

УДК 520.222

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕМЕНТОВ 6-М ТЕЛЕСКОПА БТА И ОБЪЕМА БАШНИ

© 2015 Э. В. Емельянов*

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 19 января 2015 года; принята в печать 4 июня 2015 года

Описываются результаты, полученные с помощью систем температурного мониторинга главного зеркала БТА, подкупольного пространства и внешней среды. Рассмотрены факторы, влияющие на возникновение микротурбулентностей в призеркальном слое воздуха и внутри подкупольного пространства, изменение фокусного расстояния телескопа с температурой его конструкций, изменение качества изображения из-за температурных градиентов в объеме главного зеркала БТА. Рассмотрены используемые в различных обсерваториях методы снижения влияния микротурбулентностей. Сформулированы предложения по улучшению работающей в настоящее время системы температурного мониторинга, а также системы автоматической регулировки фокусного расстояния телескопа для компенсации теплового «ухода» фокуса во время наблюдений.

Ключевые слова: *телескопы — атмосферные эффекты*

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Влияние температурного режима зеркала телескопа на деградацию изображения

Наиболее распространенным объективным методом анализа качества атмосферных изображений является использование датчика дифференциальных дрожаний изображения (differential image motion monitor, DIMM). Так, в 1993 г. в обсерватории Сайдинг-Спринг проводились подобные измерения [1]. Их результаты сравнивались с качеством изображения, полученного в каскадном фокусе Англо-австралийского телескопа (ААТ) с диаметром главного зеркала 3.9 м. Помимо указанных оценок, использовались значения температур главного зеркала телескопа, температуры в подкупольном пространстве и внешней температуры.

Авторами была обнаружена строгая антикорреляция между качеством изображения и разницей температур зеркала и подкупольного пространства в случае, когда зеркало было теплее окружающего воздуха: на каждый градус этой разницы качество изображения ухудшалось по сравнению с показаниями DIMM на 1". Для случаев, когда зеркало было холоднее, чем воздух в подкупольном пространстве, ухудшения качества изображения не наблюдалось.

Для улучшения качества изображений, получаемых на 8.3-м телескопе Субару (японский телескоп, расположенный на Мауна Кеа, Гавайи), была разработана компактная система охлаждения: зеркало телескопа продувалось холодным воздухом прямо внутри оправы [2]. Такая локализация системы охлаждения позволяла значительно эффективнее выводить зеркало на рабочий режим.

Построив корреляции ночных температур по прогнозам погоды для Мауна Кеа с реальными ночными температурами, авторы отметили, что в 80% случаев эта разница составляла не более $\pm 2^\circ\text{C}$. Таким образом, имея прогноз погоды, стало возможным выводить зеркало заранее (в течение дня) в область температур, которая будет явно ниже ночной температуры. Для предотвращения образования конденсата на зеркале и внутри оправы была разработана сложная система регулирования, контролирующая температуры зеркала и холодного воздуха в системе кондиционирования на предмет достижения точки росы. Во время наблюдений эта система также частично использовалась: компрессор, откачивающий теплый воздух из-под зеркала, продолжал работать. Благодаря этому нагреваемый актуаторами активного зеркала воздух откачивался из оправы зеркала. Тем самым снижалось нагревание зеркала Субару механикой телескопа.

Измерения показали, что даже такая преднаблюдательная подготовка зеркала улучшает качество изображения не меньше, чем на 0".1. Учитывая большую инерционность главного зеркала телескопа БТА, внедрение подобной системы дало бы

*E-mail: eddy@sao.ru

еще лучшие результаты. Однако при этом возникают проблемы, связанные с быстрым равномерным охлаждением всего объема главного зеркала БТА, а также точностью прогнозирования погоды.

Опыты с нагреваемым сферическим зеркалом показали, что ламинарный воздушный поток со скоростью около 1 м с^{-1} способен «сдувать» микротурбулентности, возникающие в приповерхностном слое воздуха. Без активного обдува микротурбулентные потоки в призеркальном слое приводят к ухудшению качества изображений при $Z < 45^\circ$ [3].

Наиболее резко ухудшение изображений наблюдается при малых углах наклона зеркала, т.е. для объектов с $Z \lesssim 10^\circ$. Для этих областей ухудшение изображения в 3–5 раз больше, чем для зеркала, наклоненного под углом 50° . Однако ламинарный поток воздуха, обдувающий поверхность зеркала со скоростью 1 м с^{-1} , значительно улучшает качество изображения для малых Z (на больших Z этот поток воздуха приводит к обратным явлениям, ухудшая качество изображения).

Наилучшим способом «сдувать» микротурбулентности в приповерхностном слое у больших зеркал было бы расположение раструба воздушно-компрессора в центральном отверстии зеркала, чтобы воздух формировал растекающийся от центра поток.

Автоматическая система обдува поверхности зеркала БТА позволила бы значительно улучшить качество изображений при наблюдении в областях с $Z \lesssim 10^\circ$ даже в случаях, когда температура зеркала значительно выше температуры окружающего воздуха (на величину 5– 10°С). Проводя аналогию с 2.5-м телескопом INT (во время его работы в Гринвичской обсерватории), можно сказать, что такие меры привели бы к улучшению полуширины изображения при предельных для БТА перепадах температуры (зеркало на 10°С теплее окружающего воздуха) до величины порядка полутора полуширин турбулентного атмосферного диска.

