

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 538.566:520

## Многокаскадная система коррекции изображения для Большого солнечного вакуумного телескопа

В.П. Лукин<sup>1</sup>, Н.Н. Ботыгина<sup>1</sup>, Л.В. Антошкин<sup>1</sup>, А.Г. Борзилов<sup>1</sup>,  
О.Н. Емалеев<sup>1</sup>, П.А. Коняев<sup>1</sup>, П.Г. Ковадло<sup>2</sup>, Д.Ю. Колобов<sup>2</sup>,  
А.А. Селин<sup>1</sup>, Е.Л. Соин<sup>1</sup>, А.Ю. Шиховцев<sup>2</sup>, С.А. Чупраков<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

Поступила в редакцию 4.02.2019 г.

В 2017 г. на Большом солнечном вакуумном телескопе (БСВТ) Института солнечно-земной физики СО РАН была создана элементная база для отработки методов регистрации и коррекции искажений оптического излучения, прошедшего слой турбулентной атмосферы. Установлена трехкаскадная система коррекции изображений на БСВТ. Усовершенствовано программное обеспечение, которое осуществляет статистический анализ качества формируемого изображения в БСВТ и объединяет работу датчика волнового фронта, анализатора качества изображения и астрономического прибора — фильтрографа.

*Ключевые слова:* астрономический телескоп, изображение, турбулентность, датчик волнового фронта, адаптивная коррекция; astronomical telescope, image, turbulence, wavefront sensor, adaptive correction.

### Введение

В мире довольно интенсивно разрабатываются системы адаптивной оптики (АО) для солнечных астрономических телескопов. Наиболее полные данные по этим проектам были опубликованы в материалах Международного симпозиума по астрономии в 2016 [1–4] и 2017 гг. [5]. Более ранние публикации, например тезисы Международной конференции Adaptive Optics for Extremely Large Telescopes (Канарские острова, 2015) и работы [6–11], также представляют интерес.

Создание системы АО для Большого солнечного вакуумного телескопа (БСВТ) представляет собой сложную задачу в связи с тем, что уровень дневной атмосферной турбулентности в регионе оз. Байкал, где установлен БСВТ, существенно выше, чем в лучших мировых солнечных обсерваториях. Это налагает дополнительные требования на все элементы рабочей системы АО и их установку в оптическом тракте телескопа [12–18].

В 2017 г. была спроектирована и изготовлена оптическая система ввода элементов АО в оптический тракт БСВТ, состоящая из двух управляемых и четырех вспомогательных зеркал. Система позволяет использовать многоэлементные деформируемые зеркала диаметром 50 мм. Она получилась компактной и, следовательно, удобной в юстировке и эксплуатации при рутинных наблюдениях Солнца.

Главная цель работы — разработка опытного образца адаптивной оптической системы для БСВТ, включающей в себя два контура фазовой коррекции атмосферных аберраций волнового фронта излучения, регистрируемого астрономическими приборами, и контура постдетекторной обработки изображений наблюдаемых объектов на Солнце.

### 1. Система ввода элементов адаптивной оптики в оптический тракт БСВТ

Созданная нами в конце 2017 г. четырехзеркальная оптическая система ввода элементов АО [19] обеспечивает работу, по крайней мере, двух управляемых зеркал: качающегося (корректора наклонов волнового фронта) и деформируемого, которые сопряжены с плоскостью входной апертуры БСВТ. На них строятся изображения входного зрачка системы телецентричными пучками лучей. Промежуточные фокальные плоскости четырехзеркальной оптической системы используются для размещения датчиков волнового фронта (ДВФ), анализатора качества изображения (АКИ) и астрономических

\* Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnp@iao.ru); Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Александр Григорьевич Борзилов (alex.borzilov@mail.ru); Олег Назарович Емалеев (eop@iao.ru); Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@yandex.ru); Дмитрий Юрьевич Колобов (kolobov@iszf.irk.ru); Антон Александрович Селин (selinanton28@gmail.com); Егор Леонидович Соин (egorsh@vtomske.ru); Артем Юрьевич Шиховцев (artem-rochta@gmail.ru); Сергей Александрович Чупраков (chupr@mail.iszf.irk.ru).

приборов. Основные датчики должны функционировать как при полной апертуре БСВТ (720 мм), так и диафрагмированной (600 мм).

Оптическая система для ввода элементов АО была изготовлена, а также предварительно апробирована в оптическом канале БСВТ с использованием плоских зеркал вместо качающегося и деформируемого. В ходе испытаний сравнивались расчетные значения с фактически измеренными параметрами изготовленной системы.

На рис. 1 и 2 показана оптическая система ввода. Коллиматорное зеркало М3 обеспечивает построение изображения зрачка системы диаметром 33,5 мм на качающемся зеркале ТМ1 при диафрагмированной входной апертуре БСВТ (600 мм) и 40,5 мм при полной апертуре (720 мм). Коллиматорные зеркала М4 и М6 строят выходной зрачок системы диаметром 33,5 мм на деформируемом зеркале DM1 при диафрагмированной входной апертуре БСВТ и 40,5 мм при полной апертуре. Выходной зрачок соответствует расчетным значениям и строится параллельными пучками. В качестве М5 может быть использовано одно из трех полупрозрачных плоских зеркал с пропусканием 3,83; 19,2 и 44,3% на длине волны 525 нм. Камерное зеркало М7 обеспечивает фокусное расстояние, равное 23351 мм (F3). В основном фокусе F3 располагается основной датчик волнового фронта WFS-2. На входной апертуре датчика с помощью вспомогательной оптики строится изображение входного зрачка системы диаметром 3,77 мм. Реализуются две конфигурации – для диаметров входного зрачка (главного объектива БСВТ) 720 и 600 мм. Система имеет промежуточный фокус F2, который находится в плоскости зеркала М5. Фокус предназначен для размещения WFS-1 – ДВФ для управления качающимся зеркалом. Эквивалентное фокусное расстояние F2 определяется параметрами коллиматорных зеркал и составляет 42757,7 мм, диаметр изображения 37 мм (поле 180"). Соответствующий масштаб изображения равен 207 мкм/угл. с.

В ДВФ WFS-1, расположенном после полупрозрачного плоского зеркала М5, используется видеокамера Allied Vision Mako G-030 с разрешением 644 × 484 пикселей размером 7,4 × 7,4 мкм. WFS-1, по сути, представляет собой корреляционный датчик смещения фрагментов изображения диска Солнца.

