

УДК 520.224.72

# ОДНОМЕТРОВЫЙ ТЕЛЕСКОП ШМИДТА БЮРАКАНСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

© 2017 С. Н. Додонов<sup>1\*</sup>, С. С. Котов<sup>1</sup>, Т. А. Мовсисян<sup>2</sup>, М. Геворгян<sup>2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Бюраканская астрофизическая обсерватория НАНА, Бюракан, 0213 Армения

Поступила в редакцию 14 августа 2017 года; принята в печать 20 сентября 2017 года

В 2013–2015 г. Лаборатория спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов (ЛСФВО) САО РАН совместно с армянскими специалистами занималась модернизацией 1-м телескопа Шмидта БАО НАН РА. Нами полностью переделана система управления телескопом: заменены исполнительные механизмы, разработано математическое обеспечение для управления телескопом, создана гидрирующая система. Мы переработали, подготовили и в октябре 2015 г. установили в фокусе телескопа CCD-детектор (4k × 4k, с жидкостным охлаждением, RON ~ 11.1 e<sup>-</sup>, производитель Arpocoe, USA) с элементом разрешения 0.868 угл. сек. и полем зрения около 1 кв. градуса. Детектор оснащен турелью с двадцатью среднеполосными фильтрами ( $FWHM = 250 \text{ \AA}$ ), равномерно покрывающими спектральный диапазон 4000–9000 Å, пятью широкополосными ( $u, g, r, i, z$  SDSS) и тремя узкополосными фильтрами (5000 Å, 6560 Å и 6760 Å,  $FWHM = 100 \text{ \AA}$ ). В течение первого года пробной эксплуатации 1-м телескопа нами проведены тестовые наблюдения по трем программам: поиск молодых звездных объектов; эволюция AGN; звездный состав дисков галактик. Мы подтвердили возможности эффективного отбора молодых звездных объектов с помощью наблюдений в узкополосных фильтрах H $\alpha$  и [S II] и в среднеполосном 7500 Å. Трехчасовые экспозиции в фильтрах SDSS  $g, r$  и  $i$  позволили достичь поверхностной яркости 28 зв. величины с кв. секунды при изучении звездного состава дисков галактик для выборки из девяти галактик. По наблюдениям на 1-м телескопе Шмидта БАО в пяти широкополосных (SDSS  $u, g, r, i$  и  $z$ ) и пятнадцати среднеполосных фильтрах (4000–7500 Å) создана полная, до  $R_{AB} = 23^m$ , выборка кандидатов в квазары с  $0.5 < z < 5$  (330 объектов) в поле SA 68 размером около 1 кв. градуса. Спектроскопия на БТА 29 объектов ( $19^m5 < R < 22^m$ ) подтвердила принадлежность 28 объектов к квазарам.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — телескопы*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Закончившаяся в середине 80-х эпоха фотографических наблюдений оставила множество телескопов без применения. Такие знаменитые инструменты, как Паломарский Шмидт, Баррелл Шмидт, Асиаго Шмидт, Бюраканский Шмидт, сыграли значительную роль в развитии астрономии. Имея превосходную оптику и механику, но архаичные системы управления и устаревшие методы наблюдений, они не выдерживали конкуренции с более современными телескопами. Особой проблемой стало отсутствие приемников соответствующего размера и качества — огромные поля зрения телескопов (например, у Паломарского Шмидта размер использовавшейся фотографической пластинки  $35.5 \times 35.5$  см) невозможно было заполнить миниатюрными в те времена ПЗС-детекторами.

Развитие технологии наблюдений (высокая квантовая эффективность детекторов и размеры, достигающие сегодня  $10 \times 10$  см, более чем 90% пропускание фильтров, эффективные широкополосные покрытия) позволили в начале нового столетия вернуть к регулярной работе широкопольные телескопы системы Шмидта [1]. На телескопах меняли системы управления, превращая их в роботизированные инструменты для удаленных наблюдений, заменяли фотографическое оборудование на ПЗС-детекторы. Стоимость таких работ высока, и поэтому не все подобные телескопы используются в настоящее время. Особый интерес к телескопам системы Шмидта связан с большим полем зрения, высоким пропусканием (из-за небольшого числа оптических элементов), малым уровнем рассеянного света, большой светосилой. Такие телескопы очень хороши для детектирования низких поверхностных яркостей, поверхностной фотометрии га-

\*E-mail: dodo@sao.ru

лактик, фотометрии звёзд. В статье представлены результаты наших усилий по восстановлению работоспособности 1-м телескопа системы Шмидта (100/125/213) Бюраканской астрофизической обсерватории Национальной академии наук Армении. Модернизация системы управления и наблюдательные задачи, которые мы планируем осуществить на этом телескопе, даны в разделе 2; описание и основные характеристики детектора, установленного в фокусе телескопа, содержит раздел 3; характеристики фильтров приведены в разделе 4; в разделах 5 и 6 описана методика наблюдений и калибровки данных, приводятся результаты первых наблюдений.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ

