

УДК 523.98+520.24

ЭКСПЕРИМЕНТ "АСТРОМЕТРИЯ" ПО ИЗМЕРЕНИЮ ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ФОРМЫ И ДИАМЕТРА СОЛНЦА НА СЛУЖЕБНОМ МОДУЛЕ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС

© 2006 г. Х. И. Абдусаматов¹, Ю. В. Алексеев³, А. А. Антошков^{1,3}, Л. Н. Архипова³, В. П. Будин¹, Д. П. Веселов^{1,3}, А. А. Гарбуль³, А. И. Иванов², И. С. Измайлов¹, В. А. Каринский³, В. П. Коношенко², А. А. Кузнецов², А. В. Марков², С. Н. Мартынов³, В. Е. Мельников², Л. А. Мирзоева³, И. И. Николаев¹, Л. Ш. Олейников³, И. Н. Сивяков¹, С. И. Ханков¹

E-mail: abduss@gao.spb.ru

Проект "Астрометрия" обеспечит координатно-фотометрический мониторинг формы лимба и диаметра диска Солнца с погрешностью 0.005" и его сплюснутости на уровне $\sim 10^{-6} R_{\odot}$ в течение 6 лет. Проект предполагает исследование внутренней структуры и динамики Солнца и изменения его глобальных характеристик вплоть до ядра. Проект также обеспечит исследование тонкой структуры и динамики фотосферы как на диске, так и на лимбе. Реализация проекта планируется в восходящей фазе нового 24-го солнечного цикла.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование высокоточных измерений солнечной постоянной [1] показывает, что ее колебания с амплитудой в 1.3 Вт м^{-2} или 0.1% в течение 11-летнего цикла Солнца аналогичны соответствующему колебанию уровня активности как по фазе, так и по амплитуде [2-5]. Наряду с такими 11-летними вариациями непосредственно обнаружено наличие также и вековой составляющей в вариациях солнечной постоянной, скоррелированных с вековыми вариациями уровня его активности [5]. Установлено, что долговременная циклическая вариация солнечной постоянной S_{\odot} фактически целиком является результатом соответствующего изменения площади излучающей поверхности фотосферы Солнца при сохранении ее эффективной температуры практически неизменной:

$$\Delta S_{\odot} / S_{\odot} \approx 2 \Delta R_{\odot} / R_{\odot}$$

где R_{\odot} - радиус Солнца [3-5]. Колебания солнечной постоянной за 11-летний цикл практически всецело обусловлены соответствующими вариациями его радиуса с амплитудой в пределах до 350 км. Таким образом, 11-летний гелиоцикл представляет собой скоординированное идентичное колебание активности и радиуса – солнечной постоянной как по фазе, так и по амплитуде [5]. Поэтому Солнце, строго говоря, в целом не находится в состоянии

механического и энергетического равновесия. Оно - переменная звезда, пульсирующая относительно ее среднего уровня по крайней мере с тремя квазипериодическими (11, 80 и 200 лет) скоррелированными вариациями активности и радиуса – солнечной постоянной.

Следовательно, точная абсолютная величина радиуса Солнца - это важнейший фундаментальный параметр и один из основных индикаторов уровня активности и солнечной постоянной. При этом данные о спектре колебаний фундаментальных характеристик Солнца, а именно радиуса, сплюснутости, интегрального потока излучения, являются основой для диагностики параметров его внутреннего строения вследствие того, что они характеризуют изменения его внутренних слоев вплоть до ядра. Однако, не искаженные влиянием нестабильности земной атмосферы и колебательных процессов в ней, долговременные высокоточные однородные измерения абсолютной величины радиуса и его относительной вариации могут быть проведены только в условиях безвоздушного космического пространства. Для исследования важнейших и наиболее актуальных фундаментальных проблем физики Солнца и астрофизики в целом, а также для более эффективного и точного исследования первопричины вариаций солнечной постоянной - временных вариаций формы и диаметра Солнца в различных интервалах - в ГАО РАН разработан проект "Астрометрия" на служебном модуле (СМ) российского сегмента (РС) МКС [3, 6].

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН.

² Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва, г. Королёв.

