

УДК 520.6+52-13(083.8)+520.876

## КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ “ЛИРА-Б”: ЦЕЛИ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ

© 2013 г. А. И. Захаров, А. В. Миронов, М. Е. Прохоров\*,  
А. В. Бирюков, О. Ю. Стекольников, М. С. Тучин

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 14.06.2012 г.; принята в печать 12.07.2012 г.

Описываются принципы и цели проведения космического эксперимента “Лира-Б” на борту МКС, разрабатываемого в ГАИШ МГУ. Основной задачей этого эксперимента является высокоточный многоцветный обзор звезд всего неба до  $16^m$ – $17^m$ . Подробно рассматривается структура ожидаемых наблюдательных данных, их возможное научное использование и ряд технических проблем.

DOI: 10.7868/S0004629913030067

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание каталогов звезд и других небесных объектов — классическая задача астрономии. Из этих каталогов астрономы черпают основную информацию при статистических исследованиях и выбирают объекты для детального изучения.

Первые действительно большие каталоги были созданы в последние десятилетия XX в. путем сканирования и оцифровки фотопластинок Паломарского обзора неба [1–3] и некоторых других фотографических обзоров. Так были созданы каталоги “Guide Star Catalog” (GSC) и USNO.

Ранние версии каталога GSC [4–8] содержат около 19 млн. объектов, из которых примерно 15 млн. классифицированы как звезды ярче  $16^m$ . В версиях GSC 1.1 и GSC 1.2 фотографические звездные величины приведены в одной спектральной полосе. В последней версии GSC 2.3.2 [9] содержится более 950 млн. объектов примерно до  $22^m$ , не менее половины из которых — звезды; фотографические звездные величины приведены в четырех спектральных полосах, две из которых являются вариациями “синей” полосы, а остальные две лежат в красной и ближней инфракрасной областях. Приведенные в каталогах GSC величины звезд, более ярких чем примерно  $12^m$ , для которых изображения на фотографических пластинках передержаны, заимствованы из каталога Tycho-2 [10] либо из каталогов фотоэлектрических величин в полосах *B* и *V* Джонсона.

Каталоги USNO-A2.0 и USNO-B1.0 [11, 12] содержат примерно 500 млн. и один миллиард объектов, соответственно. Фотографические звездные величины в USNO-A2.0 приведены в двух (синей и красной), а в USNO-B1.0 — в пяти (две синих, две красных и одна инфракрасная) спектральных полосах.

Точность звездных величин в каталогах GSC и USNO невысока. В пределах одной и той же фотопластинки случайные ошибки составляют  $0.1^m$ – $0.2^m$ . Гораздо большие систематические ошибки существуют между оценками величин на разных пластинках; они могут достигать  $0.5^m$  и более, но именно они определяют погрешность каталога в целом.

Позднее были созданы каталоги сравнимого с GSC и USNO объема, полученные путем непосредственного измерения световых потоков звезд с помощью фотоэлектрических приемников: “Two Micron All Sky Survey” (2MASS) [13] и SDSS [14]. Это многоцветные каталоги с глубоким пределом (табл. 1). Однако при их создании не были предусмотрены процедуры, необходимые для достижения высокой фотометрической точности (например, для точного учета атмосферного поглощения света), в результате чего при приемлемых случайных ошибках измерений их систематические погрешности слишком велики для использования данных в качестве стандартов при точной фотометрии [17].

Самыми точными фотометрическими каталогами на сегодняшний день являются часть каталога Hipparcos [15] и Тянь-Шаньский *WBVR*-каталог ГАИШ [16]. В первый из этих каталогов входят около 118 тыс. звезд на всем небе, измеренные в

\*E-mail: mike.prokhorov@gmail.com

**Таблица 1.** Характеристики наиболее известных фотометрических каталогов звезд

Каталог	Звездные величины	Спектральные полосы	Число объектов	Погрешность	Покрытие неба
Hipparcos [15]	0–9	1 (H $\alpha$ )	~118 тыс.	0.001 <sup>m</sup>	100%
Tycho-2 [10]	0–12	2 (B <sub>T</sub> , V <sub>T</sub> )	2.5 млн.	0.01 <sup>m</sup>	100%
Тянь-Шань [16]	0–7.2	4 (W, B, V, R)	~12 тыс.	0.002 <sup>m</sup>	$\delta > -15^\circ$
GSC 1.2 [8]	0–16	2 (B <sub>T</sub> , V <sub>T</sub> )	15 млн.	>0.1 <sup>m</sup>	100%
GSC 2.3 [9]	12–22	3 (B <sub>T</sub> , V <sub>T</sub> )	950 млн.	>0.1 <sup>m</sup>	100%
USNO-A2.0 [11]	10–21	3 (B <sub>T</sub> , V <sub>T</sub> )	500 млн.	>0.1 <sup>m</sup>	100%
USNO-B1.0 [12]	10–21	3 (B <sub>T</sub> , V <sub>T</sub> )	1 млрд.	>0.1 <sup>m</sup>	100%
2MASS [13]	5–16	3 (J, H, K)	470 млн.	0.04 <sup>m</sup>	100%
SDSS(DR8) [14]	16–22.5	5 (u, g, r, i, z)	260 млн.	0.04 <sup>m</sup>	14 500 кв. град

одной полосе H $\alpha$ , примерно до 12<sup>m</sup>. Около 75% звезд этого каталога ярче 9.5<sup>m</sup> имеют погрешность величины H $\alpha$ , не превышающую 0.003<sup>m</sup>. Во втором каталоге содержится около 13 600 звезд на северном небе ( $\delta > -15^\circ$ ), измеренные в четырех полосах до 7.2<sup>m</sup>. Внутренняя погрешность этих каталогов порядка 0.001–0.003<sup>m</sup>, а взаимная погрешность каталогов, определенная по непостоянным звездам, не превышает 0.003<sup>m</sup> [18, 19].

Желательное свойство современного фотометрического каталога — широкий охват спектрального диапазона. В последнее время проведены, проводятся и планируются обзоры неба в УФ- и ИК-диапазонах [13, 20–23]. Парадоксальность существующей ситуации заключается в том, что при этом нет одновременных измерений в разных участках оптического диапазона, а это не позволяет связать эти обзоры друг с другом, а также уверенно получить показатели цвета переменных и уникальных объектов.

Перечислим, каким условиям должен удовлетворять современный фотометрический каталог:

- большое число фотометрических полос (4–5 в видимом диапазоне, желателен также охват ИК- и УФ-диапазонов);
- умеренная (16<sup>m</sup>–17<sup>m</sup>) или большая (>20<sup>m</sup>) предельная звездная величина;
- малые погрешности, как случайные, так и систематические (порядка 0.01<sup>m</sup> для предельной звездной величины и не хуже 0.001<sup>m</sup> для объектов на 4<sup>m</sup>–5<sup>m</sup> ярче предела);
- обзор всей небесной сферы.

Насколько основные существующие каталоги удовлетворяют этим условиям, показано в табл. 1.

Как видно из таблицы, современных *высоко-точных многоцветных фотоэлектрических* каталогов звезд, удовлетворяющих всем необходимым условиям, нет.

Согласно результатам, полученным в [24, 25], статистические погрешности для ярких звезд, вызываемые флуктуациями атмосферы, убывают значительно медленнее, чем остальные виды погрешностей. Таким образом, время, необходимое для проведения глубокого и точного фотометрического обзора с поверхности Земли, становится неприемлемо большим. Это указывает на необходимость проведения обзора из космоса.

Наземные наблюдения также не позволяют проводить измерения в ультрафиолетовом и в части инфракрасного диапазонов.

Обзор неба, который будет проведен в рамках космического эксперимента “Лира-Б”, решает эти задачи, а каталог, создание которого ожидается после завершения эксперимента, будет удовлетворять всем перечисленным выше требованиям.

В разделе 2 описаны основные цели эксперимента “Лира-Б”, а в разделе 3 рассмотрены ключевые направления астрономических исследований, которые будут возможны по результатам космического эксперимента. Раздел 4 посвящен принципам проведения обзора неба. В разделе 5 обосновывается, почему в качестве места проведения эксперимента “Лира-Б” была выбрана МКС. Ожидаемые результаты обзора и структура получаемых научных данных рассмотрена в разделе 6. Последний раздел 7 содержит выводы.

## 2. ЦЕЛИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “ЛИРА-Б”

Целью эксперимента является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов от  $3^m$  до  $16^m$  на небесной сфере. В ходе эксперимента (длительностью от 3.5 до 5 лет) предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 10 спектральных полосах примерно от 200 до 1000 нм. По результатам обзора должны быть созданы следующие каталоги:

- каталог непременных звезд ярче  $12^m$  с погрешностью не хуже 0.1%–0.2% ( $0.001^m$ – $0.002^m$ ); при этом будут приняты специальные меры, чтобы измерить с высокой точностью наиболее яркие звезды — до  $3^m$ , в том числе в полосах  $B$  и  $V$ ;
- каталог (атлас) непременных звезд ярче  $16^m$ ; в полосах  $B$  и  $V$  должна быть достигнута погрешность не хуже 1% ( $0.01^m$ );
- каталог переменных звезд ярче  $16^m$ ;
- многоцветный фотометрический каталог астероидов ярче  $14^m$ ;
- каталог положений звезд с погрешностью порядка 100–200 мсек. дуги для ярких звезд и 1 мсек. дуги для остальных;
- многоцветный каталог протяженных объектов с высокой поверхностной яркостью;
- атлас фона неба во всех спектральных полосах обзора.

Наибольшее число звезд, которые будут регистрироваться в ходе обзора, являются красными. Максимум их излучения приходится на длинноволновую часть видимого и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Данные инфракрасного обзора 2MASS [13] говорят, что в эксперименте “Ли́ра-Б” будет зарегистрировано не менее 100 млн. звезд. Более подробная оценка, полученная частью авторов данной статьи [26], говорит, что будет зарегистрировано примерно 350 млн. звезд, у которых величина  $V$  будет измерена с погрешностью менее  $0.01^m$ .

