесса измерений, применение ПЗС-матриц в системах сканирования изображения и регистрации спектров и оптическая схема, согласованная с основной задачей телескопа, привели к существенному повышению оперативности, качества, точности измерений КМП и расширению круга задач в сравнении с существующими телескопами. Созданная автоматизированная система управления телескопом, измерительная система и программа обработки результатов измерений в реальном времени позволяют получать магнитограмму КМП с требуемой точностью за время около 15 мин.

Ключевые слова: телескоп, автоматизированная система управления, измерения КМП, Солнце, магнитограмма.

Введение. Солнечные магнитные поля играют основную роль в 11-летнем цикле солнечной активности и в вариациях солнечной радиации. Переменность солнечного излучения в видимой части спектра менее 1 %, но в коротковолновой части спектра она очень высока. Эти вариации могут иметь важные следствия для жизни на Земле.

Экспериментальное исследование крупномасштабных магнитных полей (КМП) продолжает занимать важное место в современной физике Солнца [1], что определяется их ключевой ролью в динамических процессах во внешних слоях солнечной атмосферы и гелиосфере [2]. Установлена связь структуры межпланетного магнитного поля (ММП) и геомагнитной активности с КМП. На этой основе развиты методы прогноза параметров ММП, солнечного ветра и геомагнитных возмущений по данным измерений солнечных магнитных полей. В последние годы вопросы эволюции магнитного потока Солнца, в том числе открытого, определяющего магнитное поле в межпланетной среде, приобрели большое значение в связи с широким обсуждением механизма влияния солнечной активности на климат Земли по цепочке: открытый магнитный поток Солнца — модуляция космических лучей — глобальная облачность — солнечная инсоляция.

*Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008–2015 годы» и при поддержке Сибирского отделения РАН (Программа фундаментальных исследований, проект «Методы и инструменты физического эксперимента»).

На протяжении трёх циклов солнечной активности наблюдения КМП производятся в Саянской солнечной обсерватории (ССО) Института солнечно-земной физики (ИСЗФ) Сибирского отделения РАН [3] и обсерватории им. Вилкокса Стенфордского университета (WSO) [4]. Но эти наблюдения ограничены измерениями только продольной компоненты КМП и получением магнитограмм с очень низким временным и пространственным разрешениями. В методе получения магнитограмм полного вектора КМП при использовании эффекта Зеемана необходимы измерения всех четырёх параметров Стокса (I, Q, U, V) и в связи с этим существенное увеличение времени измерений примерно на порядок в сравнении с измерениями продольной компоненты [5].

Основными целями при создании солнечного телескопа оперативных прогнозов (СТОП) нового поколения являлись увеличение временного разрешения при сохранении достигнутой на СТОП ССО точности измерений V -параметра Стокса и обеспечение возможности измерений всех параметров Стокса. Для этого потребовалась полная компьютерная автоматизация процесса наблюдений.

В инструментальной системе координат изображение Солнца непрерывно смещается и изменяется. Угловое разрешение элемента магнитограммы определяет максимально допустимое время её измерения без «смаза». Для разрешения в 30 с приемлемое время измерения магнитограммы не должно превышать 30 мин.

Измерительная система, методы расчёта параметров Стокса и магнитограмм, используемых на СТОП ССО [5, 6], были взяты за основу создания нового телескопа.

Структура и принцип работы телескопа. По своим функциональным характеристикам СТОП представляет собой стоксметр-магнитограф, который позволяет регистрировать распределение параметров Стокса в выбранном участке длин волн оптического диапазона для элементов фотосферы Солнца с заданными гелиографическими координатами. Измерения в магниточувствительных спектральных линиях и последующие вычисления дают возможность с использованием теоретических моделей образования линий поглощения в фотосфере Солнца получать количественную информацию о параметрах магнитного поля.