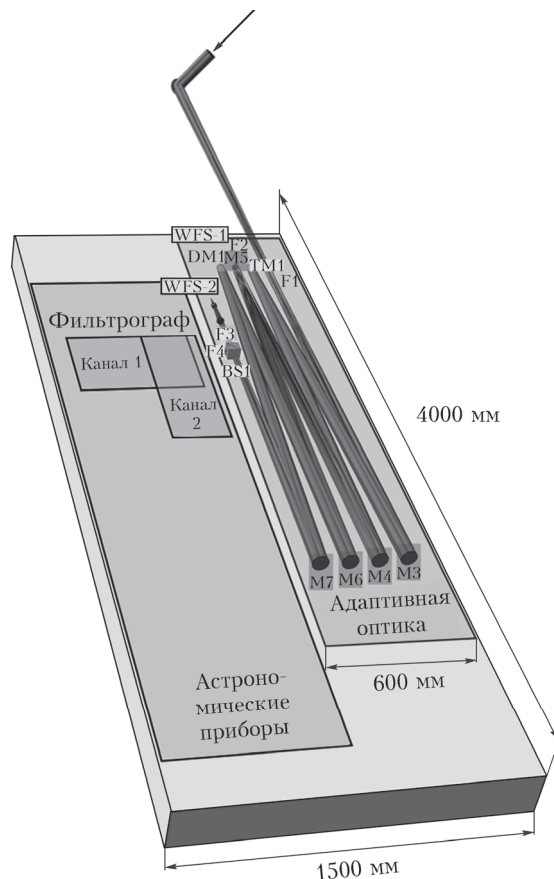


Рис. 1. Размещение элементов двухзеркальной системы АО на рабочем столе БСВТ

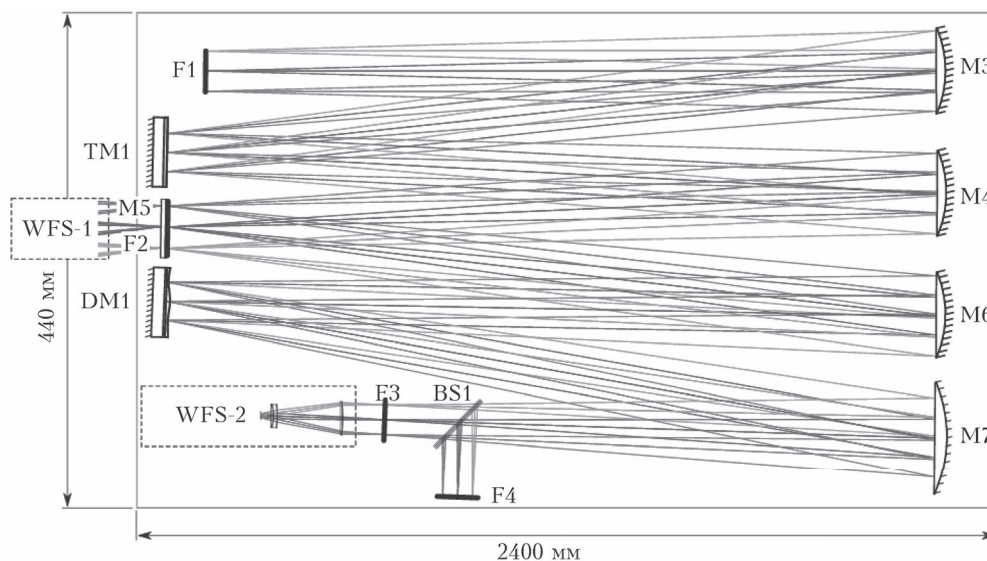


Рис. 2. Оптическая схема системы АО на БСВТ

Для переноса фрагмента изображения солнечного диска в плоскость регистрации используется линза-ахромат с фокусным расстоянием 100 мм (Thorlabs AC508-100-A) и макрообъектив с фокусным расстоянием 25 мм и предельно допустимым расстоянием до предмета 10 см (Fairfield 202374). Расчетное эквивалентное фокусное расстояние системы переноса составляет 13835 мм и может изменяться в некоторых пределах, ограничивая поле зрения. Масштаб изображения:  $1'' = 67 \text{ мкм}$ , 640 пикселям камеры будет соответствовать  $\sim 70''$ . Для линзы-ахромата Thorlabs AC508-150-A с фокусным расстоянием 150 мм и тем же макрообъективом эквивалентное фокусное расстояние равно 8446 мм. В этом случае масштаб изображения:  $1'' = 40,9 \text{ мкм}$ , 640 пикселей соответствуют  $115,8''$ . В фокусе F2 также размещается инструмент для исследования Солнца – фильтрограф, предназначенный для получения данных о солнечной атмосфере в узкой спектральной полосе.

Таким образом, система ввода предполагает, что в F2 устанавливается датчик корректора наклонов (это первый контур коррекции) и работает астрономический прибор – фильтрограф, в F3 – ДВФ для управления гибким зеркалом (второй контур). После светоделительного кубика BS1 в фокусе F4 располагается анализатор качества изображения [12], который используется в контуре постдетекторной обработки изображения (третий контур коррекции). В F4 может располагаться еще один астрономический прибор – спектрограф.

## 2. Запуск в пробном режиме системы с элементами АО

Основная наша задача в ноябре 2017 г. состояла в осуществлении пробного запуска всех элементов АО с помощью новой системы ввода. Внешний вид макета системы АО со стороны коллиматорных зеркал показан на рис. 3. В макете используются новые разработки элементов АО: пьезокерамический корректор наклонов со специально созданным датчиком наклонов, юстировочный столик, новый, более скоростной ДВФ, АКИ с модифицированным математическим обеспечением.

Пучок света от зеркала сидеростата, пройдя объектив телескопа и диагональное зеркало, которое находится внутри вакуумной трубы телескопа БСВТ, выходит из бокового иллюминатора. Затем проходит диафрагму, коллиматорное зеркало 2 и падает на зеркало корректора наклонов волнового фронта 3. Далее после отражающего зеркала 4 часть света проходит светоделитель и попадает на матрицу цифровой видеокамеры датчика смещения изображения 5. Затем пучок проходит отражатели, диагональное зеркало, светофильтр 10. После светоделительного кубика 11 часть света падает на матрицу цифровой видеокамеры АКИ 15. Остальная часть света через окуляр попадает в канал скоростного датчика волнового фронта 14, состоящего из дифракционного линзлета и цифровой видеокамеры.

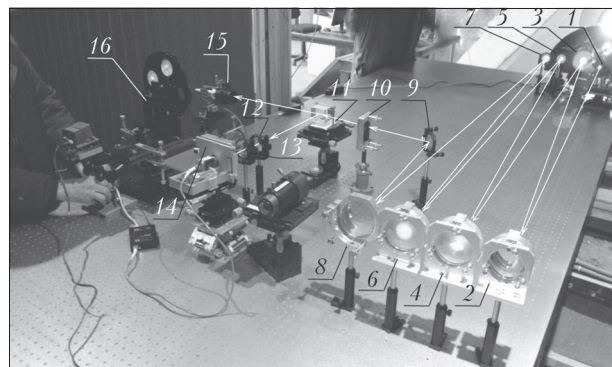


Рис. 3. Экспериментальный стенд адаптивной оптической системы на БСВТ: 1 – диафрагма поля зрения; 2, 6 – коллиматорные зеркала; 3 – управляемое по углам наклона зеркало; 4, 8 – сферические зеркала; 5 – датчик общих наклонов волнового фронта (WFS-1); 7 – деформируемое зеркало; 9 – плоское зеркало; 10 – нейтральные светофильтры; 11 – светоделительный кубик; 12 – узкополосный светофильтр; 13 – окуляр; 14 – датчик волнового фронта (WFS-2); 15 – анализатор качества изображения; 16 – фильтрограф

Угловой масштаб пикселя камеры датчика смещения изображения после настройки схемы равен  $0,153''$ , камеры АКИ –  $0,102''$ , камеры датчика волнового фронта –  $1,302''$ . Все величины угловых масштабов приведены к входной апертуре БСВТ. Поле зрения корреляционного датчика смещения в экспериментах изменялось в диапазоне от  $128 \times 128$  до  $480 \times 480$  пикселей в зависимости от условий эксперимента.