Для разработки активной оптики в Национальной астрономической обсерватории Японии был создан прототип телескопа с монолитным 61-см главным зеркалом, изготовленным из пирекса толщиной 2.1 см [4]. Форма зеркала регулировалась двенадцатью актуаторами. Для анализа волнового фронта использовался датчик Шака–Гартмана. Побочным результатом этого эксперимента был анализ изменения качества изображения за счет турбулентности в призеркальном слое воздуха, возникающей в случае, когда температура зеркала выше температуры воздуха в подкупольном пространстве.

Аналитически характеризовать искажения волнового фронта удобно при помощи коэффициентов

Цернике. В качестве же результирующей характеристики качества изображения можно взять число Штреля:

$$S = 1 - 2\pi^2 \text{STR}^2 / \lambda^2,$$

где STR^2 — взвешенная сумма квадратов коэффициентов Цернике по радиальному порядку коэффициентов. Чем ближе S к единице, тем лучшим будет качество изображения.

Эксперименты авторов также показали ухудшение изображения с ростом температуры главного зеркала телескопа из-за возникающих в призеркальном слое турбулентных потоков воздуха. Для обеспечения качества изображения на уровне $S > 0.8$ следует поддерживать температуру зеркала не выше чем на 1°С температуры воздуха в подкупольном пространстве.

Для снижения влияния микротурбулентности в призеркальном слое авторами было предложено «сдувать» микротурбулентности ламинарным потоком воздуха. Для этого использовался вентилятор с широким раструбом, расположенным вблизи края зеркала. Показано, что ламинарный воздушный поток, протекающий над поверхностью зеркала со скоростью 1 м с^{-1} (результаты, идентичные [3]) способен вдвое снизить ухудшение изображения (по числу Штреля). Для появления измеримой деградации качества изображения достаточно нагреть зеркало на 0.2°С выше температуры окружающего воздуха.

Для характеристики турбулентности обычно используется число Рэлея. Однако в нашем случае объективной характеристикой может стать компонент числа Рэлея — частота Брента–Вяйсяля (Brunt–Väisälä frequency) [4]:

$$N = \sqrt{-\frac{G}{\rho(0)} \frac{\partial \rho(h)}{\partial h}},$$

где G — гравитационная постоянная, а $\rho(h)$ — распределение плотности газа по высоте.

Конвективная нестабильность наступает при $N^2 < 0$. Переходя от плотностей к температуре воздуха, получим:

$$N^2 = \left(G/c_p - \frac{\partial T}{\partial h} \right) G/T,$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, T — абсолютная температура воздуха. Таким образом, построив точное теоретическое распределение температуры по высоте в воздушном столбе, мы можем определить, будет ли воздух в нем конвективно устойчив или создаст турбулентные потоки.

По известному полю градиентов температуры воздуха можно также оценить среднеквадратичную скорость турбулентных потоков:

$$v^2 = (\text{grad } T_h - g/c_p) Lg/\sqrt{2}T,$$

где L — длина перемешивания (около 5–20 см).

Однако, проблема измерения параметров микротурбулентностей, возникающих в подкупольном пространстве и в призеркальном слое воздуха, путем анализа градиентов температур имеет серьезные технические препятствия: в подкупольном пространстве необходимо не только установить большое количество термодатчиков на расстоянии меньше длины перемешивания друг от друга, но и крайне точно откалибровать их и достаточно часто снимать показания с точностью до сотых долей градуса!

1.2. Влияние температурного режима в подкупольном пространстве на деградацию изображения

Модели микротурбулентных движений воздуха внутри подкупольного пространства являются частными случаями модели Колмогорова для замкнутых пространств конечных объемов. Наиболее популярными являются модели фон Кармана (von Karman), Гринвуда–Таразано (Greenwood–Tarazano) и экспоненциальная модель [5].

Уточнение конкретной модели турбулентности необходимо для вычисления характерного размера турбулентных областей и расчета времени когерентности. Одним из вариантов детектора микротурбулентностей является прибор, принцип действия которого аналогичен датчику DIMM. В базовой конфигурации этот прибор представляет собой оптоволоконный расщепитель лазерного луча на несколько когерентных лучей, которые при помощи коллиматоров преобразуются в параллельные световые пучки диаметром около двух сантиметров (минимальный размер микротурбулентной области). Пучки на разных расстояниях друг от друга проходят через исследуемую область, а затем при помощи системы диагональных зеркал собираются в фокусе малого телескопа. Прибор такого класса позволяет изучить характерные пространственные и временные частоты микротурбулентности.

Для общей характеристики турбулентного потока воздуха можно использовать среднеквадратичное отклонение скорости воздушных потоков σ_v или же относительную флуктуацию скорости $I = \sigma_v/\bar{v}$, где \bar{v} — средняя скорость воздушных потоков [6].

Провести эмпирические измерения характеристик турбулентных потоков в подкупольном пространстве можно при помощи чувствительного механического либо ультразвукового анемометра.

1.3. Влияние температурного режима главного зеркала телескопа и его металлоконструкций на положение фокальной плоскости

При фотометрических и спектральных наблюдениях с длительными экспозициями (особенно это касается фотометрии) очень важно не только удержать изображение на одной и той же позиции, но и соблюсти постоянство фокусного расстояния. Фокусное расстояние телескопа изменяется за счет температурных деформаций его несущих конструкций и оптических поверхностей.

