

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Об эффективности наблюдений в среднем инфракрасном диапазоне длин волн на 2.5-метровом телескопе КГО МГУ с коммерческими ИК–камерамиС. Г. Желтоухов,^{1,2} А. М. Татарников^{1,2, a}¹ Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ)
Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра экспериментальной астрономии
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Поступила в редакцию 11.07.2022, после доработки 10.10.2022, принята к публикации 12.10.2022.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на успешность проведения наблюдений в ИК–диапазоне (центральные длины волн фотометрических полос 3.75 и 4.8 мкм) на универсальном оптическом телескопе. Получены оценки уровня яркости фона неба для Кавказской горной обсерватории МГУ (КГО): 1.3×10^6 фотонов/(с–пиксел) в полосе 3.75 мкм и 3.4×10^6 фотонов/(с–пиксел) в полосе 4.8 мкм и инструментального фона для 2.5-метрового телескопа КГО при температуре 0°C: 3.2×10^6 фотонов/(с–пиксел) в полосе 3.75 мкм и 4.3×10^6 фотонов/(с–пиксел) в полосе 4.8 мкм. Показано, что при таком уровне фоновых сигналов при использовании существующих в настоящее время коммерческих камер спектрального диапазона 3–5 мкм возможности связи телескопа и камеры при наблюдениях слабых объектов будут по-прежнему ограничены тепловым фоном. Для разных условий наблюдений получены оценки предельных звездных величин объектов, доступных наблюдениям в полосах 3.75 и 4.8 мкм. Для случая средних условий наблюдения (температура аппаратуры 0°C и размер звездных изображений 1'') предел составляет $\sim 10.6^m$ и $\sim 8.4^m$ соответственно.

Ключевые слова: астрономические инструменты, инфракрасная камера, инструментальный фон, излучение атмосферы.

УДК: 520.16, 520.3. PACS: 07.57.-с.

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасным (ИК) излучением называют электромагнитное излучение в широком диапазоне длин волн — от 0.8 до 300–500 мкм. ИК–диапазон граничит с визуальным диапазоном со стороны коротких длин волн и с микроволновым диапазоном со стороны длинных волн. В астрономии для удобства этот диапазон делят на несколько поддиапазонов. Одно из наиболее употребительных делений таково: ближний ИК–диапазон с границами 0.8–2.5 мкм, средний ИК–диапазон с границами 2.5–25 мкм, дальний ИК–диапазон с границами 25–500 мкм. В ближнем ИК–диапазоне возможно проведение астрономических наблюдений с помощью обычных неадаптированных телескопов–рефлекторов, в среднем ИК–диапазоне для снижения инструментального фона необходимо применять различные конструктивные решения (охлаждаемая диафрагма Лио, отсутствие бленд у зеркал телескопа, малый размер вторичного зеркала, модуляция потока излучения и пр., при этом чем больше длина волны, тем требуется большая адаптация телескопа), в дальнем ИК–диапазоне наблюдения возможны лишь с борта космического аппарата или высотного самолета.

В настоящее время в мире работает лишь несколько специализированных ИК–телескопов, на которых возможны наблюдения в среднем ИК–диапазоне. У нас в стране один такой телескоп — АЗТ–ЗЗИК [1], на котором в настоящее время наблюдения ведутся в оптическом диапазоне длин волн 0.3–

1.1 мкм. В ИК–диапазоне в России наблюдения на постоянной основе проводятся лишь на двух неадаптированных телескопах — в диапазоне 1–5 мкм на 1.25-м телескопе ЗТЭ Крымской астрономической станции ГАИШ с одноэлементным фотометром [2, 3] и в диапазоне 1–2.5 мкм на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ [4] с камерой–спектрографом ASTRONIRCAM [5].

Последние годы в связи с развитием техники регистрации ИК–излучения наблюдается тенденция снижения стоимости ИК–детекторов и ИК–камер. При этом улучшаются характеристики и увеличивается спектральный диапазон, доступный серийным коммерческим продуктам. Целью настоящей работы является оценка уровня фона и определение проникающей способности действующего неадаптированного под ИК–наблюдения 2.5-метрового телескопа ГАИШ при работе с коммерческим ИК–детектором на длинах волн от 3 до 5 мкм и представление конструкции прототипа ИК–камеры.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ расположена на высоте 2100 м в 20 км к югу от Кисловодска. Мониторинг астроклимата, выполненный Корниловым с соавторами в 2007–2013 гг. [6], показал, что для КГО медианное значение FWHM звезд (ширина профиля изображения звезды на уровне половины от максимального значения) в видимом диапазоне длин волн 0.96'', медианное значение высоты столба осажденной воды для ясных ночей равно

^a E-mail: andrew@sai.msu.ru

$PWV = 7.8$ мм, а наибольшее количество ясных ночей приходится на осенне-зимний период. Относительно небольшое содержание воды в атмосфере (особенно поздней осенью и зимой) и большая высота обсерватории над уровнем моря, делают возможным проведение наблюдений в ИК-диапазоне. Основным инструментом обсерватории — 2.5-метровый телескоп, работавший в тестовом режиме с 2014 г. и официально принятый в эксплуатацию в конце 2021 г.

2.5-метровый телескоп КГО является универсальным многозадачным телескопом, позволяющим выполнять широкий спектр исследований. Он построен по оптической схеме классического рефлектора Ричи-Кретьена (табл. 1) с дополнительным третичным зеркалом Нэсмита МЗ. Ввод/вывод и поворот зеркала МЗ помогают реализовать пять разных положений фокальной плоскости: фокус Кассегрена (зеркало МЗ выведено из пучка) и четыре фокуса Нэсмита (зеркало МЗ введено в пучок и наклонено под углом 45° к оптической оси главного зеркала), реализуемые поворотом зеркала МЗ вокруг оптической оси главного зеркала телескопа. Планируется, что камера среднего ИК-диапазона будет располагаться в одном из фокусов Нэсмита. С точки зрения конструкции самой камеры все эти фокусы равнозначны.