Под высокой точностью обзора подразумевается, что в тех полосах, в которых сигнал от звезды максимален, все *непеременные звезды* ярче  $12^m$ , включая самые яркие, будут измерены с результирующей погрешностью не более  $0.001^m$ , а более слабые объекты — с погрешностью не более  $0.01^m$ – $0.02^m$ . Будут приняты специальные меры,

чтобы с высокой точностью измерить блеск ярких звезд от  $3^m$  включительно.

Важнейшими особенностями обзора “Ли́ра-Б” являются:

- квазиодновременное (на интервале 15–20 с) проведение многоцветных фотометрических измерений объектов в широком спектральном диапазоне;
- высокая однородность фотометрических измерений, которая обеспечивается тем, что повторные измерения объектов происходят через интервалы времени, много меньшие, чем характерные времена изменения параметров аппаратуры;
- применение специальных мер для точного измерения блеска звезд от  $3^m$  до  $16^m$ – $17^m$ , чтобы преодолеть ограничения, связанные с шириной динамического диапазона фотоприемника (см. подраздел 4.4.6).

Из данных этого эксперимента можно будет получить много сведений, важных для различных направлений астрономии. Наиболее очевидные направления использования этих данных рассмотрены в разделе 3.

Еще одна существенная особенность космического эксперимента “Ли́ра-Б” состоит в том, что он будет проводиться на борту Международной космической станции (МКС) [27]. Причины, по которым в качестве места размещения комплекса научной аппаратуры эксперимента “Ли́ра-Б” была выбрана МКС, описаны ниже, в разделе 5. Ограничения, налагаемые размещением научной аппаратуры на борту МКС, определяют многие характеристики эксперимента и технические решения, используемые в комплексе его научной аппаратуры.

## 3. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “ЛИРА-Б”

Научные результаты, которые можно ожидать при обработке данных, полученных в эксперименте “Ли́ра-Б”, очень разнообразны. Их серьезное рассмотрение далеко выходит за рамки этой статьи. Ниже приведено краткое перечисление основных, наиболее очевидных направлений исследований. Обращаем внимание, что структура научных данных, получаемых в ходе эксперимента, которая описана в разделе 6, оказывает существенное влияние на возможности исследования свойств космических объектов.

### *3.1. Создание высокоточного многоцветного фотометрического каталога звезд и близкие вопросы*

Каталог, получение которого ожидается в рамках эксперимента “Лира-Б”, должен решить задачу увязки звездных величин звезд различных спектральных классов в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм.

Как уже отмечалось, в ходе эксперимента “Лира-Б” все небесные объекты до  $12^m$  будут измерены с погрешностью менее  $0.001^m$ . При этом будут приняты специальные меры для измерения с такими же погрешностями ярчайших звезд до  $3^m$  включительно. Существенно большее количество более слабых объектов (примерно до  $16^m$ ) будут измерены с погрешностью не более  $0.01^m$ . С фотометрической точки зрения ценность таких измерений не очень велика, однако, поскольку измерения будут сопровождаться определением координат объектов с точностью лучше  $0.1''$ , этот массив данных образует многоцветный цифровой атлас небесных объектов — основу для проведения впоследствии различных астрономических исследований.

Многократные измерения звезд позволят с большой достоверностью разработать однородную систему фотометрических стандартов до  $12^m - 14^m$  с погрешностями  $0.001^m - 0.002^m$  по всему небу в широком спектральном диапазоне. Средняя плотность стандартов составит не менее 25 на квадратный градус. В настоящее время необходимость построения такой системы не вызывает сомнений в связи с широким использованием для многоцветной фотометрии ПЗС-приемников: результаты этих измерений невозможно привязывать к существующим сегодня существенно более ярким фотометрическим стандартам. Такая система стандартов также позволит проводить фотометрическую калибровку различных УФ- и ИК-фотометрических систем и производить учет систематических ошибок, связанных с временной нестабильностью кривых реакций [28].

На основе каталога стандартов и многоцветного цифрового атласа неба можно будет разрабатывать методики широкопольной и субпиксельной наземной фотометрии умеренной точности ( $0.01^m - 0.05^m$ ). Такие методики могут применяться для массовых систематических наблюдений объектов разных типов (переменных звезд, астероидов, ИСЗ и др.) на широкопольных инструментах.

Изображения всех объектов, сигнал от которых в панхроматической полосе превышает заданную пороговую величину, а также изображения протяженных объектов из входного каталога таких объектов, фиксируются во всех фотометрических полосах и передаются на Землю. Эти фрагменты

покрывают примерно 1% небесной сферы. Однако сигналы, регистрируемые между яркими объектами, также представляют интерес. Их уровень низок, и попиксельная регистрация привела бы к их уходу под уровень шума считывания. Эти сигналы будут суммироваться без считывания для получения оценки фона неразрешенных источников. По таким записям возможна как оценка уровня фона или построение его карты, так и поиск источников, лежащих ниже порога основного систематического обзора. Одной из решаемых задач будет построение многоцветной карты зодиакального света и противосияния, а также определение локализации и физических свойств пылинок, которые порождают это рассеянное излучение.

Кривые реакции аппаратуры, установленной на МКС, будут подвержены изменениям из-за загрязнения компонентами микроатмосферы, воздействия космических лучей и старения материалов. Однако большое количество измерений непрерывных звезд в эксперименте “Лира-Б”, а также регулярное проведение специальных калибровочных процедур, позволит выявить изменения кривых реакции и уменьшить систематическую ошибку данных.

Для уверенного обнаружения и последующего исключения систематических ошибок крайне важно проведение специально спланированных координированных наземных измерений. Целесообразно также рассмотреть возможность возвращения светофильтров и матричных ПЗС на Землю по окончании эксперимента “Лира-Б” для последующих метрологических и материаловедческих исследований. Это позволит существенно повысить надежность фотометрических измерений небесных объектов, получаемых в ходе эксперимента.

### *3.2. Фотометрическое исследование поверхностей малых тел Солнечной системы*

На открытие большого числа новых астероидов и комет в эксперименте “Лира-Б” рассчитывать не приходится, так как апертура телескопа слишком мала для обнаружения слабых объектов, а поле зрения телескопа заметно уже, чем у инструментов, используемых в программах поиска астероидов и комет. В эксперименте “Лира-Б” будут регистрироваться только достаточно яркие объекты из главного пояса астероидов или еще более близкие объекты. Орбиты подавляющего большинства из них сегодня уже известны. С другой стороны, за время эксперимента любой доступный наблюдением астероид попадет в поле зрения телескопа в среднем 100 раз. При погрешности одиночного измерения координат от  $0.01''$  до  $0.1''$  это позволит существенно уточнить параметры их орбит. Следует, однако, обратить внимание на временную

структуру наблюдений (см. раздел 6), и возможно, потребуется специальная адаптация алгоритмов определения и уточнения орбит.

Наиболее интересными данными об астероидах, по-видимому, станет их многоцветная фотометрия, которая позволит судить о физических свойствах поверхности объектов и уточнить их классификацию. Повторные наблюдения астероидов через короткие интервалы времени (см. раздел 6), возможно, позволят сделать выводы об их осевом вращении.

### 3.3. Изучение Галактики

Появление каталога высокоточных измерений потоков от звезд в нескольких спектральных полосах открывает широкие перспективы для звездной астрономии и астрофизики, что особенно важно в связи с перспективой получения в ближайшие годы точных координат и параллаксов для большого количества объектов [29]. Вкупе с высокой точностью фотометрических измерений это позволит изучить тонкие статистические закономерности строения Галактики, распределения поглощающей материи и определить для миллионов звезд их физические характеристики (светимость, особенности химического состава, ускорение свободного падения на поверхности, скорости вращения и т.п.). По этим данным можно будет уточнить эволюционные треки звезд, их особенности и многое другое. Постановка и перечисление задач, которые можно решать на таком статистическом материале, выходит за пределы настоящей публикации.

### 3.4. Многоцветная поверхностная фотометрия протяженных объектов

Типичная поверхностная яркость протяженных объектов для галактик и туманностей составляет  $18^m$ /кв. сек. дуги и ниже. Эти величины близки к порогу регистрации в эксперименте “Ли́ра-Б” (см. раздел 6). Для регистрации таких объектов будет применяться процедура бинирования — объединения сигнала от нескольких пикселей, которая приводит к снижению шумов. Области и режимы регистрации изображений протяженных объектов будут содержаться в специальном входном каталоге таких объектов.

Области на небесной сфере, в которых расположены протяженные объекты, наблюдаются во всех спектральных полосах каждый раз, когда объект попадает в полосу сканирования. При этом сканирование объектов производится с разных направлений и с произвольными сдвигами пикселей относительно их ранее полученных изображений. Количество наблюдений протяженных объектов такое же, как и звезд, — в среднем 100 раз за 5 лет

проведения эксперимента. По всем полученным сканам строится единая многоцветная фотометрическая карта их поверхности.

### 3.5. Определение расстояний до звезд по межзвездному поглощению в ультрафиолетовой части спектра

Ультрафиолетовые полосы фотометрической системы “Ли́ра-Б” выбраны таким образом, чтобы средняя из них (218 нм) попадала на полосу межзвездного поглощения, а две другие (195 и 270 нм) лежали соответственно на более коротких и более длинных волнах. Измерение в этих полосах, или хотя бы в двух длинноволновых, позволяют оценить межзвездное поглощение. Сравнив эту величину с трехмерной картой межзвездного поглощения, основанной на пространственном распределении межзвездного водорода [30], мы можем получить сравнительно точную оценку расстояния до звезды.

Поток ультрафиолетового излучения, достаточный для подобных измерений, испускают звезды спектральных классов А и более ранних, т.е. таким методом будут оценены расстояния до нескольких миллионов звезд.

### 3.6. Открытие и изучение переменных звезд

За год эксперимента каждый объект будет измерен в среднем 20 раз. Вблизи полюсов мира число измерений растет и доходит до 1000 раз в год (последнее число зависит от метода сканирования приполярных областей). Подобные наблюдения позволяют открывать новые переменные звезды (это будут так называемые “звезды, заподозренные в переменности” в том смысле, как это понимается в ОКПЗ [31]<sup>1</sup> и исследовать их с умеренным качеством (для приполярных областей число наблюдений и, соответственно, качество исследования переменных будет выше). Если хотя бы 1% звезд — переменные, то эксперимент “Ли́ра-Б” позволит обнаружить более 1 000 000 кандидатов в переменные звезды, что существенно превышает число переменных звезд, известных сегодня<sup>2</sup>. Статистическая обработка переменных звезд, открытых по данным КЭ “Ли́ра-Б”, позволит найти и (или) уточнить следующие их характеристики:

- распределение переменных по типам;

<sup>1</sup> В настоящее время коллектив проекта ОКПЗ пересматривает критерии включения новых переменных звезд в каталог [32].

