

УДК 520.16

КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ И АТМОСФЕРНАЯ ЭКСТИНКЦИЯ НА МАЙДАНАКСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С 1.5-М ТЕЛЕСКОПОМ АЗТ-22

© 2010 г. Б. П. Артамонов¹, В. В. Бруевич¹, А. С. Гусев¹, О. В. Ежкова¹,
М. А. Ибрагимов², С. П. Ильясов², С. А. Потанин¹, Ю. А. Тиллаев², Ш. А. Эгамбердиев²

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Поступила в редакцию 11.03.2010 г.; принята в печать 08.06.2010 г.

С использованием данных наблюдений (более 20 000 изображений звезд в полосах $UBVRI$), полученных с помощью ПЗС-камер на 1.5-м телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории ИА АН РУз в 1996–2005 гг., определено реальное качество изображения на телескопе ($\epsilon = 1.065''$ в полосе V). Величина характерного качества изображения, приведенного к единичной воздушной массе, $\epsilon_{med}^V(M(z) = 1)$ составляет $0.945''$. Построены цветовые уравнения для используемых на телескопе ПЗС-матриц. Определены коэффициенты атмосферной экстинкции в различных фотометрических полосах. В полосе V средняя величина атмосферной экстинкции составляет $0.20^m \pm \pm 0.04^m$. Время установления стабильных условий, как в свободной атмосфере, так и в подкупольном пространстве АЗТ-22, составляет 2–2.5 ч с момента окончания астрономических сумерок. Для ночей с $\epsilon_{med}^V < 0.9''$ наблюдается постоянная разница между качеством изображения, полученном на АЗТ-22, и качеством изображения, синхронно измеренном с помощью прибора для определения дифференциальных дрожаний звездных изображений DIMM, которая составляет $\sim 0.1^m$.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 60-е гг. астрономическим сообществом в разных странах были организованы поиски перспективных мест на планете для установки телескопов нового поколения диаметром 3–4 м. Были найдены места с большой продолжительностью ясного времени и хорошим качеством изображения на западном высокогорном плато Анд в Чили, на вулканических вершинах Гавайских и Канарских островов. Следуя мировой тенденции, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) в конце 60-х гг. начал проводить первые работы по исследованию астроклимата в наиболее перспективных местах Средней Азии: на горе Санглок (Таджикистан) и на горе Майданак (Узбекистан). История исследования обеих вершин подробно описана Щегловым [1] — он являлся энтузиастом изучения астроклимата и строительства университетской обсерватории в Средней Азии.

Астрономический институт им. Улугбека АН Узбекистана (АИ АН РУз) в те же годы организовал астроклиматические исследования в разных районах Узбекистана и совместно с ГАИШ МГУ провел

наблюдения на горе Майданак, которая расположена в Кашкардарьинской области Узбекистана на отрогах Байсунского хребта на высоте 2600 м. Ближайшие города Китаб и Шахрисабз находятся на расстоянии 70–80 км в северном направлении от горы Майданак и закрыты хребтом Тахта высотой 3000 м. Световая подсветка от этих городов наблюдается на севере на небольшой высоте, в южном и восточном направлениях подсветки нет до линии горизонта, на западе горы постепенно понижаются, и основные поселения находятся в степной части на больших расстояниях от горы Майданак. В качестве одного из основных критериев выбора места для установки телескопа была использована концепция изолированной вершины, которой придерживался Шток [2] для выбора нескольких вершин в Чили для Европейской южной обсерватории (ESO). Изолированная вершина в высотном слое 2000–3000 м должна находиться в зоне свободной атмосферы [3]. Почвенный слой в ночное время быстро остывает за счет радиационного инфракрасного излучения и охлаждает тонкий приземный слой воздуха, который стекает вниз по склонам изолированной горы.

В те же годы ГАИШ МГУ обсуждал перспек-

тивы создания университетского универсального телескопа размером около 1.5 м, который был бы способен решать многие наблюдательные задачи от получения широкоугольных снимков до спектроскопических исследований. В конечном итоге было разработано техническое задание совместно с ЛОМО на изготовление 1.5-м телескопа системы Ричи—Кретьена, который получил название АЗТ-22. Одновременно был разработан проект конструкции купола и башни в ЦНИИИстальконструкций. Телескоп АЗТ-22 был установлен на горе Майданак в конце 80-х гг.; первый свет был получен в 1991 г. Однако телескоп не был сдан ЛОМО в эксплуатацию, так как распад СССР явился причиной остановки пусковых работ. В настоящее время телескоп АЗТ-22 находится в составе Майданакской обсерватории АИ АН РУз. Начиная с 1995 г. на нем проводятся систематические наблюдения — в частности, по совместным программам АИ АН РУз и ГАИШ МГУ.

2. ТЕЛЕСКОП АЗТ-22

2.1. Монтровка телескопа АЗТ-22

Телескоп АЗТ-22 (ЛОМО) представляет собой вариант вилочной экваториальной монтровки, которая имеет небольшие габариты по сравнению с английской и немецкой монтровками. Была выбрана оптическая система Ричи—Кретьена со светосилой 1 : 8, имевшая в то время большую популярность.

Труба телескопа была изготовлена как классическая рама типа Сюррерье. Ведение телескопа по часовой оси осуществляется червячной парой с диаметром шестерни 1.5 метра. Червячная пара несет большие нагрузки, так как выполняет часовое ведение и грубое наведение телескопа. Аналогичная червячная пара была установлена на оси склонения. В течение 20-летней эксплуатации телескопа не было выявлено механических повреждений, что указывает на высокое качество изготовления червячных пар. Наведение телескопа на объект выполняется с помощью аналоговой системы сельсинов. На осях главных червяков установлены два цифровых датчика “угол—код”, с помощью которых можно организовать цифровое наведение телескопа по прямому восхождению и склонению.

В 1995 г. в ГАИШ МГУ был разработан и изготовлен контроллер для цифрового наведения телескопа, но его испытания показали, что необходимым условием нормальной работы цифрового наведения должно быть проведение предварительной юстировки всех редукторов для минимизации механических люфтов. Исследования ошибок часового ведения телескопа АЗТ-22 было проведено

одним из авторов [4] в 2005 г. во время тестирования оптического компенсатора наклонов волнового фронта. Периодические ошибки часового ведения возникают при вращении главного червяка и во вторичных редукторах, но в сумме они дают среднюю величину около 0.3". Использование автогида на основе описанного выше прибора, работающего на высоких частотах, может компенсировать указанные малые смещения по часовому углу до величин, находящихся ниже значений оптических aberrаций телескопа. Дифференциальные гнутя вилки телескопа приводят к систематическим смещениям изображения в фокальной плоскости, особенно при низких высотах, что ограничивает время экспозиции наблюдаемых объектов до 3–5 мин с ПЗС-камерами. Астрономы из Харьковского национального университета разработали и установили в 2007 г. автоматическую платформу с автогидом, на которую крепится ПЗС-камера, что позволило существенно увеличить время экспозиции.

2.2. Оптические системы АЗТ-22

Расчеты оптических систем телескопа АЗТ-22 приведены в работе оптиков ЛОМО [5] и независимо — в работе [6]. Главной оптической системой телескопа АЗТ-22 была выбрана двухзеркальная квазисистема Ричи—Кретьена со светосилой 1:8 с двухлинзовым кварцевым корректором для реализации 1.5-градусного широкого поля. Был рассчитан и изготовлен пятилинзовый кварцевый редуктор со светосилой 1 : 3 для поля в 1°. Для оптической системы 1 : 17 был рассчитан двухлинзовый кварцевый корректор с другим вторичным зеркалом для поля размером 100 мм. Была также рассчитана система четырехзеркального фокуса Кудэ со своим вторичным зеркалом. Необходимо отметить, что такой набор оптических систем был обусловлен требованием создать универсальный университетский телескоп. В настоящее время в наблюдениях используется система 1 : 8 без корректора и иногда — система 1 : 17 с корректором. Современные технические параметры ПЗС-камер не дают возможности использовать в системе 1 : 8 корректор широкого поля по причине небольшого расстояния между последней линзой и фокальной плоскостью. Для использования ПЗС-камер с большой матрицей (4 К × 4 К) в системе 1 : 8 необходимо рассчитать и изготовить новый корректор для поля около 20'. С.А. Потанин рассчитал двухзеркальный кварцевый корректор для системы 1 : 8 телескопа АЗТ-22 с абберационными ошибками около 0.2" по всему полю в широком диапазоне длин волн (3500–9500 Å) и большим расстоянием между последней линзой корректора и фокальной плоскостью, что позволяет установить устройство с фильтрами и большую ПЗС-камеру.