Для элементов оптической системы, включая активные зеркала, на оптическом столе предусмотрены (рис. 3) стандартные крепления и опоры фирмы Standa.

Максимальная высота опоры в сборе составляет 259 мм (327 мм до центра пучка лучей), минимальная – 115 мм (высота до центра пучка лучей 183 мм). За основу взят вариант, когда центр пучка лучей находится на высоте 225 мм. Для коллиматорных зеркал М3, М4, М6 были изготовлены специальные трехвинтовые крепления, для камерного М7 – угловое. Для крепления зеркала М5 используется стандартное угловое крепление Standa.

На рис. 4 показано расположение пьезоэлектрического корректора наклонов.

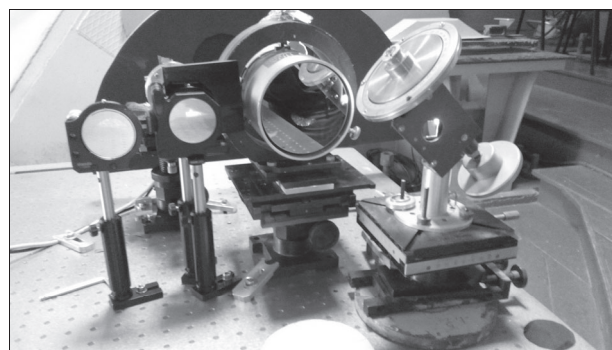


Рис. 4. Установленный в системе корректор наклонов волнового фронта



Первый контур коррекции образуют корректор наклонов волнового фронта и датчик, созданный на основе видеокамеры МАКО. Фактически датчик представляет собой еще один экземпляр АКИ. Второй контур образуют скоростной ДВФ, установленный на юстировочном столике, с блоком капсульной смены растров, и гибкое деформируемое зеркало. В комплекте макета предусмотрено использование двух вариантов гибких зеркал: биморфного зеркала (Россия) и мембранного зеркала на пьезотолкателях (Нидерланды). Третий контур коррекции образуют анализатор АКИ и компьютерный комплекс обработки кадров изображения. Особенностью этого контура является то, что он может быть задействован как непосредственно во время эксперимента, так и впоследствии. При этом формируемое изображение записывается с предельной частотой на электронные накопители и обрабатывается уже после эксперимента.

Коллиматорные зеркала в схеме ввода (см. рис. 3) обеспечивают одновременную работу всего макета: двух корректирующих зеркал – корректора наклонов и гибкого зеркала, двух датчиков волнового фронта и АКИ. В левой части макета расположен фильтрограф, который оптически вписан в систему ввода и работает после первого контура коррекции.

Оптические измерения традиционно сопровождались измерениями метеопараметров вблизи БСВТ двумя метеосистемами: одна установлена у основания телескопа, вторая – вблизи следящего (сидеростатного) зеркала.

Пробный запуск макета системы АО показал соответствие расчетных и измеренных характеристик всех ее элементов.

### 3. Испытания корректора наклонов волнового фронта на БСВТ

В ноябре 2017 г. на БСВТ Байкальской астрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН был получен «первый свет» на макете созданной системы АО. Прежде всего были проведены испытания первого контура коррекции, в котором использовался разработанный в ИОА СО РАН корректор наклонов волнового фронта (см. рис. 4), обеспечивающий стабилизацию изображения в условиях сильной атмосферной турбулентности и при больших амплитудах ветровых колебаний сидеростата телескопа.

Адаптивная оптическая система коррекции наклонов волнового фронта представляет собой следящую систему с замкнутым контуром управления общими наклонами волнового фронта со скоростной видеокамерой и управляемым оптическим дефлектором. Работа адаптивной системы проверялась в различных погодных условиях. Эксперименты показали, что при большой скорости ветра значительное влияние на отклонение луча оказывают вибрации сидеростата. В безветренную погоду искажения волнового фронта обусловлены в основном турбулентностью атмосферы.

На рис. 5 представлен график изменения угла наклона адаптивного зеркала в режиме стабилизации изображения. Спектральный анализ (рис. 6) показал, что в спектре сигнала управления наклонами адаптивного зеркала наблюдается локальный максимум в диапазоне 8–9 Гц. Эти колебания в сигнале управления связаны с ветровыми вибрациями следящего зеркала сидеростата на резонансной частоте.

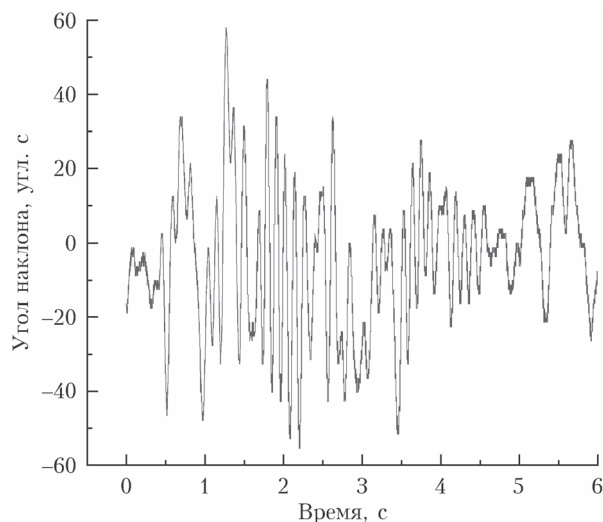


Рис. 5. Изменение угла наклона дефлектора при стабилизации изображения

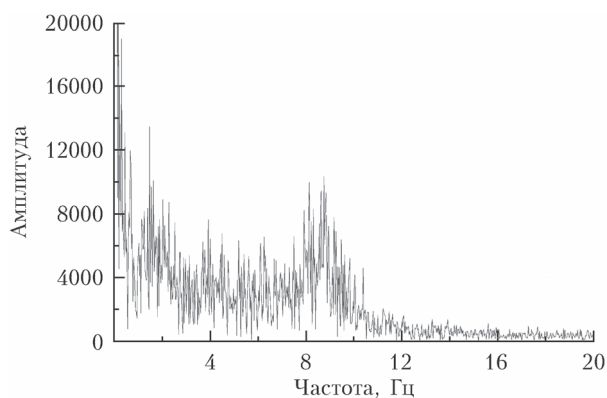
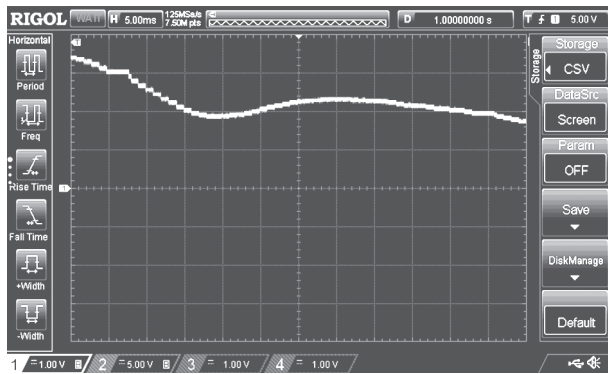