<sup>2</sup> В настоящее ОКПЗ включает в себя более 40 тыс. звезд [31], а AAVSO — около 180 тыс. переменных звезд [33].

- пространственное распределение переменных разных типов и их связь со строением Галактики;
- статистические параллаксы для разных типов переменных и распределение их пространственной плотности в Галактике.

Вероятно также открытие новых типов переменных и уточнение существующей сегодня их классификации.

### 3.7. Обнаружение неразрешенных двойных звезд по многополосной фотометрии

Один из способов обнаружения двойственности звезды — выделение в спектре двух компонентов, соответствующих звездам с различной температурой поверхности.

Если температуры компонентов различаются незначительно и отсутствуют затмения, то отличить такую двойную звезду от одиночной по фотометрическим данным практически невозможно. Легко распознать системы, в которых горячая звезда имеет меньшие размеры, чем более холодная. В этом случае в виновской области спектра холодной звезды будет наблюдаться пик излучения от горячей звезды, превышающий уровень излучения холодной звезды, даже если светимость горячей ниже.

Обнаружение двойственности в обратной ситуации — когда более холодная звезда одновременно имеет и меньшие размеры — практически невозможно. Весьма сложным является и случай, когда звезды различаются по температурам, но почти одинаковы по размерам. В этом случае на всех длинах волн излучение холодной звезды слабее, чем горячей, но в рэлей-джинсовской области спектра горячей звезды можно заметить искажения, вызываемые присутствием холодного компонента. Эта ситуация очень интересна с астрофизической точки зрения, поскольку таким образом проявляют себя двойные белые карлики, образовавшиеся в широких звездных системах.

Прецизионная многоцветная фотометрия для решения описанной задачи служит вполне адекватной заменой спектрофотометрии. У получаемого в результате многоцветной фотометрии “квазиспектра” очень низкое разрешение, зато малая погрешность измерений в каждой точке.

### 3.8. Внегалактическая астрономия

Внегалактическая астрономия в эксперименте “Лири-Б” представлена наблюдениями галактик. В ходе обзора могут регистрироваться диски или балджи галактик как протяженные объекты, а их выделенные звездообразные ядра — как точечные.

Процедура наблюдения протяженных частей галактик не отличается от описанной в подразделе 3.3.4. Типичная центральная яркость балджа спиральной галактики средней светимости — около  $18^m$ /кв. сек. дуги. Поверхностная яркость дисков галактик ниже — она не превышает  $21^m$ /кв. сек. дуги. Обе величины даны для полосы  $V$ . Поскольку порог регистрации обзора “Лири-Б” в полосе  $B$  составляет  $20.3^m$  (см. раздел 6), то галактики с балджами будут регистрироваться, а не обладающие ими — нет. Учитывая, что поверхностная яркость объекта не зависит от расстояния, мы сможем регистрировать все галактики, угловые размеры балджа которых превышают 2–3 пикс., т.е.  $1.5''$ – $2''$ . Средний эффективный радиус типичного балджа — около 0.8 кпк [34], таким образом размер балджа будет превышать  $1.5''$ – $2''$  у галактик ближе 80 Мпк. Поскольку балджами обладает примерно 40% галактик, то ожидаемое число галактик, которые в эксперименте “Лири-Б” будут регистрироваться как протяженные объекты, составляет несколько десятков тысяч.

Независимо от “тел” галактик будут регистрироваться их компактные звездообразные ядра. Порог их обнаружения такой же, как у звезд —  $16^m$  и  $17^m$  в полосах  $V$  и  $B$ , соответственно. Наблюдения с космического телескопа им. Хаббла показали, что типичная абсолютная звездная величина звездообразных ядер спиральных галактик лежит в интервале  $-14^m < M_B < -10^m$  [35], а для карликовых эллиптических галактик этот интервал составляет  $-13^m < M_B < -11^m$  [36]. Соответственно, звездообразное ядро с таким блеском может быть зарегистрировано в карликовых галактиках на расстоянии не более 10 Мпк, а в спиральных галактиках средней светимости — до 16 Мпк от нас, что соответствует расстоянию до скопления Virgo. Статистика данных с космического телескопа им. Хаббла показывает, что выделенными ядрами обладают около 75% спиральных галактик поздних типов [37] и порядка 55% дисковых галактик в полном диапазоне морфологических типов [35]. Применяя эти данные к каталогу галактик “локальной Вселенной” [38], можно ожидать, что в обзоре “Лири-Б” будет зарегистрировано порядка 100 звездообразных галактических ядер.

### 3.9. Астрометрия

Диаметры изображений точечных источников, создаваемые телескопом “Ли́ра-Б”, составляют примерно 1.5 пикс. по всей фокальной плоскости. Это значение близко к оптимальному для определения координат точечных источников. Погрешность положения фотоцентра такого изображения зависит, в первую очередь, от отношения сигнала к шуму в нем. Для ярких звезд фотоцентр можно определить с точностью до 0.01 пикс. и выше. Однако вибрации МКС создают помехи высокоточной астрометрии и снижают ожидаемую точность измерений координат звезд. Оценки показывают, что, несмотря на это обстоятельство, погрешность астрометрических измерений будет порядка 1 мсек. дуги для всех звезд, регистрируемых в обзоре, а погрешность определения координат для звезд ярче  $12^m$  не будет превышать 100 мсек. дуги. Для слабых звезд это сравнимо с результатами Hipparcos, а для ярких — немного превосходит эти результаты. Измерения с помощью телескопа “Ли́ра-Б” позволят с ошибкой в 10% определять параллаксы звезд на расстояниях до 1 кпк или несколько дальше.

Отметим, что речь идет об измерении относительных положений объектов. Указанные погрешности измерений будут достигаться для объектов, одновременно регистрирующихся в фокальной плоскости телескопа, т.е. удаленных не более чем на  $1^\circ$  друг от друга. Задачи построения фундаментальной системы координат в проекте “Ли́ра-Б” не ставится.

### 3.10. Gaia и “Ли́ра-Б”

В 2013 г. ожидается запуск большого астрометрического спутника Gaia, разработанного Европейским космическим агентством [29]. Он измерит координаты звезд в оптическом диапазоне с небывалой доселе точностью:  $\sim 25$  мсек. дуги для звезд  $10^m$  и 0.3–1.0 мсек. дуги для  $20^m$ . Помимо этого будет проводиться многоцветная “квазифотометрия” измеряемых звезд и определяться их лучевые скорости. Если бы конструкция Gaia осталась в том виде, который был предложен после завершения эскизного проекта [39], то эксперимент “Ли́ра-Б” не понадобился бы. В начальном варианте предусматривалось проведение классической многоцветной фотометрии с собственными фотоприемниками для каждой спектральной полосы и т.д. Однако современный проект существенно усечен: фотометрия была заменена на построение спектров низкого разрешения<sup>3</sup>, по которым потом рассчитываются потоки в спектральных полосах [29].

<sup>3</sup> 34 и 36 бинов для красной и синей областей спектра, соответственно.

Точность фотометрии, естественно, снизилась до типичных наземных значений  $0.02^m - 0.03^m$ .

Объединение астрометрической части каталога Gaia с фотометрическим каталогом “Ли́ра-Б” позволит получить суперкаталог с принципиально новыми характеристиками. Отметим также, что, во-первых, каталоги будут создаваться практически одновременно<sup>4</sup>, и, во-вторых, наилучшая точность измерений в обоих экспериментах достигается для одних и тех же звезд — ярче  $12^m$ .

## 4. ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА “ЛИ́РА-Б”

МКС обращается вокруг Земли с сохранением так называемой “орбитальной ориентации” [27]. В этой ориентации МКС всегда одной стороной (условно “нижней”) обращена к Земле. На этой стороне устанавливаются приборы для наблюдения Земли. Противоположная сторона, обращенная в местный зенит, предназначена для приборов наблюдения космического пространства.

При орбитальной ориентации продольная ось станции направлена приблизительно вдоль вектора ее орбитальной скорости. Российский сегмент МКС располагается в “хвосте” станции.

### 4.1. Метод наблюдения небесной сферы

Существуют два возможных метода проведения наблюдений на МКС: (1) режим прямого наведения и (2) сканирующий режим. В режиме прямого наведения работают большинство наземных телескопов и космических обсерваторий. Сканирующий режим использовался в эксперименте Hipparcos [15] и в обзоре SDSS [14] и используется в планируемых экспериментах JMAPS, JASMINE и Gaia [40, 41, 29].

На МКС реализовать сканирующие наблюдения гораздо проще, чем режим прямого наведения. Для этого достаточно зафиксировать положение оптической системы телескопа относительно корпуса станции<sup>5</sup>. При обращении МКС вокруг Земли телескоп будет поворачиваться вместе со станцией, а изображения звезд — перемещаться по фокальной плоскости телескопа. Изменять положение телескопа придется редко: примерно раз в месяц (см. подраздел 6.6.1), что повышает надежность конструкции.

В качестве приемников излучения для фотометрии в телескопах чаще всего используются матричные ПЗС или КМОП-приборы или мозаики

<sup>4</sup> Gaia с 2013 г., “Ли́ра-Б” — с 2015 г.

<sup>5</sup> Вопрос о компенсации вибраций МКС рассмотрен в разделе 5.

из них [42, 43]. При сканирующих наблюдениях фотоприемники должны функционировать в так называемом режиме с временной задержкой и накоплением (ВЗН)<sup>6</sup> [44].

В режиме ВЗН пакеты электронов, накапливаемые в ходе экспозиции, перемещаются по матрице с той же скоростью и в том же направлении, в котором перемещаются изображения звезд. Это накладывает требования на ориентацию матричных ПЗС в фокальной плоскости и на точность задания скорости перемещения зарядов.

