

УДК 520.2, 520.3, 520.8

А. В. СЕРГЕЕВ^{1,2}, О. А. БУРХОНОВ³, В. Н. ДУДИНОВ²,
 А. П. ЖЕЛЕЗНЯК², Ю. Н. КРУГЛЫЙ², И. Е. МОЛОТОВ⁴,
 В. М. ШУЛЬГА¹, Ш. А. ЭГАМБЕРДИЕВ³,
 В. В. КОНИЧЕК², А. В. КОЧЕТОВ²

¹ Радиоастрономический институт НАН Украины,
 ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина

² НИИ астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина,
 ул. Сумская, 35, г. Харьков, 61022, Украина

³ Астрономический институт им. Улугбека Академии наук Республики Узбекистан,
 ул. Астрономическая, 33, г. Ташкент, 100052, Узбекистан

⁴ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН,
 Миусская пл., 4, г. Москва, 125047, Россия

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕЛЕСКОПА АЗТ-22 МАЙДАНАКСКОЙ ВЫСОКОГОРНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Продемонстрировано, что телескоп АЗТ-22, оснащенный ПЗС камерой ML09000-65, способен получать высококачественные изображения астрономических объектов и решать широкий круг наблюдательных задач. Дифракционное качество оптики телескопа, а также прекрасные астроклиматические условия обсерватории на горе Майданак позволяют получать изображения с разрешением лучше $0.6''$. Точность дифференциальной фотометрии изолированной звезды составляет 0.002 звездной величины. Система автоматического гидирования телескопа обеспечивает выполнение длительных экспозиций с уверенной регистрацией объектов вплоть до 24 звездной величины.

Ключевые слова: телескоп, ПЗС, система автоматического гидирования, астроклимат, точность фотометрии, проникающая способность, угловое разрешение

1. Введение

Телескоп АЗТ-22 установлен на высоте 2600 м на западной вершине горы Майданак (Республика Узбекистан). По астроклиматическим условиям Майданакская высокогорная обсерватория входит в число лучших обсерваторий мира и не имеет аналогов на территории СНГ. Это позволяет проводить уникальные наблюдения в рамках международного сотрудничества по многим научным программам. Одной из таковых является многолетний мониторинг гравитационно-линзированных систем и квазаров [1].

На протяжении нескольких лет при участии представителей заинтересованных стран были проведены работы по доукомплектованию телескопа системой автоматического гидирования и новой ПЗС матрицей. В связи с этим в рамках совместной украинско-узбекской программы астрономических наблюдений на телескопе АЗТ-22 в 2012 г. выполнены тестовые испытания телескопа и изучение возможности расширения круга научных задач.

2. Телескоп АЗТ-22 Майданакской высокогорной обсерватории

Телескоп АЗТ-22 с диаметром главного зеркала 1.5 м, установленный на горе Майданак в конце 80-х гг., был разработан фирмой ЛОМО по заказу МГУ. Телескоп имеет высококачественную оптику, близкую к дифракционно-ограниченной, с величиной среднеквадратической деформации волнового фронта относительно идеального 0.024λ (цеховые испытания). Ввод телескопа в строй был осуществлен в течение 1990–1994 гг. без технического надзора со стороны фирмы-изготовителя силами инженеров и астрономов-наблюдателей МГУ и Харьковского государственного университета при активной поддержке со стороны Астрономического института АН Республики Узбекистан.

По многолетним наблюдениям среднее качество изображения, определяемое как размер изображения звезды на уровне 0.5 от максимальной интенсивности излучения (FWHM, Full Width at Half Maximum), составляет $0.69''$ (рис. 1), а количество ясного времени достигает 2000 наблюдательных часов в год [2, 3].