Обычно направления изменения фокуса телескопа за счет температурных деформаций зеркала и несущих конструкций имеют одинаковый знак (если зеркало открыто только со стороны рабочей поверхности и термоизолировано со всех остальных сторон), поэтому при достаточно медленных изменениях температуры фокальная плоскость относительно фланца первичного фокуса телескопа остается неподвижной.

Если зеркало недостаточно термоизолировано, то температурные изменения фокуса за счет искривления зеркала и изменения длины штанг телескопа могут иметь разные знаки: зеркало при нагревании может уменьшать свой радиус кривизны, в то время как штанги удлиняются [7].

Несмотря на то, что температурные деформации зеркала проявляются значительно медленнее деформаций штанг, они тоже вносят свой вклад в общее смещение фокуса. Следовательно, в простейшей линейной модели (если не учитывать множество других факторов, вызывающих смещение фокуса телескопа) фокусное расстояние телескопа зависит от температуры главного зеркала и температуры штанг:

$$F = F_0 + (T_M - T_0) f_M + (T_B - T_0) f_B,$$

где F_0 — положение фокуса при температуре T_0 ; T_M — температура зеркала; T_B — температура штанг конструкции «трубы» телескопа; f_M — линейный вклад деформаций зеркала в изменение фокуса; f_B — линейный вклад деформаций несущих конструкций телескопа в изменение фокуса.

Итак, мы видим, что даже попытка получения элементарнейшего линейного приближения для описания зависимости положения фокуса от температуры требует предварительного построения экспериментальной двумерной функции — зависимости фокуса от температур зеркала и металлоконструкций. Температурное искажение формы главного зеркала БТА из-за его большой массы является медленным процессом, т.е. в течение ночи изменение положения фокуса с температурой будет определяться лишь температурой металлоконструкций.

Но даже такое простое приближение на самом деле будет неточным: деформация зеркала зависит больше даже не от его температуры, а от поля градиента температуры внутри зеркала. Таким образом, по сути мы имеем дело с трехмерной функцией, даже опуская менее значимые факторы, влияющие на положение фокуса.

На основе теоретических выкладок мы можем сказать, что восстановление точной зависимости фокусного расстояния телескопа от температур его конструкций — достаточно сложная задача. Однако мы можем с той или иной степенью точности попытаться восстановить частную зависимость — зависимость изменения фокуса от изменения температуры в течение одной конкретной наблюдательной ночи. Так как за ночь температура зеркала не может измениться значительно, основной вклад в эти изменения внесут конструкции телескопа. Величина ошибки будет определяться множеством внешних факторов (в т.ч. изменением качества изображения в течение ночи), поэтому и в этом приближении мы не можем гарантировать высокой точности (не можем даже гарантировать точности, достаточной для автоматической коррекции положения фокальной плоскости на уровне ± 0.1 мм).

2. СИСТЕМА ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА УЗЛОВ БТА И ВОЗДУХА В ПОДКУПОЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Согласно документации,¹ в торцевой части главного зеркала БТА сделано 60 глухих отверстий диаметром 310 мм и глубиной 430 мм для размещения механизмов разгрузки (57 разгрузок) и фиксирующих опор (3 опоры); 6 площадок глубиной около 10 мм для упора домкратов; 1 сквозное отверстие диаметром 350/360 мм для центрирующего стакана.

Само зеркало представляет собой мениск с радиусом поверхностей $48\,050 \pm 50$ мм диаметром 6050 ± 5 мм и толщиной 655 ± 0.3 мм. Каждый механизм разгрузки берет на себя 1/60 часть веса зеркала (т.е. около 700 кг). Верхняя часть разгрузки отделена от зеркала воздушным промежутком, в который возможна установка температурного датчика.

В декабре 2008 г. было утверждено техническое задание на создание многоканальной системы сбора и накопления информации о температурах узлов телескопа БТА, подкупольного и межпанельного пространства. Установкой температурных датчиков занимался В. М. Кравченко, а подключением их к системе сбора — С. И. Синянский.

¹http://www.sao.ru/hq/sekhta/Tex_doc/Book1_view.pdf

Измерение температуры проводится некалиброванными датчиками ТС-1288 с точностью не хуже 0.5°C . Для измерения температуры конструкций телескопа и панелей купола применены датчики М-ФК-422 (точность измерения температуры также не хуже 0.5°C). Датчики не были откалиброваны, поэтому их показания могут расходиться больше, чем на 0.5°C .

В июне 2010 г. монтаж датчиков был завершен, однако в систему сбора и хранения информации была внедрена лишь их часть. Датчики подключены к восьмиканальным измерительным приборам ТРМ-138, объединенным в единую компьютерную сеть. Часть датчиков измеряет температуру воздуха, часть — температуру металлоконструкций и боковых поверхностей главного зеркала БТА.

Система архивирования данных и веб-интерфейс² для работы с архивом были разработаны С. В. Карповым. Данные со всех подключенных к системе термодатчиков один раз в 15 минут заносятся в базу данных PostgreSQL. Веб-интерфейс либо локальный сервис позволяют извлечь из архива интересующие данные за любой промежуток времени, в течение которого система работала.