Общая блок-схема СТОП приведена на рис. 1. Наведение телескопа на Солнце производится с помощью зеркал ($D = 150$ мм) двухканальной целостатной установки (ДЦУ). Телеобъектив (ТО) строит в плоскости вертикальной входной щели спектрографа (ЩС)

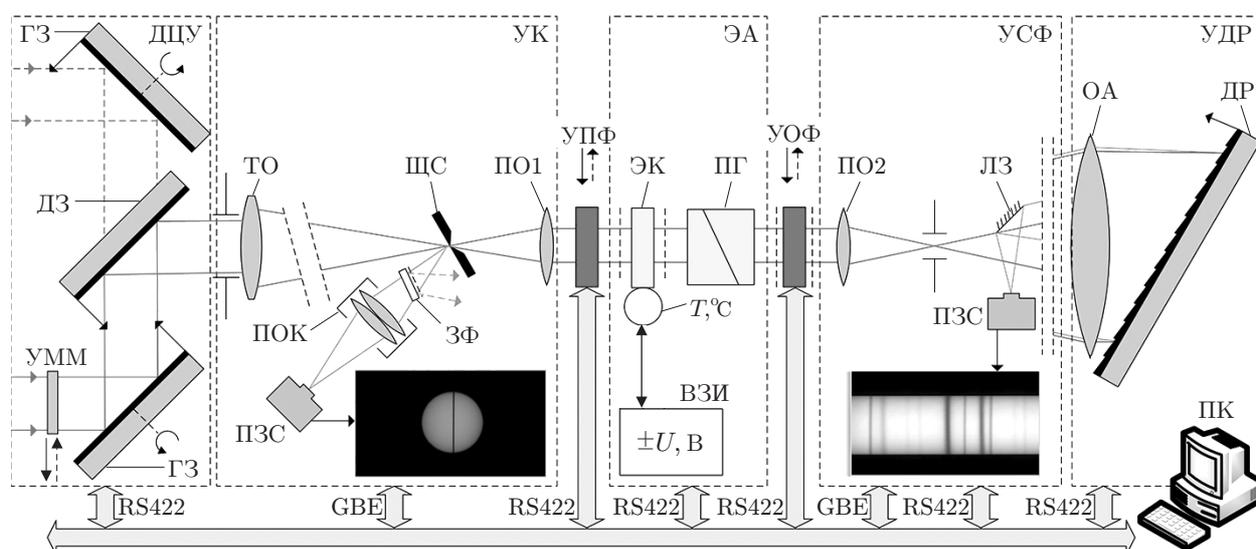


Рис. 1

сфокусированное изображение полосы диска Солнца. За ЩС между двумя перестраиваемыми объективами (ПО1, ПО2) установлены элементы электрооптического анализатора (ЭА) и отсекающие поляризационные фильтры. Расходящиеся за щелью пучки света ПО1 преобразует в параллельные для обеспечения нормальной работы ЭА и отсекающих поляризационных фильтров, а ПО2 восстанавливает параметры входного пучка (строится изображение щели в масштабе 1 : 1). Свет, отражённый от зеркальных щёчек ЩС, ориентированных под углом 15° к оптической оси ТО, используется для построения совмещённых изображений ЩС и диска Солнца в плоскости ПЗС-матрицы с помощью предметного объектива координатометра (ПОК) в масштабе 1 : 1. Перед ПОК установлен нейтральный зеркальный фильтр (ЗФ), отбрасывающий избыточный поток света в сторону от оптической оси. Свет, прошедший входную ЩС, освещает с помощью объектива автоколлиматора (ОА) отражательную дифракционную решётку. С применением ОА и ломающего зеркала (ЛЗ) строятся квазимонохроматические изображения ЩС в фокальной плоскости спектрографа (в масштабе 1 : 1), где установлена ПЗС-матрица строками параллельно направлению дисперсии. Каждой строке ПЗС-матрицы соответствует полоса спектра от прямоугольного элемента изображения Солнца размером, определяемым шириной щели спектрографа и размером пикселя. Спектральное разрешение для заданного порядка спектра определяется размером пикселя вдоль дисперсии и шириной щели. Объективы спектрографа ($F = 1600$ мм, $D = 147$ мм) и ПО1, ПО2 ($F = 150$ мм, $D = 32$ мм) оптически согласованы с объективом телескопа ($F = 500$ мм, $D = 42$ мм), с которым, в свою очередь, согласован предметный объектив ($F = 100$ мм, $D = 32$ мм), что обеспечивает построение невиньетированных изображений. Все используемые в оптической схеме объективы — двухлинзовые ахроматы.