АЗТ-22 имеет оптическую систему квази-Ричи–Кретьена с вогнутым главным гиперболи-

© А. В. Сергеев, О. А. Бурхонов, В. Н. Дудин, А. П. Железняк, Ю. Н. Круглый, И. Е. Молотов, В. М. Шулга, Ш. А. Эгамбердиев, В. В. Коничек, А. В. Кочетов, 2014

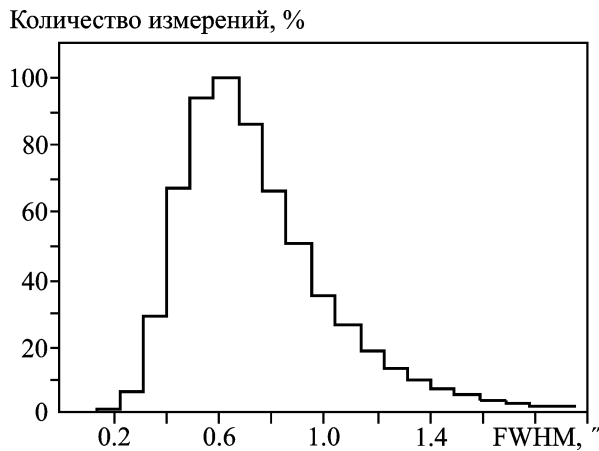


Рис. 1. Гистограмма распределения измеренных значений величины атмосферного замытия точечного источника (FWHM) в Майданакской обсерватории [2]

ческим зеркалом и сменными выпуклыми вторичными гиперболическими зеркалами. В системе Ричи–Кретьена исправлены сферическая аберрация и кома, а максимальный размер полезного поля зрения ограничивается астигматизмом.

Главное зеркало, в комбинации со сменными вторичными выпуклыми гиперболическими зеркалами, дает две системы с разным масштабом изображения: “короткий фокус” с относительным отверстием 1:7.7 и “длинный фокус” с относительным отверстием 1:17. Система 1:17 оснащена линзовым корректором, исправляющим астигматизм. Основной рабочей оптической системой АЗТ-22 в данный момент является “короткий фокус” 1:7.7.

3. Система автоматического гидирования

Обширная база данных, полученных с использованием ПЗС-приемников в двух фокальных комбинациях системы Ричи–Кретьена АЗТ-22, позволяет оценить характеристики системы ведения телескопа путем измерения и анализа координат зарегистрированных изображений звезд.

Изменение координат звезд в серии последовательных изображений при фиксированных координатах наведения телескопа может быть вызвано регулярной и случайной рефракцией, ветровыми нагрузками, а также техническими причинами, такими как погрешность установки

часовой оси телескопа, нестабильность частоты привода часового ведения, механические и термические деформации узлов телескопа и элементов оптической схемы.

Из наблюдений установлено, что при времени экспозиции более 5 мин систематический уход телескопа может составить величину порядка 1", что приводит к заметной потере реального разрешения телескопа. Проведенный анализ погрешностей системы ведения АЗТ-22 показал, что автоматическое гидирование, даже с невысокой частотой срабатывания ($\sim 1 \div 0.1$ Гц), позволит устранить ряд систематических и периодических ошибок, приводящих к заметному ухудшению функции рассеяния точки (ФРТ) зарегистрированных изображений.

В августе 2006 г. телескоп был оснащен системой автоматического гидирования (автогидом), разработанной и установленной командой харьковских астрономов в рамках работ по гранту УНТЦ (проект U127), см. рис. 2.

Автогид был установлен на крепежном фланце позиционного подшипника телескопа. Элементы крепления выполнены так, чтобы плоскость регистрации ПЗС-камеры, пристыкованной к автогиду, находилась в расчетной плоскости наилучших оптических изображений телескопа. Автогид имеет двухъярусную конструкцию: верхний и нижний фланцы соединяются с помощью отдельных прецизионных кареток, обеспечивающих перемещение по прямому восхождению и склонению.