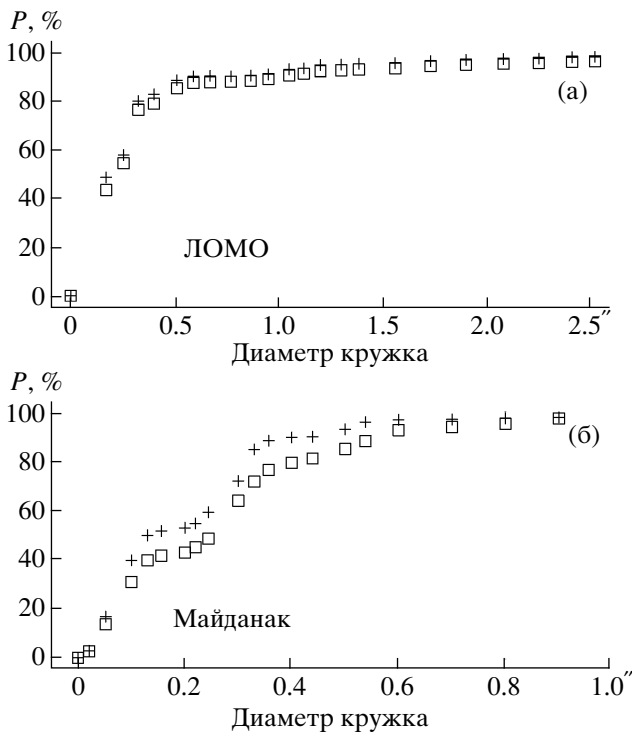


Рис. 1. Концентрация энергии P в кружке для оптической системы 1 : 8 без корректора телескопа АЗТ-22. Показаны расчетная концентрация энергии (крестики) и концентрация энергии, измеренная во время цеховых испытаний (квадратики) в ЛОМО (а) и в полевых условиях (б).

Контроль изготовленных оптических систем телескопа был проведен в цеховых условиях ЛОМО с использованием неравноплечного интерферометра, где одним плечом является исследуемая оптическая система телескопа АЗТ-22, а другим — опорное сферическое зеркало. Для коррекции разности хода больше длины волны между оптической системой телескопа и контрольной сферой были использованы специально рассчитанные корректоры. Измерения полученных интерферограмм были использованы для получения параметров оптических систем телескопа и сравнения с расчетными. Результаты цеховых испытаний в ЛОМО всех оптических систем телескопа АЗТ-22 приведены в препринте [7], и они показывают высокое качество изготовления оптики в ЛОМО. Для примера на рис. 1а показано распределение энергии в кружке (в сек. дуги) для системы 1 : 8 без корректора. Расчетная концентрация света отличается от цеховых измерений на величину около 2%–3%, что несомненно указывает на почти дифракционную оптику телескопа АЗТ-22, созданного в ЛОМО. Остальные оптические системы телескопа показали подобные результаты.

Большой проблемой для реализации высококачественной оптики телескопа является юстировка оптической системы на месте установки телескопа, а также правильная работа системы разгрузок главного зеркала. Для проверки юстировки оптики и работы разгрузок С.А. Потанин провел в 2008 г. исследование качества оптики АЗТ-22 с помощью датчика волнового фронта. Методика изучения качества оптики телескопов описана в [8]. На рис. 1б для сравнения с расчетными и цеховыми испытаниями оптической системы 1 : 8 без корректора телескопа АЗТ-22 приводится распределение концентрации энергии в кружках разного размера, измеренное в Майданакской обсерватории. Разность между расчетной и измеренной концентрацией энергии в разных кружках для оптической системы 1 : 8 достигает 10%. Для улучшения оптических характеристик телескопа АЗТ-22, т.е. доведения до характеристик, полученных во время цеховых испытаний, необходимо провести более тщательную юстировку вторичного и главного зеркал и регулировку разгрузок главного зеркала. Тем не менее, телескоп АЗТ-22 Майданакской обсерватории является почти дифракционным и, очевидно, лучшим телескопом, изготовленным в ЛОМО, если учитывать также высокое качество механики телескопа.

Необходимо отметить, что юстировкой зеркал телескопа АЗТ-22 начал заниматься О.И. Бугаенко в 1991–1992 гг. Он разработал методику и специальные приспособления для юстировки главного зеркала путем совмещения оптической оси и механической оси вращения подшипника, на фланец которого устанавливается приемная аппаратура (ПЗС-камера и пр.). Юстировка вторичных зеркал состояла в совмещении их оптических осей с осью главного зеркала. В 2008 г. группа астрономов из Харьковского национального университета под руководством В.Н. Дудинова повторила работы по юстировке зеркал телескопа АЗТ-22, усовершенствовав метод О.И. Бугаенко. Один из авторов этой статьи (С.А. Потанин) принимал участие в данной работе.

3. АСТРОКЛИМАТ ГОРЫ МАЙДАНАК И ПОДКУПОЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ТЕЛЕСКОПА АЗТ-24

ГАИШ МГУ провел в 1975 г. астроклиматические измерения западной и восточной вершин горы Майданак, разделенных расстоянием около 10 км. Результаты сравнения двух вершин приведены в работе [9]. Обе вершины оказались близки по параметрам, но западная вершина являлась более удобной для строительства, и она была выбрана для обсерватории МГУ. Визуальные оценки качества изображения ϵ на обеих вершинах были

получены с помощью двухлучевого прибора при систематических наблюдениях Полярной звезды в летне-осенний период 1975 г., и они показали, что в среднем $\epsilon = 0.6''$. Центральная вершина горы Майданак находится в 4 км восточнее западной, и на ней установлены телескопы АЗТ-24, а также телескопы АЗТ-14 и Цейсс-600 АИ АН РУз. В данной работе мы употребляем название “Майданакская обсерватория”, имея в виду обсерваторию, базирующуюся на западной вершине горы Майданак. Исследования астроклимата центральной вершины были организованы и проведены в 60–70-х гг. сотрудниками АИ АН РУз и ГАИШ МГУ [1].

Результаты многочисленных исследований астроклимата горы Майданак в 60–70-х гг. были подтверждены в 1996–1999 гг. циклом наблюдений астроклимата современными методами [10, 11]. Прибор DIMM для измерений дифференциальных дрожаний звездных изображений был установлен рядом с 1.5-м телескопом АЗТ-22 Майданакской обсерватории на высоте 5 м над поверхностью. Результаты четырехлетних наблюдений дали среднюю величину качества изображения $0.69''$. Более поздние исследования атмосферы горы Майданак с помощью прибора MASS [12] показали значение качества изображения в свободной атмосфере $0.47''$ на высотах 0.5 км и выше над уровнем горы Майданак.

Для получения изображений с высоким угловым разрешением необходимо было создать проект купола телескопа, который не вносит значительных искажений в качество изображения. Такой проект купола для телескопа АЗТ-22 был разработан С.Б. Новиковым и А.А. Овчинниковым совместно с проектировщиками ЦНИИСтальконструкций [13]. Купол телескопа имеет диаметр 12 м и выполнен в виде двух оболочек с промежутком 80 см, что дает возможность термостатирования подкупольного пространства во время дневного нагрева и сохранения ночных температур. Внешняя оболочка собрана из гексагональных панелей (сэндвич из алюминия и пенопласта). На внутренних сторонах оболочек был напылен толстый слой пенополиуретана. Теплоизоляция предохраняет нагрев купола в дневное время и позволяет сохранять под куполом ночные температуры. В башне телескопа установлена вентиляционная система для всасывания воздуха свободной атмосферы через щель купола, позволяющая бороться с турбулентными потоками в подкупольном пространстве (охлаждение телескопа более холодным воздухом внешней среды) и устанавливающая квазиламинарный поток воздуха во время ночных наблюдений. Некоторые результаты работы вентиляционной системы телескопа АЗТ-22 Майданакской обсерватории обсуждались в работе [14].