Рис. 6. Спектр сигнала управления

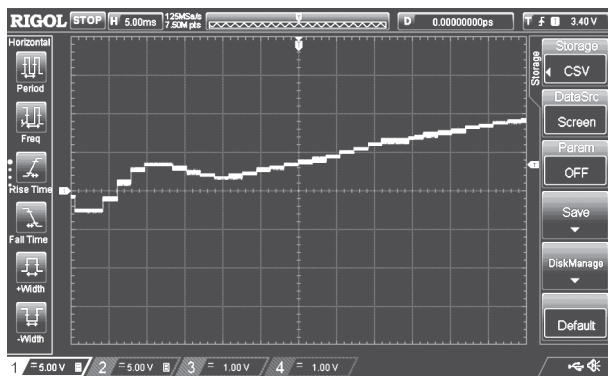
Коррекция смещений изображения проводилась при различной частоте кадров видеокамеры датчика контура коррекции углов наклона волнового фронта.

Более плавное управление зеркалом и минимальная ошибка коррекции изображения наблюдались при максимальной частоте кадров видеокамеры датчика (980 кадров в секунду). На рис. 7, а приведены сигналы управления дефлектором с частотой 980 Гц. Для сравнения на рис. 7, б показан сигнал управления корректором наклонов с частотой 550 Гц.

Результаты проведенных испытаний показали, что разработанный первый контур – контур коррекции наклонов волнового фронта системы АО – снижает амплитуду случайных наклонов волнового



*a*



*б*

Рис. 7. Сигнал коррекции, подаваемый с частотой 980 (*a*) и 550 Гц (*б*)

фронта, вызванных турбулентностью атмосферы и колебаниями сидеростата телескопа, что повышает качество получаемого изображения видимой поверхности Солнца.

#### 4. Результаты испытания системы стабилизации и коррекции изображения на БСВТ

В ноябре 2017 г. была апробирована и показала свою эффективность и работоспособность адаптивная система стабилизации и формирования изображения на БСВТ. В этой системе, наряду с первым контуром адаптивной стабилизации изображения плоским зеркалом и вторым контуром коррекции с использованием гибкого зеркала, был впервые применен третий контур коррекции, основанный на постдетекторной обработке кадров, поступающих с видеокамеры АКИ в реальном времени. Были получены надежные экспериментальные данные, подтверждающие высокую эффективность такой трехконтурной адаптивной системы.

В испытаниях были задействованы три высокоскоростные цифровые видеокамеры, проводившие одновременную регистрацию цифровых изображений со скоростями в диапазоне от 300 до 980 кадров в секунду. Камера датчика коррекции наклонов устанавливалась в фокусе F2 телескопа, камера АКИ – в фокусе F4 (см. рис. 2). Управление

корректором наклонов в замкнутом контуре оптической обратной связи осуществлялось специально созданной программой, включавшей в себя быстродействующий алгоритм корреляционного слежения (трекинга). Для постдетекторного формирования цифровых изображений также была разработана специальная программа обработки кадров, получаемых с помощью видеокамеры АКИ в реальном времени, с использованием современных быстродействующих параллельных алгоритмов из библиотек Intel MKL и IPP.

Предполагается, что контур постдетекторной обработки будет задействован при решении задач астрофизики Солнца, требующих формирования изображения солнечной поверхности для наблюдения в максимально возможном качестве.

#### Система стабилизации изображения

Для управления элементами контура стабилизации изображения была создана специальная программа, которая обеспечивала юстировку оптических элементов, исследование характеристик корректора наклонов, работу системы в режимах с разомкнутой и замкнутой обратной связью, запись и оперативный анализ полученных данных.

Главное окно программы показано на рис. 8. В левой верхней части находятся блок управления камерой и окно вывода текущего кадра изображения. Справа вверху расположено окно вывода предварительных результатов измерений в режиме эксперимента. В частности, в режиме одного контура адаптации (только стабилизация) в этом окне выводятся графики спектров дрожания изображения при коррекции и без нее. При включении контура постдетекторной коррекции (восстановление размытого турбулентностью изображения методом инверсной фильтрации) это окно служит для вывода обработанного изображения.

Для работы в режиме с постдетекторной обработкой снимаемых кадров в реальном времени выбиралась опция «Обработка» (слева внизу) и использовались параметры накопления кадров и инверсной фильтрации.

Большие массивы экспериментальных данных в виде серий фильмов по 6400 кадров (длительностью порядка 20 с), таблицы измеренных в реальном времени смещений координат, а также спектров дрожаний изображений, рассчитанных по окончании каждой серии экспериментов, записывались на твердый диск компьютера и накопители. Объем записанной на диск информации в каждой серии составил порядка 80 Гб.

Выборочные результаты испытания системы стабилизации изображения в системе АО БСВТ приведены в таблице и на рис. 9–10. Все измерения углового смещения изображения края солнечного диска приведены к углам наклона волнового фронта излучения на входном зрачке телескопа. Измерения проводились одновременно датчиком системы стабилизации изображения (WFS-1) в фокусе F2 и АКИ в фокусе F4.