Однометровый телескоп системы Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории Национальной академии наук Армении входит в пятерку крупнейших телескопов системы Шмидта в мире по размеру зеркала и в тройку — по размеру объективных призм и является одним из самых светосильных ( $f/2.1$ ) среди инструментов своего класса. Телескоп создан Государственным оптико-механическим заводом им. ОГПУ (в настоящее время ЛОМО) и установлен в Бюраканской обсерватории в 1960 г. [2]. В середине 60-х годов на этом телескопе Б. Е. Маркарян впервые начал программу поиска внегалактических объектов с избыточным УФ-излучением в континууме [3], применив методику бесщелевой спектроскопии. В ходе обзора было открыто большое количество новых активных ядер галактик, известных в настоящее время как галактики Маркаряна и до сих пор являющихся предметом многосторонних исследований. Еще до завершения программы Первого Бюраканского обзора Б. Е. Маркаряном была сформулирована задача, имевшая целью распространение низкодисперсионных спектральных исследований на более слабые звездные величины и расширение круга отбираемых объектов. Эта идея легла в основу Второго Бюраканского спектрального обзора неба. Наблюдения по программе обзора были начаты в 1974 г. и завершены в 1991 г. [4, 5]. По окончании Второго Бюраканского обзора неба систематические наблюдения на телескопе не проводились, и в середине 90-х годов он был законсервирован.

В 2006 г. была начата работа по расконсервации телескопа и восстановлению его работоспособности. Нами полностью модернизирована система управления телескопом: заменены исполнительные механизмы, разработано математическое обеспечение управления телескопом, создана гидрирующая система [6], переработан и подготовлен к установке в фокусе телескопа CCD-детектор. Созданная система позволяет управлять детектором,

фильтровыми колесами, перемещениями телескопа и купола, автоматически фокусировать телескоп.

Мы планируем выполнять на телескопе несколько наблюдательных программ, использующих либо высокую светосилу, либо большое поле зрения телескопа. К первым относятся программа поиска и исследования молодых звездных объектов с истечениями вещества (наблюдения в узкополосных  $FWHM = 100 \text{ \AA}$  и среднеполосных  $FWHM = 250 \text{ \AA}$  фильтрах); программа глубокой поверхностной фотометрии галактик (наблюдения в широкополосных фильтрах); изучение распределения ионизованного газа в галактических дисках и за пределами оптического радиуса (наблюдения в узкополосных  $FWHM = 100 \text{ \AA}$  и среднеполосных  $FWHM = 250 \text{ \AA}$  фильтрах). Программой второго рода является поиск активных галактических ядер в избранных площадках неба с помощью методики среднеполосной фотометрии. Мы провели моделирование наблюдений на 1-м телескопе в широкополосных и среднеполосных фильтрах. По нашим оценкам в широкополосных фильтрах мы сможем достичь 28–29 звездной величины с квадратной секунды за 3–5 часов экспозиции в фильтрах  $g$ -SDSS,  $r$ -SDSS и  $i$ -SDSS. Для программы поиска активных галактических ядер были сделаны оценки оптимального числа спектральных полос, равномерно распределенных во всем оптическом диапазоне, точности классификации объектов и определения фотометрических красных смещений объектов и общего времени, которое необходимо затратить для наблюдений одного поля. Мы планируем использовать 20 среднеполосных фильтров с шириной полосы пропускания  $250 \text{ \AA}$ , пропусканием лучше 90%, в диапазоне 4000–9000  $\text{\AA}$ . В этом случае за 30 часов экспозиции (DQE детектора порядка 60%) при качестве изображений 2 угл. сек. мы сможем получить отношение  $S/N = 5$  в каждом фильтре для объектов с  $AB \sim 23^m$ . При заданной глубине обзора в каждом фильтре  $AB = 23^m$  мы считаем, что сможем проследить полностью функцию светимости QSO ( $M_B = -23$ ) до  $z = 3.2$  и до  $z = 5$  для объектов с  $M_B > -24.7$ .