Термодатчики для измерения температуры главного зеркала были размещены неравномерно, поэтому для оценки тепловых градиентов в толще зеркала необходимо не только тщательно их откалибровать, но и разместить более равномерно. В случае размещения термодатчиков в углублениях под разгрузки появится возможность мониторинга распределения температурных градиентов в толще зеркала. Значение температурного коэффициента линейного расширения α_L стекла С-316, из которого отлита заготовка главного зеркала БТА, имеет значение $(3.0-3.1) \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Для $\alpha_L = 3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ отклонение формы поверхности зеркала между двумя выбранными точками на одну длину волны ($\lambda = 500$ нм) будет наблюдаться при разности температур между этими точками примерно в 0.25°C (в случае строго радиального распределения градиента температуры). Таким образом, точность регистрации температур главного зеркала БТА должна быть не хуже $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

При выборе типа термодатчиков для измерения распределения температурных градиентов в главном зеркале БТА, можно сузить калибровочный температурный интервал согласно уже накопленной статистике температур зеркала. Так, за трехлетний интервал (с 23.12.2010 г. по 13.01.2014 г.) температура зеркала не выходила за пределы диапазона от -7°C до $+21^\circ\text{C}$. Такое сужение рабочего диапазона температур позволяет значительно повысить точность измерения.

²http://acs4.sao.ru/meteo/can_requestor.php

В указанном интервале температур могут применяться цифровые термодатчики TSic 506 с интерфейсом ZACwire. Рабочий диапазон этих датчиков лежит в интервале от -10°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Паспортная точность во всем диапазоне — не хуже $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (при дискретности около 0.03°C). Согласно паспортным данным, сужение диапазона измеряемых температур в два раза позволяет улучшить относительную точность измерений. При калибровке датчиков на указанный выше температурный диапазон было отмечено, что точность измерений возросла до величины $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Другой тип цифровых термодатчиков — TSYS 01 (с интерфейсами SPI и I²C) — имеет паспортную точность $\pm(0.05-0.1)^{\circ}\text{C}$ и рабочий диапазон температур от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Применение подобных цифровых термодатчиков позволило бы упростить систему мониторинга температур и значительно повысить ее точность.

3. ОБРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

3.1. Термодинамика подкупольного пространства

Объем воздуха в подкупольном пространстве равен примерно $23\,000\text{ м}^3$. Изменение его температуры происходит, в основном, из-за следующих процессов:

- (1) нагревание в дневное время суток стенок купола за счет частичного поглощения солнечного излучения (инсоляция);
- (2) теплообмен с окружающей средой через стенки купола (в основном за счет теплопередачи);
- (3) теплопередача при контакте воздуха с полом и нижней частью стен подкупольного пространства;
- (4) проникновение в воздушное пространство подкупольного помещения теплых потоков воздуха с нижних этажей башни (система маслообмена, обогрева помещений и т.п.).

В целях защиты подкупольного пространства от нагрева вследствие инсоляции стенки купола башни БТА сделаны двойными, воздушный промежуток между стенками вентилируется. Кроме того, такая двойная структура стенок купола уменьшает эффективность теплообмена с внешней средой.

Согласно отчету Л. И. Снежко [8], аттестация системы теплозащиты БТА, выполненная в 1994 г., показала следующее:

- (1) купол эффективно защищает телескоп от инсоляции (т.е. влияние п. 1 из вышеперечисленного сводится практически к нулю);

(2) температура внутри купола распределена однородно (в пределах чувствительности метода обнаружения), обнаружен только нагрев на 0.2°C кабины первичного фокуса наблюдательной аппаратурой;

(3) отчетливо выявляется основной источник тепловыделения — система маслопитания — высокой температурой маслопроводов, а также повышенной приблизительно на 1°C температурой опорно-поворотного круга и мест выхода теплого воздуха из помещения гидростатических опор.

В 2002 г. была проделана значительная работа по модернизации системы маслопитания приводов БТА (Ю. М. Маметьев, А. М. Притыченко)³. Модернизация позволила значительно снизить потребляемую мощность, а также охлаждать масло перед подачей в приводы, что привело к снижению выделения тепла в подкупольное пространство БТА.

Для охлаждения воздуха в подкупольном пространстве с целью поддержания температуры главного зеркала БТА в рабочем режиме был проведен капитальный ремонт системы кондиционирования (ОАО «ПищеАгроСтройПроект»). В техническом блоке, расположенном вне здания башни БТА, размещены три компрессорных фреоновых агрегата мощностью 30 кВт, агрегаты охлаждают хладагент — 35% раствор этиленгликоля, который при помощи насосов подается в воздухообменные приборы, установленные в подкупольном и подпольном пространстве. Для оттаивания образующейся на воздухообменных приборах наледи используются электронагреватели (суммарной мощностью около 100 кВт).

Интенсивность образования наледи на хладопроводах и воздухообменников возрастает при увеличении разности температур подкупольного пространства и хладагента, в результате чего увеличивается потребление энергии на оттаивание и снижается КПД модернизированной системы охлаждения.⁴

Простые термодинамические расчеты могут показать степень эффективности этой системы.

3.1.1. Адиабатическое приближение

Сначала рассчитаем, за какое время охлаждающая система сможет понизить температуру воздуха в подкупольном пространстве на 10°C (для достижения предельно допустимой скорости охлаждения зеркала — 2°C в сутки [8]).