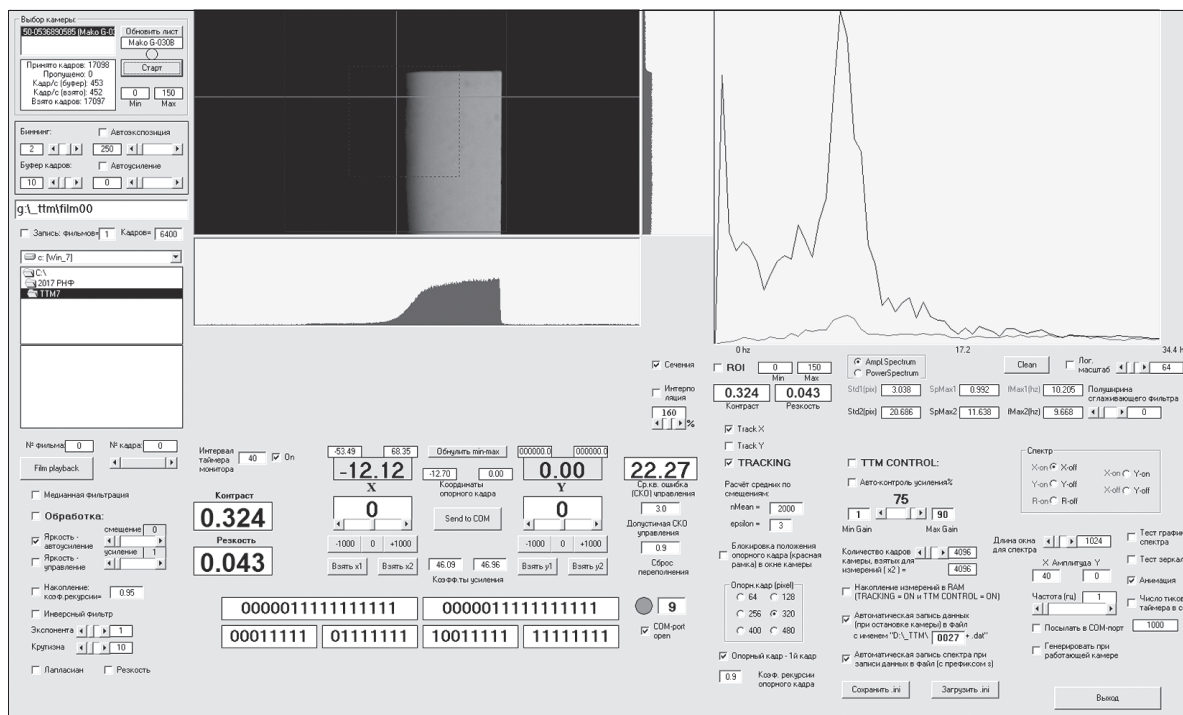


Рис. 8. Главное окно программы управления корректором наклонов в режиме контроля после проведения серии измерений. Слева сверху – окно камеры с изображением фрагмента солнечного диска, по которому осуществлялось слежение (трекинг) и коррекция дрожания в горизонтальной плоскости. Справа сверху – спектры дрожания изображения в двух режимах: до (верхняя кривая) и после (нижняя кривая) коррекции

### Результаты испытаний системы стабилизации изображения

Дата, время	СКО <sub>1</sub> (WFS-1), угл. с	СКО <sub>2</sub> (WFS-1), угл. с	СКО <sub>1</sub> / СКО <sub>2</sub>	СКО <sub>3</sub> (АКИ), угл. с	СКО <sub>4</sub> (АКИ), угл. с	СКО <sub>3</sub> / СКО <sub>4</sub>
7.11.2017 г., 13:43	0,036	0,657	0,055	0,160	0,638	0,251
9.11.2017 г., 16:22	0,124	0,643	0,193	0,245	0,511	0,479
10.11.2017 г., 14:13	0,512	3,351	0,153	–	–	–

В таблице приведены среднеквадратические отклонения (СКО) угловых смещений изображения края солнечного диска в режимах с замкнутой (СКО<sub>1</sub>, СКО<sub>3</sub>) и разомкнутой обратной связью (СКО<sub>2</sub>, СКО<sub>4</sub>) и их отношения, характеризующие ошибку стабилизации при различных атмосферных условиях.

Графики смещений изображения края диска Солнца и их спектров иллюстрируют эффективность стабилизации дрожания с помощью корректора наклонов. На рис. 9–10 приведены амплитудные спектры смещения изображения в фокусах F2 и F4 телескопа. Видно, что максимальная амплитуда колебаний снижается более чем в 10–12 раз. Энергия спектров дрожания изображения понижается в десятки раз в зависимости от метеоусловий (скорости ветра, его направления относительно сидеростата, наличия порывов ветра и т.д.).

На рис. 10, а изображен график смещений изображения края диска Солнца в горизонтальной плоскости. Участок I, состоящий из первых 4096 отсчетов, содержит данные, полученные при замкнутом контуре управления. Отчетливо виден выброс

измерений в районе 2500-го кадра, который связан с потерей координаты слежения корреляционным датчиком сдвига и мог быть вызван сильным порывом ветра. В конце первого участка система стабилизации автоматически выключила (разомкнула) контур обратной связи. Участок II, также состоящий из 4096 кадров, содержит данные измерений, полученных при разомкнутом контуре управления. Среднеквадратичное значение амплитуды дрожания изображения возросло в 6,5 раз. На графике спектра колебаний, представленном на рис. 10, б, видно, что участок в районе 8–9 Гц содержит максимум энергии колебаний сидеростата, вызванных сильным ветром. Одновременные измерения скорости ветра акустическим анемометром давали максимальные показания в диапазоне 15–20 м/с.

На основании обработки больших массивов данных, полученных в экспериментах с макетом адаптивной системы на БСВТ, можно сделать вывод, что проведенные измерения и их анализ убедительно доказывают высокую эффективность адаптивной системы стабилизации дрожания изображения на БСВТ.