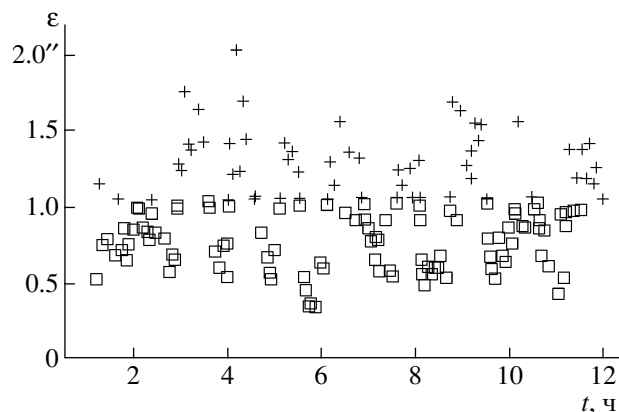


Рис. 2. Качество изображения ϵ в подкупольном пространстве телескопа АЗТ-24. Крестиками показаны изображения без включенной вентиляции, квадратиками — с включенной вентиляцией. Промежуток времени между включением и выключением вентиляции — около 30 мин.

Влияние подкупольного пространства на качество изображения было исследовано с участием авторов этой статьи, и оно описано в работе [15]. Для проведения эксперимента был использован телескоп АЗТ-24 с диаметром главного зеркала 1.1 м, установленный на центральной вершине горы Майданак на расстоянии 4 км от телескопа АЗТ-22. Конструкция башни телескопа АЗТ-24 подобна башне АЗТ-22, но имеются различия в конструкции купола. Под куполом башни АЗТ-24 был установлен прибор DIMM на южной стороне фундамента телескопа. Наблюдения качества изображения с DIMM проводились в ночь 26/27 сентября 1997 г. при включенной аппаратуре управления телескопом АЗТ-24. Под куполом башни имеется три мощные вентиляционные системы, которые создают поток внешнего воздуха через открытую щель купола и сбрасывают воздушный поток через воздухопроводы далеко от башни в ущелье. Подкупольное пространство имеет два источника нагрева: остаточный от дневного нагрева башни и телескопа и поступающий от включенной аппаратуры. DIMM измеряет размер дрожания изображения звезды в ПЗС-кадре и дает оценку качества изображения в угловых секундах. Результаты измерений приведены на рис. 2, где разными значками показаны измерения качества изображения в секунды во время сеансов включения и выключения мощной вентиляционной системы. Каждый сеанс имел продолжительность 30 мин, что позволило в течение ночи провести несколько сеансов. При выключенной вентиляции среднее качество изображения составляло $1.3''$, а при включенной вентиляции — $0.7''$. Также была изучена продолжительность стабилизации (выравнивания температур внешней среды и подку-

Таблица 1. Распределение количества ПЗС-изображений по годам и по используемым фильтрам

Годы	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>	Всего
1996	—	48	151	166	86	451
1997	—	674	945	1033	513	3165
1998	—	265	664	851	363	2143
1999	—	1266	300	1116	251	2933
2000	591	397	374	527	379	2268
2001	15	29	80	174	76	374
2002	629	513	807	899	632	3480
2003	248	247	606	1979	353	3433
2004	109	104	146	396	163	918
2005	279	275	296	1274	321	2445
Всего	1871	3818	4369	8415	3137	21610

польного пространства) качества изображения. С выключенной системой вентиляции она составляет около 3 ч, а с включенной — около 1.5–2 ч, но в последнем случае эта величина связана также со стабилизацией внешней атмосферы, зависящей от времени остывания почвы и атмосферы от дневного нагрева, которое также имеет длительность около 2 ч (см. ниже рис. 7а).

4. КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ТЕЛЕСКОПЕ АЗТ-22

4.1. Наблюдения и обработка данных

Отдельные оценки качества изображения на телескопе АЗТ-22 были приведены в работах [16–18] и последующих работах, связанных с мониторингом гравитационных линз.

Для оценки качества изображения по большой выборке наблюдательных данных, полученных на 1.5-м телескопе с помощью ПЗС-камер, мы использовали данные ПЗС-изображений (21 610 снимков) различных астрономических объектов в фильтрах *U*, *B*, *V*, *R* и *I*, имеющихся в ГАИШ МГУ. Наблюдения проводились в 1996–2005 гг. с использованием ПЗС-камеры TI 800 × 800 (1996–1999 гг.) и ПЗС-камеры SITe 2000 × 800 (2000–2005 гг.). Распределение данных по годам и по используемым фильтрам приведено в табл. 1. Оценки качества изображения на телескопе АЗТ-22 можно сравнить с данными прибора DIMM 1996–1999 гг., установленного рядом с башней АЗТ-22.

Качество изображения оценивалось по размерам звезд на ПЗС-снимках. За размер звезды

принималось значение ширины ее профиля на половине интенсивности (FWHM). Полученные значения пересчитывались затем в сек. дуги. Масштаб большей части используемых изображений составляет 0.2667"/пикс. (наблюдения в коротком фокусе 1 : 8). Часть наблюдений была выполнена в длинном фокусе 1 : 17 (масштаб 0.1333"/пикс.). Используемая в наблюдениях ПЗС-камера TI 800 × 800 имеет две моды: 800 × 800 и 400 × 400. Для последней моды масштаб изображений составляет 0.5333"/пикс. (наблюдения в коротком фокусе 1 : 8) и 0.2667"/пикс. (наблюдения в длинном фокусе 1 : 17).

Характерные экспозиции составляют для наших наблюдений 5–300 с.

4.2. Зависимость качества ПЗС-изображений от времени экспозиции и воздушной массы

Проведенный нами анализ данных показал, что для очень хороших изображений ($\epsilon < 0.8''$) при времени экспозиции менее 3 мин наблюдается слабая зависимость качества изображения объектов от времени экспозиции:

$$\epsilon(t) \approx (0.0003 - 0.0004)t + \text{const}, \quad (1)$$

где t — время экспозиции в секундах. Это соответствует отмеченной неточности ведения телескопа по оси часового угла, дающее смещение изображений объектов на 0.1"–0.2" за 2–3 мин. Для исключения зависимости $\epsilon(t)$ мы измеряли размеры звезд по оси склонений δ , не зависящие от длины экспозиции.

Для примера на рис. 3 представлен график зависимости качества изображения ϵ от времени экспозиции для 8 ночей с медианным значением качества изображения $\epsilon_{med}^V \leq 0.85''$ (5/6, 7/8, 9/10, 10/11 сентября 2002 г. и 23/24, 24/25, 25/26, 27/28 ноября 2003 г.), причем в выборке использовались изображения, полученные не ранее, чем через 3 ч после заката (всего 148 ПЗС-изображений в полосах *V* и *R*), чтобы исключить период наблюдений во время установления стационарного температурного режима под куполом.

Размеры изображений звезд зависят также от величины воздушной массы. На рис. 4 показан график зависимости качества изображения ϵ от воздушной массы $M(z)$ для той же выборки, что и на рис. 3. Для изображений с $\epsilon < 0.9''$ и воздушных масс $M(z) \equiv \sec z < 1.6$ качество изображения $\epsilon(z)$ удовлетворяет известной зависимости [19]

$$\epsilon(z) = \epsilon(0)M(z)^{3/5}. \quad (2)$$

Для выборки, представленной на рис. 4, $\epsilon(0) = 0.72''$. Мы не приводили значения ϵ к величине

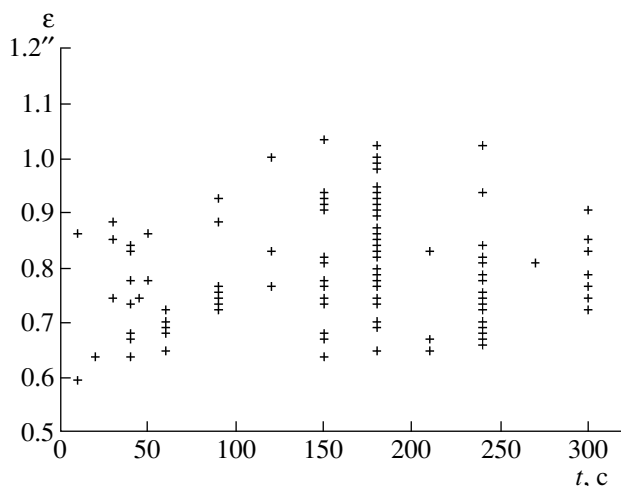


Рис. 3. Зависимость качества ПЗС-изображений ϵ в полосах V и R от времени экспозиции t для 8 ночей с хорошими ϵ_{med}^V .