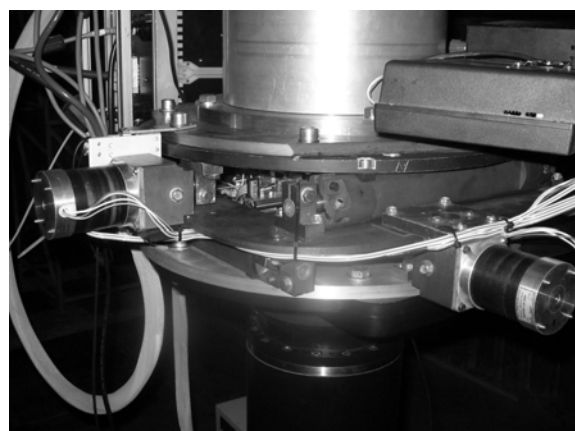


Рис. 2. Автогид, установленный в главном фокусе телескопа АЗТ-22

На нижнем фланце смонтирована двухкоординатная каретка, на которой перемещается небольшая ПЗС-камера, которая постоянно измеряет положение сравнительно яркой звезды поблизости от объекта наблюдений – звезды гидирования. Эта миниатюрная ПЗС-камера LCL 902K фирмы WATEC имеет высокую чувствительность и работает в телевизионном формате с временем экспозиции 40 мс. В телескопе свет от звезды гидирования направляется на эту камеру двумя маленькими зеркалами. Во время поиска подходящей звезды гидирования каретка с телевизионной камерой может перемещаться с помощью малых шаговых двигателей. Аналоговый телевизионный сигнал передается на управляющий компьютер, где установлена плата аналого-цифрового преобразователя.

Автогид компенсирует небольшие ошибки ведения часового механизма, гнущия трубы и вилки телескопа, а также эффекты атмосферной рефракции за время экспозиции. Гидирование проводится с частотой $1 \div 0.1$ Гц по звезде гидирования, находящейся в поле зрения вблизи изучаемого объекта. Основные характеристики автогида для “короткого фокуса” 1:7.7 приведены в табл. 1.

4. Исследование характеристик ПЗС камеры ML 09000-65

ПЗС камера ML 09000-65 фирмы FLI (www.fli-cam.com), установленная на телескопе АЗТ-22, была предоставлена проектом ISON (International Scientific Optical Network) [4]. Установка ПЗС камеры, оснащенной турелью со стандартными BVRI фильтрами (система Бесселя), была выпол-

Таблица 1. Основные характеристики автогида

Параметры	Линейная мера, мм	Угловая мера
Шаг гидирования	0.005 мм	0.09"
Диапазон гидирования	± 2.5 мм	$\pm 45''$
Поле поиска звезды гидирования: по прямому восхождению по склонению	115 мм	35'
	45 мм	14'
Предельная звездная величина звезд, пригодных для гидирования	13 звездная величина	

нена в июле 2012 г. совместно украинскими и узбекскими астрономами.

Камера имеет ПЗС матрицу KAF-09000 фирмы Kodak размером 3056×3056 пикселей, с размером пикселя 12×12 мкм. ПЗС матрица охлаждается элементами Пелтье. Разность температуры окружающей среды и температуры матрицы составляет 60 °С. Полученные ПЗС изображения передаются от камеры к компьютеру по интерфейсу USB 2.0 в двух режимах – с частотами 1 и 8 МГц. В режиме с частотой 1 МГц время считывания полного кадра составляет около 10 с.

Наблюдения в “коротком фокусе” телескопа с использованием данной камеры обеспечивают угловое поле зрения $11' \times 11'$. Масштаб изображений равен $0.214''$ на пиксель. Рабочая температура ПЗС матрицы для летнего сезона составила минус -25 °С. Все изображения объектов, а также калибровочные изображения смещения нуля (bias), темнового тока (dark) и равномерно освещенного поля (flat-field) были получены при этой же температуре.

Исследование кадров смещения нуля (bias) показало изменение среднего значения уровня смещения от ночи к ночи на $10 \div 15$ отсчетов АЦП, что составляет ~ 0.5 % от типичного уровня в 2100 отсчетов. Использование режима overscan в программе, управляющей работой камеры, позволяет получать кадры, включающие как сами объекты, так и дополнительные полосы по краям изображения, содержащие значения смещения нуля.

Результаты исследования кадров темнового тока показали, что 99.99 % пикселей поля за время экспозиции в 1 мин накапливают темновой сигнал не выше 50 единиц АЦП. Максимальный темновой сигнал отдельных “горячих” пикселей не превышает 4000 отсчетов АЦП за это же время экспозиции.

Полученные мастер-кадры равномерно освещенного поля в BVRI фильтрах показывают небольшое виньетирование к краям поля, составляющее менее 2 % и, по-видимому, обусловленное геометрией оправ фильтров. На кадрах равномерного поля видны следы поглощения потока излучения на микрочастицах пыли, находящихся как на самих фильтрах, так и на входном окне ПЗС камеры.