В настоящее время на рынке присутствуют детекторы и камеры средневолнового ИК-диапазона нескольких производителей стоимостью 50–70 тыс. евро (что на порядок и более ниже стоимости специализированных научных детекторов, имеющих к тому же экспортные ограничения). В качестве сенсора в них используется матрица InSb или HgCdTe фотодиодов, а охлаждение до температур < 100 К осуществляется машиной Стирлинга. Однако не все существующие даже коммерческие камеры доступны для заказа в России. Поэтому для дальнейшего рассмотрения мы возьмем средние параметры доступных в нашей стране детекторов. Как будет показано ниже, важным свойством детектора является чувствительность в требуемом для астрономических наблюдений диапазоне длин волн. Мы будем считать, что используемый детектор работает во всем нужном нам диапазоне длин волн (т.е. от 3 до 5 мкм) с резким падением чувствительности на длинноволновой границе.

Параметрами, задающими возможность наблюдения ярких объектов или работы при высоком уровне фона, являются минимальное время накопления и глубина потенциальной ямы пиксела. Характерные значения этих параметров $t_{min} < 1$ мс и $P_e \sim 8 \times 10^6$ e⁻. Параметры, определяющие угловое поле зрения и угловое разрешение камеры при астрономических наблюдениях на определенном телескопе, — это размер чувствительной области детектора и размер одного пиксела матрицы a . Зададим для первой величины часто встречающийся формат 640×512 пикселей, а для второй — $a = 15$ мкм.

Нами заданы основные параметры всего тракта, через который проходит излучение наблюдаемых

астрономических объектов (атмосфера Земли, телескоп и приемник излучения), на основе которых мы исследуем ограничения, накладываемые ими на точность фотометрических наблюдений и оценим предельные возможности сочетания неадаптированного к ИК-наблюдениям телескопа с коммерческой камерой среднего ИК-диапазона.

2. ОЦЕНКА ЯРКОСТИ ФОНА НЕБА

Одним из основных факторов, мешающих наземным наблюдениям в ИК-диапазоне, является влияние атмосферы Земли. Сглаженная характерная кривая пропускания атмосферы в ИК-диапазоне показана на рис. 1. Вплоть до длины волны 20 мкм видно чередование полос поглощения и пропускания (называемых окнами прозрачности атмосферы). Основными поглощающими агентами выступают водяной пар, углекислый газ и озон. Их содержание в атмосфере не постоянно, из-за этого изменяется и форма полос поглощения вблизи своих границ.

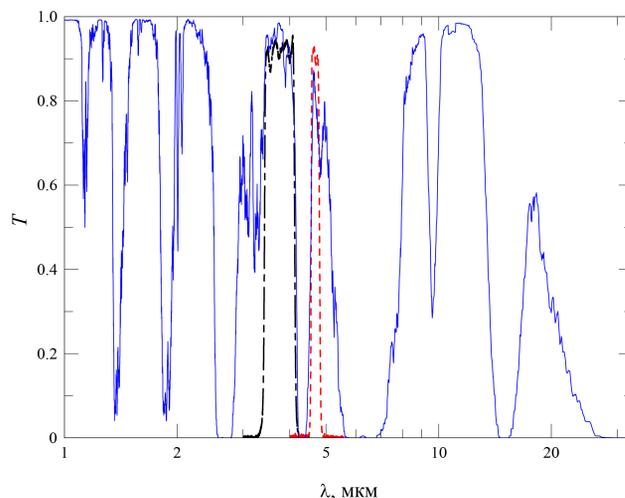


Рис. 1. Зависимость пропускания земной атмосферы от длины волны (для высоты 2000 м над поверхностью Земли и содержания воды в атмосфере 1 мм) и кривые пропускания фильтров L' (штрих-пунктирная линия) и M' (штриховая линия)

КГО ГАИШ расположена на высоте 2100 м над уровнем моря в Карачаево-Черкесской Республике. Для ИК-наблюдений в условиях горной обсерватории в начале 2000-х годов была разработана широкополосная фотометрическая система МКО-NIR (см. [7, 8]) с полосами J, H, K, L', M' . Кривые реакции системы подобраны таким образом, чтобы в них по возможности не попадали сильные полосы поглощения водяного пара и углекислого газа, а также переменные границы этих полос поглощения. В ближнем ИК-диапазоне (полосы J, H, K системы МКО-NIR) на 2.5-метровом телескопе КГО работает ИК-камера ASTRONIRCAM. Поэтому для реализации фотометрических полос среднего ИК-диапазона с новой камерой также была выбрана система МКО-NIR. Параметры фильтров L' и M' приведены в табл. 2, а их кривые реакции представлены на рис. 1. Видно, что для полосы M' не удалось добиться полной независимости кривой реакции системы от пропускания атмосферы.