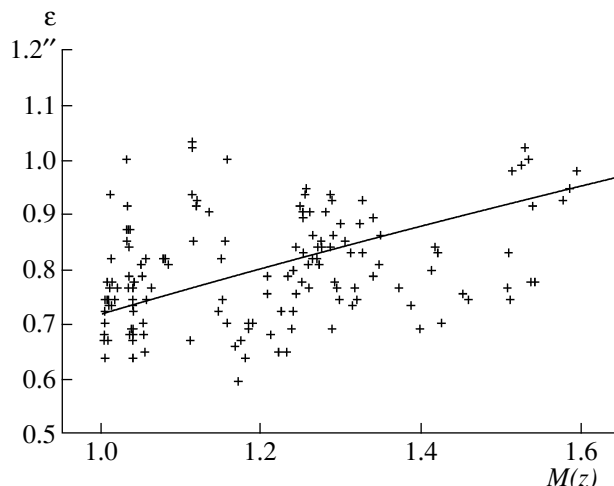


Рис. 4. Зависимость качества ПЗС-изображений ϵ в полосах V и R от величины воздушной массы $M(z)$ для 8 ночей с хорошими ϵ_{med}^V . Сплошная линия — зависимость $\epsilon(z) \sim M(z)^{3/5}$.

$M(z) = 1$, поскольку около 80% изображений имеют качество хуже $0.9''$ (см. ниже). Для них явной зависимости ϵ от $M(z)$ не наблюдается. С учетом того, что большинство наблюдений сделано на зенитном расстоянии $z < 40^\circ$, что соответствует воздушным массам $M(z) < 1.3$, размеры изображений звезд, приведенные к единичной воздушной массе, должны быть не более чем на 10%–15% меньше наблюдаемых.

Ниже, сравнивая качество изображения, полученное на телескопе, с результатами, полученными с помощью измерителя дифференциальных дрожаний атмосферы (DIMM), мы приведем наши данные к единичной воздушной массе согласно процедуре, описанной в работе [19].

4.3. Качество ПЗС-изображений в различных фильтрах

На рис. 5 представлены гистограммы распределения качества изображения, полученные в полосах U , B , V , R и I , а также интегральное распределение качества изображения в полосе V . Медианное значение качества изображения ϵ_{med} составляет от $1.23''$ в U до $0.91''$ в I . В полосе V качество изображения составляет $\epsilon_{med}^V = 1.065''$, меняясь от $0.5''$ до $2.4''$. Количество изображений с $\epsilon^V \leq 0.7''$ не превышает 2%, а с $\epsilon^V \leq 0.8''$ — 8% (рис. 5г). При качестве изображения $\epsilon > 2.3''$ – $2.7''$ фотометрические наблюдения на телескопе не проводятся. Как видно из рис. 5, учет зависимостей ϵ от времени экспозиции t и воздушной массы $M(z)$ не изменит полученные распределения ϵ и значения ϵ_{med} .

Полученные медианные значения качества изображения в различных фотометрических полосах хорошо удовлетворяют следующей зависимости ϵ от λ :

$$\epsilon(\lambda) = (10.52 \pm 0.03)\lambda^{-1/5} + \text{const}, \quad (3)$$

где λ — длина волны (в \AA) максимального пропускания соответствующего фильтра.

Используя медианные значения $M(z)_{med} = 1.22$ и $\epsilon_{med}^V = 1.065''$ для изображений, полученных на АЗТ-22, мы оценили характерное качество изображения, приведенное к единичной воздушной массе $\epsilon_{med}^V(M(z) = 1)$. Согласно уравнению (2), величина $\epsilon_{med}^V(M(z) = 1) = 0.945''$. Учитывая, что формула (2) верна строго говоря лишь для свободной атмосферы, к полученной оценке величины $\epsilon_{med}^V(M(z) = 1)$ следует относиться с известной долей осторожности.

Стоит отметить, что минимальные размеры изображений звезд по наблюдениям на телескопе АЗТ-22 превышают теоретический дифракционный радиус в 3–10 раз (для полос I – U , соответственно).

4.4. Распределение качества ПЗС-изображений по годам и месяцам

На рис. 6 представлены значения величины качества изображения в полосе V для каждой ночи наблюдений (бралось медианное значение ϵ_V за ночь). В общей сложности были обработаны данные для 378 ночей за период с июля 1996 г. по ноябрь 2005 г.

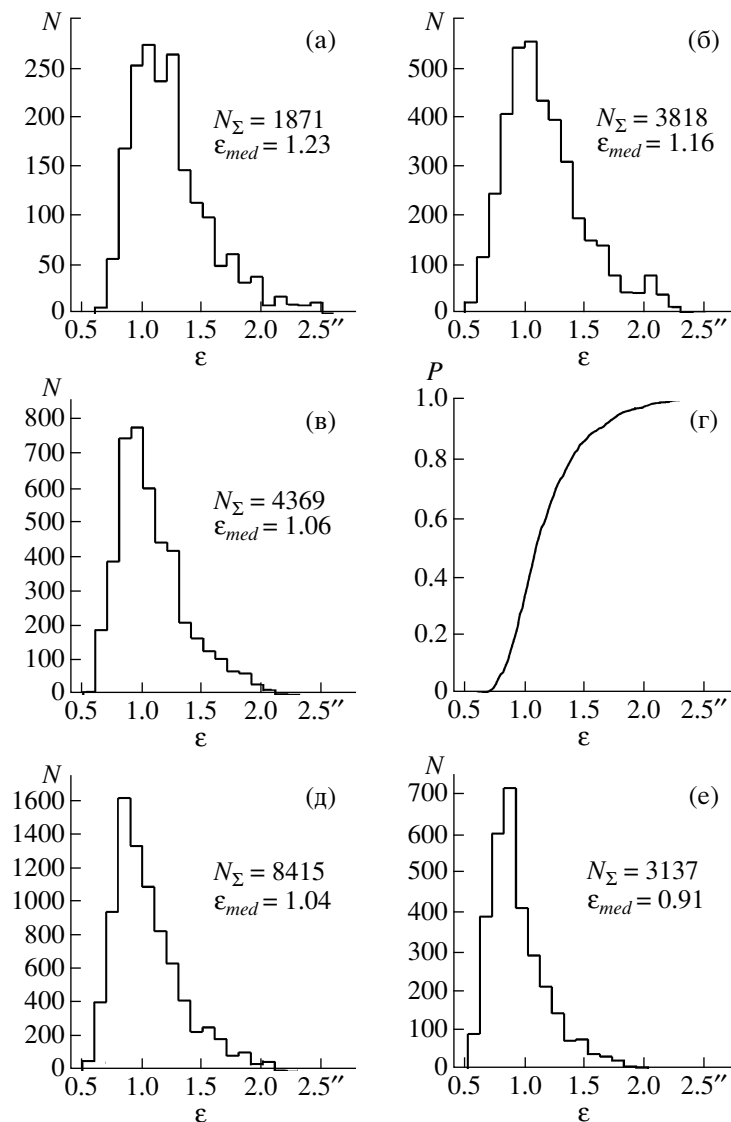


Рис. 5. Гистограммы распределения качества изображения ϵ , полученные в полосах U (а), B (б), V (в), R (д) и I (е), и интегральное распределение качества изображения в полосе V (г). Указано общее число изображений N_{Σ} и медианное среднее значение качества изображения ϵ_{med} для каждой полосы.

Разброс усредненных по ночам значений ϵ_V достаточно велик — от $0.6''$ до $2.3''$, однако для большинства ночей качество изображения составляет $0.8''$ – $1.4''$. За весь период наблюдений лишь для 2 ночей (0.5%) ϵ_V оказалось лучшим, чем $0.7''$ и для 31 ночи (7%) — лучшим, чем $0.8''$. Для 31 ночи (7%) $\epsilon_V > 1.6''$, однако в такие ночи делалось мало ПЗС-снимков. Это связано с тем, что для большинства наблюдательных программ, выполняемых на телескопе, требуется лучшее качество изображения.