Процедура коррекции неравномерности чувствительности при первичной обработке изображений позволяет достаточно эффективно устранить все наблюдаемые неоднородности.

5. Полученные результаты

В рамках совместной украинско-узбекской программы астрономических наблюдений на телескопе АЗТ-22 было проведено тестирование возможностей ПЗС камеры ML09000-65.

Как известно, разрешающая способность крупных телескопов при наблюдениях с Земли ограничивается отнюдь не дифракцией, а атмосферным замытием изображения. Эффективную разрешающую способность при реальных наблюдениях называют качеством изображения. Для количественной оценки качества изображения используют значение размера регистрируемой ФРТ на уровне 0.5 интенсивности излучения (FWHM). Лучшие изображения, полученные в период тестирования ПЗС камеры FLI, имеют значения FWHM менее $0.55''$. Рис. 3 демонстрирует фрагмент изображения поля вблизи гравитационно-линзированного квазара SBS 1520+530, полученного в июле 2012 г. на АЗТ-22. Значение FWHM, которое было измерено по изображению звезды сравнения S1, составляет $0.53''$.

Для оценки проникающей способности телескопа в комбинации с данной камерой были получены изображения скопления галактик Abell 2317 [5]. Это скопление расположено достаточно близко к полярной области, поэтому имеется возможность проводить его наблюдения большую часть года. В скопление входит более 150 галактик, имеющих блеск порядка 18 звездной величины. Расстояние до скопления составляет около 500 Мпк, а его видимый угловой радиус равен приблизительно $13'$.

На рис. 4 представлен фрагмент изображения Abell 2317 в фильтре R, полученный путем суммирования 15 кадров с временем экспозиции 600 с каждый. Качество изображения (FWHM) на суммарном изображении составляет $0.8''$.

Отождествление объектов и оценка проникающей способности телескопа были выполнены при помощи каталога звезд UCAC3 (The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog). Среднеквадратичная величина флуктуации фона неба на суммарном изображении приблизительно равна 3.3 отсчета АЦП. Самые слабые объекты,

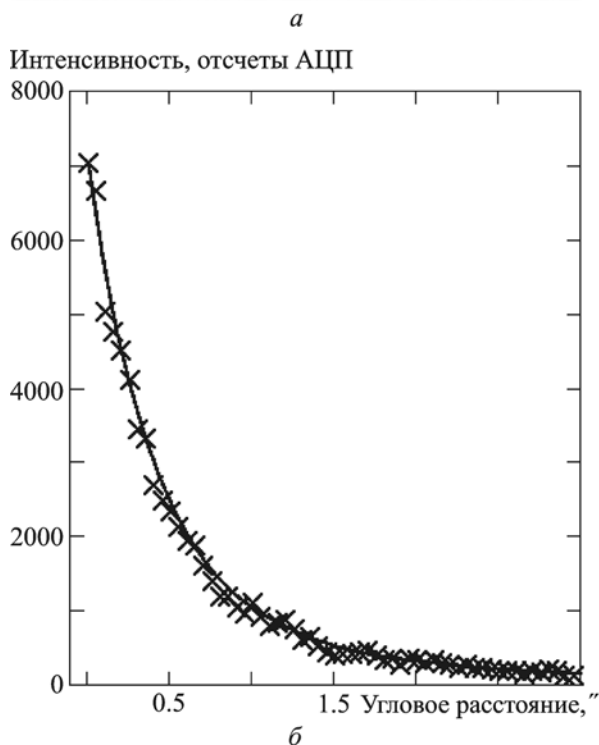
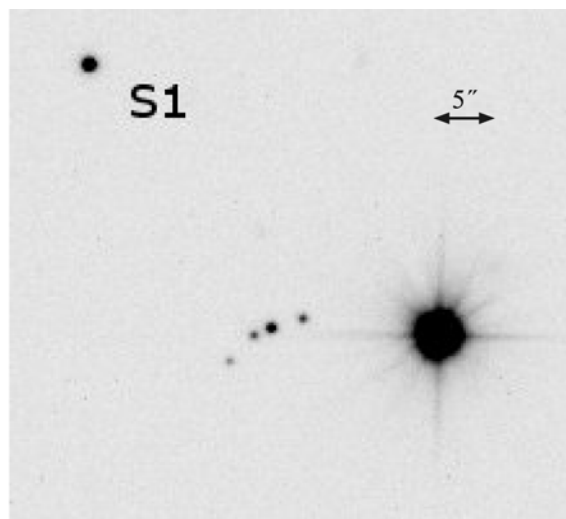