Электрооптический анализатор является анализатором круговой поляризации (для V -параметра Стокса), который позволяет поочередно гасить циркулярно поляризованный свет противоположного знака и состоит из электрооптического кристалла (ЭК) и расположенной за ним призмы Глана (ПГ). Управление кристаллом осуществляется программируемым высоковольтным знакопеременным источником (ВЗИ) питания. Для настройки ЭА, ВЗИ и калибровки измерений перед ЭА вводятся калибровочные поляризационные фильтры с известными параметрами. Для обеспечения возможности измерений Q - и U -параметров Стокса ЭА дополнен механическим модулятором в виде фазовых пластинок (ФП), вводимых перед целостатом, которые преобразуют Q - и U -параметры в V -параметры. Кроме того, с помощью механического модулятора знак параметров Стокса поочередно изменяется на противоположный, при этом инструментальные искажения остаются неизменными, обеспечивая таким способом возможность учёта инструментальных ошибок измерений.

Все устройства телескопа, кроме ПК, установлены вне отапливаемой части павильона на едином горизонтальном фундаменте (рис. 2, фотографии внутри павильона СТОП Уссурийской астрофизической обсерватории); входная часть с целостатом закрыта куполом с регулируемым световым окном.

Состав и принцип работы автоматизированной системы управления СТОП.

Структура, состав и функциональные характеристики АСУ СТОП и её особенности определены назначением основных автоматизированных узлов телескопа. Структура АСУ ориентирована на достижение максимальной скорости измерений и их полную автоматизацию с использованием современной техники программирования и микроконтроллеров. Для этого применены матричные фотоприёмники [7, 8] вместо одноканальных и многоканальных линейных. Элементы телескопа, требующие своего позиционирования (во время измерений), снабжены шаговыми двигателями типа MDrivePlus [9]. Созданы оригинальные автоматизированные электромеханические и электронные устройства телескопа, такие как ДЦУ, координатометр и др. Применён программируемый высоковольтный знакоперемен-