В целом, распределение значений качества изображения, усредненных по ночам, повторяет как в целом, так и для отдельных продолжительных

сетов наблюдений распределение, построенное по отдельным изображениям (рис. 5в, 5г).

Для оценки долговременной динамики изменения качества изображения мы вычислили медианные значения ϵ_V для каждого года наблюдений (2003 г. был разбит на две части: зимний и летне-осенний периоды). Полученные данные также представлены на рис. 6.

Исключая данные 1996 г. (имеющем недостаточную статистику — всего 15 ночей наблюдений), качество изображения в среднем не менялось за исследуемый период. Диапазон значений ϵ_V составляет $0.97''$ (2005 г.) — $1.15''$ (1999 г.).

Эгамбердиевым и др. [11] было проанализировано распределение качества изображения на

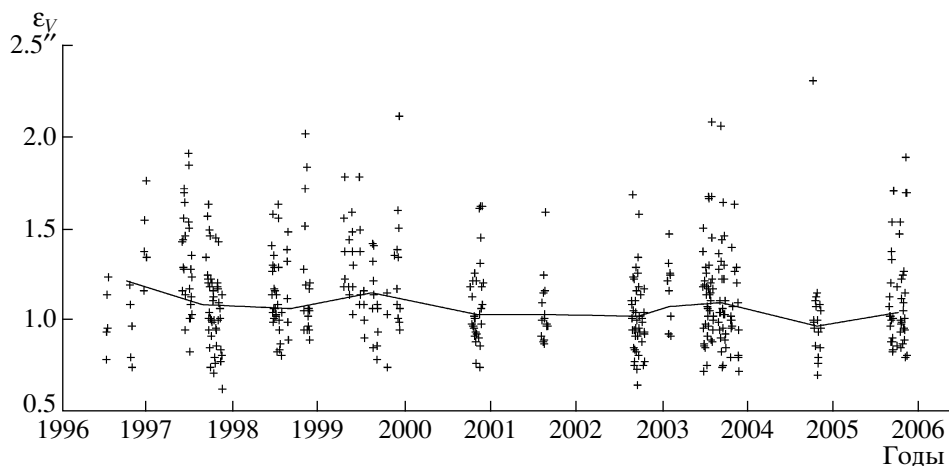


Рис. 6. Усредненные за ночь (крестики) и за год (ломаная линия) значения качества изображения ϵ в полосе V .

Майданакской обсерватории по месяцам. Проведенное нами исследование распределения по месяцам качества ПЗС-изображений, полученных на телескопе АЗТ-22 (табл. 2), повторяет в целом выводы работы [11]: наилучшее качество изображения достигается осенью (медианное $\epsilon_V = 1.01''$ для октябрьских наблюдений), наихудшие изображения (ϵ_V до $1.44''$ в апреле) наблюдаются в зимне-весенний период. Исключение, по нашим данным, представляют февральские наблюдения с относительно хорошим значением $\epsilon_V = 1.08''$ (худший месяц по данным [11]). Несоответствие между полученными нами результатами и выводами работы [11] по качеству изображения в феврале вероятно объясняется недостаточной статистикой имеющихся ПЗС-наблюдений (всего 7 ночей в 2003 г.). Детальное сравнение наших данных с результатами [11] будет проведено ниже.

4.5. *Время установления стабильных условий в свободной атмосфере и в подкупольном пространстве АЗТ-22*

Важную роль при планировании наблюдений играет время установления стабильных параметров ночной атмосферы (в первую очередь, температуры), поскольку качество изображения напрямую зависит от стабильности атмосферы в районе наблюдений. Оценки установления стабильности условий наблюдений под куполом телескопа АЗТ-22 даны в работе [14].

Для оценки времени установления стабильной атмосферы под куполом телескопа АЗТ-22 с включенной вентиляцией мы исследовали изменения качества ПЗС-изображений в полосах V и R в течении ночи для выборки из 8 ночей с $\epsilon_{med}^V \leq 0.85''$ (5/6, 7/8, 9/10, 10/11 сентября 2002 г. и 23/24,

24/25, 25/26, 27/28 ноября 2003 г.; всего 172 ПЗС-изображения). Отметим, что в данном случае мы используем значения ϵ , приведенные к единичной воздушной массе по формуле (2). Результаты, представленные на рис. 7б показывают, что характерное время установления стабильных условий в подкупольном пространстве составляет 2–2.5 ч с момента окончания астрономических сумерок. Для сравнения на рис. 7а приведены величины качества изображения, полученные в те же ночи с помощью

Таблица 2. Распределение качества ПЗС-изображений ϵ по месяцам

Месяц	Количество лет наблюдений	Количество ночей наблюдений	Всего изображений	ϵ_{med}^V
Январь	1	2	59	1.29''
Февраль	1	7	459	1.08
Март	0	0	0	—
Апрель	1	5	213	1.44
Май	2	10	399	1.32
Июнь	4	38	1424	1.34
Июль	5	63	1838	1.08
Август	6	44	1366	1.10
Сентябрь	6	93	5542	1.06
Октябрь	9	93	5186	1.01
Ноябрь	7	68	4024	1.04
Декабрь	3	17	1100	1.29
Всего	10	440	21 610	1.06

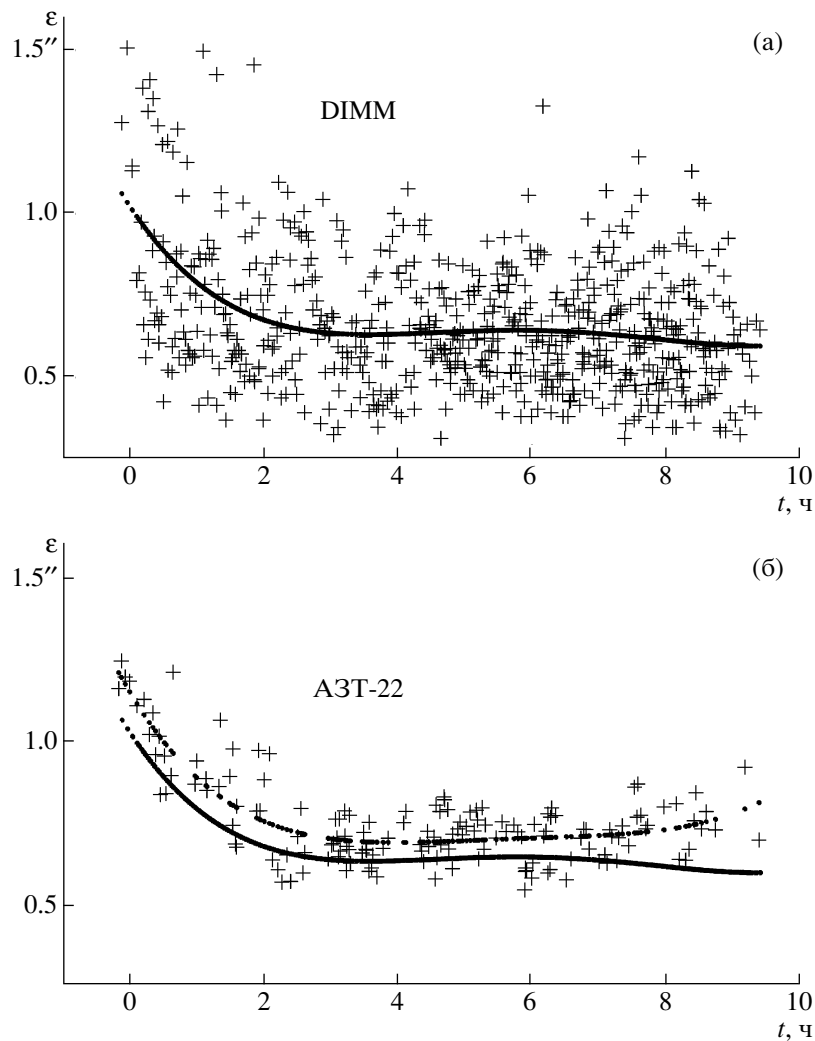


Рис. 7. Сравнение качества изображения на приборе DIMM (а) и на телескопе АЗТ-22 (б) в течение ночи. Приведены данные DIMM для 8 ночей с хорошими ϵ , усредненные полиномом четвертой степени, и данные для телескопа АЗТ-22 (ϵ_V и ϵ_R , приведенные к единичной воздушной массе) в полосах V и R для тех же ночей, усредненные полиномом четвертой степени. Для сравнения на графике (б) также приведен полином усреднения данных DIMM (нижняя кривая). Момент 0 ч соответствует времени окончания астрономических сумерок.