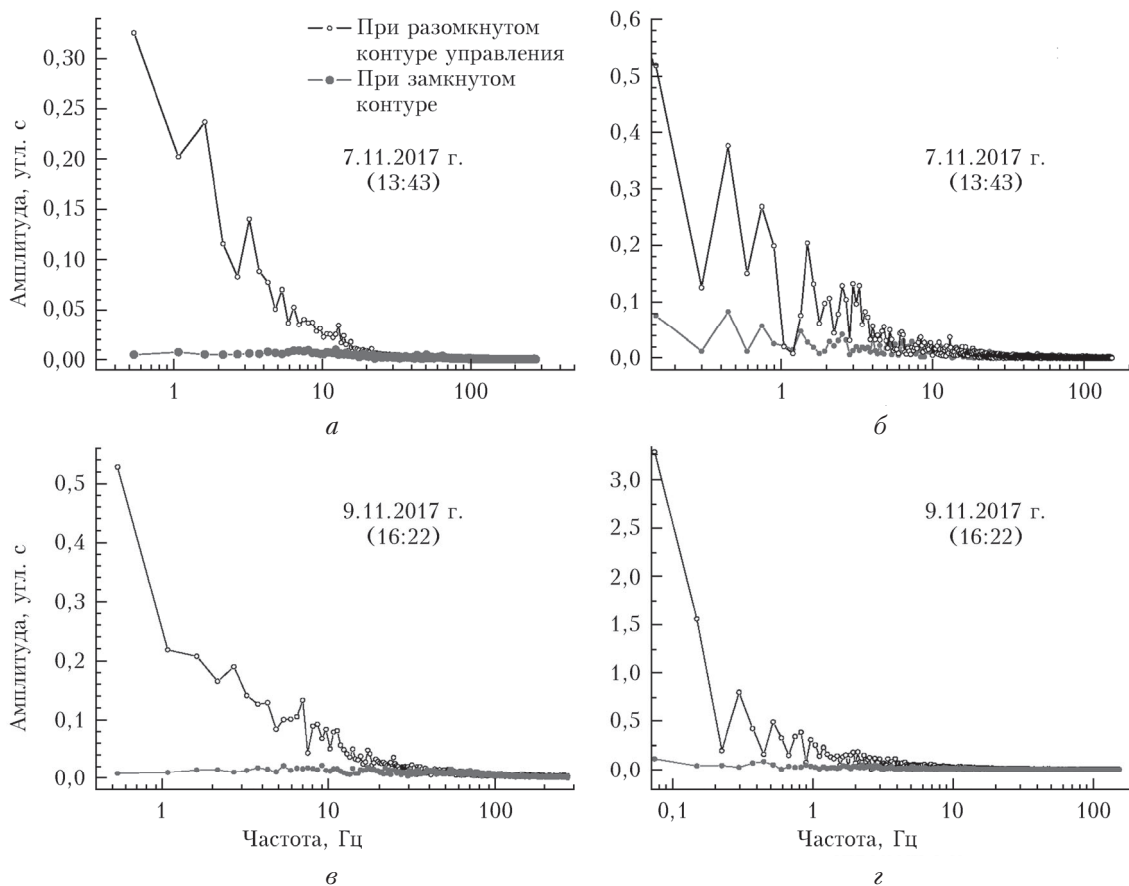


Рис. 9. Амплитудные спектры смещения изображения в фокусах F2 (а, в) и F4 телескопа (б, г) при различных условиях распространения излучения в турбулентной атмосфере

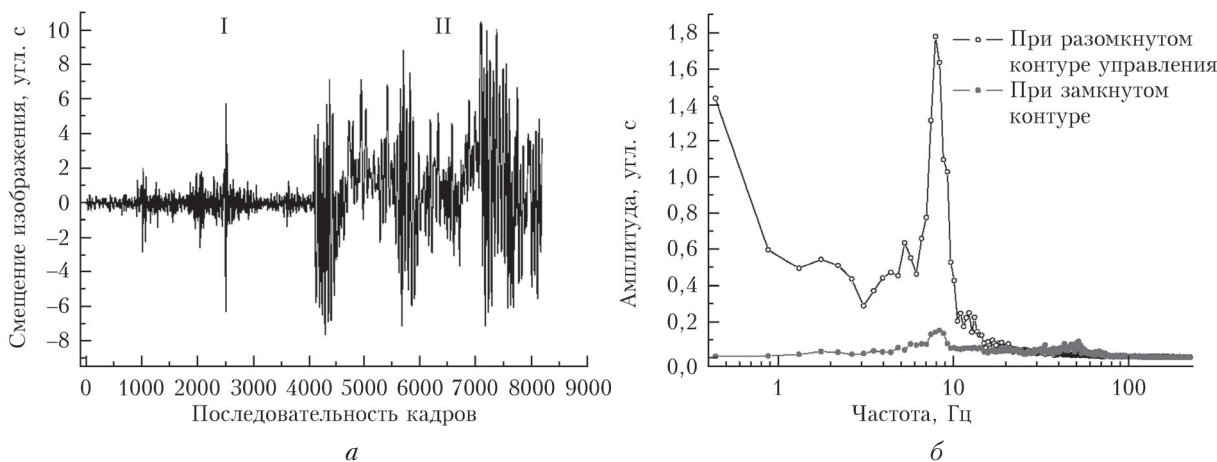


Рис. 10. Угловые смещения изображения (а) и амплитудные спектры (б), регистрируемые датчиком смещения изображения в режиме стабилизации (I) и при разомкнутом контуре управления (II). Измерения 10.11.2017 г. в 14:13 по местному времени

**Двухконтурная адаптивная система стабилизации и формирования изображения, включающая контур постдетекторной цифровой обработки**

В тех случаях, когда при решении задач физики Солнца требуется формирование изображения солнечной поверхности максимально возможного

качества, лишенного не только искажений из-за вибраций телескопа, но и размытия атмосферной турбулентностью, существует возможность включения в адаптивную систему дополнительную контура компьютерной обработки изображений, поступающих с цифровых видеокамер. Такая обработка возможна как в отложенном режиме, когда изображения обрабатываются после их регистрации



и записи в архив, так и в реальном времени непосредственно при наблюдении. В последнем случае к алгоритмам цифровой обработки предъявляются высокие требования по быстродействию, как правило, до сотен кадров в секунду. Для этой цели в нашем макете используются данные АКИ. Во время экспериментов это устройство работало синхронно с ДВФ и всей системой АО в целом.

Для постдетекторного формирования цифровых изображений в адаптивной системе на БСВТ нами было разработано программное обеспечение обработки кадров цифровой видеокамеры в реальном времени с использованием современных быстродействующих параллельных алгоритмов из библиотек Intel MKL и IPP. Впервые на БСВТ, совместно с контуром адаптивной стабилизации плоским зеркалом, был применен контур формирования изображения, основанный на цифровой обработке кадров. На рис. 11 показан эффект от применения такой обработки на примере стабилизации края солнечного диска. Анализ изображений, полученных при длительной экспозиции со стабилизацией дрожания (рис. 11, *а*) и после цифровой обработки серии короткоэкспозиционных кадров (рис. 11, *б*), показывает, что во втором случае заметно выше контраст (нет фоновой засветки слева от центра кадра), сильнее крутизна края диска вследствие устранения размытия.

Чтобы нагляднее продемонстрировать действие постдетекторной фильтрации, приведем результаты обработки ранее записанного с помощью АКИ и хранящегося на электронном накопителе фильма.

На рис. 12 представлены изображения солнечных пятен, полученные с помощью АКИ в различных условиях. Наилучший кадр находился по максимальной дисперсии яркости в области интереса (как правило, содержащей большое число деталей).

Для постдетекторного улучшения изображений, размываемых атмосферной турбулентностью, нами был использован метод инверсной фильтрации с регуляризацией. Для применения этого метода в реальном времени мы разработали эффективный быстродействующий алгоритм, позволяющий вести цифровую фильтрацию изображений с высоким разрешением и частотой короткоэкспозиционных кадров до 300 кадров в секунду.

## Заключение

Таким образом, на стенде БСВТ был установлен макет созданной многоконтурной двухзеркальной системы АО. В ноябре 2017 г. проведен ее запуск. В системе использованы два управляемых зеркала: зеркало для коррекции общих наклонов волнового фронта и гибкое (деформируемое) зеркало, контролируемые двумя ДВФ, а также АКИ [12]. В результате обеспечена полноценная работа в замкнутом контуре макета системы АО, включающей в себя два ДВФ трехкаскадной системы коррекции. В качестве третьего каскада коррекции используется постдетекторная фильтрация. Осуществлены фиксация и постдетекторная фильтрация изображений Солнца, получаемых с помощью АКИ в рутинном режиме наблюдений.