³ ВНИИ "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА

- координатно-фотометрический мониторинг формы лимба и диаметра диска Солнца с погрешностью $0.005''$ и его сплюснутости на уровне $\sim 10^{-6} R_{\odot}$;

- координатно-фотометрические измерения центральных и лимбовых участков диска;

- координатно-фотометрические измерения угловых расстояний между эталонными звездами $+2.5 \leq m_b < +6.5$ с погрешностью $0.004''$ (по усредненным результатам обработки 100 последовательных измерений);

- создание уникальной базы данных с фундаментальными высокоточными рядами этих параметров, охватывающей не менее половины 11-летнего цикла.

ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ ПРОЕКТА

I. Исследование глобальных процессов, протекающих в недрах Солнца, и оценки их влияния на Землю:

- определение спектра и природы вариаций формы, диаметра – солнечной постоянной и сплюснутости диска и их зависимости от фазы цикла и потока солнечных нейтрино;

- изучение структуры внутреннего строения и его динамики, а также глобальных процессов, протекающих в недрах Солнца, и их вариаций в течение цикла;

- исследование физических механизмов и выяснение природы солнечного цикла;

- изучение влияния долговременных вариаций солнечного радиуса – потока радиации на глубокие изменения в климате Земли.

II. Исследование цикловых вариаций тонкой структуры фотосферы:

- исследование тонкой структуры и динамики фотосферы и их вариаций в течение цикла;

- определение природы грануляции, мезо- и супергрануляции;

- исследование вариаций физических параметров фотосферы в зависимости от глубины при изменении диаметра и фазы цикла.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Для решения термических проблем, связанных с непосредственным влиянием интегрального потока излучения полного диска Солнца на стабильность качества оптики и механической структуры телескопа и фотоприемного устройства, а также для получения однозначных и непротиворечивых результатов с требуемой точностью разработан и запатентован уникальный солнечный лимбограф космического базирования СЛ-200 со световым диаметром главного зеркала 200 мм, имитирую-

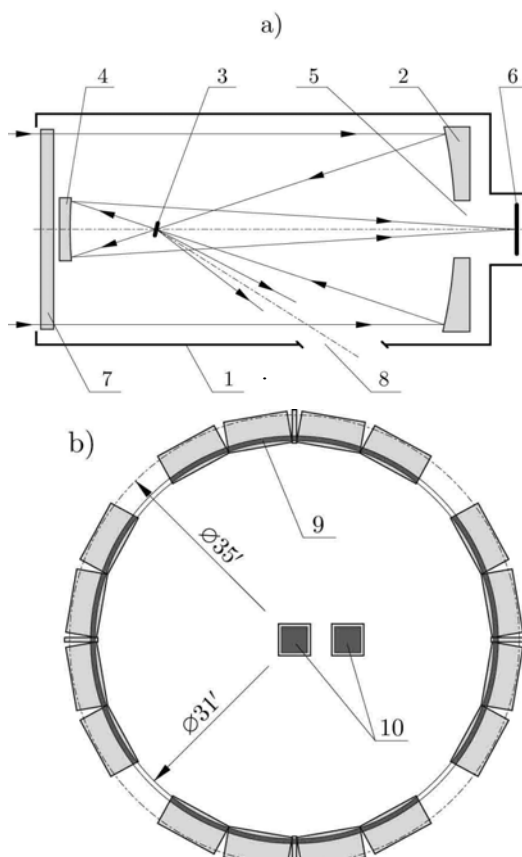


Рис. 1

щий кольцеобразное солнечное затмение [7, 8]. В основу оптической системы СЛ-200 (рис. 1а) положена зафокальная апланатическая схема Грегори, в промежуточном фокусе которой устанавливается искусственная Луна 3, перекрывающая более 90% центральной зоны изображения солнечного диска и обеспечивающая наблюдение только за очень узким кольцом края лимба 9 и двумя центральными участками диска 10 (рис. 1б). "Луна" представляет собой непрозрачный эллиптический экран с поперечным угловым диаметром не менее $1800''$, с двумя центральными отверстиями, установленный под углом 12° по отношению к плоскости, перпендикулярной оптической оси. Отраженный зеркальной поверхностью "луны", поток лучистой энергии Солнца, падающий сходящимся пучком от главного зеркала 2, выводится наружу через отверстие 8 в корпусе лимбографа 1. СЛ-200 снабжен зеркальным свето(спектро)делительным фильтром (ЗСВФ) 7 на входном зрачке, ослабляющим интегральный поток солнечного излучения более чем в 100 раз, и гелиофотомикрометром со специальным мозаичным ПЗС-фотоприемником диаметром 50 мм (рис. 1б), размещенным в фокальной плоскости 6 на подвижном основании. Эквива-