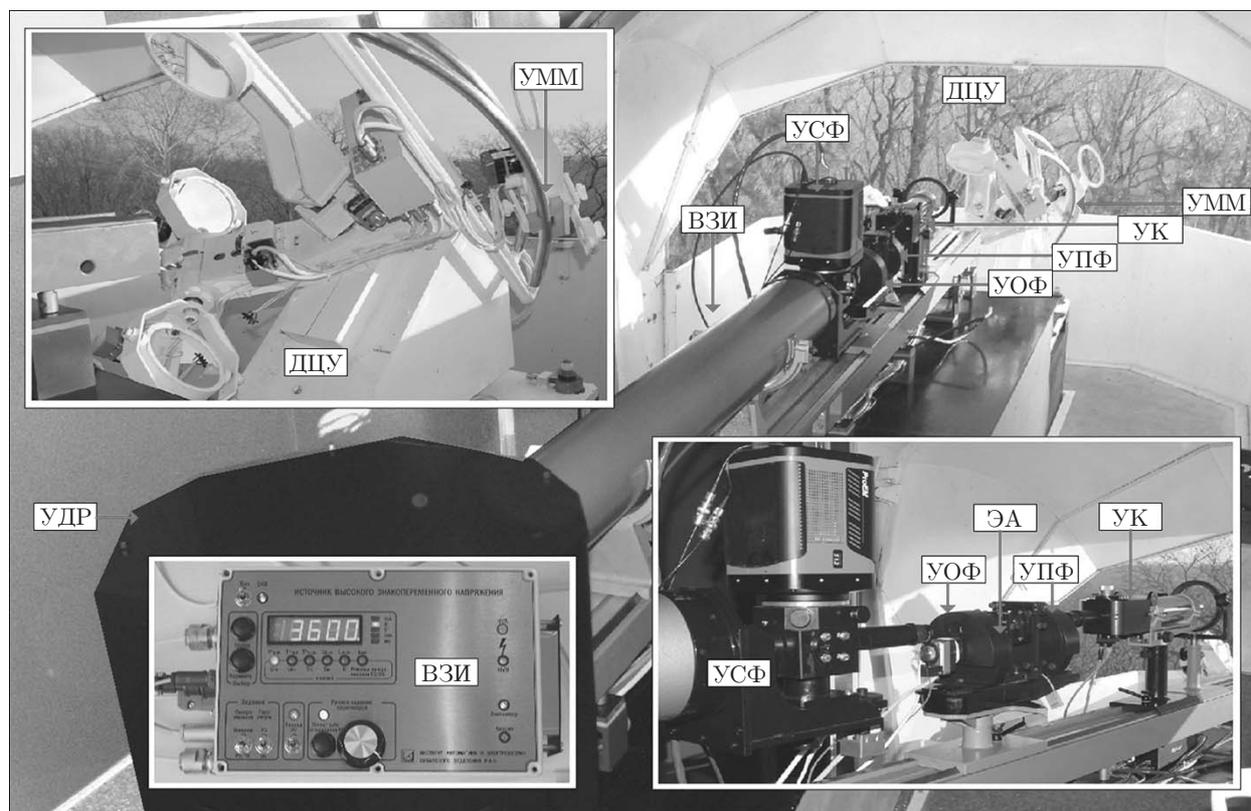


Рис. 2

ный источник питания [10]. К основным автоматизированным узлам относятся следующие устройства (см. рис. 2): узел механического модулятора (УММ), ДЦУ, узел координатометра (УК), ВЗИ, узел отсекающих фильтров (УОФ), узел калибровочных поляризационных фильтров (УПФ), узел спектрофотометра (УСФ), узел дифракционной решётки (УДР).

Узел механического модуля предназначен для автоматического ввода во входной зрачок телескопа, а затем для вывода из него ФП и УПФ и оснащён электромеханическим приводом револьверного типа. Наведение телескопа на Солнце и построение его неподвижного изображения на входной щели спектрографа обеспечивает ДЦУ совместно с телеобъективом с помощью конструктивно объединённой системы из трёх зеркал, снабжённой электромеханическим приводом часового ведения. Привод имеет двухступенчатый червячный редуктор (для всей системы) и связанный с ним барабанно-ленточный (для дополнительного зеркала). Два главных зеркала (ГЗ), симметрично разнесённые относительно друг друга и часовой оси, вращаются вокруг этой оси с часовой скоростью и отбрасывают свет на дополнительное зеркало (ДЗ) по одному из двух оптических каналов. Плоскость ДЗ совмещена с часовой осью и вращается вокруг неё со скоростью вдвое меньшей часовой. Для переключения каналов ДЗ снабжено соответствующим приводом. Для обеспечения безлюфтового быстрого и тонкого позиционирования изображения оба ДЗ снабжены дополнительными приводами кулачкового типа (кулачки в виде спирали Архимеда): одним общим и двумя отдельными, позволяющими смещать изображение во взаимно-перпендикулярных направлениях. Узел координатометра предназначен для измерений положения изображения относительно щели спектрографа с помощью ПЗС-камеры "Basler pilot piA1900-32gm" [7] и состоит из конструктивно жёстко связанных элементов: телеобъектив, щель, предметный объектив и ПЗС. Для генерации знакопеременных им-

пульсов высокого напряжения прямоугольной формы регулируемых амплитуды, частоты и фазы используется ВЗИ. Нагрузкой ВЗИ является ЭК. Источник оснащён датчиком для измерения температуры кристалла. Узлы ОФ и ПФ служат для автоматической замены фильтров и выполнены в виде электромеханических устройств револьверного типа. Диск с посадочными гнёздами для фильтров установлен непосредственно на валу шагового двигателя. Узел спектрофотометра состоит из подвижной (вдоль оптической оси) платформы, на которой установлены ПЗС-камера (характеристики см. [8]), ЛЗ и ПО2. Для обеспечения автоматической фокусировки спектра платформа снабжена приводом. Узел дифракционной решётки (ДР) состоит из вращающейся в горизонтальной плоскости платформы с установленной на ней ДР, рабочая поверхность и направление штрихов которой совмещены с осью вращения. Платформа оснащена электромеханическим приводом и может поворачиваться без угловых ограничений, обеспечивая позиционирование заданного участка спектра любого порядка в плоскости ПЗС-матрицы спектрофотометра.