## 3. ДЕТЕКТОР

Для установки на телескоп нами была приобретена любительская CCD-камера Apogee Alta 16M (производства Apogee, USA) с охлаждением детектора двухкаскадным модулем Пельтье и воздушным охлаждением горячего спая Пельтье-модуля. В камере установлен CCD-детектор Kodak KAF-16803  $4096 \times 4096$  элементов с размером элемента  $9 \times 9 \text{ мкм}$ . Лабораторные исследования камеры показали, что шум считывания равен

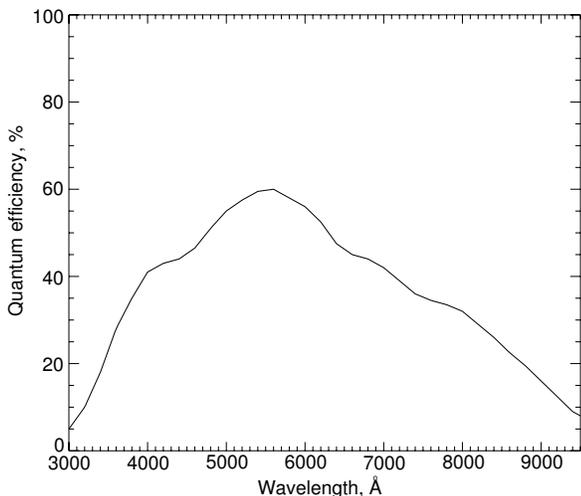


Рис. 1. Спектральная чувствительность камеры Arcee Alta 16M по результатам измерений в лаборатории.

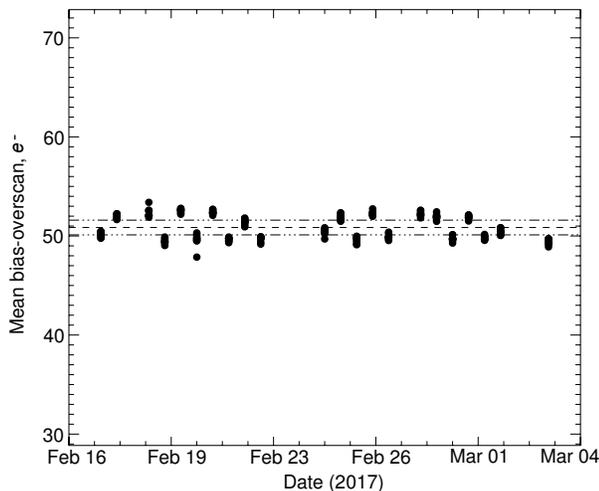


Рис. 2. Измерения базового уровня bias-overscan в реальных условиях на телескопе при изменении температуры подкупольного пространства от  $-18^{\circ}\text{C}$  до  $+2^{\circ}\text{C}$ . Пунктирной линией показан средний уровень, штрихпунктирными —  $\pm 0.5$  ADU.

$\text{RON} = 11.1 e^{-}$ , коэффициент преобразования равен  $\text{ADU} = 1.487 e^{-}$ , и камера имеет достаточный для наблюдений диапазон линейности. Спектральная чувствительность камеры позволяет работать практически во всём оптическом диапазоне. Измерения спектральной чувствительности, сделанные нами в лаборатории, приведены на рис. 1.

Мы переработали камеру, заменив воздушное охлаждение жидкостным, и вакуумировали объем, в котором находится детектор. Это позволило в значительной степени уменьшить зависимость тем-

пературы детектора и электроники от температуры окружающей среды и довести рабочую температуру детектора до  $-40^{\circ} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  при температуре теплоносителя  $+10^{\circ} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Перед стеклянным окном объема, в котором находится детектор, мы установили полеспрямляющий двухлинзовый объектив с антирефлексным покрытием, специально рассчитанный для исправления кривизны фокальной поверхности 1-м телескопа во всём оптическом диапазоне. На корпусе камеры мы разместили фильтровую турель со сменными фильтровыми колесами (HSFW, производства Optec, USA), в каждом из которых устанавливаются пять фильтров диаметром 50 мм. В октябре 2015 г. на штатный фокусирующий узел телескопа была установлена CCD-камера и проложены линии подачи теплоносителя от системы охлаждения (Minichiller, производства фирмы Huber, Германия), находящейся в подкупольном пространстве телескопа. В качестве теплоносителя мы использовали смесь этилового спирта с дистиллированной водой. В результате было получено поле зрения телескопа с камерой Alta 16M около 1 кв. градуса с элементом разрешения 0.868 угл. сек. Мы провели исследование фотометрической стабильности детектора в условиях реальных наблюдений: в течение двух недель измерялись значения базового уровня, относительно которого проводятся измерения яркости объектов (bias-overscan). Температура подкупольного пространства изменялась от  $-18^{\circ}\text{C}$  до  $+2^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Как показали измерения, среднеквадратичные отклонения изменений базового уровня не превосходят  $1.4 e^{-}$ , т.е. 1 ADU детектора, без заметных трендов.

