

М. Е. Прохоров, А. В. Миронов
Государственный астрономический
институт им. П. К. Штернберга

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ НОВЫХ КОУРОВСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ — ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ

В работе рассмотрены возможности проведения фотометрических наблюдений на новых телескопах Коуровской астрономической обсерватории — 2×40 см робот-телескопе МАСТЕР и 1.2-метровом телескопе — и возникающие при этом проблемы.

In work requirements which are put before astroorientation systems (star gauges) new generation are considered. The most important of them is the very high precision of orientation — $0.1-0.01''$ — on high speed of updating of the information. Possible ways of achievement similar precision are considered.

In the article are considered possibility and problems of photometrical observations on the new telescopes of Kourovka astronomical observatory: 2×40 cm MASTER robot-telescope and 1.2-meter telescope.

В 2008—2009 гг. в Коуровской астрономической обсерватории были установлены два новых телескопа: сдвоенный 40-см робот-телескоп МАСТЕР и 120-см «Метровик».

Ниже, в табл. 1 и 2 приведены характеристики инструментов и установленных или предполагающихся к установке на них приборов, предоставленные В. В. Крушинским.

Следует заметить, что в отличие от других телескопов, установленных или стоявших ранее в Коуровской астрономической обсерватории оба новых инструмента являются широкопольными, поэтому методика проведения фотометрических измерений звезд на них будет существенно отличаться от классической.

В классической электрофотометрии, использовались фотометры различной конструкции.

1. Одноканальные и однополосные, позволяющие измерять один объект в одном фильтре, например, фотоэлектрический фотометр Лютого [1].

© М. Е. Прохоров, А. В. Миронов, 2010

Таблица 1. Характеристики телескопа МАСТЕР Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	Значение
Число труб	2
Диаметр	400 мм
Фокусное расстояние	1 000 мм
Поле зрения	$2 \times 2^\circ$
Камера	Apogee Alta U16m
ПЗС	Kodak KAF-16803
тип ПЗС	с прямой засветкой
Размер ПЗС	4096×4096 пикс.
Размер пикселя	9 мкм
Квантовая эффективность (на 5500 Å)	60 %
Шум считывания (на 4 МГц)	$9 e^-$
Темновой сигнал (при T=25C)	$3 e^-/\text{пикс}/\text{с}$
Светофильтры	BVR+поляриз. и VRI+поляриз.
Дополнительно	Сверхбыстрая автоматическая монтажная

- Одноканальные многополосные, в которых один объект одновременно измерялся в нескольких фотометрических полосах. Примеры таких приборов — электрофотометр Корнилова [2].
- Многоканальные фотометры, например, спецфотометр Магницкого, позволявшие одновременно измерять несколько объектов [3].

Преимущество приборов первого типа заключалось в том, что свет всегда проходил через один и тот же оптический тракт. Недостатком — что все наблюдения производились одновременно. В многоцветных одноканальных приборах оптические тракты частично различались, в многоканальных — были разделены полностью. Следует заметить, что возможность одновременного измерения объектов существенно повышала точность измерений: типичная погрешность относительных измерений на приборе Лютого составляла 0.02^m , на 4-цветном фотометре Корнилова — 0.003^m , а на двухканальном спецфотометре Магницкого (при включенной системе термостабилиза-

Таблица 2. Характеристики нового метрового телескопа Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	Значение
Диаметр	1 200 мм
Фокус (главный)	3 500 мм
Фокус (Нэсмита)	11 600 мм
Поле зрения (гл. фокус)	1.15°
Поле зрения (Нэсмит)	0.5°
Камера	Apogee Alta U230
ПЗС	e2v CCD230-42
тип ПЗС	с обратной засветкой
Размер ПЗС	2 048 × 2 048 пикс.
Размер пикселя	15 мкм
Макс. квантовая эффективность (на 7 200 Å)	96 %
Охлаждение	Пельтье
Шум считывания	12 e ⁻
Темновой сигнал (при T=-25C)	0.4 e ⁻ /пикс/с
Светофильтры	UBVRI+узкополосные

ции) — 0.001^m. Следует заметить, что механико-оптические системы, позволявшие проводить одновременные наблюдения двух или нескольких звезд были сложны как по устройству, так и в эксплуатации и применялись крайне редко.