Таблица 1. Основные параметры 2.5-м телескопа КГО ГАИШ

Параметр	Значение
Оптическая схема	Ричи-Кретьен
Диаметр главного зеркала D	2.5 м
Относительное отверстие A	1/8
Линейное центральное экранирование d	0.408
Коэффициент отражения зеркал	0.95
Диаметр изображения звезды, в котором собирается 80% энергии	0.3''
Масштаб изображения	10''/мм
Максимальная скорость наведения	3°/с
Максимальное ускорение при наведении	1°/с ²

Таблица 2. Основные параметры фильтров L' и M'

Параметр	L'	M'
Центральная длина волны, мкм	3.75	4.70
Ширина полосы пропускания (на уровне 50% от максимального), мкм	0.7	0.21
Пропускание в максимуме	0.9	0.9
Пропускание вне рабочей области	< 0.005	< 0.005

В ИК-диапазоне атмосфера Земли является мощным источником фонового излучения. Величина потока этого излучения сильно зависит от длины волны — если в полосе K (2.2 мкм) поверхностная яркость неба составляет 12.5^m с квадратной секунды (измерено по наблюдениям в КГО), то в полосе L' она равна 4^m , а в полосе M' 1^m . Соответствующие величины в энергетических единицах: $F_K = 5 \times 10^{-5}$ Вт/м²/ср, $F_{L'} = 4 \times 10^{-2}$ Вт/м²/ср, $F_{M'} = 8 \times 10^{-2}$ Вт/м²/ср. Приведенные величины яркости в полосах L' и M' зависят от содержания воды в атмосфере — при увеличении количества осажденной воды с 2 мм до 10 мм яркость фона неба в этих полосах меняется примерно на 20%¹.

На рис. 2 представлен график зависимости количества фотонов, излучаемых 1 квадратной угловой секундой неба от длины волны. Свернув приведенные данные с кривыми пропускания L' и M' фильтров, можно получить поток фотонов в них, определяемый фоном: для полосы L' на 2.5-метровом телескопе КГО (см. табл. 1) поток 1.3×10^6 фот/с, для M' поток 3.4×10^6 фот/с.

Точным наблюдениям мешает не только высокая яркость фона неба, но и её быстрые флуктуации, характерные для среднего ИК-диапазона. Для учета флуктуаций необходимо одновременно (квазиодновременно) наблюдать как фон, так и объект, что возможно благодаря высокой частоте следования кадров используемых ИК-детекторов.

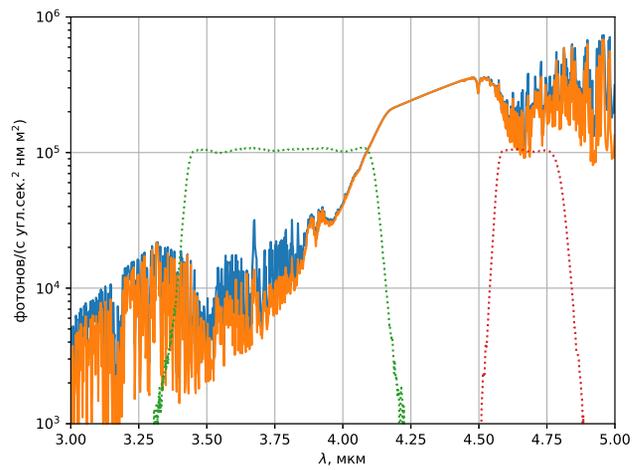


Рис. 2. Спектр фона неба по данным сайта Gemini (<https://www.gemini.edu/observing/telescopes-and-sites/sites#Near-IR-long>) для воздушной массы 1.5. Синяя кривая — фон неба для 10 мм осажденной воды. Оранжевая кривая — для 2.3 мм осажденной воды. Пунктирными линиями показаны кривые пропускания фильтров L' и M'

3. ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ФОНА

В среднем и дальнем инфракрасных диапазонах на получаемые изображения сильно влияет тепловое излучение телескопа и отдельных частей приемной аппаратуры. Начиная примерно с длины волны 2 мкм мощность теплового излучения неадаптированного к ИК наблюдениям телескопа становится сравнима с мощностью фонового излучения неба. Ниже приводятся расчёты потока фотонов, падающих на детектор от телескопа, и конструктивных элементов камеры для разных температур.

3.1. Излучение телескопа

Для определения вклада излучения телескопа в величину инструментального фона были проведены измерения теплового излучения от элементов телескопа при помощи тепловизора. Рабочий диапазон длин волн тепловизора составляет 7–14 мкм, что позволяет увидеть именно собственное тепловое излучение, которое в этом диапазоне наиболее интенсивно. Тепловизор был помещен в то же место,

¹ <https://www.gemini.edu/observing/telescopes-and-sites/sites#Near-IR-long> Для расчёта данных на этой странице использовался меморандум[9]

где в дальнейшем будет установлена ИК-камера. В результате мы получили тепловую карту для внутренних частей телескопа, которые в итоге будут попадать в поле зрения камеры. Соответствующее изображение можно видеть на рис. 3.

В первом приближении коэффициент излучающей способности незеркальных элементов телескопа можно считать близким к 1 как на рабочих длинах волн тепловизора, так и в полосах L' и M' . В этом случае данные о температуре, полученные с помощью тепловизора, и об угловых размерах видимых от детектора элементов телескопа однозначно пересчитываются в сигнал, воспринимаемый детектором. Оценим количество фотонов N_{ph} , приходящих от элемента с температурой T и угловой площадью Ω на пиксел детектора с линейным размером a в некотором диапазоне длин волн:

$$N_{ph} = \Omega a^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{hc} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda. \quad (1)$$

Полный телесный угол, который должен видеть пиксел детектора при наблюдениях, определяется относительным отверстием телескопа A , и для пучка 2.5-метрового телескопа КГО составляет 41 квадратный градус. Из них 35 квадратных градусов — видимая в телескоп площадь относительно холодного неба (a точнее — его отражения от зеркал телескопа) и минимум 6 квадратных градусов займут теплые и излучающие в ИК-диапазоне элементы телескопа. Так как телескоп КГО не оптимизирован к ИК-наблюдениям, в поле зрения детектора попадает излучение оправы главного зеркала и бленды вторичного зеркала, а также растяжки, на которых крепится узел вторичного зеркала (см. рис. 3).