Рис. 3. Изображение гравитационно-линзированного квазара SBS 1520+530, полученное в июле 2012 г. на АЗТ-22 в фильтре R с временем экспозиции 300 с (а); радиальный профиль распределения интенсивности излучения в изображении звезды S1 (б)

уверенно детектируемые на изображении, имеют 24 звездную величину при отношении сигнал/шум около 10, что соответствует уровню 3 сигма относительно флуктуаций фона неба. Таким образом, проникающая способность телескопа АЗТ-22 в комбинации с ПЗС камерой ML09000-65 при суммарном времени экспозиции 2.5 ч в фильтре R соответствует 24 звездной величине (рис. 4).

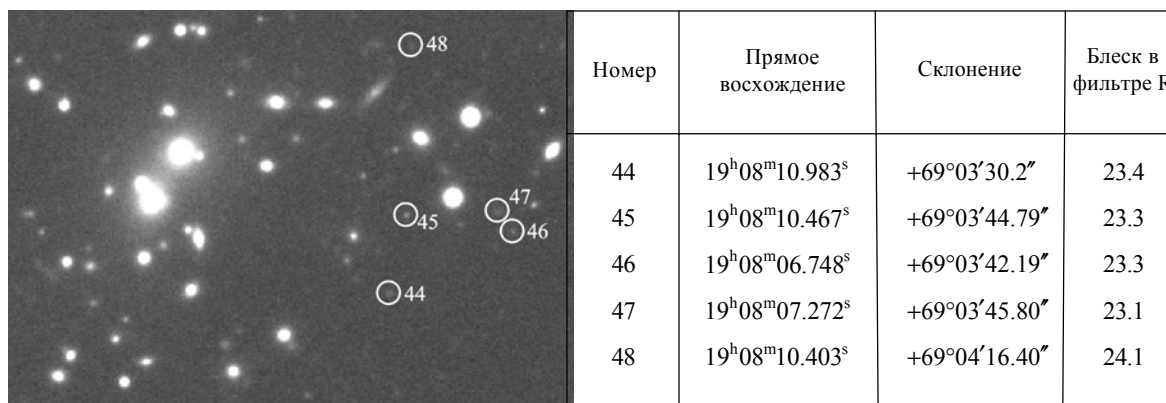


Рис. 4. Фрагмент усредненного изображения скопления галактик Abell 2317 в фильтре R при эквивалентном времени экспозиции 2.5 ч. Кругжками с номером выделены галактики, оценки блеска которых приведены в таблице справа

Оценка предельно достижимой фотометрической точности была сделана путем наблюдения явления прохождения (транзита) экзопланеты в системе Wasp-2 [6].

Звезда в экзопланетной системе Wasp-2 имеет блеск 12 звездных величин в фильтре V. Вокруг звезды обращается планета, плоскость обращения которой совпадает с плоскостью луча зрения земного наблюдателя, поэтому в этой системе периодически наблюдается явление прохождения планеты по диску звезды. В момент транзита планеты наблюдаемый поток излучения от звезды уменьшается на несколько процентов.

Наблюдения системы Wasp-2 на АЗТ-22 выполнены вблизи предвычисленного момента транзита 28 июля 2012 г. в течении трех часов. В ходе наблюдений получена серия последовательных изображений участка неба, содержащего наблюдаемую звезду и звезды сравнения в спектральной полосе R с временем экспозиции 20 с.