Считывание накопленных зарядов происходит, когда изображение достигает края матричного ПЗС. Получаемый кадр имеет вид полосы, ширина которой равна числу пикселей в строке матричного ПЗС, а длина определяется продолжительностью сеанса наблюдения и скоростью перемещения звезд по фокальной плоскости.

ВЗН-режим имеет целый ряд преимуществ, важных для получения высокоточной фотометрии: усреднение неоднородности чувствительности и термогенерации вдоль столбцов ПЗС, стабильные тепловые и электрические режимы функционирования матрицы. Кроме того, в режиме ВЗН естественным образом возникает так называемый “эффект дрожаний” (dithering mode) [45], что приводит к существенному снижению термогенерации электронов.

Для проведения многоцветной фотометрии в фокальной плоскости располагается несколько матричных ПЗС, каждая со своим светофильтром. Они реализуют разные спектральные полосы фотометрической системы. В сканирующем режиме изображение объекта последовательно проходит по всем ПЗС, и мы получаем квазиодновременные многоцветные измерения его блеска. Похожая конструкция приемника излучения была использована в телескопах проекта SDSS [46].

#### 4.2. Телескоп

Параметры телескопа, используемого в эксперименте “Лира-Б”, определяются целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС.

Габариты инструмента определяются способом его доставки и монтажа на МКС. Научная аппаратура на МКС доставляется грузовым космическим кораблем “Прогресс”, который выводится на околоземную орбиту и стыкуется со станцией. После этого через внутренние люки транспортные секции научной аппаратуры вносятся внутрь российского сегмента МКС. Затем часть этих блоков

выносятся в космическое пространство и монтируются на внешней поверхности станции. Самые сильные ограничения на габариты телескопа накладывают диаметры люков и процесс перемещения транспортных секций из “Прогресса” внутрь МКС. Максимально допустимый диаметр транспортного блока составляет 0.6 м при длине 1.3 м. Таким образом, с учетом толщины корпуса телескопа и транспортной упаковки диаметр главного зеркала не может превышать 0.5 м. За бортом МКС телескоп будет собираться из трех секций: (1) основной секции, содержащей собственно телескоп, фокальную плоскость с приемниками излучения и блоки электроники, (2) бленды с крышкой и (3) устройства позиционирования, с помощью которого телескоп крепится к поверхности МКС и изменяет свою ориентацию. Поскольку сборка и юстировка оптической системы силами экипажа на борту МКС невозможна, то телескоп доставляется на орбиту в собранном виде.

Размер поля зрения телескопа определяется несколькими факторами. Для проведения обзора всего неба нужен инструмент с достаточно широким полем зрения. С другой стороны, по мере увеличения поля зрения становится все труднее удовлетворить требования к абберациям оптической системы телескопа [47, 48]. Одновременно более сложными и дорогими становятся процессы изготовления и юстировки оптики. Поэтому размер исправленного поля зрения был выбран компромиссным:  $2\omega = 2^\circ$ . При этом угловой размер основной фокальной плоскости (по диагонали) составляет  $1.5^\circ$ , а ширина полосы сканирования  $W = 1^\circ$ . Оставшаяся часть исправленного поля зрения используется для размещения фотоприемников устройства стабилизации изображения (см. раздел 5).

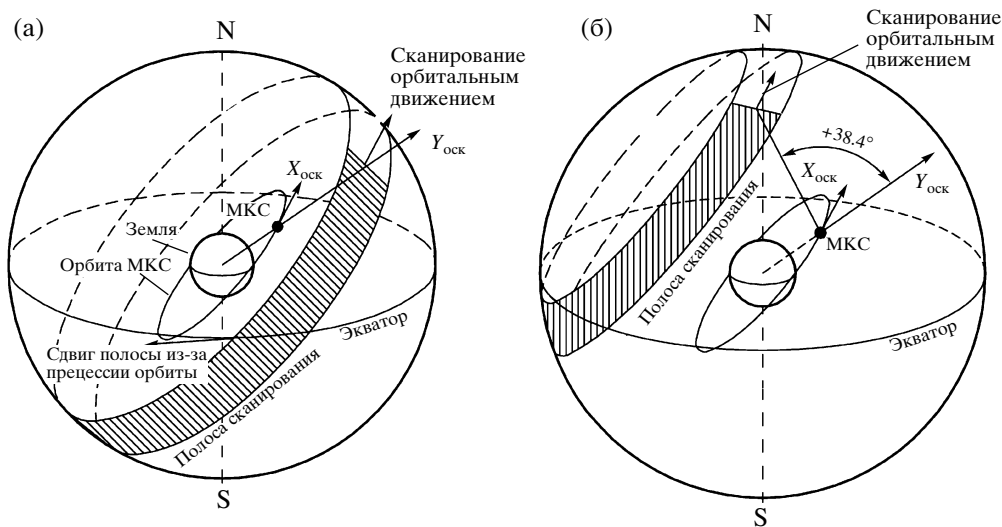
Предельное угловое разрешение телескопа “Лира-Б” должно быть не менее  $1''$ . Это одно из основных требований технического задания на эксперимент. Тогда при использовании матричных ПЗС с оптимальным в технологическом смысле размером пикселя  $12 \text{ мкм} \times 12 \text{ мкм}$ , мы приходим к минимальному фокусному расстоянию  $F \approx 3 \text{ м}$ . При этом для успешного перемещения внутри МКС длина телескопа вместе с фокальной плоскостью (без бленды) не должна превышать 1.3 м.

Есть также ряд других требований, которым должен удовлетворять телескоп. Так как в качестве приемника излучения будут использоваться матричные ПЗС, то инструмент должен обладать плоским полем изображения.

Далее, диаметр изображения точечного источника по половине интенсивности должен быть порядка 1.5–2 пикс. по всей фокальной плоскости.

<sup>6</sup> Заметим, что этот режим можно реализовать только для матричных ПЗС, в стандартных матрицах КМОП он невозможен.





**Рис. 1.** Сканирование неба: (а) — в основной ориентации инструмента, т.е. когда ось телескопа лежит в плоскости орбиты. (б) — ось телескопа смещена на  $38.4^\circ$  к северу, полоса сканирования проходит через северный полюс мира.

Это требование вытекает из необходимости точного определения блеска и положения фотоцентров изображений.

Наконец, поскольку телескоп работает в сканирующем режиме, к нему предъявляются достаточно жесткие требования по относительной дисторсии ( $<0.1\%$ ). В противном случае изображения звезд на фокальной плоскости будут отклоняться от столбцов матриц и смазываться.

Всем этим требованиям удовлетворяет широко используемая сегодня оптическая схема Ричи—Кретьена с афокальным линзовым корректором, которая и была выбрана. Более детально характеристики телескопа “Ли́ра-Б” рассмотрены в [49].

В качестве материала для изготовления зеркал телескопа предполагается использовать карбид кремния. Для такого выбора существуют две причины [50]. Во-первых, карбид кремния обладает высокой жесткостью, что позволяет изготовить из него тонкие и легкие зеркала и уложиться в конструктивные ограничения по массе. Во-вторых, он обладает очень высокой теплопроводностью, т.е. зеркала из этого материала обладают малыми нелинейными температурными искажениями формы и быстро приходят в состояние теплового равновесия.

#### 4.3. Покрывание небесной сферы наблюдениями

В эксперименте “Ли́ра-Б” ориентация телескопа, при которой его оптическая ось лежит в плоскости орбиты МКС, является базовой. В этой ориентации центр поля зрения инструмента описывает большой круг, плоскость которого совпадает с

плоскостью орбиты станции. Орбита МКС наклонена к экватору Земли примерно на  $51.6^\circ$  (наклонение изменяется со временем не более, чем на  $0.1^\circ$ ). Под действием гравитационного поля Земли орбита МКС прецессирует с периодом около 70 дней [27]. Такая скорость прецессии соответствует смещению поля зрения инструмента вдоль экватора на  $0.3^\circ$  за виток, т.е. каждый объект попадает в полосу сканирования телескопа, имеющую ширину  $1^\circ$ , не менее четырех раз подряд на последовательных витках.

Из-за прецессии поле зрения телескопа замечает на небе сферический пояс с координатами  $|\delta| < 52.1^\circ$ . (Ширина этого пояса равна удвоенному наклонению орбиты МКС ( $2 \times 51.6^\circ$ ) плюс ширина полосы сканирования ( $1.0^\circ$ .) При этом области вблизи полюсов мира не наблюдаются (рис. 1а). Для того, чтобы полоса сканирования проходила через северный полюс мира, необходимо отклонить ось телескопа на  $38.4^\circ$  к северу от плоскости орбиты (рис. 1б). Для сканирования южного полюса мира — на такой же угол к югу.

Сочетание этих трех режимов позволяет покрыть наблюдениями все небо. Возможно, для построения более эффективного плана сканирования небесной сферы будет необходимо включать и промежуточные ориентации телескопа. Отметим, что не следует использовать ориентации оси телескопа с большими, чем  $38.4^\circ$  отклонениями от плоскости орбиты МКС, так как при этом резко возрастают проблемы, связанные с кривизной траекторий, по которым в фокальной плоскости движутся изображения звезд.

Наблюдения возможны только в той части орбиты, где отсутствует или слаба засветка рас-

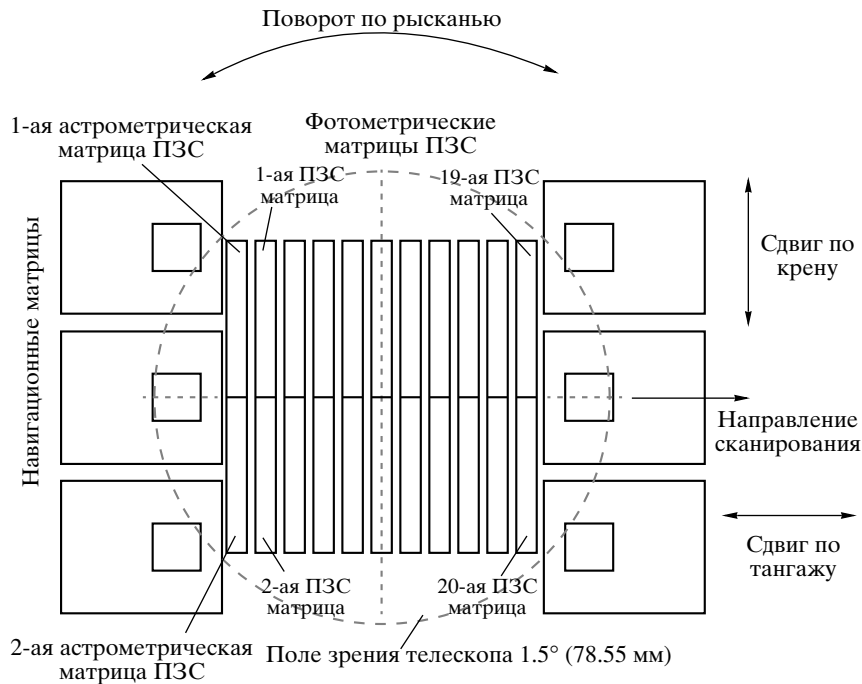


Рис. 2. Устройство фокальной плоскости в эксперименте “Ли́ра-Б”.