Из данных, представленных на рис. 3, мы можем получить оценку излучательной способности зеркал 2.5-метрового телескопа. Для этого необходимо определить «температуру» неба, наблюдаемого без телескопа, и неба, видимого через телескоп. После отключения внутренних калибровок тепловизора, учитывающих влияние расстояния до объекта и отраженного от него излучения, можно считать, что поток, принимаемый тепловизором, непосредственно пропорционален интегралу от формулы Планка в пределах чувствительности тепловизора (от 7 до 14 мкм) с температурой тела, равной выдаваемой тепловизором. Обозначим этот интеграл $B_f(T)$. Теперь мы можем составить уравнение на суммарную излучательную способность зеркал, ε . Измерения показали, что «температура» неба составляла $T_s = -39^\circ\text{C}$, а «температура» неба через телескоп — $T_t = -32.9^\circ$. При этом датчики, расположенные непосредственно на поверхности зеркала, показывали, что его температура $T_m = -5^\circ\text{C}$. Таким образом мы получаем уравнение (2), из которого получается значение $\varepsilon = 0.14$, что вполне правдоподобно для трех последовательно расположенных зеркал.

Итоговые результаты вычислений потока от телескопа можно увидеть в табл. 3.

$$B_f(T_t) = (1 - \varepsilon)B_f(T_s) + \varepsilon B_f(T_m). \quad (2)$$

Таблица 3. Фон, создаваемый телескопом

Температура телескопа, °C	Сигнал в полосе L' , фот/с/пкс	Сигнал в полосе M' , фот/с/пкс
-20	470 000	1 000 000
-10	820 000	1 600 000
0	1 400 000	2 500 000
10	2 200 000	3 700 000
20	3 500 000	5 300 000

Для проверки полученных оценок мы провели измерения вклада телескопа в фоновое излучение независимым методом. Для этого были использованы наблюдения, проводимые с помощью уже установленной на телескопе камеры ASTRONIRCAM ближнего ИК-диапазона (1–2.5 мкм)[5]. На длине волны > 2 мкм вклад теплового излучения телескопа становится заметен на фоне других источников. Поэтому нами была получена зависимость фонового сигнала, регистрируемого в полосе K (2.2 мкм) от температуры телескопа (рис. 4). Мы предполагаем, что яркость фона неба слабо зависит от температуры приземного слоя воздуха (благодаря высокой прозрачности атмосферы вне полос поглощения). Это дает возможность отделить вклад в общий фоновый поток от неба и от телескопа. С помощью аппроксимации полученных точек модельной зависимостью мы получаем, что сигнал от неба в каждом элементе детектора ASTRONIRCAM составляет примерно 210 отсчетов в секунду, а от телескопа при 0°C — 250 отсчетов в секунду. Фильтры и конструктивные элементы камеры ASTRONIRCAM охлаждены до криогенных температур, поэтому здесь мы пренебрегаем их излучением. Далее, зная коэффициент преобразования числа фотоэлектронов в отсчеты ($\text{gain}=2.2$) и квантовый выход детектора камеры ASTRONIRCAM[5], можно определить количество фотонов N_K , падающих в полосе K за единицу времени на единицу площади детектора. Считая излучение чернотельным, можно вычислить приходящий от телескопа поток и в интересующих нас фильтрах L' и M' . Для этого необходимо умножить полученную величину N_K на отношение интегралов от функции Планка для соответствующих спектральных диапазонов и пересчитать поток на размер пиксела a исследуемого детектора (3).

$$N_{LM} = N_K \cdot a^2 \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{hc} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda}{\int_{\lambda_{K1}}^{\lambda_{K2}} \frac{\lambda}{hc} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda}. \quad (3)$$

После расчёта этих значений мы получаем данные, хорошо совпадающие с результатами, представленными в табл. 3, которые были вычислены другим способом. Однако надо учитывать, что даже небольшие изменения в начальных данных могут поменять расчётный уровень фона почти в 2 раза, т.е. полученные результаты можно считать характерной оценкой. Тем не менее совпадение полученных результатов с большой долей вероятности означает хорошую

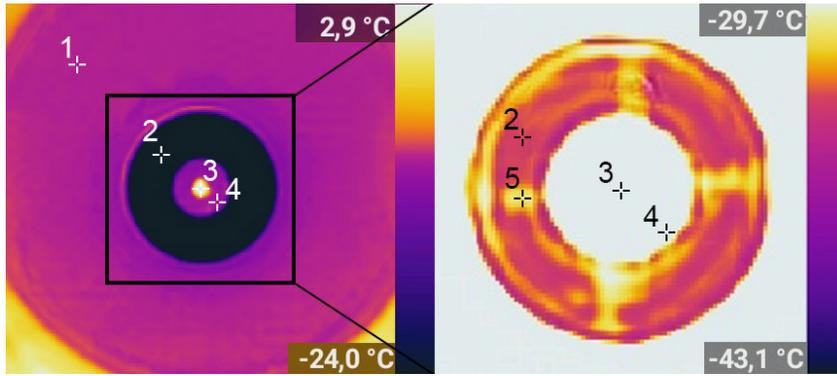


Рис. 3. Тепловая карта внутренних частей телескопа, полученная 24 декабря 2021 г. при температуре воздуха вне башни телескопа -15°C . Справа показан увеличенный фрагмент внутренней части изображения; цветовая шкала на изображениях разная. Точка 1 (-7.2°C) — бленда третичного зеркала МЗ, точка 2 (-32.9°C) — небо, видимое после отражения от трех зеркал телескопа, точка 3 ($+7.2^{\circ}\text{C}$) — отражение теплого наблюдателя с тепловизором во вторичном зеркале телескопа, точка 4 (-8.1°C) — отражение внутренней части бленды зеркала МЗ во вторичном зеркале, точка 5 (-30.5°C) — температура, измеряемая вблизи изображения металлических растяжек, на которых крепится вторичное зеркало.