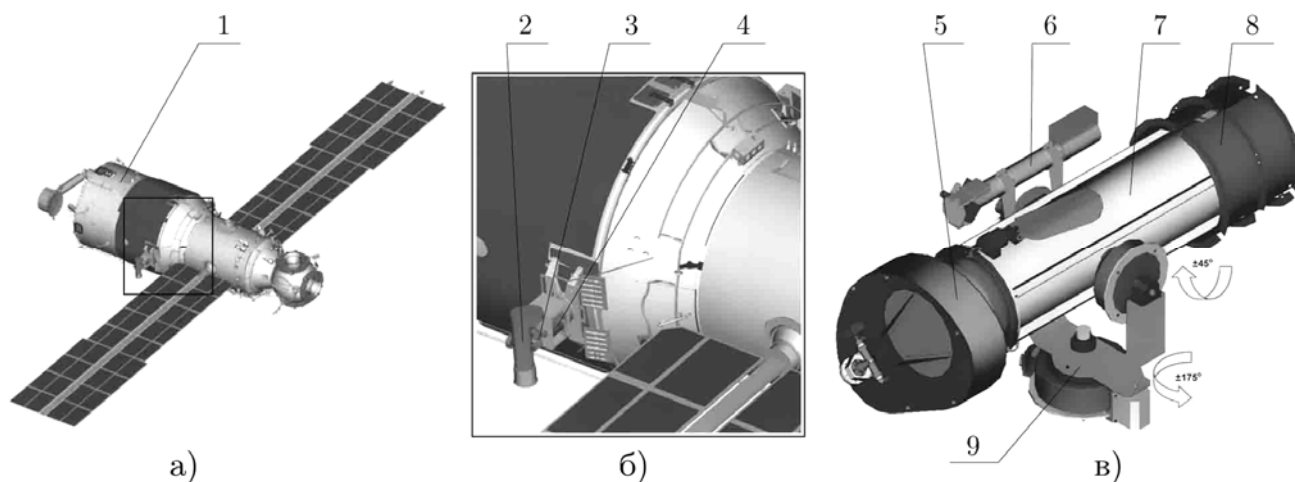


Рис. 2

лентное фокусное расстояние оптической системы – 4800 мм.

Научная аппаратура (НА) измерительно-исследовательского комплекса солнечного лимбографа СЛ-200 состоит из двух блоков: блока оптики и механики (БОМ) (рис. 2в), устанавливаемого в открытом космосе за пределами корпуса СМ 1 (рис. 2а,б), блока электроники (БЭ), состоящего из внутреннего субблока с компьютером НА, размещаемого в гермоотсеке СМ, и внешнего субблока с микропроцессором, размещаемого непосредственно на БОМ 2. Для удобства эксплуатации и обеспечения возможности замены ЗСВФ и ПЗС-фотоприемника на борту СМ БОМ СЛ-200 конструктивно расчленяется вдоль оптической оси трубы на три сопрягаемых субблока: субблок ЗСВФ 5 - БОМ1, субблок гелиофотомикрометра – фотоприемного устройства 8 - БОМ2 и собственно основной субблок солнечного лимбографа, включая его трубу 7, платформу точного слежения (ПТС) 9, фотогид 6 и системы наведения и управления - БОМ3. БОМ1 и БОМ2 устанавливаются на БОМ3 с помощью штифтов и закрепляются посредством замков многократного действия.

БОМ СЛ-200 включает в себя следующие функциональные элементы:

- труба лимбографа с питающей оптической системой (ПОС);
- откидная теплозащитная крышка объектива с приводом;
- заменяемый ЗСВФ с приводом;
- собственная ПТС визирной оси лимбографа за Солнцем;
- арретирующее устройство с приводом;
- теплозащитная крышка трубы лимбографа с приводом;

- заменяемый мозаичный ПЗС-фотоприемник, диаметром 50 мм - гелиофотомикрометр;
- автономная система обеспечения теплового режима (АСОТР);
- анализатор качества изображения (АКИ);
- телеметрические датчики оперативного контроля;
- фотогид с полем зрения 6° , установленный соосно с визирной осью ПОС;
- система точного ведения и слежения визирной оси лимбографа за Солнцем;
- системы автоматической фокусировки (САФ) и управления (САУ).