сеянным солнечным излучением. Наилучшей для наблюдения объектов предельной звездной величины является ситуация, когда наблюдения ведутся во время нахождения МКС в тени Земли. На освещенном Солнцем участке орбиты минимальный угол между оптической осью инструмента и направлением на Солнце определяется эффективностью бленды. В настоящее время можно гарантировать ослабление ею рассеянного излучения в  $10^6$  раз. Это означает, что наблюдения объектов предельной звездной величины можно будет вести в отсутствие прямой засветки входной апертуры телескопа, т.е. когда ось телескопа отстоит от края солнечного диска более чем на  $90^\circ$ . На остальной части витка возможны только наблюдения самых ярких объектов.

#### 4.4. Фотоприемные устройства и фотометрическая система

В качестве приемника излучения для фотометрии предполагается использовать сборку 11 матричных ПЗС обратной засветки. Устройство этой сборки показано на рис. 2. Каждая матрица состоит из двух независимо управляемых частей размером  $2250 \times 300$  пикс.

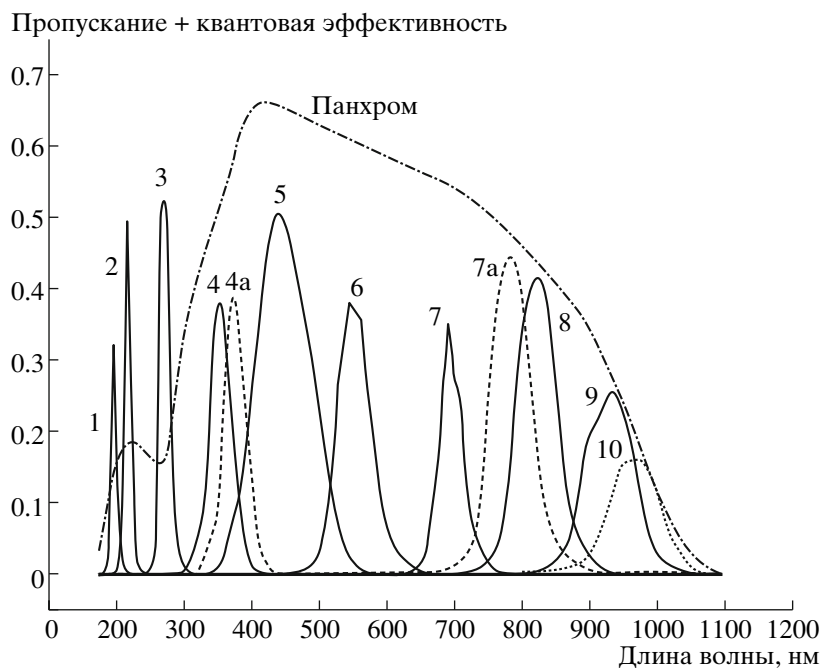
О возможности создания таких матричных ПЗС специально для космического эксперимента “Ли́ра-Б” заявила фирма “e2v technologies Ltd” (Великобритания). Некоторые характеристики этих матриц приведены в табл. 2.

На первую ПЗС<sup>7</sup> наносится широкополосное просветляющее (панхроматическое) покрытие, на остальные — интерференционные светофильтры, реализующие фотометрическую систему “Ли́ра-Б”. Полосы пропускания фильтров этой фотометрической системы показаны на рисунке 3 и в таблице. 3. Заметим, что на рисунке и в таблице приведены 12 фотометрических полос, в то время как приемников будет только 10, т.е. два фильтра из приведенных в списке будут исключены.

Все полосы фотометрической системы “Ли́ра-Б” лежат в области чувствительности обычных кремниевых ПЗС-матриц с обратной засветкой. Три первых ультрафиолетовых фильтра — 195, 218 и 270 нм — позволяют изучать горячие звезды и эффективно определять межзвездное поглощение, так как фильтр 218 нм лежит в центре ультрафиолетовой полосы межзвездного поглощения, а два других фильтра — по обе стороны от нее. Четыре полосы — 350, 440, 555 и 700 нм — близки к полосам *W*, *B*, *V* и *R* модифицированной системы Джонсона-Кузинса. Эти 4 полосы были использованы в Тянь-Шаньском *WBVR*-каталоге ГАИШ [51, 16].

Полоса 374 нм расположена на бальмеровском скачке, и она может служить для выделения голубых и белых сверхгигантов. Ее положение совпадает с полосой *P* Вильнюсской фотометрической системы [52], но имеет большую ши-

<sup>7</sup> Нумерация ПЗС ведется в направлении перемещения изображений звезд.



**Рис. 3.** Полосы пропускания фотометрической системы эксперимента “Ли́ра-Б”: центральные длины волн 195 нм (1), 218 нм (2), 270 нм (3), 350 нм (4), 374 нм (4а), 440 нм (5), 555 нм (6), 700 нм (7), 785 нм (7а), 825 нм (8), 930 нм (9), 1000 нм (10) и широкополосный панхроматический фильтр. Кривые пропускания учитывают пропускание интерференционного фильтра, нанесенного на кремний, и квантовую эффективность ПЗС.

рину. Остальные полосы лежат в ближнем ИК-диапазоне. Фильтр 785 нм лежит на локальном минимуме между двумя полосами TiO<sub>2</sub>, а фильтры 700 и 825 нм — на локальных максимумах в спектрах звезд спектрального класса М. Фильтр 930 нм соответствует атмосферной полосе воды и служит для определения параметров атмосферы при последующих наземных наблюдениях звезд каталога. Фильтр 1000 нм охватывает наиболее длинноволновую область чувствительности кремниевых ПЗС.

Несмотря на то что предлагаемая фотометрическая система является широкополосной, она позволяет достаточно качественно проводить трехмерную классификацию звезд. Возможно в характеристики фотометрических полос еще будут внесены изменения. Более подробное обоснование выбора именно этого набора полос для фотометрической системы “Ли́ра-Б” смотри в [28, 53].

Интерференционные фильтры предполагается наносить непосредственно на поверхность матричных ПЗС. Такая технология была разработана в ФИАН [54], и она успешно опробована в экспериментах серии спутников “Коронас”. Отметим, что применение такой технологии возможно лишь для матриц с обратной засветкой, обладающих гладкой и однородной передней поверхностью.

Обычно интерференционный светофильтр представляет собой стеклянную пластину с нанесенным

на нее интерференционным покрытием, установленную перед фотоприемником. Отражение света от обеих поверхностей стеклянной пластины и передней поверхности матричного ПЗС порождает многочисленные блики, особенно от ярких звезд.

**Таблица 2.** Характеристики фотометрических ПЗС, предложенных фирмой “e2v”

Размеры матрицы	4500 × 312 пикс.*
Размеры пикселя	12 мкм × 12 мкм
Емкость пикселя	200 000 эл.
Толщина ПЗС для видимого диапазона	14 мкм
Толщина ПЗС для ИК-диапазона	30 мкм
Максимальная квантовая эффективность панхроматической ПЗС	96%
Шум считывания на частоте 1 МГц	5 эл./пикс.
То же для дифференциального считывания	7 эл./пикс.
Шум термогенерации при $T = -30^{\circ}\text{C}$	<1 эл./пикс. с

\* ПЗС состоит из двух независимо управляемых секций размером 2250 × 312 пикс. каждая.

**Таблица 3.** Характеристики полос пропускания фотометрической системы эксперимента “Ли́ра-Б” (в первой колонке — центральные длины волн, во второй — ширины фотометрических полос, в третьей — пропускание светофильтра в максимуме, в последней — суммарная чувствительность фотоприемника в максимуме)

$\lambda_0$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм	Fil, %	Fil + QE, %
195	20	73	32
218	20	84	49
270	25	82	52
350	50	59	38
374	50	59	38
440	100	73	50
550	80	55	37
700	80	53	35
785	80	74	41
825	80	74	41
930	80	72	25
1000	100	76	16
Панхром*	~600	91	66

\* Максимум пропускания панхроматического фильтра расположен на  $\lambda = 495$  нм, а максимум чувствительности панхроматического фотоприемника — на  $\lambda = 415$  нм.

Вышеописанная технология нанесения фильтров позволяет этого избежать.

#### 4.5. Регистрация объектов

В эксперименте “Ли́ра-Б” не используется входной каталог для фотометрии точечных объектов (звезд и компактных галактик). Существует только входной каталог протяженных объектов (туманностей, скоплений и близких галактик), для которых выполняется поверхностная фотометрия, и каталог ярчайших звезд, вызывающих переполнение пикселей ПЗС.

Измерение точечных объектов производится следующим образом.

1. Изображение, которое строит первая матрица с панхроматическим покрытием, обладающая наибольшей чувствительностью, считывается полностью. В получаемом изображении производится поиск объектов, которые значимо (отношение сигнала к шуму  $> 10$ ) превышают уровень шумов.

Для найденных объектов приближенно определяются координаты, блеск и другие параметры. На их основе предвычисляются места и моменты появления каждого найденного объекта на остальных фотометрических матрицах фокальной плоскости. Дополнительно, в список найденных точечных объектов включаются протяженные объекты из соответствующего входного каталога. Для них также вычисляются моменты появления и положения на остальных матрицах.