Качество изображения в течение наблюдений (FWHM) было несколько лучше 1". При выбранной экспозиции сигнал в максимуме интенсивности изображения звезды приближался к границе динамического диапазона ПЗС камеры (65535 отсчетов АЦП), поэтому была выполнена расфокусировка изображения до значения FWHM порядка 1.5". При этом суммарный поток излучения в изображении звезды за время экспозиции составлял около 10⁶ отсчетов, что обеспечивало отношение сигнал/шум порядка 1000.

Диапазон изменения блеска звезды во время прохождения планеты по ее диску составил примерно 0.02 звездной величины. Среднеквадра-

тичная флуктуация (сходимость) измерений блеска наблюдаемой звезды от кадра к кадру, которую можно рассматривать как оценку точности фотометрии, равна 0.002 звездной величины.

6. Выводы

Телескоп АЗТ-22, оснащенный ПЗС камерой ML09000-65, способен получать качественные изображения астрономических объектов и решать широкий круг астрономических задач. Высококачественная оптика телескопа, а также прекрасные астроклиматические условия Майданакской обсерватории позволяют получать отдельные изображения с FWHM лучше 0.6". Оснащенность телескопа гидрирующим устройством дает возможность получать глубокие снимки неба вплоть до 24 звездной величины.

Считается, что наземные наблюдения не могут давать точность фотометрии лучше 0.001 звездной величины из-за эффекта мерцания в земной атмосфере. Полученные нами данные фотометрии прохождения планеты по диску звезды приближаются к этому пределу. Дальнейшее улучшение точности фотометрии возможно только при усреднении данных фотометрии за более длинные промежутки времени.

В режиме работы телескопа с "коротким фокусом" и данной ПЗС камерой, имеющей размер пикселя 12 мкм, что соответствует масштабу 0.215" на пиксель, примерно 98 % света, приходящего от точечного источника, попадает на площадь 3×3 пикселя. Это ограничивает разрешающую способность телескопа и может огра-

ничивать точность ФРТ-фотометрии. Для задач прецизионной фотометрии имеется возможность работы телескопа с “длинным фокусом” 1:17 с масштабом порядка 0.1” на пиксель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsvetkova V. S., Vakulik V. G., Shulga V. M., Schild R. E., Dudinov V. N., Minakov A. A., Nuritdinov S. N., Artamonov B. P., Kochetov A. Ye., Smirnov G. V., Sergeyev A. A., Konichek V. V., Sinelnikov I. Ye., Zheleznyak A. P., Bruevich V. V., Gaisin R., Akhunov T., and Burkhonov O. PG1115+080: variations of the A2/A1 flux ratio and new values of the time delays // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2010. – Vol. 406, Is. 4. – P. 2764–2776.
2. Ehgamberdiev S. A., Baijumanov A. K., Ilyasov S. P., Sarazin M., Tillayev Y. A., Tokovinin A. A., and Ziad A. The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. – 2000. – Vol. 145, No. 2. – P. 293–304.
3. Artamonov B. P., Bruevich V. V., Gusev A. S., Ezhkova O. V., Ibrahimov M. A., Ilyasov S. P., Potanin S. A., Tillaev Yu. A., and Ehgamberdiev Sh. A. Seeing and atmospheric extinction at Mt. Maidanak observatory from observations with the 1.5-m AZT-22 telescope // Astron. Rep. – 2010. – Vol. 54, Is. 11. – P. 1019–1031.
4. Molotov I. E., Agapov V. M., Kouprianov V. V., Titenko V. V., Khutorovsky Z. N., Guseva I. S., Romyantsev V. V., Biryukov V. V., Litvinenko E. A., Borisov G. V., Sukhanov S. A., Burtsev Yu. V., Kornienko G. I., Bakhtigaraev N. S., Rusakov O. P., Schelkov P. O., Erofeeva A. V., Krugly Yu. N., Ivaschenko Yu. N., Borisova N. N., Irsambetova T. R., Zalles R., Grebetskaya O. N., Vikhrstenko A. M., Aliev A., Minikulov N. H., Gulyamov M. I., Inasaridze R. Ya., Ibrahimov M. A., Erofeev D. V., Loskutnikov V. S., Erofeev A. D., Gubin E. G., Dorokhov N. I., Tsibizov O. Yu., Likh Yu. S., Chekalin O. N., Ryback A. L., Abdulloev S. H., Ermakov B. K., Yurkov V. V., Matrenitsky D. V., and Semenchuk S. A. International scientific optical network // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулковке. – 2009. – № 219, Вып. 1. – С. 231–248.
5. Abell George O., Corwin Harold G., Jr., and Olowin Ronald P. A catalog of rich clusters of galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. – 1989. – Vol. 70. – P. 1-138.
6. Collier Cameron A., Bouchy F., Hébrard G., Maxted P., Pollacco D., Pont F., Skillen I., Smalley B., Street R. A., West R. G., Wilson D. M., Aigrain S., Christian D. J., Clarkson W. I., Enoch B., Evans A., Fitzsimmons A., Fleenor M., Gillon M., Haswell C. A., Hebb L., Hellier C., Hodgkin S. T., Horne K., Irwin J., Kane S. R., Keenan F. P., Loeillet B., Lister T. A., Mayor M., Moutou C., Norton A. J., Osborne J., Parley N., Queloz D., Ryans R., Triaud A. H. M. J., Udry S., and Wheatley P. J. WASP-1b and WASP-2b: two new transiting exoplanets detected with SuperWASP and SOPHIE // Monthly Not. R. Astron. Soc. – 2007. – Vol. 375, Is. 3. – P. 951–957.