#### 4. ФИЛЬТРЫ

В соответствии с поставленными научными задачами мы приобрели 20 среднеполосных фильтров ( $\text{FWHM} = 250 \text{ \AA}$ ), равномерно покрывающих спектральный диапазон 4000–9000  $\text{ \AA}$ , и три узкополосных фильтра (5000  $\text{ \AA}$ , 6560  $\text{ \AA}$  и 6760  $\text{ \AA}$ ,  $\text{FWHM} = 100 \text{ \AA}$ ). Фильтры изготовлены фирмой Optec (USA) по технологии ионной бомбардировки и имеют высокое пропускание (более 90%) в пике чувствительности и хорошее подавление света в «глухих» диапазонах (более 4D). Нами приобретен также набор из пяти широкополосных фильтров ( $u, g, r, i, z$  SDSS) производства фирмы Astrodon, USA. Световой диаметр фильтров — 50 мм. Результаты лабораторных измерений фильтров в сходящемся пучке со светосилой  $F/2$  приведены на рис. 3.

Фильтры уставлены в шесть фильтровых колес, что позволяет оперативно их менять в процессе

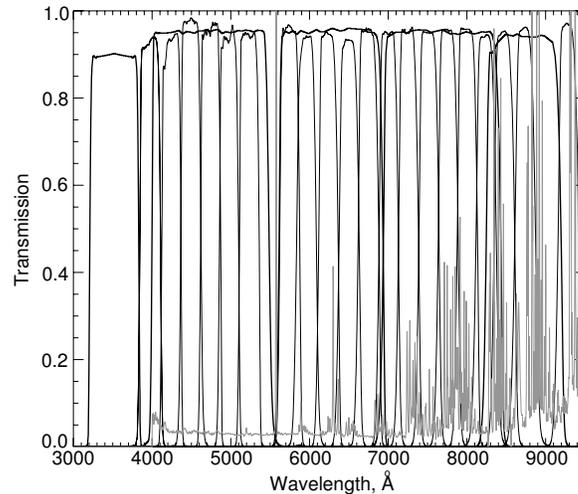


Рис. 3. Результаты измерений фильтров в лаборатории в сходящемся пучке со светосилой  $F/2$ .

