

Новая инфракрасная камера Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ: конструкция, основные параметры и первый свет

С. Г. Желтоухов,^{1,2} А. М. Татарников,^{1,2,*} А. А. Белякова,² Е. А. Кокшарова²

¹Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, астрономическое отделение, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
(Поступила в редакцию 27.11.2023; подписана в печать 30.11.2023)

В работе представлен прототип инфракрасного фотометра, созданный в ГАИШ МГУ на базе коммерческого светочувствительного модуля Gavin-615A. Основной спектральный рабочий диапазон фотометра 3–5 мкм. Исследования детектора фотометра показали, что его параметры соответствуют заявленным производителем. Нелинейность детектора не превышает $\sim 5\%$ во всем диапазоне сигналов, для ее исправления определены коэффициенты корректирующих функций. Дополнительно определены шум считывания $RN = 1200 \pm 210 e^-$, коэффициент преобразования $GAIN = 520 \pm 9 e^- / ADU$, величина сигнала кадра подложки $BIAS = 960.5 \pm 2.2 ADU$ и темновой ток $\approx (9.3 \pm 1.1) \cdot 10^6 e^- / c$, состоящий из суммы темнового тока детектора и излучения входного окна чувствительного модуля и измеренный нами при температуре входного окна $6^\circ C$. С прибором начаты наблюдения на 2.5-м телескопе Кавказской горной станции МГУ, первые результаты которых приведены в работе. Невиньетированное поле зрения составило $30''$. В полосе M при хороших атмосферных условиях достигнуто качество изображения, близкое к дифракционному. За время накопления 20 с с отношением $SNR \sim 10$ получены изображения звезды с блеском $L = 7.96$ и $M = 6.78$. Показано, что при высоком качестве изображений за время накопления 20 с в полосах L и M с $SNR=3$ можно наблюдать звезды до $\sim 9^m$ и $\sim 8^m$ соответственно. Основной модуль фотометра использовался также при измерениях яркости фона неба.

PACS: 95.85.Jq УДК: 520.8.07

Ключевые слова: ИК-астрономия, фотометрия.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2410801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2410801)

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасный диапазон занимает на шкале электромагнитных колебаний почти 10 октав, а видимый диапазон, в котором проводится подавляющее большинство астрономических наблюдений в нашей стране, — всего одну октаву. В ИК-диапазоне можно наблюдать все типы астрономических объектов — от экзопланет и активных ядер галактик до тел Солнечной системы и искусственных спутников Земли. При этом наблюдения в ИК-диапазоне имеют целый ряд преимуществ: максимум излучения холодных объектов (звезд поздних спектральных классов, пылевых оболочек, межзвездных газо-пылевых облаков и т.п.) приходится на ИК-область спектра, малое межзвездное поглощение позволяет наблюдать объекты, скрытые за плотными пылевыми облаками, меньшая чувствительность к атмосферной турбулентности позволяет проще получать высокое угловое разрешение, а резкое падение рассеяния света в атмосфере Земли с ростом длины волны позволяет проводить наблюдения в среднем ИК-диапазоне днем.

Возможность проведения наблюдений слабых объектов в ИК-диапазоне во многом зависит от места расположения обсерватории и его астроклимата. Регулярные наблюдения в этой области спектра ведутся у нас в стране в двух обсерваториях — Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ с одноэлементным фотометром на базе InSb-фотодиода ([1]) и Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (КГО, [2]) с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM ([3]) на базе матричного детектора Hawaii-2RG. Астроклимат КГО хорошо исследован. Эта обсерватория, благодаря большой высоте над уровнем моря (2110 м), низкому содержанию водяного пара в атмосфере (медианное значение PWV меньше 8 мм [4]) и высокому качеству изображений ([5]), хорошо подходит для наблюдений в ИК-диапазоне. Согласно работе [6], в КГО в ближнем ИК-диапазоне 1 квадратная угловая секунда фона ночного неба в среднем имеет блеск $J = 15.5^m$, $H = 13.7^m$, $K = 13.1^m$, что соответствует лучшим обсерваториям мира, расположенным на схожих высотах над уровнем моря.

В последние годы достигнут значительный прогресс в технологии производства приемников ИК-диапазона: увеличиваются размеры чувствительной области, квантовая эффективность вплотную приблизилась к единице, снижается стоимость от-

* E-mail: andrew@sai.msu.ru

дельных образцов детекторов. Оценки, выполненные в работе [7], показывают, что при использовании не оптимизированного к ИК-наблюдениям наземного телескопа, на длинах волн до 5 мкм можно использовать современные коммерческие матричные приемники — шумовые ограничения при наблюдениях слабых объектов будут определяться в основном фоновым излучением, а не шумом самого детектора.