Фотометрические измерения носили относительный характер, т. е. определялась разность звездных величин измеряемых звезд и звезд сравнения. В процедуре измерения участвовали три группы звезд — в минимальном случае — три звезды:

- измеряемая звезда;
- основная звезда сравнения;
- контрольная звезда сравнения.

Звезды сравнения должны быть постоянными и быть предварительно привязанными к фотометрическим звездам-стандартам.

Измерения заключались в попеременном измерении этих звезд и фона рядом с ними: изменения блеска основной и контрольной опорных звезд позволяют определить погрешность измерения блеска непременных звезд в данной серии, а разность отсчетов основ-

ной опорной и измеряемой звезды используется для оценки блеска последней. Для получения точных результатов все три звезды, участвующие в измерениях должны примерно одинакового блеска. А для уверенного определения атмосферной экстинкции и перевода результатов в стандартную фотометрическую системы — дополнительно иметь близкие показатели цвета. Порядок измерения переносных звезд и соотношение числа измерений каждой зависит от цели проведения эти измерений и варьировался в широких пределах.

Измерение каждой звезды состоит в наведении диафрагмы фотометра на центр изображения звезды и удержания ее там в ходе проведения экспозиции. Измерение одной звезды оказывается крайне непроизводительным¹, поэтому обычно составлялся список измеряемых объектов, который был существенно больше, чем список стандартов и контрольных звезд. На одно измерение стандарта приходилось несколько (много) измерений изучаемых звезд.

Типичный пример порядка измерения нескольких звезд на многополосном фотометре выглядел так [4]:

```
Опорная[UBVR] Опорная -> Фон у опорной -> Звезда ->
-> Звезда -> Фон у звезды -> Опорная -> Опорная ->
-> Звезда -> Звезда -> Опорная -> Опорная ->
-> Фон у опорной -> Контрольная -> Контрольная
```

Для ускорения работы и повышения точности измерений желательно было, чтобы измеряемая звезда и стандарт располагались близко друг от друга, желательно внутри поля зрения телескопа. Однако выполнить это требование удавалось не всегда.

Поскольку серии наблюдений длились достаточно долго, то высота звезд над горизонтом менялась, что приводило к изменению атмосферного поглощения. Обязательным шагом обработки таких фотометрических серий был вынос измерений всех звезд за атмосферу. В оптимальном варианте вынос за атмосферу осуществлялся методом Никонова (методу контрольных звезд, см., например, [5]). В случае отсутствия необходимой информации ход экстинкции мог определяться иначе: по данным с другого телескопа обсерватории в эту же ночь, по среднесезонным значения для данного места или по формуле Бугера со средними коэффициентами.

Еще более осложнялась ситуация если фотометр был однополосным, в этом случае в программе наблюдений приходилось задавать

¹Если только наблюдения не были посвящены изучению *именно этой одной* звезды.

не только последовательность перехода от звезды к звезде, но и последовательность смены светофильтров.

С появлением ПЗС-приемников ситуация существенно изменилась — все объекты и фон в поле зрения телескопа стали измеряться одновременно (правда только в одной спектральной полосе). Для инструментов с малыми полями зрения дифференциальные изменения поглощения в атмосфере были невелики и их легко было учесть¹. Резко выросли как число производимых измерений, так и их качество — по словам наблюдателей из КраО «число «фотометрических» ночей с переходом на ПЗС выросло на порядок» (хотя эта оценка кажется несколько завышенной).

Рассмотрим теперь ситуацию с новыми широкопольными инструментами установленными в Коуровской астрономической обсерватории. Телескоп МАСТЕР с апертурой 40 см может заниматься только фотометрией и астрометрией. На «метровике» помимо этих работ возможна также спектрофотометрия ярчайших объектов — надо признать, что этот инструмент мал для серьезных спектральных исследований.

Очень важными как для фотометрических, так и для астрометрических измерений на новых Коуровских телескопах являются угловые размеры изображений звезд, которые приведены в табл. 3 (данные для «метровика» приведены для главного фокуса).

Из табл. 3 видно, что дифракционные размеры изображений пренебрежимо малы (около 0.1 пикселя), турбулентный диск на МАСТЕРЕ совпадает по размеру с пикселем, а на «метровике» составляет примерно 2 пикселя.