2. Для остальных матриц производится полное считывание предвычисленных фрагментов. Для точечных источников размер фрагмента берется постоянным, равным  $7 \times 7$  пикс. (это значение может быть уточнено). Для очень ярких звезд, вызывающих переполнение пикселей изображения, а также для протяженных объектов фрагменты могут быть большего размера и иметь прямоугольную форму.

Сигналы в промежутках между границами фрагментов, содержащих изображения объектов, суммируются без считывания по частям строк матричных ПЗС длиной до 100–150 пикс. (т.е. по площадкам размерами до  $1 \times (100-150)$  пикс.). Сигнал в интервалах между объектами создается фоном звездного неба и неразрешенными источниками. Его величина составляет единицы квантов на пиксель за время экспозиции. Суммирование без считывания используется для того, чтобы шум считывания вносился в измеряемый сигнал только один раз.

3. По изображениям в наиболее чувствительных полосах фотометрической системы ( $V$ ,  $B$  и  $R$ ) можно провести определение мгновенных положений фотоцентров объекта и найти для него сдвиг и смаз за время прохождения по фокальной плоскости. Эта процедура, в частности, позволяет в реальном времени выделять объекты Солнечной системы, перемещающиеся по небесной сфере с достаточно высокой скоростью.

#### 4.6. Наблюдение ярчайших звезд

Емкость пикселя ПЗС ограничена, и она зависит, в первую очередь, от его линейного размера [42]. Для матричных ПЗС производства фирмы “e2v” с пикселем размером  $12 \text{ мкм} \times 12 \text{ мкм}$ , которые предполагается использовать в эксперименте “Ли́ра-Б”, емкость равна 200 000 электронов. При более высоком сигнале накопленные электроны начинают перетекать в потенциальные ямы соседних пикселей вперед и назад по столбцу. Поскольку наиболее яркая часть изображения звезды занимает  $2 \times 2$  пикс. (см. подраздел 4.4.2), максимальный накопленный от нее заряд составляет около 800 000 электронов. С учетом шумов приемника

значимый сигнал начинается примерно с 200 электронов. Следовательно, одновременно могут измеряться объекты, число накопленных электронов от которых составляет от 200 до 800 000. Блеск таких объектов различается не более чем на  $8^m$ .

Корректная фотометрия более ярких звезд, одновременно с наиболее слабыми, становится невозможной.

Фотометрия ярчайших звезд осуществляется в специальном режиме, в котором необходимо распределить накапливаемый сигнал по большому числу пикселей. Наиболее простой способ это сделать — расфокусировать изображение. Расфокусировка смещает динамический диапазон фотоприемных устройств в сторону больших потоков. В этом режиме слабые звезды, близкие к пределу обзора, не будут видны, зато будут наблюдаться яркие и ярчайшие звезды.

Наблюдения ярчайших звезд можно проводить при более сильной солнечной засветке, т.е. при меньших углах между осью телескопа и Солнцем. Этот режим может устанавливаться в начале и в конце каждого сеанса наблюдений (в начале и в конце каждого скана неба).

#### 4.7. Калибровка приемников излучения

Со временем чувствительность ПЗС-матриц, а также кривые пропускания нанесенных на них фильтров, будут изменяться. Основными причинами таких изменений будет воздействие микроатмосферы МКС и энергичных частиц [55]. Подобные процессы необходимо учитывать для получения стабильных фотометрических результатов, поскольку эксперимент “Ли́ра-Б” будет продолжаться несколько лет.

Для определения характеристик фотометрических приборов предусмотрено регулярное проведение калибровочных процедур. Предполагается использование трех различных типов калибровок:

1. Калибровка по излучению Солнца. При проведении этой процедуры фотоприемное устройство освещается рассеянным солнечным светом.

2. Калибровка по внутренним источникам излучения. Внутри телескопа предполагается установить несколько источников излучения: ультрафиолетовые и широкополосные (“белые”) светодиоды. Перед одной группой белых светодиодов будет установлен узкополосный акустооптический фильтр [56, 57], который будет пропускать излучение в полосе порядка нескольких нанометров с центральной длиной волны, меняющейся от 400 до 800 нм. Это устройство позволит контролировать кривые спектральной чувствительности ПЗС.

3. Сравнение с наземными наблюдениями. Еще одним способом исследования деградации приемников излучения в эксперименте “Ли́ра-Б” является проведение наземных наблюдений звезд с использованием приемников излучения, аналогичных установленным на борту МКС и предварительно прокалиброванным в лабораторных условиях.

### 5. ПРИЧИНЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА МКС И ВЫЗЫВАЕМЫЕ ЭТИМ ПРОБЛЕМЫ

Выбор МКС в качестве места проведения эксперимента “Ли́ра-Б” имеет свои достоинства и недостатки. Альтернативой этому является создание автономного спутника.

К достоинствам проведения эксперимента на МКС можно отнести следующее:

- наличие технологической и технической инфраструктуры: источников энергии, информационных каналов, возможности получения информации об ориентации станции и пр.;
- отработанная технология доставки на борт приборов малого и среднего веса;
- возможность возвращения на Землю грузов (с сильными ограничениями по весу);
- монтаж аппаратуры силами экипажа станции;
- возможность (при крайней необходимости) проведения ремонта аппаратуры силами экипажа.

Однако основной причиной выбора в качестве места проведения эксперимента “Ли́ра-Б” МКС является большой объем научных данных, который требуется передать на Землю. В ходе сеансов наблюдений поток данных составляет около 300 Мбит/с. Полный объем данных, который будет получен за время проведения эксперимента и который должен быть передан на Землю, составляет около 200 Тбайт.

Стандартные средства космической радиосвязи имеют недостаточную скорость передачи информации — порядка нескольких десятков Мбит/с. Помимо этого, для непрерывной передачи информации хотя бы во время сеансов наблюдений космический аппарат должен все время передачи находиться в прямой видимости наземного пункта приема информации. При ограниченном числе приемных антенн такое возможно только на геостационарных (геосинхронных) или высокоэллиптических орбитах.

**Таблица 4.** Предельные звездные величины обзора “Ли́ра-Б” для звезд спектрального класса A0V

$\lambda_0$ , нм	Предельные величины				Перепо- ление ПЗС
	Одно наблюдение		За 5 лет*		
	$0.01^m$ (1%)	$0.1^m$ (10%)	$0.01^m$ (1%)	$0.1^m$ (10%)	
	$S/N$				
	100	10	100	10	
195	8.5	13.2	13.2	16.3	3.6
218	9.0	13.6	13.6	16.8	4.2
270	9.4	14.1	14.1	17.3	5.4
350	10.6	15.3	15.3	18.4	6.5
374	10.7	15.4	15.4	18.6	7.1
440	12.6	17.3	17.3	20.4	8.5
550	11.6	16.3	16.3	19.5	7.4
700	11.1	15.8	15.8	18.9	6.0
785	11.0	15.7	15.7	18.7	7.4
825	10.8	15.5	15.5	18.5	7.2
930	10.3	14.9	14.9	18.0	6.8
1000	9.7	14.3	14.3	17.4	6.3
Панхром	14.0	18.5	18.5	21.4	10.3

\* Значения в колонках “ $0.1^m$  за одно наблюдение” и “ $0.01^m$  за 5 лет” совпадают, поскольку среднее число наблюдений звезды за 5 лет считалось равным 100. Значения в колонке “ $0.1^m$  за 5 лет” соответствуют 100-кратному усреднению звезд, регистрируемых в отдельном наблюдении с  $S/N = 10$ . Такая же ситуация реализуется при наблюдении областей, регистрируемых попиксельно.

МКС также не обладает каналом связи, позволяющим передать получаемый поток информации. Поэтому для передачи данных на Землю был выбран другой путь: данные с телескопа передаются в блок управления научным экспериментом, установленный внутри гермоотсека МКС. Там они записываются на сменные внешние носители, которые затем доставляются на Землю в составе спускаемого груза (2 раза в год). В качестве носителей информации предполагается использовать сборки флэш-памяти. Эти устройства обладают высокой надежностью и одним из наилучших на сегодня

отношением объема записываемой информации к массе порядка 10 Тбайт/кг.

Указанный способ позволяет передать весь объем научной информации, получаемой в эксперименте “Ли́ра-Б”, но совершенно не обладает оперативностью. К счастью, обзорный характер эксперимента делает оперативное получение информации несущественным для большинства научных задач эксперимента (см. раздел 3).

Помимо перечисленных выше достоинств, размещение научной аппаратуры на МКС имеет и ряд недостатков. Одним из наиболее серьезных недостатков для наблюдений в видимом диапазоне с использованием телескопов с разрешением лучше угловой секунды являются вибрации пилотируемой станции, которые вызываются деятельностью экипажа и работой систем поддержания жизнедеятельности. Отметим, что именно по этой причине на пилотируемых станциях не велись астрономические наблюдения, требующие секундных точностей угловой стабилизации инструментов.

Такая проблема существует и для эксперимента “Ли́ра-Б”<sup>8</sup>, и для ее преодоления разработана специальная система стабилизации изображения, встроенная в телескоп. Компенсация сдвига будет проводиться путем перемещения фокальной плоскости с помощью высокоточного пьезомеханического гексапода (платформы Гью–Стюарта) 58 — некоторый современный автоматизированный аналог “кассеты Ричи” [59, § 6].

## 6. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЗОРА И СТРУКТУРА ПОЛУЧАЕМЫХ НАУЧНЫХ ДАННЫХ

### 6.1. Число наблюдений объектов

Для оценки покрытия небесной сферы было проведено моделирование. Для произвольно выбранного годового интервала строился план сканирования. Считалось, что наблюдения возможны, когда МКС находится в тени Земли, а вне тени — если угол между осью визирования и краем диска Солнца превышает  $90^\circ$ . Из трех основных ориентаций телескопа (в плоскости орбиты, южная и северная полярные ориентации; см. подраздел 4.4.3) выбиралась та, которая с учетом засветки позволяла вести наиболее длительные сеансы наблюдений. В типичном плане наблюдений положение телескопа изменялось 14 раз. Наблюдения велись 193.4 сут (53% наблюдательного времени), из них сканирование в плоскости орбиты шло 52.2 сут, а

<sup>8</sup> МКС проектировалась для проведения в том числе и экспериментов в условиях микрогравитации, поэтому ее вибрации ниже, чем на всех предыдущих пилотируемых станциях — например, на “Мире”.