При отсутствии теплообмена с окружающей средой изменение температуры воздуха происходит

³<http://www.sao.ru/hq/sekbta/Maslo/>

⁴http://www.sao.ru/hq/sekbta/Xolod/xolod_2.htm

вначале изохорно (при незначительном изменении давления вследствие изменения температуры), затем — изобарно (за счет обмена воздухом с окружающей средой). Строго говоря, изобарическое изменение температуры уже выводит процесс из рассматриваемого адиабатического приближения, поэтому в первом приближении будем считать процесс изохорным.

Рассчитаем, какое количество тепла необходимо отнять у воздуха подкупольного пространства для его охлаждения на dT °С (здесь и далее основные расчетные формулы взяты из [9, 10]):

$$c_V = \frac{i R}{2 M}, \quad dQ = m c_V dT = \rho V \frac{i R}{2 M} dT,$$

$$dQ = 1.29 \times 23\,000 \times \frac{5}{2} \times \frac{8.31}{29 \times 10^{-3}} dT \\ = 2.13 \times 10^7 dT \text{ [Дж]},$$

где c_V — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме; i — количество степеней свободы частицы идеального газа; M — молярная масса воздуха; R — универсальная газовая постоянная; ρ — плотность воздуха; Q — количество теплоты; T — абсолютная температура.

Таким образом, для охлаждения подкупольного воздуха на 10°С необходимо отобрать у него энергию около 213 МДж.

Суммарная хладопроизводительность системы охлаждения составляет порядка 107 кВт. Минимальное время отбора у подкупольного воздуха энергии 213 МДж (без учета времени, затрачиваемого на принудительное перемешивание воздуха) составит в этом случае

$$t_{\min} = \frac{2.13 \times 10^8}{1.07 \times 10^5} \approx 2000 \text{ с},$$

т.е. примерно 33 минуты.

3.1.2. Расчет притока тепла

Плотность теплового потока от пола и стен подкупольного пространства зависит от температурного градиента:

$$\frac{\partial Q}{dt dS} = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x},$$

резко возрастающего при интенсивном перемешивании (здесь κ — коэффициент теплопроводности воздуха). Таким образом, для заданного градиента $\theta = \text{grad } T$ тепловая мощность составит

$$P = -24.1 \times 10^{-3} S \theta \text{ [Вт]},$$

где S — площадь поверхности с данным градиентом θ . Например, для пола тепловая мощность равна

$$P = -13.7 \theta \text{ [Вт]}.$$

Аналогично можно рассчитать тепловую мощность для стенок купола ($P \approx -60 \theta$).

Столь малая величина теплового потока позволяет не принимать во внимание нагрев подкупольного воздуха из-за теплопередачи от стен и пола. Следовательно, основным источником нагрева воздуха подкупольного пространства являются тепловые потоки из технологических и жилых помещений.

Примерное определение тепловых потоков сделал Л. И. Снежко. Они соответствуют скорости роста температуры 1.4°C ч^{-1} , что эквивалентно тепловой мощности около 8.3 кВт.

Приближенные расчетные данные показывают, что имеющаяся система охлаждения могла бы справиться с поставленной задачей поддержания температуры в подкупольном пространстве на уровне разности температур между главным зеркалом и подкупольным воздухом до 10°С, будь она идеальной. Оценка хладопроизводительности, необходимой для поддержания температуры подкупольного воздуха на заданном уровне даст 9–10 кВт (Л. И. Снежко). Однако учитывая, что производительность системы кондиционирования воздуха в подкупольном пространстве БТА сильно зависит от температуры внешнего воздуха и разности внутренней и внешней температур, в зимних условиях эксплуатации она малоэффективна.

В целях достижения максимальной допустимой скорости охлаждения главного зеркала, температуру подкупольного воздуха, вплоть до достижения зеркалом заданной температуры, необходимо постепенно уменьшать, согласуя с текущей температурой зеркала, для поддержания постоянной разности температур между воздухом и зеркалом.

Для более точного определения градиентов температур и тепловых мощностей паразитных источников тепла (и, как следствие, количества электроэнергии, которое необходимо затратить для поддержания заданного уровня температуры в подкупольном пространстве) необходимо произвести подробный температурный мониторинг подкупольного пространства.

3.2. Зависимость положения фокуса от температуры

Для изучения зависимости положения фокуса от температуры различных частей телескопа и подкупольного пространства были сделаны выборки из архива температур за последние три года, а также выборки из базы данных ASPID⁵ за то же время:

⁵<http://alcor.sao.ru/db/aspid/>

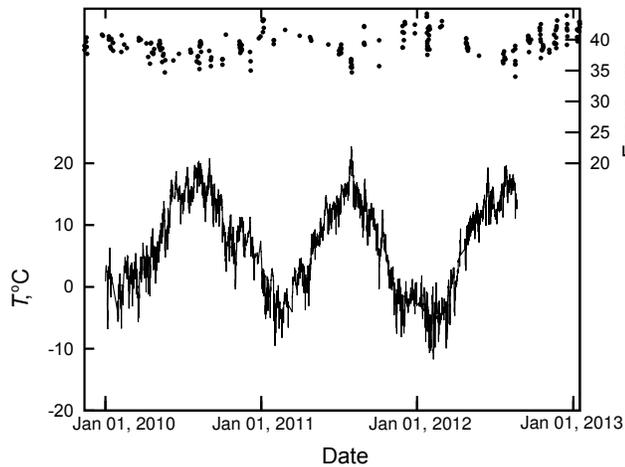


Рис. 1. Температура штанги (сплошная линия) и отсчеты фокуса (точки) за три года.