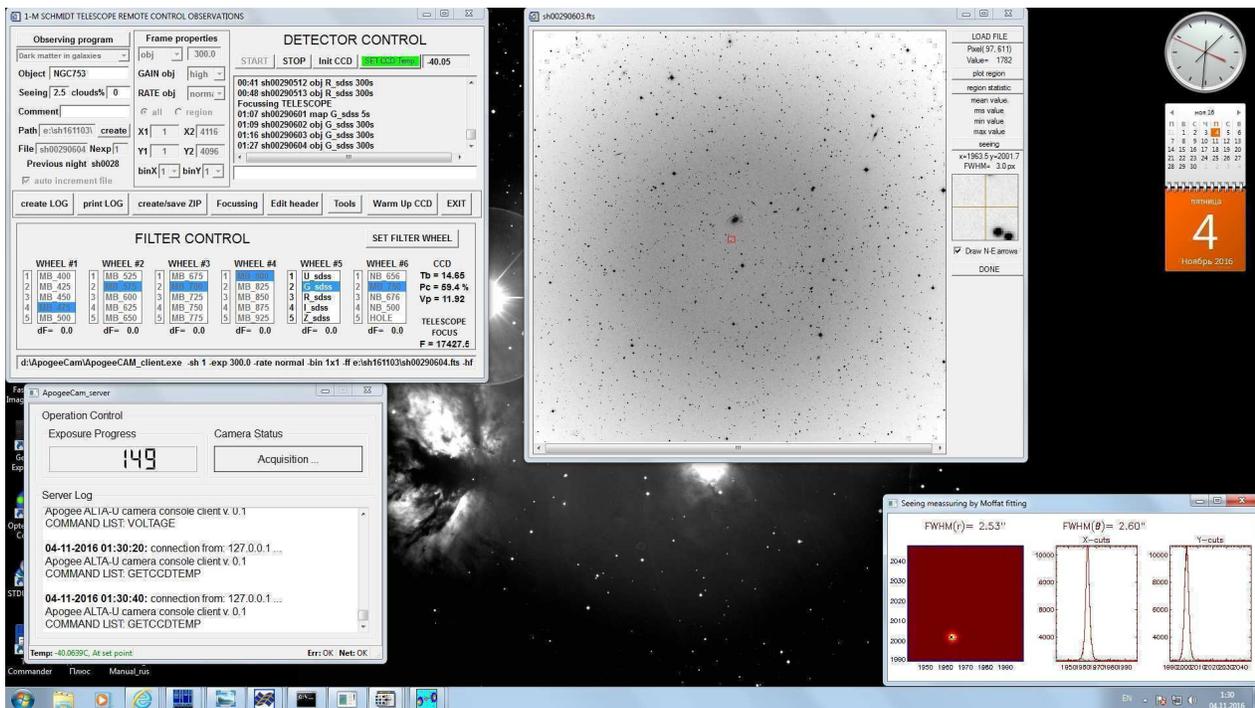


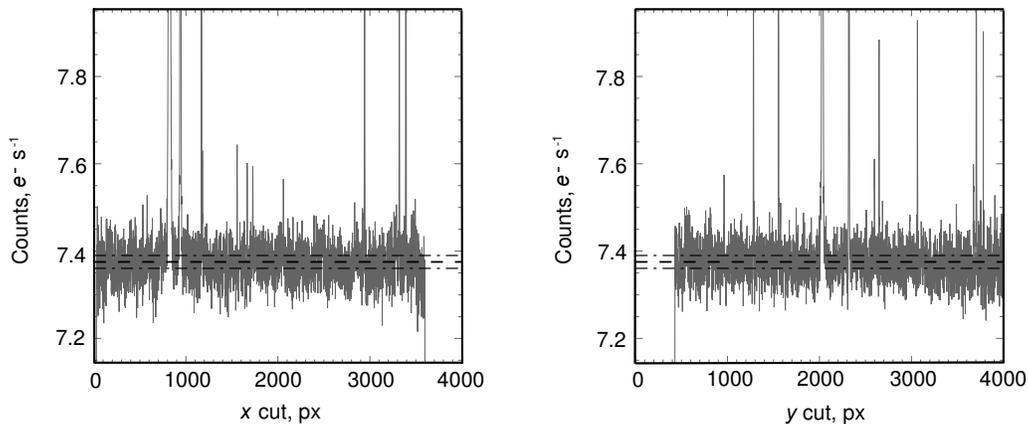
Рис. 4. Копия экрана управления детектором в процессе наблюдений на 1-м телескопе.

наблюдений. Управление турелью фильтров осуществляется из программной оболочки, общей с управлением камеры.

## 5. НАБЛЮДЕНИЯ И КАЛИБРОВКА ДАННЫХ

Многоцветная фотометрия, на которую мы переориентировали 1-м телескоп, позволяет существенно формализовать методику наблюдений, что

является ключевым моментом при переходе к удаленным и полностью автоматизированным наблюдениям. Разрабатывая математическое обеспечение управления телескопом и детектором, мы учитывали возможное в будущем проведение удаленных наблюдений, а затем и переход к режиму автоматических наблюдений по заданной программе. Создана программная оболочка управления детектором, из которой можно не только контролировать его состояние, задавать время экспозиции и режимы накопления изображений, но и управлять



**Рис. 5.** Разрезы через центр снимка по осям  $x$  и  $y$  поля HS 47.5-22, полученного в фильтре  $r$ -SDSS. Пунктиром показан средний уровень фона ночного неба, штрихпунктирными линиями обозначены отклонения от него  $\pm 0.2\%$ .

турелью фильтров, взаимодействуя с программой управления телескопом, производить фокусировку телескопа, перемещать телескоп на новые координаты, осуществлять калибровку данных и по окончании ночи проводить архивацию полученных данных с созданием протокола наблюдений за прошедшую ночь (см. рис. 4).