**Таблица 5.** Предельные звездные величины в полосе  $V$  обзора “Лира-Б” для звезд спектральных классов А, F, G и К

$\lambda_0$ , нм	Одно наблюдение; $0.01^m$				Одно наблюдение; $0.1^m$			
	А	F	G	К	А	F	G	К
195	8.5	6.1	1.6	-0.6	13.2	10.8	6.3	4.1
218	9.0	7.3	4.3	0.0	13.6	12.0	9.0	4.6
270	9.4	8.4	7.2	5.0	14.1	13.1	11.8	9.7
350	10.6	10.3	9.8	8.9	15.3	15.0	14.5	13.6
374	10.7	10.4	9.8	9.0	15.4	15.1	14.5	13.7
440	12.6	12.5	12.3	12.1	17.3	17.1	16.9	16.8
550	11.6	11.8	11.9	12.1	16.3	16.4	16.6	16.8
700	11.1	11.5	11.9	12.4	15.8	16.2	16.6	17.1
785	11.0	11.5	12.0	12.6	15.7	16.1	16.6	17.2
825	10.8	11.3	11.8	12.5	15.5	16.0	16.5	17.1
930	10.3	10.8	11.3	12.0	14.9	15.4	16.0	16.7
1000	9.7	10.2	10.8	11.5	14.3	14.9	15.4	16.2
Панхром	14.0	14.1	14.2	14.5	18.5	18.6	18.7	19.1

полярные области наблюдались по 70.6 сут. Среднее число наблюдений<sup>9</sup> отдельного объекта за год равно 22, а объектов вблизи полюсов мира — до 1000. Моделирование не учитывало прекращение наблюдений на время стыковок и внекорабельной деятельности экипажа, что должно уменьшить наблюдательное время примерно на 10%.

Исходя из этого среднее число наблюдений отдельного объекта при 5-летней длительности эксперимента составит 100.

### 6.2. Предельные звездные величины

Размер пикселя фотометрических ПЗС составляет 12 мкм, что при фокусном расстоянии телескопа  $F = 3$  м соответствует угловому размеру  $0.8''$ . МКС совершает один орбитальный оборот за 1.5 ч, откуда следует, что длительность экспозиции, т.е. время прохождения одной ПЗС (вдоль стороны длиной 300 пикс.) при сканировании неба в плоскости орбиты МКС составляет  $\tau = 1.04$  с. Полученная длительность экспозиции, вместе с приведенными выше параметрами телескопа и фильтров,

<sup>9</sup> Под отдельным подразумевается одно прохождение объекта по фокальной плоскости, т.е. его измерения в панхроматическом фильтре и в 10 полосах фотометрической системы.

позволяет вычислить предельную звездную величину для каждой спектральной полосы. Эти данные приведены в табл. 4.

В первой колонке табл. 4 приведены центральные длины волн фотометрических полос. Во второй и третьей — предельные звездные величины объектов, погрешность одиночного измерения которых составляет соответственно  $0.01^m$  (1%) и  $0.1^m$  (10%). В четвертой и пятой колонках приведены предельные величины непременных объектов, для которых погрешность измерения, усредненная по всем наблюдениям за время эксперимента (100 наблюдений за 5 лет), составляет  $0.01^m$  (1%) и  $0.1^m$  (10%), соответственно. В последней колонке указаны звездные величины точечных объектов, начиная с которых происходит переполнение емкости пикселей ПЗС за время одного измерения. Оценки звездных величин, приведенных в таблице, сделаны для звезд спектрального класса A0V.

В табл. 5 приведены предельные величины для звезд нескольких спектральных классов. Эти результаты взяты из работы [26], в которой подробно описаны предположения, сделанные при их получении. Следует заметить, что в таблице приведены предельные величины звезд в спектральной полосе  $V$ , а не в полосе наблюдения.

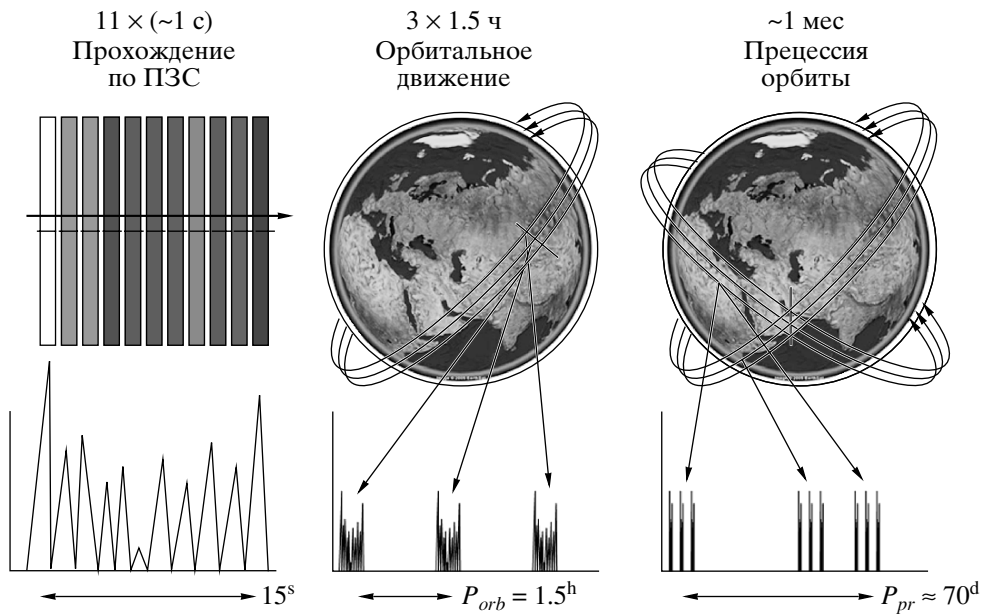


Рис. 4. Временные шкалы, возникающие при проведении наблюдений в КЭ “Ли́ра-Б”.

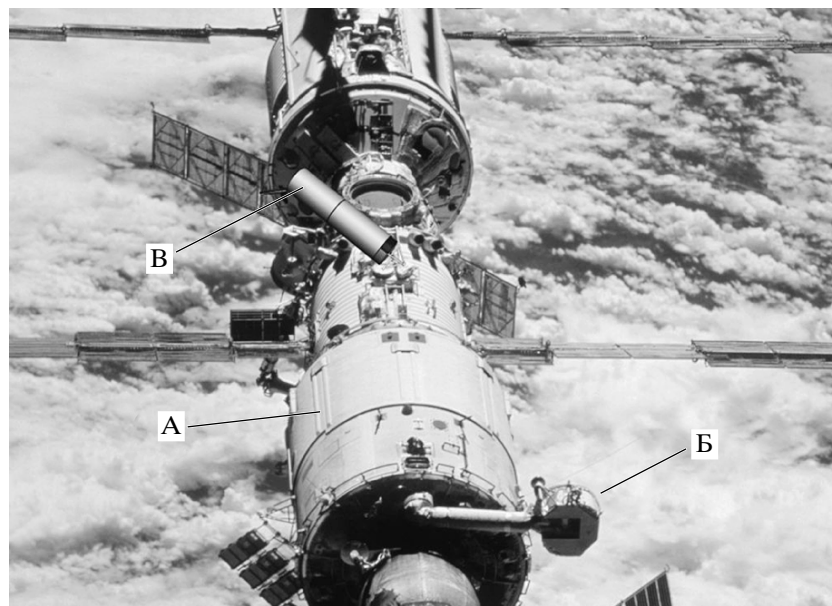


Рис. 5. Российский сегмент МКС. Буквами отмечены: А — служебный модуль “Звезда”, Б — остронаправленная антенна “Ли́ра”, (В) — телескоп “Ли́ра-Б”.

### 6.3. Временная структура наблюдений

В наблюдениях объектов в рамках эксперимента “Ли́ра-Б” присутствуют три различные временные шкалы.

Самая короткая шкала связана с последовательным прохождением изображения объекта по

11 матричным ПЗС в фокальной плоскости. Интервал между прохождениями по соседним матрицам составляет около 1 с.

Средняя шкала связана с наблюдениями объекта на последовательных витках орбиты. Интервал между наблюдениями — около 1.5 ч. Объекты на-



блюдаются на четырех (или более) последовательных витках.

Самая длинная шкала связана с повторным попаданием объекта в полосу сканирования. Эти попадания происходят не строго периодически, так как объект нельзя наблюдать, когда он оказывается близко от Солнца, а в остальное время моменты наблюдений зависят от графика переключений телескопа. Характерный временной масштаб этой шкалы — порядка месяца.

Схематически эти шкалы показаны на рис. 4.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активная реализация проекта “Ли́ра-Б” была начата в конце 2007 г. В 2008 г. был выполнен аванпроект, а в 2009–2010 гг. — эскизный проект космического эксперимента “Ли́ра-Б”. Научным постановщиком эксперимента “Ли́ра-Б” является ГАИШ МГУ, а головным изготовителем комплекса научной аппаратуры эксперимента — СПбГУ ИТМО. На этих стадиях была показана реализуемость проекта и возможность достижения заложенных в его техническом задании характеристик, основные из которых описаны в начале этой статьи.

При выполнении календарного плана, составленного при завершении эскизного проекта, выполнение эксперимента “Ли́ра-Б” может начаться в конце 2015 г.

Авторы благодарят О.К. Сильченко и А.С. Расторгуева за полезное обсуждение научной программы эксперимента “Ли́ра-Б”. Особая благодарность академику А.М. Черепашуку за большую помощь, оказанную им на этапе первоначального формулирования проекта, и за всемерную дальнейшую поддержку.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### О НАЗВАНИИ ПРОЕКТА “ЛИРА-Б”

Проект “Ли́ра-Б” был включен в долгосрочную программу космических исследований в 1999 г. И все эти годы разработчикам проекта постоянно задают вопрос о его названии, чаще всего в двух вариантах: «Почему “Ли́ра”?» и «Откуда взялось “Б”?».

С самого начала проект задумывался как фотометрический. А основным опорным объектом всех звездных фотометрических систем является Вега. Однако дать такое название космическому аппарату было уже нельзя — так назывались две межпланетные станции, посланные в 1984–1986 гг. с Земли к комете Галлея [60]. Хотя название этих межпланетных станций происходит не от имени звезды, а от слов “Венера” и “Галлей”.