- (1) рекурсивным сканированием директорий с архивами, из логов SCORPIO выбирались строки, следующие за текстом «focussing TELESCOPE» (т.е. сведения об изображениях, полученных явно после фокусировки телескопа);
- (2) исходя из полученных имен файлов формировались имена содержащих их архивов;
- (3) все архивы, представляющие интерес, распаковывались в текущую директорию;
- (4) FITS-заголовок файлов, имена которых были получены на шаге 1, копировался в отдельный файл;
- (5) по анализу полей INSTRUME и IMAGETYP FITS-заголовка определялось, получено ли данное изображение на SCORPIO и являлся ли тип изображения «объектом»; если условие выполнялось, в лог-файл записывались данные о дате и времени наблюдений, значении фокуса и температурах: зеркала, подкупольного пространства и внешней среды.

Из архива температур были получены сведения о показаниях термометра, расположенного на одной из штанг телескопа. Эти данные были усреднены по промежутку в 15 минут (в самой базе данных записи сделаны с интервалом в 10 секунд). Дальнейшие вычисления выполнялись в среде Octave.

Так как информация о фокусах и температурах бралась из разных архивов с различными временными интервалами (см. рис. 1), необходимо было сначала свести накопленные данные в единую систему. Для этого из полученных значений отсчетов фокуса отбирались те, для которых имелись сведения о температуре штанги в ближайшие 15 минут. Далее температура штанги интер-

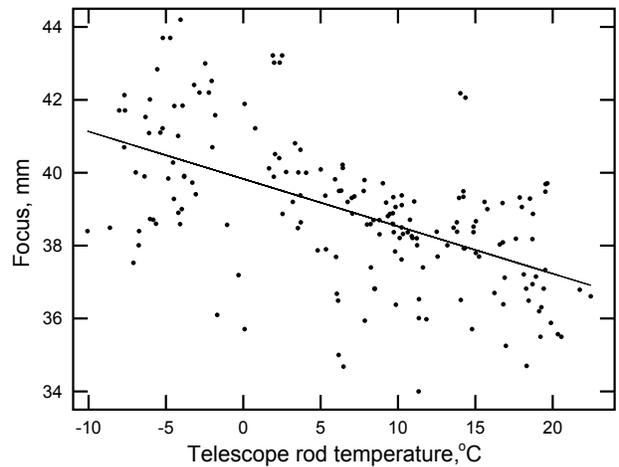


Рис. 2. Зависимость между отсчетами фокуса и температурой штанги. Сплошной линией обозначена линейная аппроксимация.

полировалась на время получения изображений на SCORPIO.

Коэффициент корреляции между температурой штанги и полученными отсчетами фокуса оказался равным -0.56 , а линейная интерполяция зависимости (см. рис. 2) дала приближенную формулу

$$F \approx 39.83 - 0.13 T, \quad \sigma_F = 1.64, \quad (1)$$

где F — отсчеты фокуса в мм; T — температура штанги в градусах Цельсия; σ_F — среднеквадратическое отклонение фокуса.

Построение аналогичных зависимостей между изменением фокуса и температурами подкупольного пространства и зеркала дало следующие результаты. Для температуры в подкупольном пространстве коэффициент корреляции равен -0.54 , а линейная аппроксимация имеет вид $F \approx 39.53 - 0.13 T$, $\sigma_F = 1.67$, что близко к (1). Для температуры зеркала коэффициент корреляции был наибольшим: -0.66 , — а линейная аппроксимация дала выражение $F \approx 40.22 - 0.17 T$, $\sigma_F = 1.49$. Понятно, что во втором случае зависимость получилась более явной, т.к. зеркало играет роль своеобразного демпфера температуры, сглаживающего быстрые изменения, влияющие на общую корреляцию.

Подробное рассмотрение нескольких отдельных ночей не позволило улучшить статистику: разброс данных относительно линейной аппроксимации был все равно слишком велик, чтобы можно было бы сделать вывод об однозначной зависимости отсчетов фокуса от показаний какого-либо термоматчика.

Несомненно, большой разброс данных в нашем случае обусловлен не только различного рода

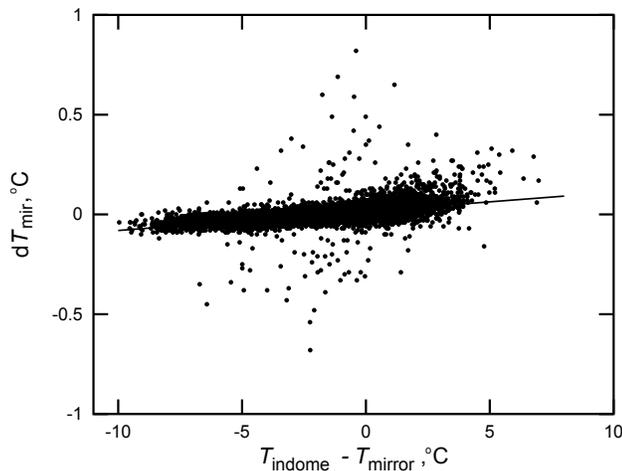


Рис. 3. Зависимость между скоростью изменения температуры зеркала и разностью температур подкупольного пространства и зеркала (данные за три года). Сплошной линией обозначена линейная аппроксимация данных.