На основе данных БСВТ (1–11.11.2017 г.) с помощью вновь созданной аппаратуры проведен анализ качества формируемых изображений поверхности Солнца; отобраны отдельные изображения наилучшего качества; данные наблюдений записаны на электронные накопители для дальнейшей обработки.

Материалы, полученные при выполнении этих исследований, были опубликованы [19–25] и докладывались на конференциях по астрономии в 2017–2018 гг. Кроме этого, были проведены научные

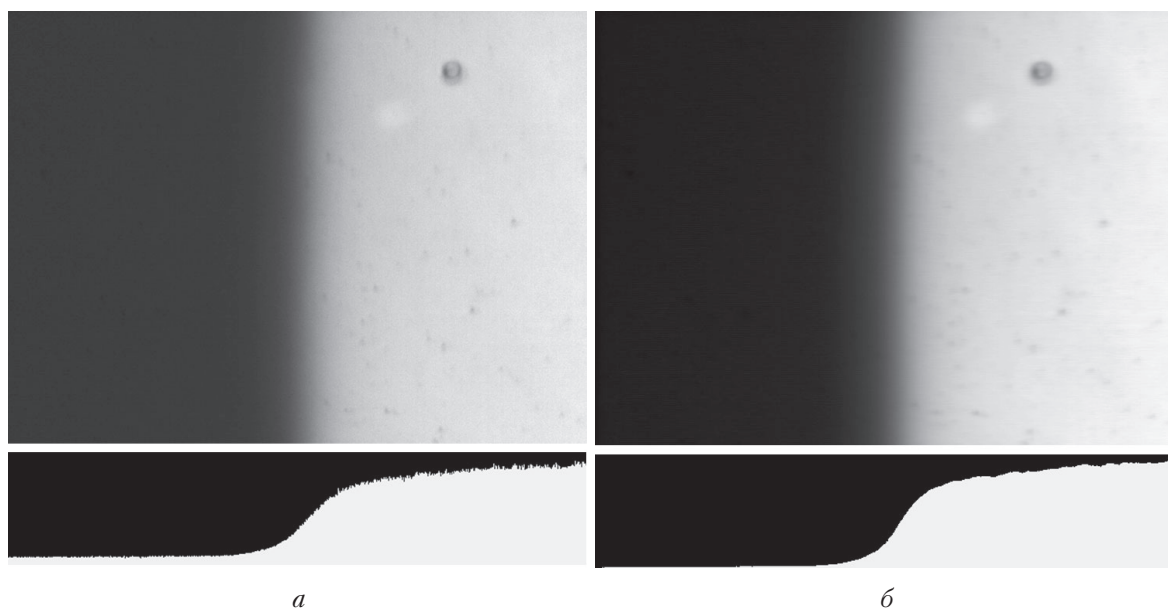


Рис. 11. Изображения края диска Солнца при длительной экспозиции со стабилизацией дрожания (*а*) и после цифровой обработки серии короткоэкспозиционных кадров (*б*)



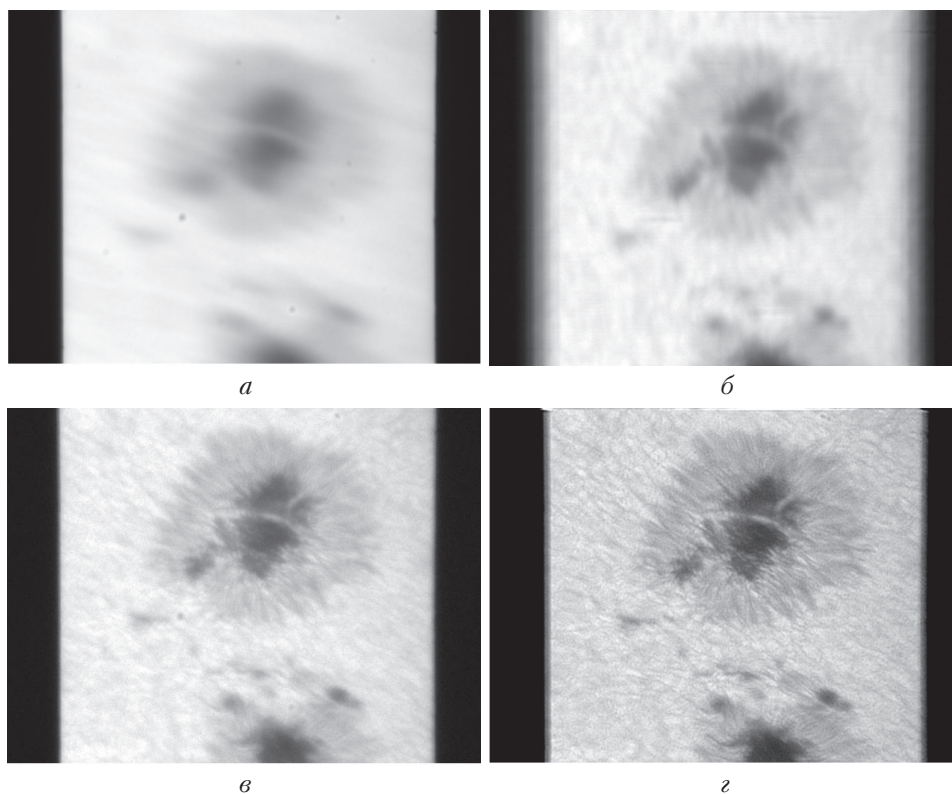


Рис. 12. Изображения солнечных пятен при различных режимах формирования: длительная экспозиция без стабилизации дрожания (*а*), то же, но со стабилизацией (*б*); рекурсивное усреднение длинной серии короткоэкспозиционных кадров со стабилизацией (*в*), рекурсивное усреднение короткой серии кадров в области наилучшего кадра с инверсной цифровой фильтрацией (*г*)

семинары в крупных обсерваториях РФ и СНГ, а именно в Институте астрофизики АН Республики Таджикистан (г. Душанбе, 16.12.2016 г.), в Институте солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск, 21.03.2017 г.), в Главной астрономической обсерватории РАН (Пулкovo, 21.04.2017 г.) и на научной сессии, посвященной 40-летию организации Байкальской астрофизической обсерватории (г. Иркутск, 25 апреля 2018 г.).

Самые свежие результаты были доложены на круглых столах [26] по проблемам применения АО в рамках рабочих групп «Аэрозоли Сибири», проведенных в г. Томске в 2017 и 2018 гг.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-79-20077), при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00033).