Вега — ярчайшая звезда ( $\alpha$ ) созвездия Лиры, а для Международной космической станции в то время использовали наименование “Станция Альфа”. В результате этого совпадения название созвездия и было взято в качестве основного для экспериментов, предложенных ГАИШ.

Эти названия — и “Вега”, и “Ли́ра” — были предложены директором ГАИШ А.М. Черепашуком.

Буква “Б” появлялась в названии проекта дважды. Сначала, еще при подготовке заявок, было предложено два проекта. Первым был телескоп со сверхгладкими зеркалами, представляющий собой зеркальный внеатомный коронограф. Кремниевые зеркала, имеющие после суперполировки шероховатость порядка 1/100 длины волны, должны были позволить наблюдать слабые галактики вокруг квазаров и планеты (бурые карлики) вблизи звезд. Этот проект был назван “Ли́ра-А”.

Второй проект предназначался для фотометрического обзора всего неба и представлял собой упрощенную версию эксперимента, описанного в этой статье. Он получил наименование “Ли́ра-Б”.

Вскоре выяснилось, что звездное окружение квазаров и экзопланеты слишком слабы для наблюдений с помощью телескопа с максимальным диаметром 0.5 м при максимальной экспозиции порядка 45 мин, который можно разместить и использовать на борту МКС. В результате этого вариант “Ли́ра-А” был отменен, и остался только фотометрический обзор “Ли́ра-Б”, из названия которого убрали букву “Б”.

Таким образом, во время включения заявки на этот эксперимент в долгосрочную программу космических исследований проект фигурировал под именем “Ли́ра” без индекса. Однако вскоре после этого выяснилось, что среди аппаратуры, установленной на борту Российского сегмента МКС, уже есть прибор, имеющий название “Ли́ра”. Это — радиоантенна, установленная на модуле “Звезда” и предназначенная для связи при использовании системы геостационарной ретрансляции “Луч” [61] (рис. 5). Работоспособность этой системы начала восстанавливаться в 2012 г. с запуском КА “Луч-5А”.

Согласно нормативным документам, регламентирующим проведение космических экспериментов на борту МКС, все приборы и эксперименты должны быть уникально поименованы — совпадения не допускаются. Поэтому к названию нашего эксперимента была добавлена литера “Б”. Так вернулась “Ли́ра-Б”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. O. Abell, *Astron. Soc. Pacif. Leaflets* **8**, 121 (1959).
2. I. N. Reid, C. Brewer, R. J. Brucato, *et al.*, *Publs Astron. Soc. Pacif.* **103**, 661 (1991).
3. R. R. Gal, R. R. de Carvalho, S. C. Odewahn, *et al.*, *Astron. J.* **128**, 3082 (2004).
4. B. M. Lasker, C. R. Sturch, B. J. McLean, *et al.*, *Astron. J.* **99**, 2019 (1990).
5. B. M. Lasker, C. R. Sturch, B. J. McLean, *et al.*, *Astron. J.* **99**, 2173 (1990).
6. J. L. Russel, B. M. Lasker, B. J. McLean, *et al.*, *Astron. J.* **99**, 2059 (1990).
7. H. Jenkner, B. M. Lasker, C. R. Sturch, *et al.*, *Astron. J.* **99**, 2082 (1990).
8. J. E. Morrison, S. Roeser, B. McLean, *et al.*, *Astron. J.* **121**, 1752 (2001).
9. B. Lasker, M. G. Lattanzi, B. J. McLean, *et al.*, *Astron. J.* **136**, 735 (2008).
10. E. Høg, C. Fabricius, V. V. Makarov, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **355**, L27 (2000).
11. D. Monet, *USNO-A V2.0* (Flagstaff, AZ: U. S. Naval Observatory, 1998).
12. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Casian, *et al.*, *Astron. J.* **125**, 984 (2003).
13. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, *et al.*, *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
14. J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, Allam, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 634 (2007).
15. *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200 (Europ. Space Agency, 1997).
16. В. Г. Корнилов, И. М. Волков, А. И. Захаров и др., *Тр. Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга* **63**, 3 (1991).
17. А. В. Миронов, *Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд* (М.: Физматлит, 2008).
18. A. Mironov and A. Zakharov, *Astrophys. and Space Sci.* **280**, 71 (2002).
19. А. И. Захаров, А. В. Миронов, А. Н. Крутяков, *Тр. Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга* **70**, 289 (2004).
20. D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, *et al.*, *Astrophys. J. (Letters)* **619**, L1 (2005).
21. W. Wamsteker, *ASP Conf. Ser.* **164**, 261 (1999).
22. N. Epechtein, B. de Batz, E. Copet, *et al.*, *Astrophys. and Space Sci.* **217**, 3 (1994).
23. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, *et al.*, *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
24. V. Kornilov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **417**, 1105 (2011).
25. В. Г. Корнилов, *Письма в Астрон. журн.* **37**, 44 (2011).
26. Aleksey Mironov, Andrey Zakharov, and Mikhail Prokhorov, in *proc. "Calibration and Standardization of Large Surveys and Missions in Astronomy and Astrophysics" held at Fermilab, Batavia, Illinois, April 16-19, 2012*, eds A. Smith and D. Tucker (ASP Conf. Ser. 2012) в печати.
27. N. Larter and A. Gonfalone, *International space station. A guide for European users*, ed. B. Battrick (Paris: Europ. Space Agency, 1996).
28. А. В. Миронов, А. В. Захаров, М. Е. Прохоров, в сб.: *Труды 37-ой международной студенческой конференции "Физика космоса"* (Екатеринбург: Изд. Уральск. гос. ун-та, 2008), с. 105.
29. M. A. C. Perryman, in: *Proceedings of the Gaia Symposium "The Three-Dimensional Universe with Gaia"*, eds. C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman, ESA SP-576 (Europ. Space Agency, 2005), p. 15.
30. P. M. W. Kalberla and J. Kerp, *Ann. Rev. AFtron. and Astrophys.* **47**, 27 (2009).
31. N. N. Samus, O. V. Durlевич, E. V. Kazarovets, *et al.*, *General Catalog of Variable Stars. GCVS database*, vers. 2011Jan., CDS B/gcvs.
32. N. N. Samus, *The draft classification for new GCVS versions*, <http://www.sai.msu.su/gcvs/future/classif.htm>.
33. C. L. Watson, *The Society for Astronomical Sciences 25-th Annual Symposium on Telescope Science*, eds B. D. Warner, J. L. Foote, D. Mais, D. Kenyon (Soc. Astron. Sci., 2006), p. 47.
34. A. W. Graham and C. C. Worley, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **388**, 1708 (2008).
35. S. Scarlata, M. Stiavelli, M. A. Hughes, *et al.*, *Astron. J.* **128**, 1124 (2004).
36. S. Paudel, T. Lisker, H. Kuntschner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **413**, 1764 (2011).
37. T. Boeker, R. P. van der Marel, S. Laine, *et al.*, *Astron. J.* **123**, 1389 (2002).
38. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, *et al.*, *Astron. J.* **127**, 2031 (2004).
39. C. Jordi and E. Høg, in: *Proceedings of the Gaia Symposium "The Three-Dimensional Universe with Gaia"*, eds. C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman, ESA SP-576 (Europ. Space Agency, 2005), p. 43.
40. B. N. Dorland, R. P. Dudik, Z. Dugan, *et al.*, *Bull. Amer. Astron. Soc.* **41**, 344 (2009); e-Print arXiv:0904.4516 [astro-ph] (2009).
41. N. Gouda, T. Tsujimoto, Y. Kobayashi, *et al.*, *Proc. SPIE.* **4850**, 1161 (2003).
42. S. B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006).
43. J. E. Beletic, J. W. Beletic, and P. Amico, *Scientific Detectors for Astronomy 2005*, ed. J. E. Beletic (Berlin—Dordrecht: Springer, 2006).
44. P. Martinez and A. Klotz, *A practical guide to CCD astronomy* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998).
45. *CCD Sensors Technical Note. Glossary of Terms*, <http://www.e2v.com/e2v/assets/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/Papers/ccdn106.pdf>.
46. J. E. Gunn, M. Carr, C. Rockosi, *et al.*, *Astron. J.* **116**, 3040 (1998).
47. Г. М. Попов, *Современная астрономическая оптика* (М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1988).
48. Д. Д. Максудов, *Астрономическая оптика* (М.: Наука, 1979).

49. Г. И. Цуканова, А. В. Бахолдин, *Оптич. журн.* **5**, 15 (2012).
50. V. A. Alekseev, V. V. Bokov, V. N. Egorov, *et al.*, *Sov. J. Opt. Technol.* (Опт.-механ. промышл.) **58**, 390 (1991).
51. Kh. Khaliullin, A. V. Mironov, and V. G. Moshkalyov, *Astrophys. and Space Sci.* **111**, 291 (1985).
52. В. Страйжис, *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1977).
53. A. V. Mironov, A. I. Zakharov, M. E. Prokhorov, *et al.*, in: *Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy Formation*, Proc. conf., eds C. Sterken, N. Samus, L. Szabados (Moscow: Sternberg Astron. Inst, 2010), p. 185.
54. *ТЕСИС: о проекте*, [http://www.thesis.lebedev.ru/about\\_thesis.html](http://www.thesis.lebedev.ru/about_thesis.html).
55. K. D. Stefanov, T. Tsukamoto, A. Miyamoto, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **436**, 182 (1999).
56. B. Bates, D. Findlay, and D. Halliwell, *Proc. SPIE* **369**, 315 (1983).
57. J. P. Xu and R. Stroud, *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications*, Wiley Ser. in Pure and Appl. Opt. (New York: Wiley, 1992).
58. D. Stewart, *Proc. Inst. Mech. Eng.* **180**(15), 371 (1965).
59. Д. Я. Мартынов, *Курс практической астрофизики* (М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1977).
60. J. Blamont and R. Z. Sagdeev, *Naturwissenschaften* **71**, 295 (1984).
61. *Международная космическая станция. Средства связи*, [http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная\\_космическая\\_станция](http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная_космическая_станция).