прибора DIMM [11], установленного рядом с башней телескопа АЗТ-22.

Синхронные оценки качества изображения на DIMM и на АЗТ-22 позволяют оценить влияние подкупольного пространства телескопа, которое подвергается тепловому воздействию от работы механизмов телескопа и навесной аппаратуры, а также учесть медленное охлаждение деталей башни и купола от дневного нагрева. На рис. 7б приведены аппроксимирующие полиномы четвертого порядка для DIMM и АЗТ-22, усредняющие оценки качества изображений в течение ночи. Разность качества изображения между свободной атмосферой и подкупольным пространством составляет около $0.1''$ при включенной вентиляции. Эксперимент по подавлению турбулентности

в подкупольном пространстве для телескопа АЗТ-24, описанный выше, показал, что мощная вентиляционная система способна в течение 15 мин создать ламинарный поток и улучшить изображение. Вентиляционная система АЗТ-22, вероятно, не имеет достаточной мощности, чтобы заметно улучшить изображение. Мы видим, что время стабилизации температурных условий под куполом АЗТ-22 примерно совпадает с тем же временем для свободной атмосферы. Различие между оценками с DIMM и АЗТ-22 остается постоянным и пока необъяснимым явлением. Отметим, что подобную разность наблюдали китайские астрономы при синхронных оценках качества изображения на метровом телескопе и установленном рядом с башней прибором DIMM в Обсерватории Юннан

(1.17" и 0.84", соответственно) [20]. Ограничение качества изображения на телескопе АЗТ-22 с почти дифракционной оптикой в основном связано с условиями подкупольного пространства, которые можно изменить, установив новую мощную систему вентиляции. Для получения изображений, сравнимых с дифракционным пределом оптики телескопа, необходимо установить адаптивную оптическую систему для подавления турбулентности свободной атмосферы. Как показано в работе [12], такая система будет эффективна в условиях астроклимата горы Майданак.

Необходимо отметить, что представленные результаты сравнения наблюдений с DIMM и АЗТ-22 мы считаем предварительными. Более глубокое исследование влияния подкупольного пространства на качество изображения требует постановки целенаправленного эксперимента с установкой DIMM на трубе телескопа АЗТ-22 для синхронных наблюдений в ночи с различными условиями в свободной атмосфере, а также с выключенной и включенной системой вентиляции и с измерением флуктуаций температуры в разных точках башни. Эксперименты такого рода должны помочь в модернизации вентиляционной системы в башне телескопа АЗТ-22.

5. АТМОСФЕРНАЯ ЭКСТИНКЦИЯ НА МАЙДАНАКСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА 1.5-М ТЕЛЕСКОПА АЗТ-22

5.1. Цветовые уравнения для инструментальных фотометрических систем телескопа АЗТ-22

Детальное исследование величин атмосферной экстинкции и коэффициентов цветовых уравнений было независимо проведено корейскими астрономами по наблюдениям 2003–2007 гг. [21] с использованием ПЗС-матриц SITe 2000 × 800 (до 2005 г.) и Fairchild 4000 × 4000 (с 2006 г.). Ниже мы приведем сравнение наших результатов с выводами [21].

Цветовые уравнения, необходимые для точных фотометрических исследований, были ранее получены и использовались для системы “телескоп + ПЗС-матрица TI 800 × 800” [17, 18] без учета зависимости от величины атмосферной экстинкции. Уравнения перевода данных из инструментальной системы “телескоп + ПЗС-матрица SIT 2000 × 800” в стандартную фотометрическую *UBVRI*-систему Джонсона–Казинса строились и использовались в работах [22, 23]. Тем не менее, полученные нами коэффициенты цветовых уравнений и величины атмосферной экстинкции ранее не публиковались.

Для построения цветовых уравнений для системы “телескоп + ПЗС-матрица SITe 2000 × 800” и учета атмосферной экстинкции мы использовали наблюдения стандартных звезд полей Ландольта RU 149, PG 1047+003, PG 2336+004, SA 95 и SA 98 [24] и рассеянного звездного скопления NGC 7790 [25]. Наблюдения проводились 8/9, 9/10, 26/27 и 27/28 ноября 2003 г. в фильтрах *U*, *B*, *V*, *R* и *I* в диапазоне значений воздушной массы $M(z) = 1.1–1.9$. Были получены данные *UBVRI*-фотометрии для 88 звезд, причем для 65 звезд были измерены потоки при разных значениях $M(z)$.

Цветовые уравнения для системы “телескоп + ПЗС-матрица TI 800 × 800” с учетом атмосферной экстинкции были построены по данным *BVRI*-фотометрии звездных стандартов Ландольта [24] (поля PG 1657+078 и SA 110; всего 8 звезд). Наблюдения проводились 6/7 и 7/8 июля 1997 г. в диапазоне значений воздушной массы $M(z) = 1.4–1.7$. Результаты фотометрии звезд-стандартов 1997 г. использовались ранее в работах [17, 18].

Для перевода данных из инструментальной системы в стандартную мы рассчитывали коэффициенты в цветовых уравнениях вида

$$F_1 = C_{f_1}^{f_1} f_1(t_{f_1}, M_{f_1}(z)) + \quad (4)$$

$$+ C_{f_1}^{f_1 f_2} (f_1(t_{f_1}, M_{f_1}(z)) - f_2(t_{f_1}, M_{f_1}(z))) +$$

$$+ C_{f_1}^{M(z)} M_{f_1}(z) + C_{f_1}^{f_1 f_2 M(z)} (f_1(t_{f_1}, M_{f_1}(z)) -$$

$$- f_2(t_{f_1}, M_{f_1}(z))) M_{f_1}(z) + C_{f_1}^t + 2.5 \lg t_{f_1},$$

где F_1 — звездная величина в полосе F_1 стандартной фотометрической системы, f_1, f_2 — звездные величины в полосах f_1, f_2 инструментальной фотометрической системы, t_{f_1} — время экспозиции в секундах изображения, сделанного в фильтре f_1 , $M_{f_1}(z)$ — величина воздушной массы для изображения, сделанного в фильтре f_1 , $C_{f_1}^{f_1}, C_{f_1}^{f_1 f_2}, C_{f_1}^{M(z)}, C_{f_1}^{f_1 f_2 M(z)}, C_{f_1}^t$ — коэффициенты данного уравнения, $f = -2.5 \lg l$ — звездные величины (здесь l — измеренный поток излучения).

При расчете коэффициентов цветовых уравнений методом наименьших квадратов выяснилось, что коэффициенты вида $C_{f_1}^{f_1 f_2 M(z)}$ оказались малы по сравнению с точностями определения прочих коэффициентов, и ими можно без ущерба пренебречь.

Коэффициенты вида $C_{f_1}^{f_1}$ при наблюдениях в линейном динамическом диапазоне ПЗС-матрицы обычно принимаются равными единице. Мы провели дополнительные исследования коэффициента

Таблица 3. Коэффициенты цветовых уравнений и их точность для систем “телескоп + ПЗС-матрица SITe 2000 × 800” и “телескоп + ПЗС-матрица TI 800 × 800”

f_1	$C_{f_1}^{f_1 f_2}$		$C_{f_1}^{M(z)}$
	ПЗС-матрица 2000 × 800	ПЗС-матрица 800 × 800	
u	-0.139 ± 0.040	—	-0.582 ± 0.143
b	0.111 ± 0.016	0.325 ± 0.014	-0.339 ± 0.051
v	-0.020 ± 0.013	0.074 ± 0.009	-0.202 ± 0.036
r	0.012 ± 0.028	0.018 ± 0.013	-0.110 ± 0.053
i	0.024 ± 0.018	0.089 ± 0.007	-0.061 ± 0.048

$C_{f_1}^{f_1}$ и подтверждаем, что в пределах ошибок $C_{f_1}^{f_1} = 1$.