правдоподобность используемых моделей и верную оценку излучающей угловой площади телескопа в первом способе расчёта.

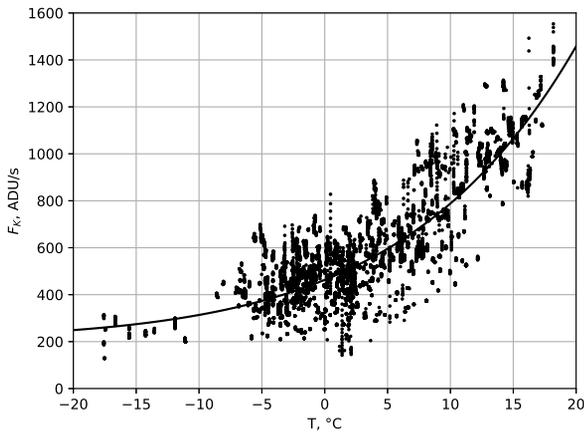


Рис. 4. Зависимость полной величины фона в полосе K от температуры зеркала телескопа. Линией показана модельная зависимость, используемая в дальнейших расчётах

3.2. Излучение фотометрических фильтров

Помимо излучения различных частей телескопа, важным источником фонового сигнала являются конструктивные элементы самой ИК-камеры. Прежде всего — входной светофильтр, элемент, занимающий наибольшую часть поля зрения. Для расчёта величины собственного излучения фильтров использовалась формула, аналогичная формуле (1):

$$E_{ph} = \Omega_T a^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) \frac{\lambda}{hc} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} d\lambda. \quad (4)$$

В этой формуле Ω_T — это полный телесный угол пучка, приходящего из телескопа, а ε — излучательная способность фильтра. Если бы фильтр был полностью прозрачным (или полностью зеркальным), то его излучательная способность ε была бы равна 0.

Реальный фильтр будет иметь кривую пропускания $T(\lambda)$, определяемую желаемой фотометрической системой (см. рис. 1). Кроме того, используемые светофильтры при взгляде со стороны детектора будут иметь кривую отражения $R(\lambda)$. Типовые кривые пропускания и отражения интерференционных фильтров показаны на рис. 5. Таким образом, величину излучательной способности можно оценить по формуле $\varepsilon(\lambda) = 1 - T(\lambda) - R(\lambda)$. Обычно она составляет от нескольких процентов до 10–15% в интересующем нас диапазоне.

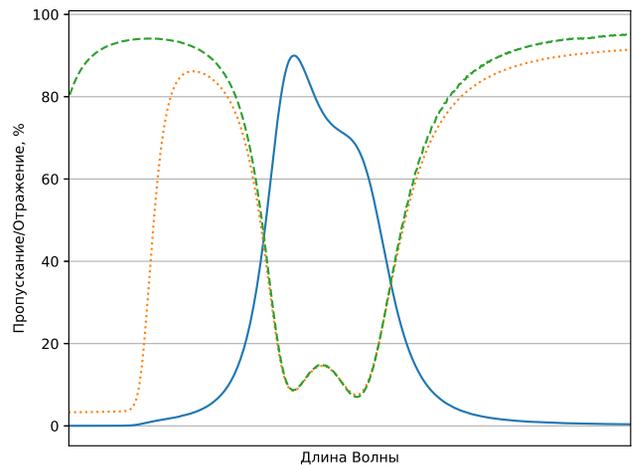


Рис. 5. Форма кривых пропускания (сплошная синяя кривая) и отражения от обеих сторон (штриховая линия — взгляд на фильтр со стороны детектора, пунктирная линия — со стороны телескопа) для типичного интерференционного фильтра

Далее необходимо учесть температуру отраженного от фильтра излучения. Из-за описанных далее в разд. 4 особенностей конструкции прибора в этом расчёте мы приняли её равной внутренней температуре кристата детектора -100°C . Этот отраженный поток оказывается значительно меньше собственного излучения фильтров. Получаемые значения паразитных потоков от фильтров сильно зависят от

выбранного значения излучательной способности материала фильтра. Результаты расчётов для значения $\varepsilon = 0.04$ можно увидеть в табл. 4. Величины для обоих фильтров одинаковые, так как считается что ε не зависит от спектрального диапазона.

Таблица 4. Фон, создаваемый фотометрическими фильтрами при $\varepsilon = 4\%$ во всем диапазоне чувствительности детектора

Температура фильтра, °C	Величина фона, фотон/(с·пиксел)
-20	730 000
-10	1 200 000
0	1 800 000
10	2 600 000
20	3 800 000

4. ВОЗМОЖНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИК-КАМЕРЫ

Одна из главных задач, которую необходимо решить при создании инфракрасного прибора, — минимизация инструментального фона. Для этого нужно минимизировать количество теплых оптических элементов в схеме прибора. В нашем случае детектор поставляется с собственным криостатом и системой охлаждения на основе машины Стирлинга. Малая мощность холодильника приводит к тому, что непосредственный контакт с охлаждаемой машиной площадью имеет только детектор. Поле зрения детектора ограничивает холодная диафрагма, расположенная в одном вакуумированном объеме с детектором. Входным окном служит тонкая кремниевая пластинка, установленная на торце полированного стального конуса, который может применяться для крепления камеры. В этом случае камеру можно установить на дополнительный криостат с вакуумированным объемом, в котором расположить охлаждаемые светофильтры, перебрасывающую оптику

и ограничивающие холодные диафрагмы. Однако, использование дополнительного криостата резко повышает итоговую стоимость проекта. Поэтому мы предлагаем к рассмотрению упрощенную конструкцию камеры.