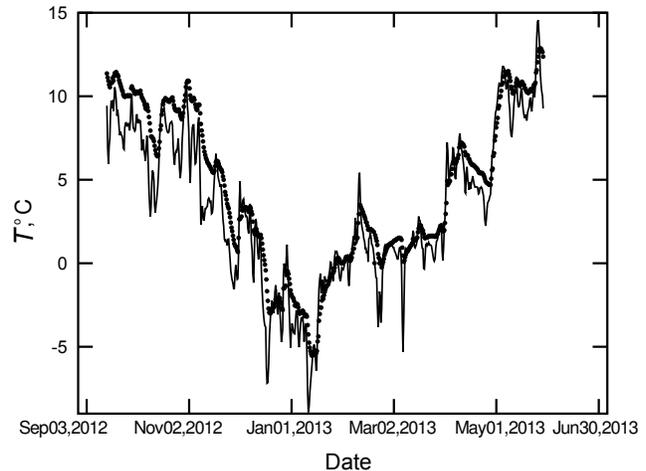


Рис. 4. Температура зеркала (точки) и скользящее среднее за одни сутки (сплошная линия) по температуре подкупольного пространства для избранного интервала времени.

ошибками и погрешностями, но и более сложным видом зависимости фокуса телескопа от температуры. Так, к примеру, для случая крепления светоприемника одной-единственной стальной балкой и отсутствия влияния других факторов, коэффициент в зависимости (1) был бы равен -0.31 . Температурные градиенты, возникающие в толще зеркала при изменении его температуры, привели бы к появлению другого коэффициента с положительным знаком и явной зависимостью от скорости изменения температуры подкупольного пространства (т.к. от нее же зависит скорость изменения температуры главного зеркала БТА).

Итак, можно сделать вывод, что наилучшим решением для однозначной автоматической подстройки фокуса в процессе наблюдений без необходимости проведения процедуры перефокусировки по звездам является установка лазерного дальномера на стакан первичного фокуса и мониторинг расстояния от стакана до держателя диагонального зеркала либо одной из точек на оправе зеркала. Однако возможно, что тщательная калибровка термодатчиков и их перестановка поможет получить однозначную аналитическую зависимость.

3.3. Зависимость скорости изменения температуры главного зеркала от температуры в подкупольном пространстве

Для построения этой зависимости из архива температур были извлечены данные о температуре под куполом и температуре зеркала с усреднением по временному интервалу в один час. После дифференцирования значений температуры зеркала dT_{mir}

и получения разности между температурами подкупольного пространства и зеркала ΔT , производился отбор полученных величин: для исключения выбросов, связанных с ошибками аналого-цифрового преобразования, отбрасывались величины, для которых $|\Delta T| > 10^\circ\text{C}$, а для исключения выбросов, связанных с неравномерностью полученных отсчетов, отбрасывались величины с $|dT_{\text{mir}}| > 1^\circ\text{C}$.

Коэффициент корреляции между dT_{mir} и ΔT составил 0.52. Линейная аппроксимация всех полученных данных (см. рис. 3):

$$dT_{\text{mir}} \approx 0.0152 + 0.0096 \Delta T.$$

Для выполнения корреляционного анализа из полученного массива данных было выбрано десять интервалов с равномерно расположенными отсчетами температур. Наибольший непрерывный интервал (см. рис. 4) имел продолжительность около 255 суток (с 14 сентября 2012 г. по 28 апреля 2013 г.). Для каждого интервала строились взаимные корреляционные функции между температурами зеркала и подкупольного пространства, а также вычислялись линейные аппроксимации между скоростью изменения температуры зеркала и разностью температур подкупольного пространства и зеркала.

Для всех выбранных интервалов времени положение максимума взаимной корреляционной функции варьировалось от 41 часа (31 час для скользящего среднего) для января 2011 г. до нуля для четырех других интервалов. Наибольший сдвиг, очевидно, получился для интервалов с резкими скачками температуры подкупольного пространства. Нулевой сдвиг — для интервалов с плавным изменением среднесуточной температуры, а