В конце 2022 г. МГУ приобрел коммерческий матричный ИК-приемник, предназначенный для работы в тепловизорах, с рабочим диапазоном длин волн 3–5 мкм, на базе которого нами был изготовлен прототип астрономической ИК-камеры, получивший в КГО аббревиатуру LMP (L and M bands Photometer) и установленный в 2023 г. на 2.5-м телескопе этой обсерватории. В данной статье мы представляем характеристику камеры LMP как прибора для проведения астрономических наблюдений в области длин волн 3-5 мкм и результаты первых наблюдений с ней.

1. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА

В настоящее время LMP фотометр собран по схеме, предложенной ранее в нашей работе [7]. Это не самая оптимальная схема с точки зрения величины инструментального фона, но она позволяет собрать действующий прибор при минимальных затратах. В будущем мы планируем добавить редуктор фокуса и вынести все оптические элементы камеры в отдельный охлаждаемый модуль.

Основой фотометра является светочувствительный модуль Gavin-615A с матрицей из HgCdTe формата 640×512 пикселей в качестве детектора изображения, охлаждаемой до ≈ 82 К машиной Стирлинга. Из базовой модели модуля производитель по нашему заказу удалил внутренний полосовой светофильтр, пропускавший на детектор излучение лишь в спектральном диапазоне 3.7–4.8 мкм. Это позволило расширить спектральный диапазон чувствительности камеры и использовать внешние светофильтры, реализующие стандартные фотометрические полосы, совпадающие с окнами прозрачности земной атмосферы.

Первоначально (до ноября 2023 г.) в фотометр были установлены фильтры L ($\lambda_c = 3.7$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.49$ мкм) и M ($\lambda_c = 4.8$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.54$ мкм), аналогичные используемым в одноканальном ИК-фотометре ГАИШ на 1.25-метровом телескопе ЗТЭ Крымской астрономической станции [1]. Расширение диапазона чувствительности позволило установить также фильтр K с центральной длиной волны 2.2 мкм, однако квантовая эффективность камеры на этой длине волны в несколько раз ниже, чем в основном диапазоне, и наблюдениям с ним доступны лишь наиболее яркие объекты. Как было предложено в [7], вокруг светофильтров установлены зеркальные поверхности, уменьшающие инструментальный фон от

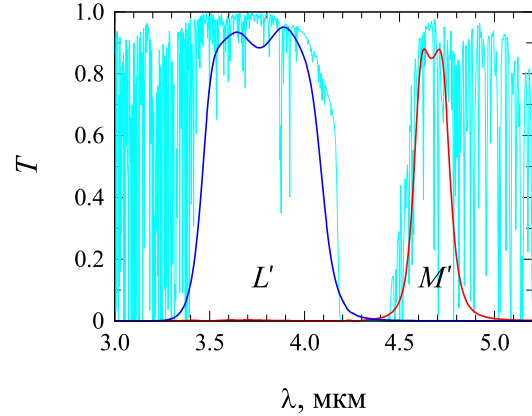


Рис. 1. Кривые пропускания светофильтров L' и M' и земной атмосферы для высоты 2 км над уровнем моря и содержания водяного пара 5 мм

фильтров. Все светофильтры, а также открытое отверстие и калибровочная заглушка установлены в колесе, приводимом в движение шаговым мотором. Для фиксации колеса в рабочем положении используется механизм подпружиненного стопора (детенд-механизм). Время смены фильтра примерно 5 с.

В ноябре 2023 г. мы заменили светофильтры L и M на новые, изготовленные российским предприятием ООО ALKOR Technologies¹, реализующие фотометрические полосы L' и M' системы MKO-NIR ([8]). Их кривые реакции представлены на рис. 1. Они подобраны таким образом, чтобы оптимально вписываться в соответствующие окна прозрачности земной атмосферы. Среднее пропускание фильтров, вычисленное по формуле $T_{avr} = \int T(\lambda)d\lambda/FWHM$, центральная длина волны и другие параметры фильтров приведены в табл. 1.

Для возможности ручной калибровки прибора в корпусе предусмотрено отверстие, в которое можно вводить охлажденную (для измерения темнового тока) или нагретую металлическую пластинку (для получения карты распределения чувствительности пикселей).