ПЗС-фотоприемник (рис. 1б) представляет собой мозаику с тремя автономными группами отдельных блоков: 16 лимбовых блоков; два центральных блока и четыре линейки на диаметрально противоположных краях лимба через каждые 90° . Каждая группа фотоприемных блоков имеет независимый режим работы и собственную систему управления: СУ1, СУ2, СУ3, - а также автономные общие электронные затворы с управляемым временем экспонирования.

Разработанная АСОТР включает регулируемые электронагреватели общей мощностью до 100 Вт, обеспечивающие компенсацию нерегулируемых тепловых потерь БОМ в окружающее космическое пространство, а также экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ) его наружных поверхностей. Инваровая труба лимбографа снаружи покрывается двумя слоями ЭВТИ по 10 мм, между которыми размещается дополнительная труба из дюралюминия для выравнивания температур вдоль оптической оси и по всему объему инваровой трубы. К пассивным элементам АСОТР можно отнести систему экранировки вторичного зеркала от прямого солнечного облучения и от переохлаждения при наблюдении звезд, внешние ра-

диационные панели и тепловые шины для отвода тепла, выделяющегося при работе ПЗС-фотоприемника и при наблюдениях Солнца, а так же теплозащитную кольцевую бленду, устанавливаемую внутри корпуса объектива. Таким образом организуется отрицательный внешний тепловой баланс БОМ в рабочем диапазоне температур за счет выбора радиационных характеристик, тепловой изоляции корпуса-трубы и площадей наружных поверхностей радиаторов. Такая АСОТР в рабочем режиме может поддерживать температуру зеркал и корпуса трубы лимбографа в диапазоне изменения не более 1.0 К и удерживать положение фокальной плоскости оптической системы при работе лимбографа в циклическом режиме в пределах не более 25 мкм [9, 10]. Увеличение стабильности положения фокальной плоскости лимбографа может быть достигнуто за счет регулировки уровней температур зеркал и корпуса-трубы:

$$\Delta f = B_{zл}\theta_{zл} + B_{зм}\theta_{зм} - B_{к}\theta_{к},$$

где Δf - термическое смещение фокальной плоскости оптической системы [мкм]; $\theta_{zл}$, $\theta_{зм}$ и $\theta_{к}$ - перегревы главного и вторичного зеркал и корпуса-трубы соответственно, К; $B_{zл}$, $B_{зм}$ и $B_{к}$ - передаточные коэффициенты для главного и вторичного зеркал и корпуса данной оптической системы соответственно, мкм К⁻¹. С помощью этой формулы также можно определить величину термического смещения фокальной плоскости лимбографа во время измерений диаметра диска Солнца или расстояний между яркими эталонными звездами и ввести соответствующую компенсирующую поправку в измеренные величины. При этом для избежания переохлаждения трубы лимбографа дежурный контур АСОТР остается включенным постоянно. В этом режиме БЭ обеспечивает контроль температур оптико-механических элементов БОМ и поддержание их с требуемой точностью. Для поддержания значений температуры оптических элементов, трубы лимбографа и фотоприемных матриц в необходимых пределах БЭ обеспечивает автоматическое регулирование подачи питания на рабочие нагреватели АСОТР.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В режиме измерений по Солнцу наведение БОМ в направлении центра солнечного диска с погрешностью не более $\pm 3^\circ$ осуществляет ПТС программным образом через информационную управляющую систему (ИУС) СМ. При этом изображение Солнца должно попадать в поле зрения фотогида $\pm 3^\circ$. С этого времени ПТС под управлением контроллера системы точного слежения, использующего в качестве информационных сигналов сигналы рассогласования изображения лимба Солнца от четырех ПЗС-линеек фотоприемника

(рис. 1б), расположенных в диаметрально противоположных краях лимба через каждые 90° , начинает постоянное наведение оси лимбографа на центр диска Солнца и обеспечивает стабилизацию его изображения в пределах не более $5''$. Далее система анализатора качества изображения (АКИ) анализирует сигнал с центрального блока матрицы фотоприемника, возникающий при плавном перемещении блока фотоприемника вдоль оптической оси, которое осуществляет система автоматической фокусировки (САФ) под управлением контроллера САФ. АКИ определяет наилучший контраст грануляции и с помощью САФ устанавливает фотоприемник в плоскости наилучшей фокусировки. Начинается этап измерений, в ходе которого сигналы с матриц, под управлением контроллера преобразуются в цифровой код и считываются в буферную память БЭ для дальнейшей обработки и регистрации результатов.