Продолжим дальнейшее рассмотрение с телескопа-робота МАСТЕР. На сегодняшний день сеть этих телескопов состоит из четырех близких по характеристикам инструментов. Они установлены под Москвой (Домодедово), в Коуровке, на Кисловодской корональной станции Пулковской обсерватории (в последствии будет перенесен на КГО ГАИШ) и в Иркутске. Телескопы МАСТЕР отрабатывают алерты, приходящие от орбитальных гамма-телескопов. Их конструкция позволяет им за секунды навестись на любую (указанную в сообщении) точку неба и начать съемку. Однако такие события происходят примерно раз в сутки, остальное время инструменты МАСТЕР ведут наблюдения по фоновой программе. Опыт эксплуатации первого МАСТЕРа (под Москвой) насчитывает уже несколько лет.

¹Или проигнорировать из-за их малости.

Таблица 3. Угловые размеры изображений в новых телескопах Коуровской астрономической обсерватории

Параметр	МАСТЕР	«Метровик»
Фокусное расстояние телескопа, м	1.0	3.5
Линейный размер пикселя, мкм	9	15
Угловой размер пикселя, "	1.9	0.9
Тип ПЗС	с прямой засветкой	с обратной засветкой
Дифракционное изображение (для $\lambda = 5\,500 \text{ \AA}$), "	0.3	0.08
Дифракционное изображение (для $\lambda = 5\,500 \text{ \AA}$), пикс	0.16	0.09
Турбулентный диск звезды ¹ , "	2	2
Турбулентный диск звезды, пикс	~ 1	~ 2

¹Мы не имеем точных данных о размерах турбулентных изображений звезд в Коуровской астрономической обсерватории поэтому взяли значение типичное для равнинных обсерваторий.

Потенциальный объем астрономической информации, который можно получить от обработки этих кадров, очень велик, достаточно упомянуть хотя бы наблюдения переменных звезд. Однако на сегодня для телескопов МАСТЕР хорошо отработаны методики выявления новых (отсутствующих на предыдущих снимках) и движущихся (смещающихся) объектов, а также объектов с сильным изменением блеска. Таким образом удастся обнаруживать искусственные спутники Земли, астероиды, новые и сверхновые звезды. Возможности исследования других объектов ограничиваются точностью получаемой фотометрии.

Причем точность фотометрии ограничивается следующими причинами: а) плохим астроклиматом Коуровской обсерватории, б) субпиксельным характером фотографии.

Робот-телескопы, к которым относится МАСТЕР, ведут наблюдения при любом состоянии атмосферы, даже в тех, которые обычно считаются непригодными для фотометрии. Способом, который может улучшить данную ситуацию, является наблюдение звезд по опорному каталогу, т. е. по крайней мере часть звезд каждого кадра должны отождествляться с некоторым опорным каталогом для сравнения и анализа каталожных и измеренных звездных величин.

Какие каталоги можно использовать в качестве опорных? Телескоп мастер в стандартном режиме работы регистрирует звезды приблизительно до 19 величины. Поскольку телескопы Коуровской обсерватории будут наблюдать ВСЕ объекты северного неба, то в качестве опорных могли бы использоваться следующие каталоги:

- Алма-Атинский WBVR-каталог звезд северного неба ГАИШ [6, 7];
- каталог Tycho-2 [8];
- каталоги USNO B1.0 [9];
- Sloan digital sky survey (SDSS) [10].
- Two-micron all-sky survey (2MASS) [11];

Алма-Атинский каталог ГАИШ содержит около 11 000 объектов северного неба измеренных в фотометрической системе WBVR. Примерно 8 000 из них измерены с точностью около 0.003^m . Все эти объекты расположены на северном небе ($\delta > -30^\circ$). Каталог Tycho-2, полученный в ходе космического астрометрического обзора Hipparcos, содержит около 2.5 млн звезд примерно до 11^m в двух спектральных полосах V_T и V_T . Точность фотометрии звезды до 9^m в нем составляет 0.001^m . Таких объектов около 300 000. Если использовать эти каталоги в качестве опорных, то в поле зрения телескопа МАСТЕР будет попадать в среднем 1 звезда Алма-Атинского каталога, 50 звезд каталога Tycho-2 и 6 звезд из его высокоточной части. Этого достаточно для оценки атмосферной экстинкции, в том числе и дифференциальной, при «идеальном» фотометрическом состоянии атмосферы.