В конструкции без криостата можно ограничиться одним элементом, расположенным в световом пучке, питающим прибор — фотометрическим светофильтром. Относительное отверстие 2.5-метрового телескопа КГО $A = 1/8$, что дает небольшие углы схождения лучей и позволяет интерференционным фильтрам работать в сходящемся пучке без заметного изменения полосы пропускания. Однако этот угол гораздо больше углового поля зрения детектора, которое часто рассчитывают исходя из величины $A = 1/4$. Вне своей полосы пропускания интерференционные фильтры являются зеркалами с высоким коэффициентом отражения. Характерные кривые пропускания и отражения можно увидеть на рис. 5. Таким образом, для снижения инструментального фона необходимо минимизировать температуру отраженного излучения. При установке светофильтров в непосредственной близости к входному окну детектора можно добиться того, что светофильтры будут отражать холодные внутренности детектора. Для ограничения величины сигнала, прошедшего через светофильтр, из-за различия относительных отверстий телескопа и детектора необходимо установить зеркальную диафрагму с соответствующим внутренним размером и с внешним размером, превышающим размер фильтра. Зеркальная диафрагма должна иметь вогнутую поверхность для исключения отражения в ней теплых частей камеры. Общая схема получившегося узла показана на рис. 6.

5. ОЦЕНКА ПРОНИЦАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

На основе полученных данных об инструментальном фоне и фоне неба в исследуемых диапазонах для выбранного варианта конструкции камеры можно провести оценку предельной проникающей способности. Для этого запишем теоретическое соотношение сигнал-шум (SNR):

$$SNR = \frac{F_0 \cdot 2.512^{-m} \cdot t}{\sqrt{F_0 \cdot 2.512^{-m} \cdot t + 2((a_s/a_{pix})^2 \cdot F_{bg} \cdot t + (a_s/a_{pix})^2 \cdot \sigma_d^2/n)}}, \quad (5)$$

где t — время накопления сигнала, F_0 — количество фотоэлектронов, улавливаемых детектором от звезды 0^m , m — звездная величина исследуемого объекта, F_{bg} — количество фотоэлектронов, регистрируемых детектором от фона (сумма инструментального фона, фона неба и темнового тока) в расчёте на 1 квадратную угловую секунду неба, a_s и a_{pix} — размер изображения звезды и пиксела в угловых секундах соответственно, n — количество отдельных кадров, участвующих в получении итогового изображения. Коэффициент 2 перед вторым слагаемым в знаменателе учитывает тот факт, что вычитание

фона при обработке удвоит соответствующий шум. При вычислениях предполагалось, что квантовая эффективность детектора равна 0.85, а пропускание атмосферы, телескопа и светофильтра — 0.5. К сожалению производителем не специфицируется значения шума считывания и темнового тока детектора, но для подобных приемников вызываемые этими эффектами шумы обычно оказываются значительно ниже пуассоновского шума фона [10]. При этих условиях значение искомой предельной звездной величины для заданных уровня фона, SNR и времени накопле-