А. В. Сергеев^{1,2}, О. А. Бурхонов³, В. Н. Дудінов², А. П. Железняк², Ю. М. Круглий², І. Є. Молотов⁴, В. М. Шульга¹, Ш. А. Егамбердієв³, В. В. Конічек², О. В. Кочетов²

¹Радиоастрономічний інститут НАН України, вул. Червонопрапорна, 4, м. Харків, 61002, Україна

²НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, вул. Сумська, 35, м. Харків, 61022, Україна

³Астрономічний інститут ім. Улугбека Академії наук Республіки Узбекистан, вул. Астрономічна, 33, м. Ташкент, 100052, Узбекистан

⁴Інститут прикладної математики ім. М. В. Келдиша РАН, Міуська пл., 4, м. Москва, 125047, Росія

МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕЛЕСКОПА AZT-22 МАЙДАНАЦЬКОЇ ВИСОКОГІРНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ: РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ

Продемонстровано, що телескоп AZT-22, оснащений ПЗЗ камерою ML09000-65, здатен отримувати якісні зображення астрономічних об'єктів та розв'язувати широке коло спостережних задач. Дифракційна якість оптики телескопу, а також прекрасні астрокліматичні умови обсерваторії на горі Майданак дозволяють отримувати зображення з роздільною здатністю краще 0.6". Точність диференційної фотометрії ізольованої зорі становить 0.002 зоряної величини. Система автоматичного гідуювання телескопу забезпечує отримання тривалих експозицій із впевненою ресстрацією об'єктів аж до 24 зоряної величини.

А. В. Сергеев^{1,2}, О. А. Бурхонов³, В. Н. Дудінов², А. П. Железняк², Ю. М. Круглий², І. Є. Молотов⁴, В. М. Шульга¹, Ш. А. Егамбердієв³, В. В. Конічек², О. В. Кочетов²

¹Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Chervonopraporna St., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Institute of Astronomy of V. Karazin National University of Kharkiv, 35, Sumska St., Kharkiv, 61022, Ukraine

³Ulug Bek Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences, 33, Astronomicheskaya St., Tashkent, 100052, Uzbekistan.

⁴Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, 4, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia

MODERNIZATION OF AZT-22 TELESCOPE OF MAIDANAK HIGH-ALTITUDE OBSERVATORY: TESTING RESULTS

The AZT-22 telescope, equipped with the ML09000-65 CCD camera, has shown to be capable of obtaining high-quality images of astronomical objects and thus solving a wide range of observational tasks. Diffraction-limited telescope optics together with the excellent seeing conditions at Mt. Maidanak Observatory allows recording images with the seeing quality better than 0.6 arcsec. The accuracy of differential photometry for an isolated star is 0.002 stellar magnitude. Automatic guiding system of the telescope provides obtaining long exposures with reliable recording of objects down to 24 stellar magnitude.

Статья поступила в редакцию 13.11.2013