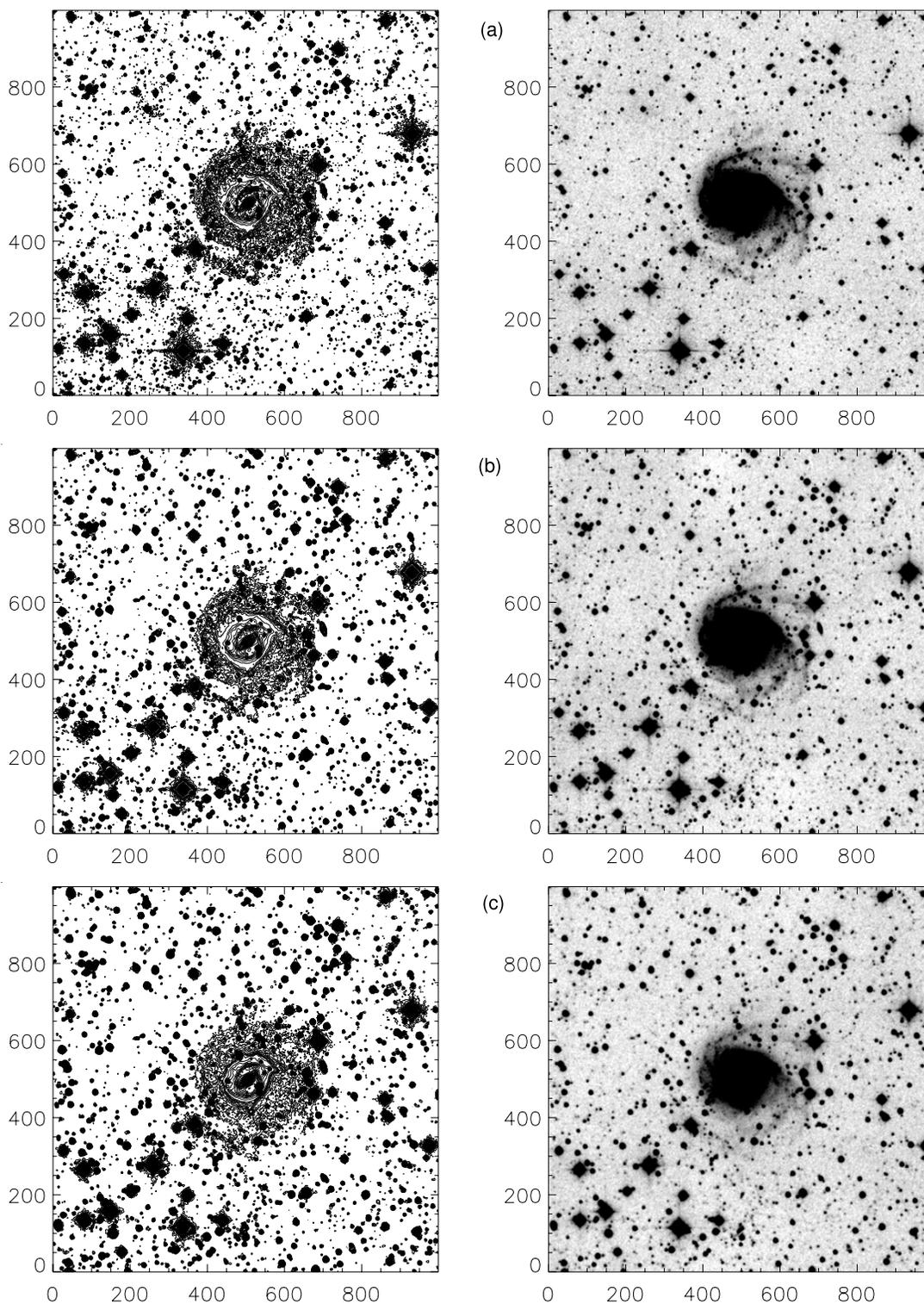
Многоцветная фотометрия является мощным методом изучения распределения яркости близких галактик, а при использовании среднеполосных фильтров дает возможность восстанавливать распределение энергии в спектрах всех объектов, видимых в поле зрения телескопа, а значит, классифицировать объекты и определять их красные смещения. Ключевой вопрос фотометрических наблюдений — калибровка каждого диапазона. Одним из сложных моментов при наблюдениях на широкоугольных телескопах является получение «плоского поля.» Идеальное «плоское поле» позволяет исправлять не только поканальные различия чувствительности детектора, но и неоднородности освещения детектора в силу особенностей оптического тракта (виньетирование). На практике получить идеальное «плоское поле» трудно по двум причинам: детектор должен быть освещен так же, как и при реальных наблюдениях, и спектральный состав света, освещающего детектор, должен быть близок к спектральному составу излучения ночного неба. Обычно для получения «плоского поля» снимается утреннее или вечернее небо, однако для телескопа с большим полем зрения эти «плоские поля» могут иметь градиенты яркости, да и накопление кадров такого «плоского поля» с высоким отношением  $S/N$  для большого числа фильтров крайне затруднительно. Мы разделили процесс калибровки данных на две части: для устранения локальных неоднородностей используем «плоское

поле,» полученное от экрана калибровки плоского поля (см. [7]), установленного в подкупольном пространстве телескопа, а для устранения виньетирования создаем модель виньетирования из снимков объектов, сделанных со смещением около 6 угл. мин. между экспозициями. Математическое обеспечение предварительной редукции наблюдательных данных, созданное нами, позволяет с хорошим качеством подготовить снимки к фотометрии объектов. Таким образом решена основная проблема широкоугольных наблюдений — средний уровень фона неба по всему изображению сохраняется в пределах  $\pm 0.2\%$  (рис. 5).