Подсистемами АСУ СТОП выполняются следующие основные функции:

- полуавтоматическое наведение телескопа на Солнце по вычисленным для текущего времени координатам, часовое и тонкое гидирование Солнца;
- автоматическое определение направления оси вращения Солнца относительно входной щели спектрографа по измерениям координат суточной линии и вычисленному позиционному углу (при этом регистрируется траектория движения центра изображения относительно входной щели, когда выключено часовое ведение);
- позиционирование изображения в заданные координаты относительно щели и измерение текущих координат центра изображения относительно центра щели;
- фокусировка спектра на основе определения контраста изображений спектра по текущим данным о распределении интенсивности вдоль дисперсии;
- калибровка измерительных оптико-электронных каналов спектрофотометра и координатометра способом, в котором плоское поле имитируется путём пошагового сдвига и регистрации изображений (полученные для каждого шага изображения используются для вычисления относительных передаточных коэффициентов каждого пикселя);
- регулировка высокого напряжения при изменении температуры ЭК исходя из показаний датчика и известной функциональной зависимости рабочего напряжения от температуры либо из результатов прямых измерений коэффициента модуляции с применением калибровочных фильтров;
- регистрация спектра с заданной или адаптивной выдержкой для одного кадра, с заданными количеством кадров в одном измерении и количеством измерений;
- автоматическая регистрация спектров для заданных координат изображения Солнца по заданному алгоритму и последующие вычисления значений параметров Стокса и магнитного поля (получение магнитограмм).

В реализации аппаратно-программного комплекса АСУ СТОП есть принципиальные особенности. Все исполнительные и большинство измерительных устройств имеют встроенный контроллер и подключены к единственному управляющему ПК по дуплексным RS422 каналам связи. Используются однотипные шаговые двигатели. Контроллеры двигателей позволяют определять текущее состояние приводов и задавать режимы работы с помощью пользовательских микропрограмм. Управление и синхронизация работы систем телескопа производятся с помощью многофункциональной платы ввода/вывода цифровых и аналоговых сигналов. Применение цифровых и аналоговых каналов связи в управлении двигателями позволило обеспечить работоспособную подсистему гидирования, основанную на вычислении координаты центра изображения Солнца относительно щели спектрографа. Эта подсистема имеет меньшее быстродействие в сравнении с аналогичной системой с одноканальными фотоприёмниками [11], но зато оператор получает компьютерное изображение Солнца. Компьютер снабжён тремя GBE Intel каналами связи, к которым

подключены ПЗС-камеры и внешний канал сети Ethernet. Синхронизация работы различных электронных устройств СТОП решена на аппаратно-программном уровне. ПЗС-камера спектрофотометра совместно с ВЗИ формирует временной интервал единичного цикла измерений, который соответствует двум одинаковым по длительности и последовательным кадрам ПЗС. Переключение источника в новое состояние производится синхросигналом записи кадра, причём каждый записанный кадр сопровождается информацией о параметрах состояния источника, а изменение режимов работы других систем происходит по окончании единичного цикла измерений.

Программное обеспечение (ПО) АСУ состоит из инструментального и прикладного пакетов программ, которые позволяют управлять подсистемами СТОП как автономно, так и по заданному алгоритму процесса измерений. Оно разработано с использованием кросс-платформенного инструментария Qt [12]. Инструментальное ПО предоставляет непосредственный доступ к контролю и управлению конечными устройствами.

Прикладное ПО даёт возможность выполнять следующие операции:

- отображение параметров текущего состояния систем телескопа, изображений спектра и Солнца;
- вычисление и отображение результатов измерений в квазиреальном времени;
- предварительная статистическая обработка и сжатие исходных данных;