Система управления движением и навигацией (СУДН) СМ построена по принципу корректируемой бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Инерциальными датчиками СУДН являются высокоточные гироскопические измерители вектора угловой скорости (ГИВУС) с нескомпенсированным уходом порядка $0.001^\circ/\text{ч}$ - $0.003^\circ/\text{ч}$. Путем интегрирования составляющих абсолютной угловой скорости БИНС вычисляет положение связанных осей относительно инерциального базиса. Коррекция знания ориентации (коррекция БИНС) определяется с использованием звездных датчиков блока определения координат звезд (БОКЗ) СМ путем их периодических включений (примерно 2 раза в сутки). Для обеспечения наведения визирной оси БОМ на эталонные звезды программным образом через ИУС с точностью порядка одной угловой минуты проводится юстировка его приборных осей относительно приборных осей БОКЗ. Такая юстировка осуществляется путем проведения серии измерений направления на центр диска Солнца аппаратурой БОМ и сравнения измеренных БОМ направлений с вычисленными угловыми положениями Солнца в БИНС для одного и того же времени. Повышение точности такой юстировки до десятков угловых секунд достигается путем включения и обработки информации одновременно двух звездных датчиков БОКЗ и выполнения коррекции данных БИНС по их данным перед проведением юстировки. Полученная информация (углы отработки ПТС при наведении визирной оси БОМ на центр диска Солнца и вычисленное угловое положение Солнца в БИНС в привязке к одним и тем же моментам времени) определяет положение ПТС в БИНС в пересчете для нулевых углов его поворота и используется для наведения БОМ (посредством ПТС) в заданное время на площадку звездного неба, содержащую по меньшей мере пару эталонных звезд, программным обра-

зом через ИУС и последующее ее сопровождение [11].

Для редукции всех измерений, запланированных в эксперименте, из инструментальной системы в метрическую, а также для контроля стабильности всей инструментальной системы планируется регулярно проводить измерения таких характеристик, как масштабы (по обеим осям измерительной системы), косоугольность системы координат (отличие угла между осями системы от 90°) и ориентацию осей относительно направления на полюс экваториальной системы координат. В проекте "Астрометрия" эти задачи - калибровка масштаба изображения и контроль стабильности функциональных параметров лимбографа в целом - будут решены посредством измерения угловых расстояний между эталонными звездами каталога Хиппаркос [12]. Звездная величина всех отобранных для калибровки 172 пар звезд, сгруппированных в 16 площадках, в полосе b - меньше 6.5. При этом для проверки точности позиционных измерений звезд было проведено численное моделирование процесса получения и измерения изображений, отобранных для калибровки, звезд. С учетом эффекта движения изображения по полю зрения, возникающего из-за наличия у МКС собственных колебаний, и ошибок собственных движений и координат звезд, а также разности эпох в 15 лет и наблюдения порядка 170 пар звезд в каждом сеансе калибровки получено, что ошибка по усредненным результатам обработки 100 измерений в целом составит не более 0.001". Можно ожидать, что и ошибка измерения диаметра Солнца - расстояния между точками перегиба радиального профиля яркости на противоположных краях его лимба по усредненным результатам обработки 100 измерений будет также порядка 0.001". Таким образом, в результате проведенного численного моделирования процесса получения и измерения изображений звезд и Солнца можно сделать вывод, что ошибки измерений в проекте "Астрометрия" заложены реальные и - более того - в случае проведения эксперимента можно ожидать, что работа комплекса СЛ-200 будет успешнее (в смысле точности), чем планируется на настоящем этапе.

Управление циклограммой эксперимента обеспечивается системой управления бортовой аппаратурой (СУБА) СМ и БЭ комплекса СЛ-200. Управление работой исполнительных органов и систем БОМ и фотоприемного устройства, а также запись информации только заданных строк лимбовой группы фотоприемника в режиме наблюдения Солнца или только двух (трех) блоков лимбовой группы фотоприемника в режиме наблюдения звезд, оперативная их обработка и регистрация изображений лимба и центральных участков диска Солнца или звезд обеспечиваются БЭ. Фрагменты научной информации, а также наиболее важная часть контрольной информации оперативно пере-