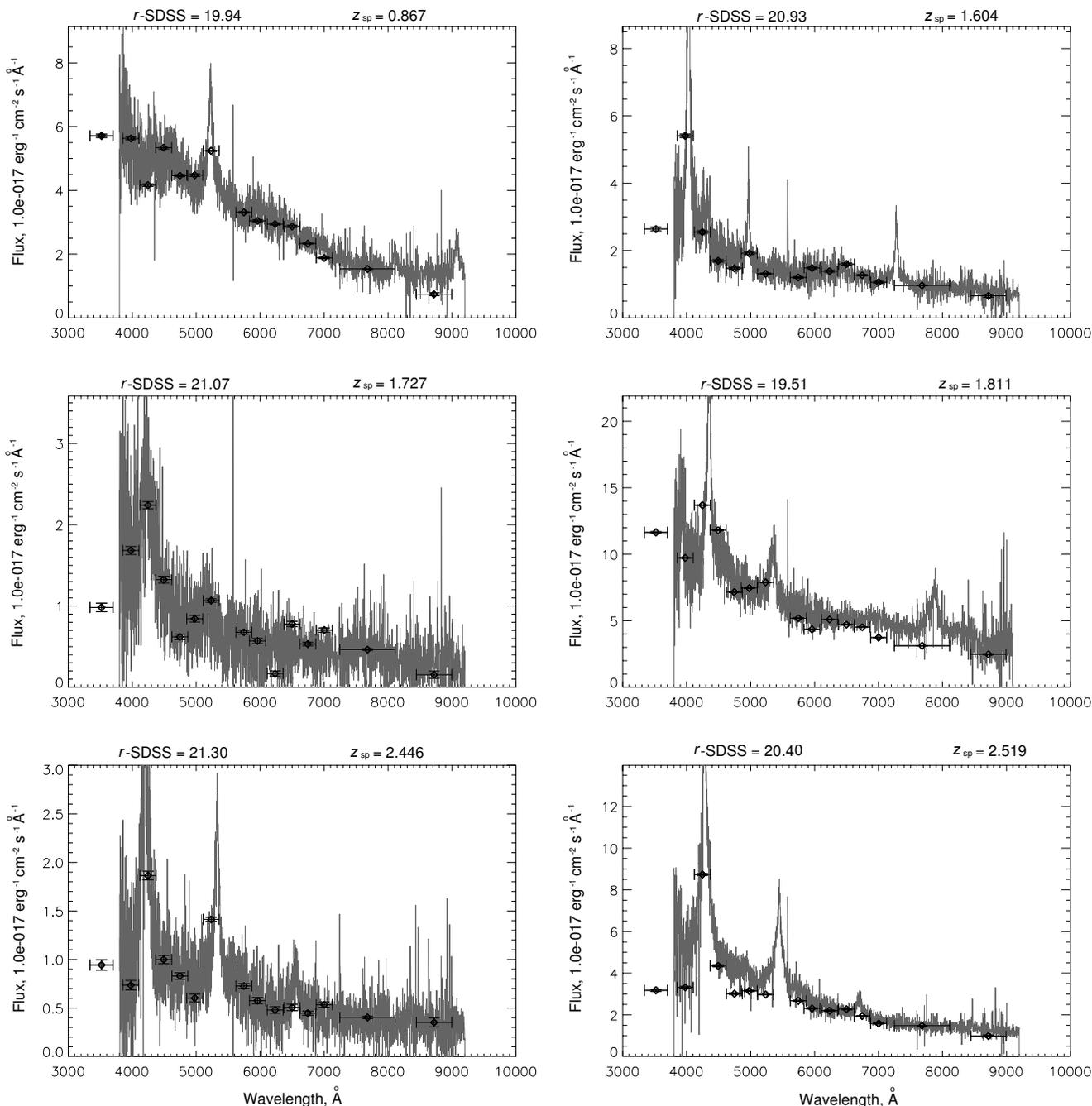
## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Первый свет с обновленной системой управления и CCD-детектором на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской обсерватории мы получили в октябре 2015 г. За более чем 50 ночей наблюдений накоплены наблюдательные данные по программам, представленным в разделе 2. Мы провели наблюдения выборки из девяти галактик по программе «Тёмная материя в пределах оптических границ галактик,» в целом около 40 часов экспозиции. Для конкретных объектов и фильтров продолжительность экспозиции менялась от 40 минут до 4 часов. Все полученные данные обработаны и подготовлены для дальнейшей детальной фотометрии. Для нескольких галактик фотометрия проведена. На рис. 6 представлены ее результаты для одной из них — галактики UGC 03685. Данные не сглажены, изоуровни звездных величин подобраны так, чтобы не закрывать общую картину.

По программе поиска активных галактических ядер в избранных площадках неба нами получены наблюдательные данные для двух площадок: SA 68



**Рис. 6.** UGC 03685 по наблюдениям на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН РА. Слева: изофоты поверхностной фотометрии; справа: снимки объекта в фильтрах  $i$ -SDSS (a),  $r$ -SDSS (b) и  $g$ -SDSS (c) за время экспозиции 6000 с, 10 500 с и 8100 с соответственно. Уровень крайних изофот на панелях слева (в том же порядке) —  $26^m5$ ,  $27^m7$ ,  $28^m0$  с кв. сек.



**Рис. 7.** Распределение энергии шести квазаров, объектов поля HS 47.5-22, по данным многополосных фотометрических наблюдений на 1-м телескопе Шмидта (точки с барами: горизонтальный соответствует ширине полосы пропускания фильтра, вертикальный — ошибке фотометрии объекта в данной полосе) и спектры этих объектов из обзора SDSS (сплошная линия).