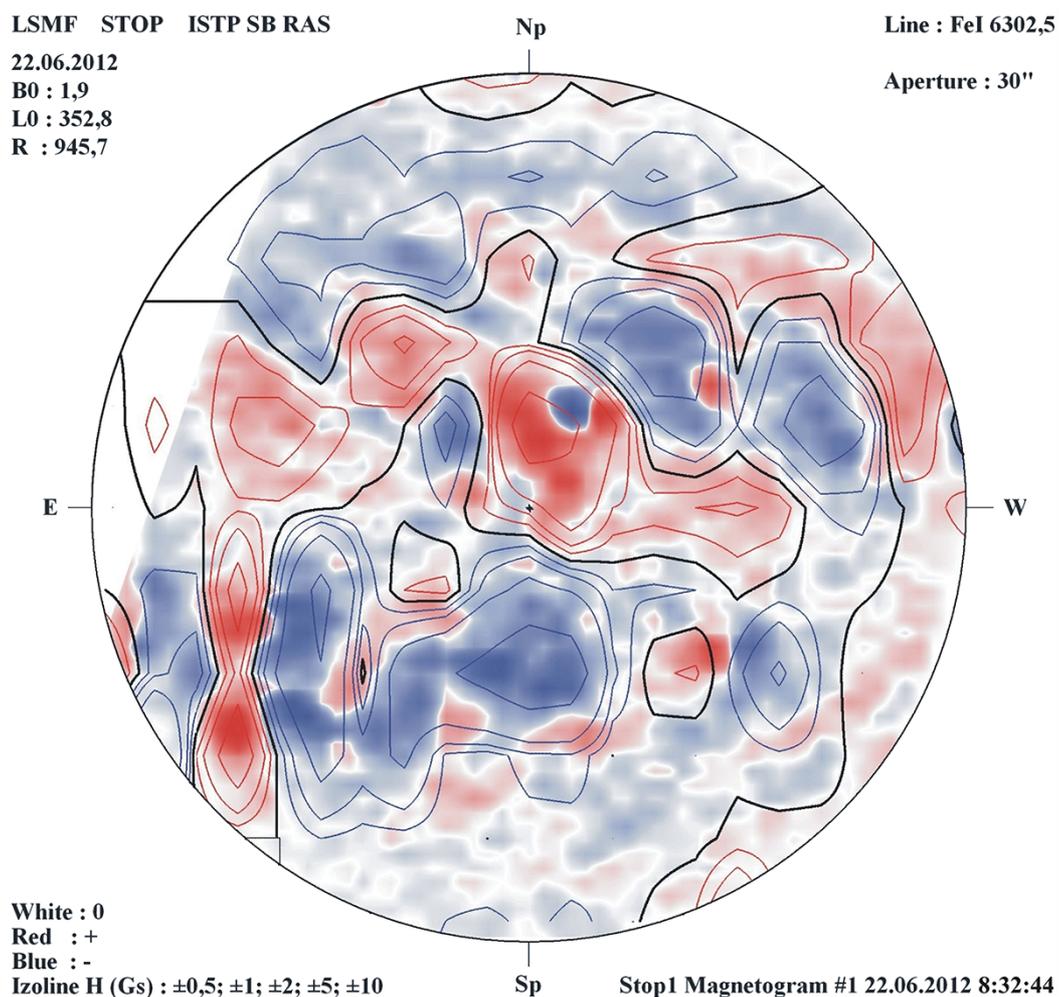


Рис. 3

- формирование и сохранение файлов данных;
- формирование заданий подсистемам управления;
- автоматическое выполнение процесса измерений;
- инициализация, тестирование и калибровка оборудования перед измерениями.

Интерактивное управление телескопом и контроль процесса наблюдений осуществляется с помощью графического многоканального интерфейса, окна которого соответствуют устройствам, системам и программам, различающимся по функциональному назначению.

Результаты экспериментальных испытаний измерительной системы солнечного телескопа оперативных прогнозов. Опытные наблюдения на СТОП Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН показали его высокую оперативность и точность: время получения магнитограммы продольной компоненты КМП при угловом разрешении 30 угл. с составило 15 мин, причём среднеквадратическая ошибка определения нулевого уровня — не более $\pm 0,1$ Гс. На рис. 3 показана первая магнитограмма соответствующей исходной цифровой матрицы данных. Поверх полутоновой картинки нанесена (в виде изолиний) магнитограмма, редуцированная из исходной магнитограммы, как если бы она была получена в ССО. Для этого исходная матрица подвергалась процедуре скользящего осреднения (с шагом 30 угл. с и окном 120 угл. с). Следует отметить, что полученная таким способом магнитограмма КМП существенно отличается от стандартных двухминутных магнитограмм, полученных в Саянской обсерватории, поскольку статистическая значимость при осреднении увеличивается (в данном случае в 4 раза), уменьшается искажение структур КМП полями активных областей и, что особенно важно, более точно определяется положение нулевой линии. Получение подобных магнитограмм в Саянской обсерватории невозможно, так как потребовалось бы не менее 20 ч непрерывных измерений, а это не реально даже исходя из величины приемлемого времени измерений (для магнитограммы не более 2 ч).