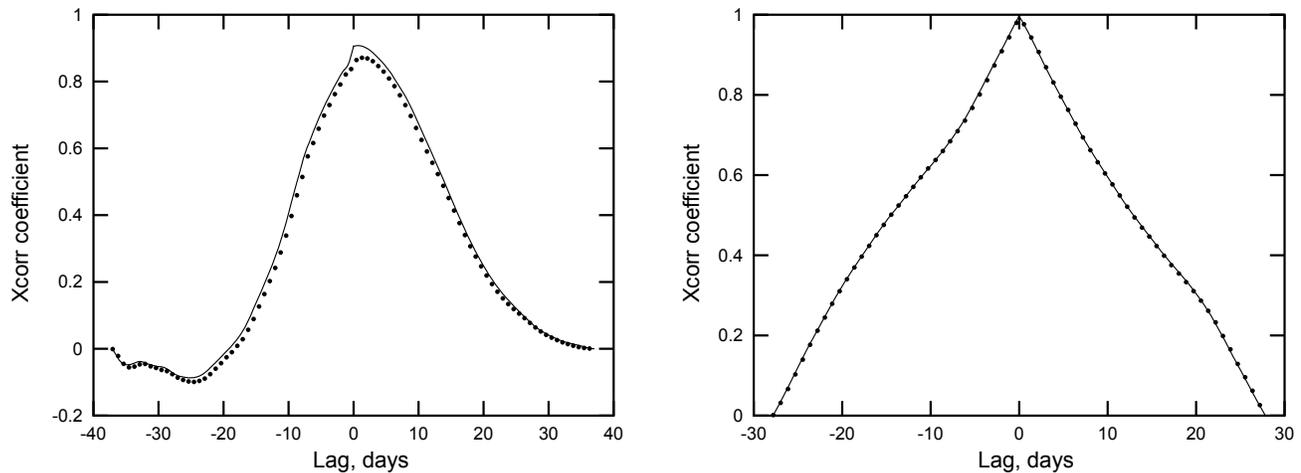


Рис. 5. Взаимная корреляционная функция температур главного зеркала БТА и подкупольного пространства. Точками отображены температуры с усреднением по интервалу в один час, сплошными линиями — с усреднением за одни сутки.

также интервалов, когда для охлаждения зеркала включалась система кондиционирования воздуха в подкупольном пространстве. Для примера на рис. 5 представлены взаимные корреляционные функции температур зеркала и подкупольного пространства для случаев ненулевого и нулевого смещения.

Аппроксимация скорости изменения температуры главного зеркала БТА в зависимости от разности между температурами подкупольного пространства и зеркала для всех десяти участков дала средний коэффициент пропорциональности, равный 0.01 час^{-1} , что согласуется с известными значениями: для изменения температуры главного зеркала БТА на 0.1°C за один час температура в подкупольном пространстве должна отличаться от температуры зеркала на 10°C .

Полученные данные полностью согласуются с расчетами Л. И. Снежко. Для изучения процессов, вызванных температурными градиентами в толще главного зеркала БТА, необходимо разместить в разгрузочных отверстиях зеркала точные калиброванные термодатчики.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать следующие выводы: во-первых, нет необходимости размещать большое количество термодатчиков внутри подкупольного пространства; во-вторых, для однозначной оценки дополнительной деградации изображения из-за температурных градиентов и микротурбулентных движений воздуха необходимо измерять в нескольких точках температуру штанг телескопа и распределение температуры в толще главного зеркала. При этом крайне важно, чтобы все датчики имели нулевой (в пределах допустимой погрешности) разброс показаний в диапазоне температур

от -10°C до $+25^\circ\text{C}$. Это означает, что все датчики должны быть точно откалиброваны в термостате по опорному высокоточному сертифицированному термометру. Преобразование показаний датчиков в реальные температуры может выполняться как внутри системы сбора данных, так и на сервере архивации во время занесения новой порции измеренных значений температур в базу данных.

Применение цифровых термодатчиков позволило бы упростить систему термомониторинга и повысить ее точность. Другим вариантом модернизации является использование существующей системы при условии тщательной калибровки и перераспределения датчиков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен проф. В. Л. Афанасьеву за предложенную идею изучения зависимости положения фокуса телескопа БТА от температурных условий, а также описание структуры базы данных ASPID и проф. В. Е. Панчуку за ценные замечания по тексту работы. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. R. Wood and S. G. Ryan, Publ. Astron. Soc. Australia **12**, 95 (1995).
2. A. Miyashita, R. Ogasawara, G. Macaraya, and N. Itoh, Publ. National Astron. Obs. Japan **7**, 25 (2003).
3. C. M. Lowne, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **188**, 249 (1979).

4. M. Iye, T. Noguchi, Y. Torii, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **103**, 712 (1991).
5. A. Ziad, D.-A. Wassila, J. Borgnino, and M. Sarazin, *SPIE Conf. Ser.*, **8444**, 31 (2012).
6. L. Zago and F. Rigaut, *The Messenger* **55**, 22 (1989).
7. C. D. Perrine, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **30**, 30 (1918).
8. L. I. Snezhko, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **45**, 39 (1993).
9. Д. В. Сивухин, *Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика* (Наука, Москва, 1975).
10. И. В. Савельев, *Курс общей физики, Том 1: Механика, колебания и волны, молекулярная физика* (Наука, Москва, 1970).

Analysis of Thermal Conditions of the 6-m BTA Telescope Elements and the Telescope Dome Space

E. V. Emelianov

The results obtained using the temperature monitoring systems of the 6-m BTA telescope primary mirror, dome space, and external environment are reported. We consider the factors that affect the development of microturbulence in the near-mirror air layer and inside the dome space, variation of the telescope focal length with the temperature of its structures, variation of seeing due to temperature gradients inside the primary mirror of the 6-m telescope. The methods used in various observatories for reducing microturbulence are analyzed. We formulate suggestions concerning the improvement of the temperature monitoring system currently in operation and the system of automatic adjustment of the telescope focal length to compensate the thermal drift of the focus during observations.

Keywords: *telescopes—atmospheric effects*