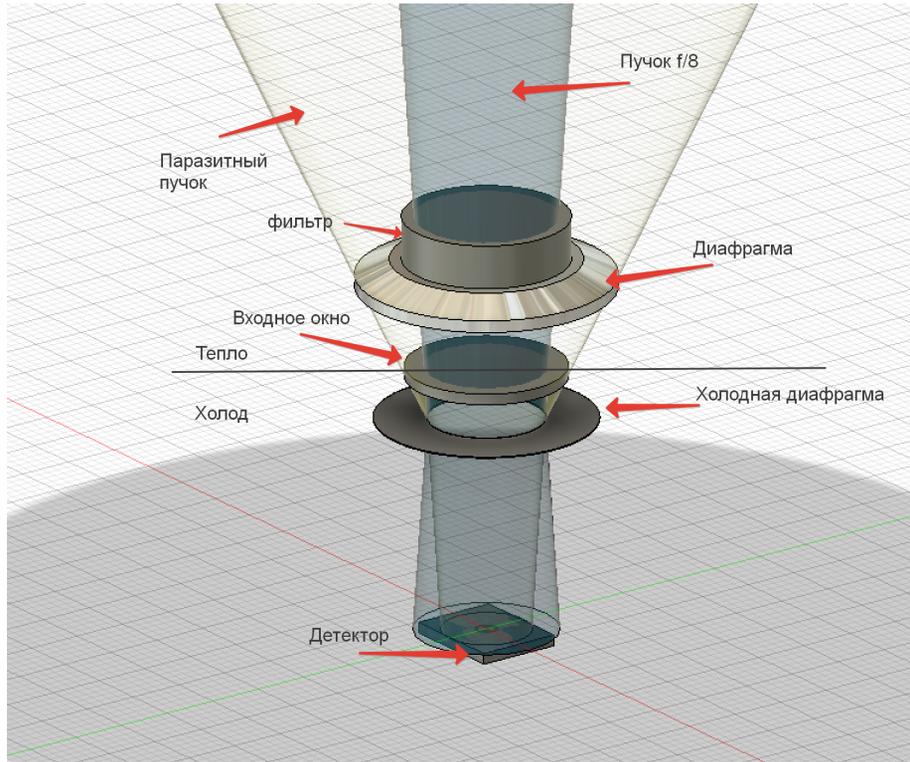


Рис. 6. Схема расположения диафрагм и светофильтров вблизи детектора

Таблица 5. Расчётные предельные звездные величины точечных источников

Условия	фильтр L'	фильтр M'
$T_{tel} = -20^{\circ}\text{C}, T_{fltr} = -40^{\circ}\text{C}, \varepsilon_{fltr} = 0.04, FWHM = 1''$	11.2^m	8.8^m
$T_{tel} = 0^{\circ}\text{C}, T_{fltr} = 0^{\circ}\text{C}, \varepsilon_{fltr} = 0.04, FWHM = 1''$	10.6^m	8.4^m
$T_{tel} = +20^{\circ}\text{C}, T_{fltr} = +20^{\circ}\text{C}, \varepsilon_{fltr} = 0.04, FWHM = 1''$	10.2^m	8.1^m
$T_{tel} = +20^{\circ}\text{C}, T_{fltr} = +20^{\circ}\text{C}, \varepsilon_{fltr} = 0.2, FWHM = 1''$	9.7^m	7.6^m
$T_{tel} = +20^{\circ}\text{C}, T_{fltr} = +20^{\circ}\text{C}, \varepsilon_{fltr} = 0.04, FWHM = 2.5''$	9.2^m	7.1^m

ния может быть легко получено решением уравнения (5) относительно m .

Ограничения на величину минимальной экспозиции со стороны электроники детектора влияют на возможность наблюдения ярких объектов. Характерной величиной минимальной экспозиции коммерческих детекторов можно считать 300–400 мкс. При ёмкости ячейки в 8 млн электронов мы сможем наблюдать звезды не ярче -4.5^m в L' и -7^m в M' .

Максимально возможная одиночная экспозиция ограничивается максимальной емкостью пиксела (8×10^6 e⁻). Для найденных выше характерных значений фона максимальная экспозиция составит $t_{max} = 1 - 3$ с. Однако если шум считывания пренебрежимо мал, то одна длинная экспозиция принципиально неотличима от суммы множества коротких. Это позволяет обойти ограничения на величину t_{max} и при необходимости накапливать сотни кадров для получения необходимого SNR. Кроме того, наблюдения в режиме сложения отдельных кадров для получения итогового изображения позволяют организовать модуляцию светового потока, когда между отдельными кадрами происходит перемещение центра поля зрения на $5 - 10''$. Частота

модуляции при этом получается достаточно высокой (0.3 – 10 Гц), и для реализации этого метода требуется использование дополнительного качающегося зеркала, установленного между входным отверстием камеры и элементами оптической схемы телескопа. Для дальнейших расчетов зададим время накопления t равным 1 с.

Будем считать величину $SNR = 3$ границей обнаружимости на кадре точечного объекта. В табл. 5 мы приводим результаты расчетов для разных случаев. Первые три строки таблицы получены при фиксированных значениях $\varepsilon = 0.04$ и размера изображения звезды $FWHM = 1''$. Видно, что переход от холодного телескопа и холодных фильтров к нагретым приводит к потере примерно 1^m . К таким же потерям приводят наблюдения, проводимые при низком качестве изображения. Использование фильтров с высокой излучательной способностью также ухудшает предельную величину камеры.

На рис. 7 для условий наблюдений, заданных во второй строке табл. 5, приведена зависимость интегрального времени накопления t , требующегося для достижения определенной звездной величины m точечного объекта, для двух характерных значе-

ний SNR : $SNR = 3$ — предел обнаружимости и $SNR = 100$ — случай точной фотометрии.

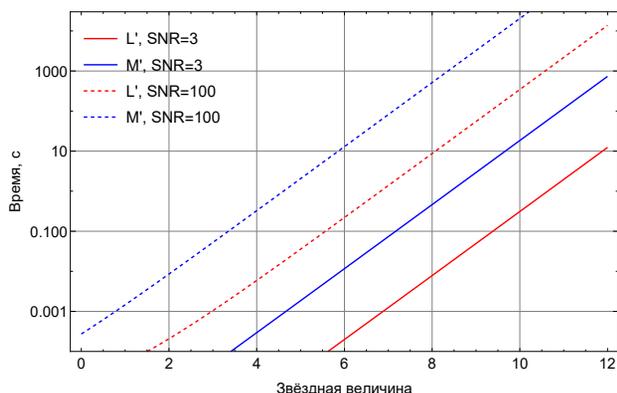


Рис. 7. Зависимость времени экспозиции от блеска звезды при температуре телескопа и фильтров 0°C , $FWHM = 1''$ и $\varepsilon_{filtr} = 0.04$. Красная сплошная линия — фильтр L' для $SNR = 3$. Красная пунктирная линия — фильтр L' для $SNR = 100$. Синяя сплошная линия — фильтр M' для $SNR = 3$. Синяя пунктирная линия — фильтр M' для $SNR = 100$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для рассматриваемой в нашей работе связки универсального оптического телескопа и коммерческой ИК камеры, работающей в коротковолновом конце среднего ИК-диапазона (3–5 мкм), для различных условий наблюдений получены величины вклада в фоновый сигнал от всех составляющих: атмосферы Земли, телескопа, конструктивных элементов камеры (см. табл. 3, 4 и рис. 2). Сравнение величин этих компонентов говорит о том, что их вклады примерны равны в полосе L' , в полосе M' при температуре телескопа ниже 10°C доминирует излучение атмосферы, а при более теплом телескопе — излучение телескопа. Для минимизации вклада от компонентов камеры (при сохранении минимальной стоимости системы) предложена компоновка светофильтра с зеркальной диафрагмой вогнутой формы (рис. 6).