Таким образом, цветовые уравнения сводятся к виду

$$F_1 = f_1 + C_{f_1}^{f_1 f_2}(f_1 - f_2(t_{f_1}, M_{f_1}(z))) + C_{f_1}^{M(z)}M(z) + C_{f_1}^t + 2.5 \lg t. \quad (5)$$

Зависимость $f_2(t_{f_1}, M_{f_1}(z))$ обозначает, что для использования уравнения (5) необходимо нормировать потоки в фильтрах f_1 и f_2 на одно время экспозиции и единую воздушную массу.

Таким образом, для перевода данных из инструментальной *ubvri*-системы в стандартную фотометрическую *UBVRI*-систему мы используем следующие цветовые уравнения:

$$U = u + C_u^{ub}(u - b) + C_u^{M(z)}M(z) + C_u^t + 2.5 \lg t, \quad (6)$$

$$B = b + C_b^{bv}(b - v) + C_b^{M(z)}M(z) + C_b^t + 2.5 \lg t, \quad (7)$$

$$V = v + C_v^{bv}(b - v) + C_v^{M(z)}M(z) + C_v^t + 2.5 \lg t, \quad (8)$$

$$R = r + C_r^{vr}(v - r) + C_r^{M(z)}M(z) + C_r^t + 2.5 \lg t, \quad (9)$$

$$I = i + C_i^{vi}(v - i) + C_i^{M(z)}M(z) + C_i^t + 2.5 \lg t, \quad (10)$$

причем для наблюдений, сделанных с помощью ПЗС-матрицы TI 800 × 800, не чувствительной в полосе U , используется система уравнений (7)–(10).

Полученные коэффициенты уравнений $C_{f_1}^{f_1 f_2}$ и $C_{f_1}^{M(z)}$ и погрешности их измерений приведены в табл. 3 (вторая колонка — для системы “телескоп + ПЗС-матрица SITe 2000 × 800”; третья колонка — для системы “телескоп + ПЗС-матрица TI 800 × 800”).

Коэффициенты вида $C_{f_1}^{M(z)}$ являются величинами атмосферной экстинкции ($K(f_1) = -C_{f_1}^{M(z)}$), полученными по результатам наших наблюдений. Подробнее вопрос об атмосферной экстинкции будет рассмотрен в следующем разделе.

Численные значения свободных членов C^t (“нуль-пунктов”) мы не приводим, так как они, строго говоря, верны лишь для конкретных дат наблюдений (соответственно ноябрь 2003 г. и июль 1997 г.). Коэффициенты C^t зависят главным образом от запыленности зеркал телескопа и фильтров и от состояния атмосферы и меняются со временем.

Стоит отметить, что значение коэффициента C_u^{ub} и уравнение (6) даны достаточно условно из-за большой неточности, вызванной небольшим количеством наблюдений стандартных звезд на разных воздушных массах в течение ночи. В полосах V и R обе инструментальные системы близки к стандартной фотометрической системе.

Построенные независимо Ибрагимовым [26] (наблюдения августа 2001 г.) и Железняком [27] (наблюдения октября 2000 г.) цветовые уравнения имеют совпадающие в пределах ошибок коэффициенты. Величины коэффициентов цветовых уравнений, полученных в работе [21] для системы “телескоп + ПЗС-матрица SITe 2000 × 800”, слегка отличаются от наших ($C_b = 0.053 \pm 0.003$, $C_v = -0.043 \pm 0.002$, $C_i = 0.054 \pm 0.002$, C_r — не рассчитывался). Величина коэффициента C_u , полученная авторами [21], заметно отличается от значения, полученного нами (табл. 3). Стоит, однако, отметить, что авторы [21] строили цветовые уравнения, опираясь на систему SAAO, которая в полосе U сильно отличается от данных Ландольта [24].

Учитывая, что цветовые уравнения [21] получены на большем статистическом материале, можно рекомендовать их использование для системы “телескоп + ПЗС-матрица SITe 2000 × 800” в фильтрах B , V , I и для системы “телескоп + ПЗС-матрица Fairchild 4000 × 4000” в фильтрах B , V , R и I . Использование коэффициента C_u , полученного в [21], возможно с учетом несовпадения стандартов SAAO и Ландольта.

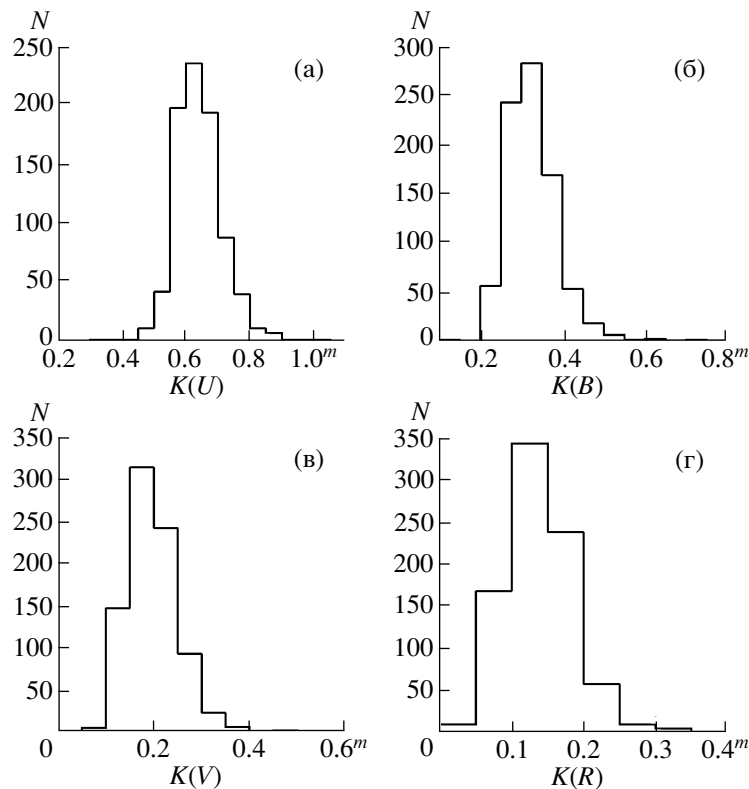


Рис. 8. Гистограммы распределения среднесуточной величины атмосферной экстинкции на центральной вершине горы Майданак в 1991–2002 гг. в полосах U (а), B (б), V (в) и R_J (г).

5.2. Атмосферная экстинкция на Майданакской обсерватории

Используя результаты абсолютной $UBVRI$ -фотометрии стандартных звезд, мы оценили величину атмосферной экстинкции в соответствующих полосах (коэффициенты $C^{M(z)}$ в уравнениях (6)–(10); табл. 3). Полученная нами величина экстинкции в V -полосе $K(V) = 0.20^m \pm \pm 0.04^m$ хорошо согласуется с более ранними оценками: 0.21^m [28, 29] (исследования 1976–1998 гг.), $0.15^m \pm 0.02^m$ [26], 0.18^m [27] и $0.18^m \pm 0.05^m$ [21]. Невысокая точность нашей оценки (20%) объясняется большими колебаниями величины атмосферной экстинкции. Специальные исследования, проведенные астрономами Литвы [29], Узбекистана [30] и Кореи [21], показали, что атмосферная экстинкция на Майданакской обсерватории меняется в пределах 0.08^m – 0.45^m в V [29], а ее колебания в течение ночи могут достигать 0.2^m (зафиксировано 15/16 августа 1977 г.) [28]. Наблюдается зависимость величины атмосферной экстинкции от сезона: минимум (0.11^m – 0.14^m) в январе–марте и максимум (0.20^m – 0.22^m) в июле–августе [21, 31]. Отмечена строгая корреляция величины атмосферной экстинкции с относительной влажностью [30]. Все это отражает известный факт зависимости

атмосферной экстинкции от количества пыли в атмосфере.