даются в Центр управления полетами (Москва) (ЦУП-М) через ИУС. Телеметрический контроль служебных параметров комплекса СЛ-200 осуществляется бортовой информационной системой (БИТС) СМ. С ее помощью передается вся служебная информация о состоянии аппаратуры и ее работе. Периодически на Землю дополнительно возвращаются полные результаты эксперимента, записанные на сменные жесткие диски.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в конце 2004 г. в ГАО РАН совместно с ГОИ им. СИ. Вавилова собственная ПТС 3, 9 (рис. 2б, в) комплекса СЛ-200 2 с диапазоном углов прокачки вокруг вертикальной оси $\pm 175^\circ$ и $\pm 45^\circ$ вокруг горизонтальной оси с дискретностью около 2" позволяет реализовать космический эксперимент "Астрометрия" на служебном модуле РС МКС без использования ранее запланированного промежуточного звена наведения с помощью двухступенной платформы наведения (ДПН) и выносного рабочего места (ВРМ). В соответствии с просьбой ГАО РАН БОМ комплекса СЛ-200 планируется крепить непосредственно на УРМ-Д (универсальное рабочее место) 4, расположенном на внешней поверхности рабочего отсека большого диаметра (РО-2) СМ 1 по плоскости IV (правый борт) (рис. 2а, б) на расстоянии около 1000 мм от его корпуса [11]. При этом, в частности, значительно упрощается контур управления и повышается надежность механической схемы и точность предварительного наведения БОМ на Солнце или на заданную площадку звездного неба, содержащую по меньшей мере пару эталонных звезд, и их последующее сопровождение. При поддержании орбитальной ориентации МКС с помощью управляющих моментных гироскопов (СМГ) система МКС-УРМ-Д-проставка-БОМ СЛ-200 практически не испытывает упругих колебаний, так как спектр частот управляющих воздействий лежит вне диапазона собственных частот совокупной системы [11]. Эксперимент проводится двухсуточными непрерывными сериями из 12 сеансов на смежных витках. Количество таких серий в месяц - не менее 6. Длительность сеанса - не более 30 мин.

Общая масса БОМ - 64 кг, БЭ (внутренний субблок с компьютером) в гермоотсеке - 15 кг (внешний субблок с микропроцессором - 7 кг в составе БОМ). Габаритные размеры БОМ - 1090 x 485 x 550 мм, БЭ (внутренний субблок с компьютером) - 180 x 400 x 270 мм и (внешний субблок с микропроцессором) - 200 x 200 x 80 мм. Реализация проекта планируется в восходящей фазе нового 24-го солнечного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frohlich C.* Solar Constant // www.pmod-wrc.ch/pmod.php?topic=tsi/composite/SolarConstant.
2. *Абдусаматов Х.И., Будин В.П., Славнов С.Г.* // Тр. междунар. конф. "Солнце в эпоху смены знака магнитного поля". Санкт-Петербург: НИИХ СПбГУ, 2001. С. 9.
3. *Абдусаматов Х.И.* // Петербургские фрагменты научной картины мира. В 2. СПб.: ПИЯФ РАН, 2003. С. 8.
4. *Abdussamatov H.I.* // Proc. IAU Symposium № 223. Cambridge: Univ. press, 2004. P. 541.
5. *Абдусаматов Х.И.* // Кинематика и физика небесных тел. 2005. Т. 21. С. 471.
6. *Abdussamatov H.I., Arkhipova L.N., Alekseev Yu.V. et al.* // IAU Symp. № 223. Book Abstr. 2004. P. 4.
7. *Абдусаматов Х.И.* Пат. РФ № 2158946 // Б.И. 2000. №31. С. 383.
8. *Abdussamatov H.I.* // Proc. IAU Symp. № 223. Cambridge: Univ. press, 2004. P. 605.
9. *Абдусаматов Х.И., Ханков СИ.* // Опт. журн. 2006. Т. 73. № 1. С. 29.
10. *Абдусаматов Х.И., Ханков СИ.* // Опт. журн. 2006. Т. 73. № 4. С. 37.
11. Служебный модуль. Пояснительная записка. Комплекс целевых нагрузок. 17КС.0000-0ПЗ 53. Интеграция научной аппаратуры космического эксперимента "Астрометрия" (комплекс солнечного лимбографа СЛ-200). Королёв: РКК "Энергия", 2004. 213 с.
12. *Pertymian A.C. et al.* The Hipparcos and Tycho Catalogs. Noordwijk: ESA, 1997.