Все основные детали корпуса и колеса фильтров напечатаны на 3D-принтере из PETG-пластика. Как показал опыт, его жесткости достаточно для обеспечения требуемой точности позиционирования всех узлов фотометра. На рис. 2 и 3 приведена 3D-модель установки и ее фотографии. Как видно, светочувствительный модуль Gavin-615A установлен на монолитной детали (закрашена красным на 3D-модели) с толщиной фланца 20 мм и крепежного стола 8 мм. Деталь имеет 30%-е заполнение при печати слоями толщиной 0.2 мм. Полная масса фотометра 1350 г, из которых 900 г приходится на светочувствительный модуль.

¹ <https://alkor.net/>

Таблица 1. Параметры светофильтров

Параметр	L'	M'
Центральная длина волны, мкм	3.77	4.68
FWHM, мкм	0.63	0.2
Коротковолновая граница полосы на уровне 10%, мкм	3.39	4.52
Длинноволновая граница полосы на уровне 10%, мкм	4.18	4.83
Среднее пропускание, %	92	86
Пропускание вне рабочей полосы, %	<0.2	<0.5
Диаметр подложки, мм	25	
Световой диаметр, мм	20	
Толщина, мм	3	

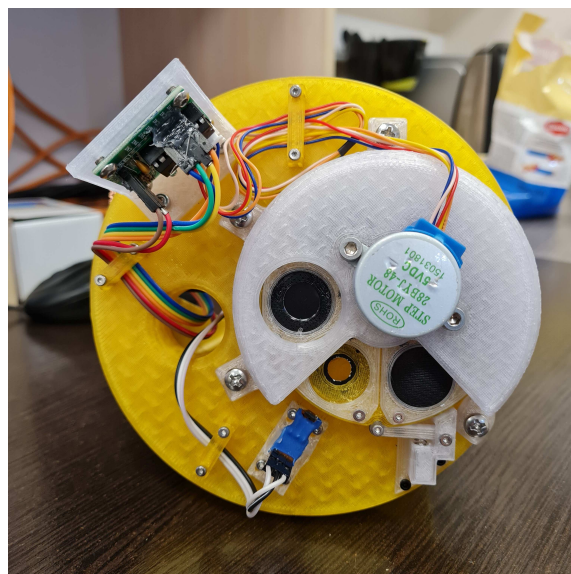
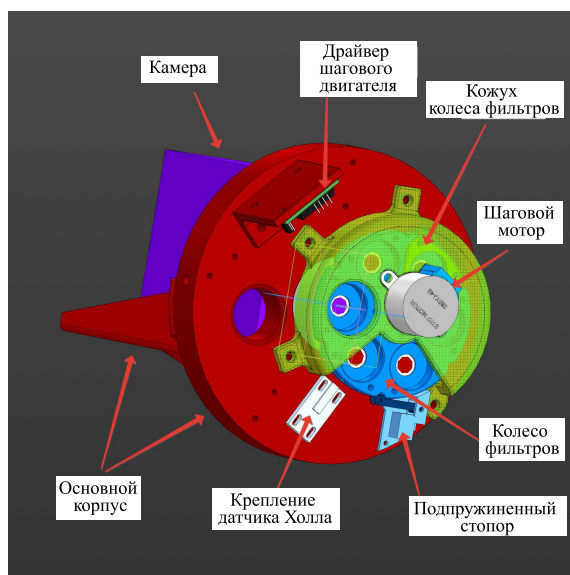


Рис. 2. 3D модель камеры с колесом фильтров (слева) и фотография готового устройства со стороны колеса фильтров (справа)

Регистрация изображений осуществляется с помощью одноплатного компьютера Banana Pi BPI-M5, работающего на базе 4-х ядерного процессора Cortex-A55 под управлением операционной системы Ubuntu 20.04. Компьютер установлен на телескопе рядом с камерой, т.к. использование порта USB 3.0 для передачи данных с камеры не позволяет разместить компьютер достаточно далеко. Такой выбор компьютера обусловлен тем, что от производителя удалось получить базовое программное обеспечение (SDK) только под архитектуру AArch64. На основе полученного SDK, не имевшего части важных функций, нами было разработано собственное программное обеспечение на языках C++ и Python. Оно может использоваться для получения кадров и управления параметрами камеры через встроенный последовательный порт. Существует возможность управлять экспозицией в диапазоне от 346 мкс до 50 мс, частотой чтения кадров, режимом считывания (сырой кадр; кадр, калиброванный с помощью внутренних алгоритмов