Три последних каталога гораздо более многочисленны, сопоставление кадра с ними позволяет получить оценки блеска для всех наблюдаемых объектов. Каталог USNO B1.0 содержит данные о 3 643 201 733 объектах. Однако этот каталог получен в результате оцифровки фотопластинок Паломарского обзора неба, он обладает хорошей астрометрической точностью, но погрешность блеска звезд в нем слишком велика — порядка 0.1^m , т. е. его нельзя использовать в качестве опорного для фотометрических наблюдений.

Каталог SDSS содержит фотометрические измерения в пяти оптических полосах u , g , r , i и z до $23-25^m$ примерно на одном стерадиане небесной сферы вокруг северного полюса Галактики. Распространение обзора на остальное небо пока не предполагается. Этот каталог позволяет отождествлять все звезды в кадре МАСТЕРа и

даже «метровика», но не на всем небе. Наиболее удачный период для проведения фотометрии по SDSS в Коуровке — весна-лето. Еще одним недостатком этого каталога (помимо неполноты покрытия неба) является плохая поддержка фотометрической системы: вынос фотометрических измерений за атмосферу в SDSS осуществлялся по простейшим формулам, что приводит к заметным систематическим ошибкам.

2MASS — Two-Micron All-Sky Survey — содержит измерения примерно 300 000 000 звезд в трех полосах J, H и K_s ближнего инфракрасного диапазона (1–2 мкм). Предельные звездные величины в этих полосах составляют: $J_{\max} = 15.8$, $H_{\max} = 15.1$ и $K_{s,\max} = 14.3$. Учитывая, что большинство звезд в полосах J, H и K_s несколько ярче, чем в оптике, получаем, что по каталогу 2MASS можно отождествить около 1 % звезд в кадре телескопа МАСТЕР.

Для пересчета в полосы BVRI, в которых ведутся наблюдения на МАСТЕРЕ, необходимо определить спектральный класс звезды. Двухцветная диаграмма J–H/J– K_s вполне позволяет это сделать [12]. Некоторая проблема такого пересчета заключается в том, что теоретическая двухцветная диаграмма для карликов и гигантов дает заметно различающиеся предсказания. Для звезд спектрального класса позже K это определение является однозначным, так как зависимости расходятся, для звезд моложе A — зависимости практически совпадают. В оставшемся интервале ход двухцветной диаграммы совпадает, но одна и та же точка на ней соответствует разным спектральным классам (и соответственно звездным величинам в BVRI) для гигантов или карликов.

Следует заметить, что обзор неба в SDSS делался в один проход (на большей части неба, охваченной обзором), а 2MASS — в два, таким образом эти обзоры не позволяют выделить переменные звезды, для которых будет не менее 10 %.

Алгоритм наблюдений с опорным каталогом должен выглядеть так.

- На основе SDSS (вокруг северного полюса Галактики) и 2MASS (для остальной части северного неба) создается начальная версия опорного каталога звезд в полосах BVRI. Для BVRI-величин рассчитанных по 2MASS в каталог заносятся два варианта: для гигантов и карликов.
- Этот каталог корректируется по результатам первых наблюдений.

- В нем выделяются переменные звезды.
- Выбирается вариант карлик/гигант (для спектральных классов A–G по 2MASS).
- По последующим наблюдениям производится уточнение звездных величин непериодических звезд в каталоге.

В равнинной обсерватории, подобной Коуровской, большую часть времени можно предполагать наличие легкой облачности с уровнем поглощения $\sim 1\text{--}5\%$ и размерами неоднородности в десятки угловых минут. Использование опорного каталога позволяет для каждого кадра построить карту поглощения и учитывать ее при обработке. Для этого в каждом отдельном наблюдении необходимо провести следующие действия:

- отождествить изображения звезд в кадре с каталогом;
- найти разности измеренных и опорных звездных величин;
- исключить из списка переменные звезды;
- по оставшимся непериодическим звездам построить локальную карту поглощения.

На этапе начальной корректировки, когда мы не знаем какие из звезд являются переменными, необходимо производить несколько последовательных снимков одной и той же области неба для того, чтобы разделить влияние меняющегося от кадра к кадру атмосферного поглощения и постоянного для серии кадров изменения связанного с переменностью звезд.