Заключение. Созданы и установлены в Байкальской астрофизической обсерватории, Кисловодской горной астрономической станции Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН три солнечных телескопа нового поколения. Измерения продольного КМП, выполненные на СТОП Байкальской астрофизической обсерватории, показали высокую эффективность работы его АСУ по сравнению с телескопом предыдущего поколения (СТОП ССО), особенно в оперативности получения данных. Кроме того, существенно повышено их качество и информационная ёмкость. Это обстоятельство позволяет надеяться, что с помощью СТОП после окончательной доработки станет возможным производить регулярные измерения не только продольного КМП, но и полного вектора, причём по всему диску Солнца. Отметим также следующие важные для будущих экспериментальных исследований КМП особенности телескопа. Зарегистрированные данные не искажены какими-либо теоретическими предположениями, поэтому могут служить исходными по мере уточнения существующих теорий образования фотосферных линий поглощения и совершенствования методов расчёта параметров фотосферы — по сути, наблюдать Солнце в прошлом с исходными временным и пространственным разрешениями. По данным СТОП нового поколения можно получать магнитограммы, аналогичные магнитограммам ССО и WSO, обеспечивая тем самым однородность данных о КМП с первых измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов М. Л., Григорьев В. М. Крупномасштабные магнитные поля на Солнце // Солнечно-земная физика: Сб. науч. тр. 2004. Вып. 6. С. 10–19.
2. Mordvinov A. V., Grigoryev V. M., Peshcherov V. S. Large-scale magnetic field of the Sun and evolution of sunspot activity // Solar Phys. 2012. 280, Is. 2. P. 379–387.

3. **ССО** — Саянская солнечная обсерватория. URL: <http://ru.iszf.irk.ru/Магнитограммы> (дата обращения: 29.04.2013).
4. **WSO** — The Wilcox Solar Observatory. URL: <http://wso.stanford.edu> (дата обращения: 29.04.2013).
5. **Пещеров В. С., Григорьев В. М.** Горизонтальные магнитные поля в солнечной фотосфере: состояние проблемы и метод измерения // Солнечно-земная физика: Сб. науч. тр. 2011. Вып. 17. С. 39–45.
6. **Григорьев В. М., Демидов М. Л., Пещеров В. С., Жигалов В. В.** Измерение крупномасштабных магнитных полей Солнца: профили параметров Стокса в линиях FeI 524,7 нм и FeI а 525,0 нм // Солнечно-земная физика: Тр. VII Симп. по солнечно-земной физике России и стран СНГ. Троицк, 1999. С. 260–268.
7. **Basler**. URL: <http://www.baslerweb.com> (дата обращения: 15.10.2013).
8. **ProEM™ EMCCD Camera System**. URL: [ftp://ftp.princetoninstruments.com/public/Manuals/Princeton Instruments/ProEM System Manual.pdf](ftp://ftp.princetoninstruments.com/public/Manuals/Princeton%20Instruments/ProEM%20System%20Manual.pdf) (дата обращения: 15.10.2013).
9. **MDrive integrated motor+driver**. URL: http://motion.schneider-electric.com/products/mdriveplus_overview.html (дата обращения: 15.10.2013).
10. **Пат. на полезную модель № 120297 РФ по заявке № 2012118341**. Источник высокого знакопеременного напряжения, программируемого по амплитуде и частоте /А. А. Лубков, С. В. Перебейнос, А. А. Зотов и др. Оpubл. 10.09.2012, Бюл. № 25.
11. **Зотов А. А., Котов В. Н., Лубков А. А., Лылов С. А.** Автоматическое управление солнечным телескопом // Датчики и системы. 2008. № 10. С. 8–12.
12. **Qt Project**. URL: <http://qt-project.org> (дата обращения: 15.10.2013).

Поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.