Расчеты предельной звездной величины объектов, доступных наблюдениям с камерой, были проведены для различных условий наблюдений. Из табл. 5 видно, что потери при переходе от варианта к варианту составляют $0.5\text{--}1^m$. Наибольшее влияние оказывает качество изображения во время наблюдений. В работе [10] для адаптированного телескопа диаметром 10 м, установленного в высокогорной обсерватории, для таких же значений SNR и времени накопления была получена оценка предельной величины в полосе M' 13^m . Прямой пересчет на 2.5-метровый телескоп КГО приводит к значению предельной величины 10^m , что примерно на 1^m лучше полученной нами оценки для предлагаемой конструкции камеры. Такое различие связано в основном с меньшим

вкладом атмосферы в условиях высокогорья и более низкой температурой телескопа.

Полученные нами оценки предельной проникающей величины показывают, что наблюдениям с предлагаемой ИК камерой, согласно данным каталога WISE[11], будет доступно более 1 млн объектов. Это звезды самых разных типов и классов, галактики разных типов, планетарные туманности и другие объекты. Легко получить оценки размеров тел Солнечной системы, которые могут быть доступны наблюдениям с описываемой аппаратурой. Например, «серый» астероид диаметром 100 км в главном поясе в противостоянии с альбедо 0.2 будет иметь блеск $m_{L'} = 8.7^m$ и $m_{M'} = 8.5^m$, что близко к нашему порогу обнаружения. Тело на орбите Луны диаметром 30 м с такими же альбедо будет иметь блеск $m_{L'} = 9.6^m$ и $m_{M'} = 7.7^m$. Такое значительное изменение показателя цвета связано с сильно возросшим собственным излучением тела, находящегося ближе к Солнцу, в более длинноволновом диапазоне M' . Если рассматривать околоземную орбиту, то камере будут на пределе доступны объекты сантиметровых размеров.

С. Желтоухов благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БА-ЗИС» №21-2-10-35-1. Работа С. Желтоухова поддержана грантом 075-15-2020-778 Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука». В работе использованы данные обзора WISE (объединенный проект Университетов Калифорнии и Лос-Анжелеса и Лаборатории реактивного движения/Калифорнийского технологического Института).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камус С.Ф., Тергоев В.И., Панушев П.Г. и др. // Оптический журнал. 2002. **69**. С. 84.
2. Наджип А.Э., Шенаврин В.И., Тихонов В.Г. // Труды ГАИШ. 1986. **58**. С. 119.
3. Шенаврин В.И., Таранова О.Г., Наджип А.Э. // Астрономический журнал. 2011. **88**. С. 34.
4. Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al. // Ground-Based Astronomy in Russia. Proc. 2020. **1**. P. 127.
5. Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У. и др. // Астрофизический бюллетень. 2017. **72**. P. 382.
6. Kornilov V., Safonov B., Kornilov M. et al. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2014. **126**. P. 482.
7. Simons D.A., Tokunaga A. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2002. **114**. P. 169.
8. Tokunaga A.T., Simons D.A., Vacca, W.D. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2002. **114**. P. 180.
9. Lord S.D. // NASA Technical Memorandum. 1992.
10. Zhao Zhi-Jun, Zhou Hai-Jing, Zhang Yu-Chen et al. // Research in Astronomy and Astrophysics. 2021. **21**. P. 81.
11. Wright E. L., Eisenhardt P.R.M., Mainzer A.K. et al. // Astronomical Journal. 2010. **140**. P. 1868.

On the Effectiveness of Observations in the Mid-Infrared Wavelength Range on the 2.5-Meter Telescope of the Caucasus Mountain Observatory of Moscow State University with Commercial IR Cameras

S. G. Zheltoukhov^{1,2}, A. M. Tatarnikov^{1,2,a}

¹*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia*

²*Department of Experimental Astronomy, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^aandrew@sai.msu.ru

The main factors that influence the success of observations in the infrared range (central wavelengths of the photometric bands at 3.75 and 4.8 μm) on the multipurpose optical telescope are considered. Estimates of the sky background brightness are obtained for the Caucasus Mountain Observatory (CMO) of Moscow State University: 1.3×10^6 photons/(s pixel) in the 3.75 μm band and 3.4×10^6 photons/(s pixel) in the 4.8 μm ; and the instrumental background for the 2.5-m CMO telescope at 0°C: 3.2×10^6 photons/(s pixel) in the 3.75 μm band and 4.3×10^6 photons/(s pixel) in the 4.8 μm band. It is shown that at this background signal level with the currently available commercial cameras in the 3–5 μm spectral range, the telescope–camera coupling capabilities for observing faint objects will still be limited by the thermal background. For different observational conditions, estimates of the limiting magnitudes of objects available for observations in the 3.75 and 4.8 μm ranges are obtained. For average observation conditions (instrument temperature of 0°C and stellar image size of 1''), the limit is $\sim 10.6^m$ and $\sim 8.4^m$, respectively.

Keywords: astronomical instruments, infrared camera, instrumental background, atmospheric radiation.

PACS: 07.57.-c

Received 11 July 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 6. Pp. 886–895.

Сведения об авторах

1. Желтоухов Сергей Геннадьевич — вед. программист, аспирант; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: srg7zh@gmail.com.
2. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: andrew@sai.msu.ru.