Полученные нами величины экстинкции в полосах U – I также хорошо согласуются с данными, полученными предыдущими исследованиями [21, 26, 29–31], а их отношение для различных полос близко к модельным зависимостям, рассчитанным по наблюдениям на Европейской южной обсерватории в Чили [32]. В частности, средние значения экстинкции на Майданакской обсерватории (центральная вершина) по данным наблюдений 1991–2002 гг. (833 ночи) составляют $0.64^m \pm 0.07^m$ (медианное значение 0.63^m) в U , $0.33^m \pm 0.06^m$ (медианное – 0.32^m) в B , $0.20^m \pm 0.05^m$ (медианное – 0.19^m) в V и $0.14^m \pm 0.05^m$ (медианное – 0.13^m) в R_J [31]. Средние величины экстинкции на западной вершине Майданака (месте нахождения АЗТ-22) по данным [21] (25 ночей наблюдений в 2003–2007 гг.): $0.49^m \pm 0.07^m$ в U , $0.29^m \pm 0.05^m$ в B , $0.18^m \pm 0.05^m$ в V , $0.12^m \pm 0.04^m$ в R и $0.08^m \pm 0.06^m$ в I . При этом в весенне-летний период величины экстинкции во всех полосах примерно на 0.05^m больше, а в осенне-зимний на 0.05^m меньше среднего [21]. На рис. 8 представлены неопубликованные ранее гистограммы распределения коэффициентов атмосферной экстинкции в полосах $UBVR_J$ по данным наблюдений 1991–2002 гг. [31].

В среднем величина атмосферной экстинкции в летний период на Майданакской обсерватории в 1.5–2 раза больше, чем на лучших обсерваториях Чили и Гавайских и Канарских островов [33].

6. ВЫВОДЫ

1. Майданакский 1.5-м телескоп АЗТ-22 после тестирования оптики в цеху ЛОМО и на месте установки показал почти дифракционное качество, и вероятно его можно считать одним из лучших телескопов фирмы ЛОМО с учетом отличной механики.

2. С использованием данных ПЗС-изображений (21610 снимков) в фильтрах U , B , V , R и I , полученных в 1996–2005 гг. на 1.5-м телескопе АЗТ-22, оценено качество изображения. Медианное качество изображения, полученное на телескопе, $\epsilon_{med}^V = 1.065''$. Количество изображений с $\epsilon^V < 0.8''$ не превышает 8% (7% ночей имеют $\epsilon_{med}^V < 0.8''$). Величина характерного качества изображения, приведенного к единичной воздушной массе, $\epsilon_{med}^V(M(z) = 1)$ составляет по нашим оценкам $0.945''$.

3. Сравнение оценок качества изображения, полученных синхронно на АЗТ-22 и на установленном рядом с башней АЗТ-22 приборе DIMM, дало возможность измерить влияние подкупольного пространства на формирование изображения. После стабилизации температурных условий в свободной атмосфере и подкупольном пространстве АЗТ-22 с включенной вентиляцией для ночей с $\epsilon_{med}^V < 0.9''$ наблюдается постоянная разность около $0.1''$ между качеством изображения DIMM и АЗТ-22, которая пока не нашла адекватного объяснения.

4. Наилучшее качество изображения наблюдается осенью ($\epsilon_V = 1.01''$ в октябре), наихудшие изображения ($\epsilon_V = 1.44''$ в апреле) наблюдаются в первой половине каждого года. Усредненное по годам качество изображения в среднем не менялось в 1996–2005 гг.

5. Качество изображения не зависит от времени экспозиции и слабо зависит от величины воздушной массы (для $M(z) \leq 1.6$), если наблюдаемое $\epsilon_V > 0.9''$.

6. Характерное время установления стабильной атмосферы на Майданакской обсерватории составляет около 2–2.5 ч с момента окончания астрономических сумерок.

7. Средняя величина атмосферной экстинкции в полосе V составляет $K(V) = 0.20^m \pm 0.04^m$.

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты важны для планирования наблюдений, проведения новых экспериментов для

исследования турбулентности подкупольного пространства, юстировки оптических систем и механических узлов телескопа с целью получения изображений с высоким угловым разрешением.

Авторы благодарят В.Г. Корнилова (ГАИШ МГУ) за полезное обсуждение работы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 08-02-01323 и 09-02-00244).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П. В. Щеглов, *Проблемы оптической астрономии* (М.: Наука, 1980).
2. J. Stock, *Bull. Astron.* **24**, 116 (1964).
3. Ю. Н. Ефремов, С. Б. Новиков, П. В. Щеглов, *Усп. физ. наук* **115**, 301 (1975).
4. С. А. Потанин, *Астрон. журн.* **85**, 665 (2008).
5. М. В. Лобачев, К. М. Груздева, Л. Е. Якухнова, К. А. Черная, в сб.: *Методы повышения эффективности оптических телескопов*, ред. С. А. Гладышев (М.: МГУ, 1987), с. 132.
6. Б. П. Артамонов, М. И. Тertiцкий, в сб.: *Методы повышения эффективности оптических телескопов*, ред. С. А. Гладышев (М.: МГУ, 1987), с. 160.
7. Б. П. Артамонов, В. В. Бруевич, О. Н. Бугаенко и др., *1.5-метровый телескоп АЗТ-22. Цеховая аттестация оптических систем*, Препринт Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга № 16 (М.: ГАИШ МГУ, 1990).
8. С. А. Потанин, *Астрон. журн.* **86**, 758 (2009).
9. Б. П. Артамонов, С. Б. Новиков, А. А. Овчинников, в сб.: *Методы повышения эффективности оптических телескопов*, ред. С. А. Гладышев (М.: МГУ, 1987), с. 8.
10. С. П. Ильясов, А. К. Байжуманов, М. Сарацин и др., *Письма в "Астрон. журн."* **25**, 156 (1999).
11. S. A. Ehgamberdiev, A. K. Baijumanov, S. P. Ilyasov, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **145**, 293 (2000).
12. В. Г. Корнилов, С. П. Ильясов, О. В. Возякова и др., *Письма в "Астрон. журн."* **35**, 606 (2009).
13. С. Б. Новиков, А. А. Овчинников, в сб.: *Астроклимат и эффективность телескопов*, ред. В. С. Шевченко, А. Х. Курмаева (Ленинград: Наука, 1984), с. 177.
14. В. Р. Артамонов, *Proc. SPIE*, **2871**, 737 (1997).
15. Х. Б. Султанов, С. П. Ильясов, Ш. А. Эгамбердиев, в сб.: *Современные проблемы астрономии в Узбекистане*, ред. Ш. А. Эгамбердиев (Ташкент, АИ АН РУз, 2004), с. 21.
16. V. G. Vakulik, V. N. Dudinov, A. P. Zheleznyak, *et al.*, *Astron. Nachr.* **318**, 73 (1997).
17. Б. П. Артамонов, Ю. Ю. Бадан, В. В. Бруевич, А. С. Гусев, *Астрон. журн.* **76**, 438 (1999).
18. Б. П. Артамонов, Ю. Ю. Бадан, А. С. Гусев, *Астрон. журн.* **77**, 643 (2000).
19. M. Sarazin and F. Roddier, *Astron. and Astrophys.* **227**, 294 (1990).

20. T. L. Qian, C. R. Qui, X. F. Cen, *et al.*, *Acta Astron. Sinica* **42**, 101 (2001).
21. B. Lim, H. Sung, M. S. Bessell, *et al.*, *J. Korean Astron. Soc.* **42**, 161 (2009).
22. А. С. Гусев, *Астрон. журн.* **83**, 195 (2006).
23. А. С. Гусев, *Астрон. журн.* **83**, 211 (2006).
24. A. U. Landolt, *Astron. J.* **104**, 340 (1992).
25. G. Petrov, W. Seggewiss, A. Dieball, and B. Kovachev, *Astron. and Astrophys.* **376**, 745 (2001).
26. М. А. Ибрагимов, неопубл. (2004).
27. А. П. Железняк, частн. сообщ. (2004).
28. К. Зданавичюс, Д. Мацяускас, *Бюлл. Вильнюсск. астрон. обсерв.* **55**, 11 (1980).
29. E. Pakstiene, K. Zdanavicius, and S. Bartasiute, *Baltic Astron.* **10**, 651 (2001).
30. Ю. А. Тиллаев, в сб.: *Современные проблемы астрономии в Узбекистане*, ред. Ш. А. Эгамбердиев (Ташкент, АИ АН РУз, 2004), с. 34.
31. Ю. А. Тиллаев, С. П. Ильясов, К. Н. Гранкин, *Докл. Акад. наук РУз* **6**, 27 (2004).
32. W. J. Roberts and E. K. Grebel, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **109**, 313 (1995).
33. A. Jimenez, H. Gonzalez Jorge, and M. C. Rabello-Soares, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **129**, 413 (1998).