Все выше сказанное относится как к МАСТЕРу, так и к «метровику». Для последнего неоднородность атмосферного поглощения не менее важна из-за существенно более высокой точности фотометрии, которая на нем может быть получена. Опорные каталоги у двух телескопов могут быть общими.

Другая причина низкой точности фотометрии МАСТЕРа связана с установленной на нем ПЗС-матрицей. Это матрица с прямой засветкой, т. е. регистрируемое излучение сначала проходит через полупрозрачные управляющие электроды и лишь затем попадает в область регистрации. Из-за этого возникает неустранимая неоднородность чувствительности внутри пикселей, составляющая десятки процентов. При размере изображений звезд примерно равных пикселю это будет приводить к заметным ошибкам в фотометрии и астрометрии.

Эта проблема может быть решена одним из следующих способов.

1. Расфокусировка изображения. Если расфокусировать изображение до двух пикселей влияние внутрипиксельной неоднородности чувствительности существенно снизится. Уровень остаточной неоднородности плохо поддается теоретической оценке, но может быть легко измерен в специальной серии наблюдений. недостатком этого метода является увеличение шумов. При расфокусировке до двух пикселей площадь изображения (и, следовательно, суммарный шум) увеличивается в четыре раза, отношение сигнал/шум — падает в два раза, а проникающая сила телескопа снижается примерно на одну звездную величину.

2. Регистрация изображений в режиме ВЗН. Режим с *временной задержкой и накоплением* состоит в следующем: с помощью гидирующего механизма заставляются двигаться вдоль столбцов ПЗС-матрицы. Одновременно в том же направлении и с той же скоростью переносятся накопленные в ПЗС заряды. Такой режим регистрации приводит к усреднению влияния неоднородности. Перенос заряда за время экспозиции на 100 пикселей приведен к снижению неоднородности чувствительности¹ на порядок. Этот способ не приводит к снижению проникающей способности инструмента, но, возможно, потребует переделки контроллера, управляющего ПЗС-камерой.

Для «метрового» телескопа, оснащенного ПЗС-матрицей с обратной засветкой и более крупным зерном переход на ВЗН-режим регистрации для высокоточных фото- и астрометрических измерений не требуется (хотя и возможен).

Работа частично поддержана грантами РФФИ 09-02-00032 и 09-02-00520.

Список литературы

1. *Лютый В. М.* Автоматрический электрофотометр со счетом фотонов // Сообщ. ГАИШ. — 1971. — Т. 172. — С. 30—41.
2. *Корнилов В. Г., Крылов А. В.* Четырехканальный звездный фотоэлектрический фотометри для наблюдений ярких звезд // Астрон. журн. — 1990. — Т. 67. — С. 173—181.

¹Снижается влияние как внутри- так и межпиксельной неоднородности чувствительности.

3. *Магницкий А. К.* Наблюдения звезды скопления Плеяды HZ:П-625 V811-TAURI с использованием синхронизированного двухзвездного UBVR фотометра // *Астрон. журн.* — 1987. — Т. 31. — С. 696.
4. *Миронов А. В.* Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. — М.: ТОО «Эдэм», 1997. — С. 157. — (Учебное пособие).
5. *Миронов А. В.* Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — С. 260.
6. *Корнилов В. Г., Волков И. М., Захаров А. И. е.* Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба // *Сообщ. ГАИШ.* — 1991. — Т. 63. — С. 3—400.
7. *Chereshchuk A., Khaliullin K., Kornilov V., Mironov A.* Sternberg WBVR photometric survey of bright stars // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* — 1994. — Vol. 217. — P. 83.
8. *Hog E., Fabricius C., Makarov V. V. e.* Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. Astrophys.* — 2000. — Vol. 255. — P. L27—L30.
9. *Monet D. G., Levine S. E., Casian B. e.* The USNO-B1.0 Catalog // *Astron. J.* — 2003. — Vol. 125. — P. 984.
10. *Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., Allam S. S. e.* The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J., Suppl. Ser.* — 2007. — Vol. 172. — P. 634.
11. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R. e.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 131. — P. 1163.
12. Explanatory Supplement to the 2MASS Second Incremental Data Release. — <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/second/doc/figures/>.