модуля; цветной кадр с наложенной тепловизионной палитрой) и режимом триггера затвора (автоматический старт экспозиции или с использованием внешнего сигнала), а так же получать информацию о состоянии и температуре детектора камеры. На основе улучшенного нами SDK были написаны программы как для автоматической съемки серий наблюдений, так и графический интерфейс управления для оператора 2.5-метрового телескопа КГО. Также компьютер управляет колесом фильтров и питанием прибора. Система управления наблюдениями с LMP фотометром интегрирована в систему планирования и управления наблюдениями 2.5-метрового телескопа *Oplan*.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Астрономические наблюдения с LMP-фотометром проводились на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ. Телескоп имеет один фокус Кассегрена, два

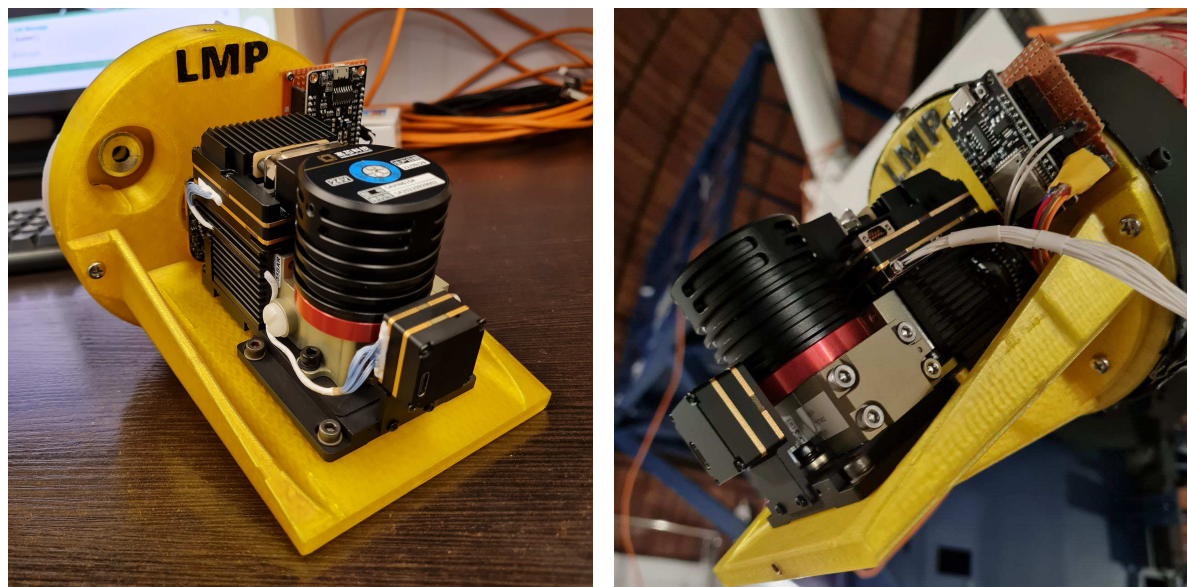


Рис. 3. Фотография готового устройства (слева) и камера, установленная на телескопе (справа)

основных фокуса Несмита (выходящих на балконы и оснащенных деротаторами) и два дополнительных фокуса Несмита, представляющих собой просто отверстия в среднике трубы телескопа. LMP камера установлена в одном из дополнительных фокусов. В ходе наблюдений с помощью перемещения трубы телескопа выполнялась низкочастотная модуляция светового потока с угловой амплитудой $10'' - 15''$ для точечных объектов и $1'$ для протяженных. В зависимости от яркости объекта и планируемой полной длительности накопления выбиралось число индивидуальных кадров и время экспозиции в каждом из них после перемещения трубы телескопа. Время, затрачиваемое телескопом на перемещение, практически не зависит от угла смещения (в пределах углов, используемых при модуляции) и составляет 3 с.

Измерения яркости фона неба проводились в снятом с телескопа виде. Фотометр устанавливался на массивное основание так, что его оптическая ось располагалась горизонтально. Перед входным окном с фильтром устанавливался объектив из ZnSe с фокусным расстоянием 38 мм. Излучение неба направлялось в объектив с помощью плоского зеркала, закрепленного на оси шагового двигателя. Вращением зеркала изменялось положение поля зрения фотометра на небесной сфере таким образом, чтобы выполнялось сканирование от зенита до горизонта в выбранном вертикале.