1. Schmidt D., Gorceix N., Marino J., Berkefeld T., Rimmele T., Zhang X., Woger F., Goode P. Progress in multi-conjugate adaptive optics at Big Bear Solar Observatory // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. 990929.
2. Changhui Rao, Lei Zhu, Xuejun Rao, Lanqiang Zhang Hua Bao, Lin Kong, Youming Guo, Libo Zhong, Xue'an Ma, Mei Li, Cheng Wang, Xiaojun Zhang, Xinlong Fan, Donghong Chen, Zhongyi Feng, Xiaoyun Wang, Naiting Gu, Zhiyong Wang. Solar adaptive optics for 1-m New Vacuum Solar Telescope // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. 990921.
3. Lanqiang Zhang, Lin Kong, Hua Bao, Lei Zhu, Xuejun Rao, Changhui Rao. Preliminary result of the solar multi-conjugate adaptive optics for 1-m New Va-

cuum Solar Telescope // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99092C-1.

4. Montilla I., Marino J., Asensio Ramos A., Collados M., Montoya L., Tallon M. Solar adaptive optics: Specificities, lessons learned, and open alternatives // Proc. SPIE. 2016. V. 9909. P. 99091H-1.
5. Von der Lühe O.F., Berkefeld T., Sprung D., Sucher E., Stein K.U. Local optical turbulence at and in the vicinity of the GREGOR solar telescope // Proc. SPIE. 2017. V. 10425. DOI: 10.1117/12.2279432.
6. Kellerer A. Wide-field solar adaptive optics in a layer-oriented approach // Appl. Opt. 2012. V. 51. P. 5743-5751.
7. Madec P.Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy // Imag. Appl. Opt. 2015. P. 18-26. DOI: 10.1364/AOMS.2015.AOTh2C.1
8. Moretto G., Langlois M., Goode P., Gorceix N., Shumko S. Design for solar multi-conjugate adaptive optics at the New Solar Telescope / Big Bear solar observatory // Third AO4ELT Conference. Adaptive optics for Extremely Large telescopes. Italy. 2013. P. 5.
9. Rimmele T.R., Marino J. Solar adaptive optics // Living Rev. Solar Phys. 2011. V. 8. P. 92-98.
10. Scharmer G.B., Derrori P., Löfdahl M.G., Shand M. Adaptive optics system for the new Swedish solar telescope // Proc. SPIE. 2002. V. 4853. 4853-52.
11. Scharmer G.B., Bjelksjö K., Korkonen T., Lingberg B., Petterson B. The 1-meter Swedish solar telescope // Proc. SPIE. 2002. V. 4853. 4853-47.
12. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин Л.В., Коняев П.А. Анализатор качества изображения // Датчики и системы. 2012. № 6(157). С. 12-14.

13. *Lukin V.P., Grigor'ev V.M., Antoshkin L.V., Botygina N.N., Emaleev O.N., Kovadlo P.G., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Skomorovski V.I., Trifonov V.D., Chuprakov S.A.* Development of adaptive optics elements for solar telescope // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8447. P. 84476E-1–8.
14. *Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N., Antoshkin L.V., Konyaev P.A.* Image quality analyzer // *Proc. SPIE*. 2012. V. 8447. P. 84474A-1–6.
15. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Первые результаты испытания управляемого зеркала DM2-100-31 в адаптивной оптической системе Большого солнечного вакуумного телескопа // *Изв. вузов. Физика*. 2012. Т. 55, № 8/2. С. 220–221.
16. *Ботыгина Н.Н., Ковадло П.Г., Копылов Е.А., Лукин В.П., Туев М.В., Шиховцев А.Ю.* Оценка качества астрономического видения в месте расположения Большого солнечного вакуумного телескопа из оптических и метеорологических измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 11. С. 942–947; *Botygina N.N., Kovadlo P.G., Kopylov E.A., Lukin V.P., Tudev M.V., Shikhovtsev A.Yu.* Estimation of the astronomical seeing at the large solar vacuum telescope site from optical and meteorological measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 142–146.
17. *Лукин В.П.* Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // *Успехи физ. наук*. 2014. Т. 184, вып. 6. С. 599–640.
18. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Этапы развития адаптивной оптической системы для Большого солнечного вакуумного телескопа // *Изв. Главной астрономической обсерватории в Пулковке*. 2016. № 224. С. 5–10.
19. *Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Больбасова Л.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Лукин В.П., Чупраков С.А., Селин А.А., Шиховцев А.Ю.* Адаптивная оптическая система для солнечного телескопа, обеспечивающая его работоспособность в условиях сильной атмосферной турбулентности // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 895–904; *Antoshkin L.V., Botygina N.N., Bolbasova L.A., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Kolobov D.Y., Kudryashov A.V., Lavrinov V.V., Lavrinova L.N., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Selin A.A., Shikhovtsev A.Yu.* Adaptive optics system for solar telescope operating under strong atmospheric turbulence // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 3. P. 291–299.
20. *Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Копылов Е.А., Лукин В.П.* Развитие элементной базы для создания системы адаптивной оптики на солнечном телескопе // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 11. С. 990–997; *Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P.* Development of components for adaptive optics systems for solar telescopes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 2. P. 216–224.
21. *Botygina N.N., Kolobov D.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Shikhovtsev A.Yu.* The first light for the system of inputting the elements of AO into the optical path of LSVT // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10833. 10833-351. DOI: 10.1117/12.2504689.
22. *Лукин В.П., Антошкин Л.В., Больбасова Л.А., Борзилов А.Г., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Ковадло П.Г., Колобов Д.Ю., Коняев П.А., Копылов Е.А., Кудряшов А.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н., Сазонова П.В., Селин А.А., Чупраков С.А., Шиховцев А.Ю., Григорьев В.М.* Разработка системы адаптивной оптики для солнечного телескопа // *Всерос. астроном. конф. Ялта*, 2017.
23. *Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu.* Development of astronomical instruments equipped with adaptive optics systems // *Intern. Conf. on Astron. & Geophys. in Mongolia*. 2017.
24. *Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyaev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P.* Development of elements for an adaptive optics system for Solar Telescope // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10703. P. 107032.
25. *Bolbasova L.A., Kopylov E.A., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Shikhovtsev A.Yu.* First seasonal study of solar seeing and wind speed vertical distribution at Baikal Astrophysical Observatory // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10703. P. 107036V.
26. URL: <https://symp.iao.ru/ru/sa/25/i1> (last access: 4.12.2018).

*V.P. Lukin, N.N. Botygina, L.V. Antoshkin, A.G. Borzilov, O.N. Emaleev, P.A. Konyaev, P.G. Kovadlo, D.Yu. Kolobov, A.A. Selin, E.L. Soim, A.Yu. Shikhovtsev, S.A. Chuprakov. Multi-cascading image correction system for a Large Solar Vacuum Telescope.*

In 2017, at the Large Solar Vacuum Telescope of the Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS, an element base was created for developing methods for recording and correcting distortions of optical radiation passed through a layer of turbulent atmosphere; a three-stage image correction system was installed; software was developed, which provides the statistical analysis of the quality of the formed image in BSWT and combines the work of a wavefront sensor, an image quality analyzer, and an astronomical instrument – a filter-recorder.