(0.65 кв. градуса) и HS 47.5-22 (2.5 кв. градуса) в пятнадцати среднеполосных и пяти широкополосных фильтрах. После предварительной редукции данных и фотометрии объектов (статья с описанием использованной методики готовится к публикации) мы получили распределения энергии для более чем 130 000 объектов. Выделено около 1500 кандидатов в активные галактические ядра. Пример

распределений энергии некоторых объектов поля HS 47-22 в сравнении с их спектрами из обзора SDSS представлен на рис. 7.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возвращение к регулярным наблюдениям 1-м телескопа Шмидта Бюраканской обсерватории

расширяет возможности российских и армянских астрономов в решении ключевых задач современной астрофизики: исследование эволюции активных объектов, исследование гамма-всплесков на ранних стадиях их обнаружения, поиск далёких (до  $z \sim 1$ ) скоплений галактик, исследование окружения гигантских радиогалактик, изучение связи AGN и скоплений галактик, изучение взаимодействующих скоплений галактик, изучение распределения ионизованного газа в галактических дисках и за пределами оптического радиуса, исследование областей звездообразования в Галактике. Мы надеемся, что в обозримом будущем удастся многократно увеличить эффективность наблюдений на 1-м телескопе за счет установки в фокусе мозаичного детектора, покрывающего все 16 кв. градусов поля зрения телескопа.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В. Р. Амирханяна, В. Л. Афанасьева, Т. А. Фатхуллину, А. Н. Борисенко за по-

мощь в работе. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 17-12-01335 «Ионизованный газ в галактических дисках и за пределами оптического радиуса.»)

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Schmidt, Zeitschrift fur Physik **71**, 696 (1931).
2. P. V. Dobichin, Оптико-механическая промышленность **11**, 2 (1961).
3. В. Е. Markaryan, Astrophysics **3**, 24 (1967).
4. В. Е. Markaryan and D. A. Stepanyan, Astrophysics **19**, 354 (1983).
5. D. A. Stepanyan, Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics (Inst. Applied Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1994).
6. T. A. Movsessian, S. N. Dodonov, and M. Gevorgyan, Astrophysics, 2017 (in press).
7. J. L. Marshall and D. L. DePoy, Publ. Astron. Soc. Pacific **125**, 1277 (2013).

## One-Meter Schmidt Telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory: New Capabilities

S. N. Dodonov, S. S. Kotov, T. A. Movsessian, and M. Gevorgian

In 2013–2015 the Laboratory of spectroscopy and photometry of extragalactic objects (LSPEO) of the Special Astrophysical Observatory together with Armenian specialists upgraded the 1-m Schmidt telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory of the National Academy of Sciences of Armenia. We completely redesigned the control system of the telescope: we replaced the actuating mechanisms, developed telescope control software, and made the guiding system. We reworked and prepared a  $4k \times 4k$  Apogee (USA) liquid-cooled CCD with  $RON \sim 11.1 e^-$ , a pixel size of  $0''.868$ , and field of view of about  $1^\circ$ , and in October 2015 mounted it in the focus of the telescope. The detector is equipped with a turret bearing 20 intermediate-band filters ( $FWHM = 250 \text{ \AA}$ ) uniformly covering the 4000–9000  $\text{\AA}$  wavelength range, five broadband filters ( $u, g, r, i, z$  SDSS), and three narrow-band filters (5000  $\text{\AA}$ , 6560  $\text{\AA}$  and 6760  $\text{\AA}$ ,  $FWHM = 100 \text{ \AA}$ ). During the first year of test operation of the 1-m telescope we performed pilot observations within the framework of three programs: search for young stellar objects, AGN evolution, and stellar composition of galaxy disks. We confirmed the possibility of efficiently selecting of young objects using observations performed in narrow-band  $H\alpha$  and [S II] filters and the intermediate-band 7500  $\text{\AA}$  filter. Three-hours long exposures with SDSS  $g$ -,  $r$ -, and  $i$ -band filters allow us to reach the surface brightness level of  $28^m/\square''$  when investigating the stellar content of galaxy disks for a sample of nine galaxies. We used observations performed with the 1-m telescope in five broadband (SDSS  $u, g, r, i$ , and  $z$ ) and 15 intermediate-band filters (4000–7500  $\text{\AA}$ ) to construct a sample of quasar candidates with  $0.5 < z < 5$  (330 objects) in about one-sq. degree SA 68 field complete down to  $R_{AB} = 23^m$ . Spectroscopic observations of 29 objects ( $19^m5 < R < 22^m$ ) carried out at the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences confirmed the quasar nature of 28 objects.

Keywords: *methods: observational—telescopes*