Большинство измерений, использованных для получения параметров камеры, были сделаны с помощью модели абсолютно черного тела (АЧТ), изготовленной в ГАИШ МГУ. Этот прибор представляет собой нагреватель в виде спирали, расположенный по периметру металлического цилиндра. Цилиндр помещен внутрь изолирующего контейнера. Для теплозащиты внутри контейнера используется асбестовое полотно. Излучение нагретой поло-

сти цилиндра проходит через небольшое отверстие в его основании. Перед отверстием на теплоизолирующих ножках установлен вращающийся диск с 34 отверстиями различных диаметров, использование которых позволяет варьировать площадь излучающей поверхности (теплоизоляция исключает нагрев диска и уменьшает собственное излучение оправ диафрагм). Температура АЧТ измеряется с помощью лабораторного термометра со шкалой от 200 до 300°C, который помещается в полость АЧТ через отверстие в противоположном основании цилиндра. Время установления рабочей температуры АЧТ из-за большой массы внутреннего цилиндра и высокой тепловой инерции составляет порядка 5 ч, что позволяет получать высокую стабильность температуры на коротких временных отрезках, требующихся для проведения измерений.

3. ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КАМЕРЫ

Основой LMP-фотометра является светочувствительный модуль Gavin-615A производства Global Sensor Technology (Китай) на базе детектора HgCdTe $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$ MWIR и криомодуля RS085. Производитель сообщает лишь некоторые параметры детектора (см. табл. 2). Для обработки наблюдений требуется, помимо этих базовых параметров, знать такие, как коэффициент преобразования (GAIN), шум считывания (read noise), темновой ток (dark) и величина подложки (BIAS).

3.1. Нелинейность

Под нелинейностью детектора подразумевается нелинейная зависимость отклика детектора, представленного в относительных цифровых единицах измерения ADU и записанных в итоговый файл с изображением, от величины падающего потока

Таблица 2. Параметры модуля Gavin-615A, установленного в LMP фотометре (по данным производителя)

Параметр	Величина
Тип детектора	HgCdTe
Формат	640×512
Размер пикселя	15×15 мкм
Спектральная область чувствительности (На уровне 50%)	3.0–4.9 мкм
Нелинейность	до 8%
Емкость пикселя	$7.8 \times 10^6 e^-$
Эквивалентная шуму разность температур	≤ 20 мК (при 23°С)
Разрядность оцифровки	14 бит
Рабочая температура детектора	85 К
Время подготовки в работе	≤ 8 мин

излучения. При постоянном потоке излучения это эквивалентно зависимости от времени накопления.

Нами была снята серия кадров площадки АЧТ с различными временами накопления: от минимальных ≈ 0.35 мс до ≈ 16 мс, когда произошло заполнение емкости ячеек. На рис. 4 представлен график зависимости от экспозиции t среднего уровня сигнала F_{meas} в центральной области кадра размером 100×100 пикселей. Считая, как это было сделано в [9], что в первых измерениях нелинейность мала и сравнима с вкладом шумов, мы по четырем начальным точкам провели прямую $s(t)$, иллюстрирующую ожидаемые значения сигнала в предположении линейности отклика детектора. На рисунке хорошо видно монотонное отклонение зарегистрированного сигнала от этой прямой.

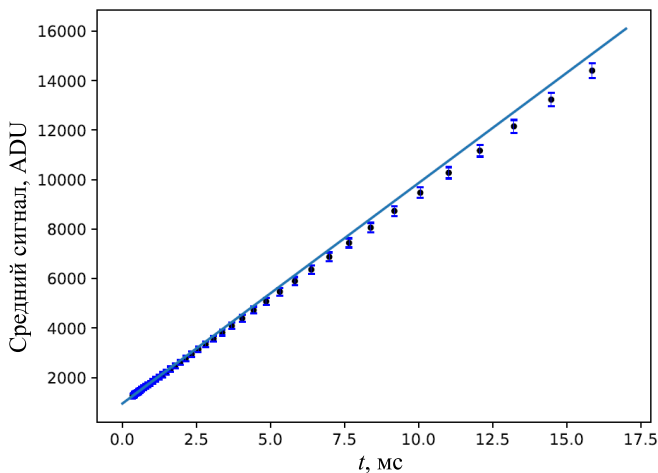


Рис. 4. Зависимость сигнала от времени накопления t (точки) и прямая $s(t)$, проведенная по четырем начальным точкам

Далее, в соответствии с алгоритмом [9] были вычислены величины $s(t)/F_{meas} - 1$. Их зависимость от измеренного сигнала имеет сложную форму (см. рис. 5), которую можно аппроксимировать полиномом 6–7 степени $f(F_{meas})$ или функцией $f(F_{meas}) = 0.051 - 50/(F_{meas} - 400)$. Знание

этой функции позволяет проводить коррекцию за нелинейность: $F_{corr} = F_{meas}[1 + f(F_{meas})]$. Степень полинома получилась больше, чем в [9], где предлагается использовать 3-ю степень, но меньше, чем 7–9 степень в пайплайне [10]. Отличается и сам вид зависимости — в [9] это параболическая зависимость, а у нас гиперболическая.

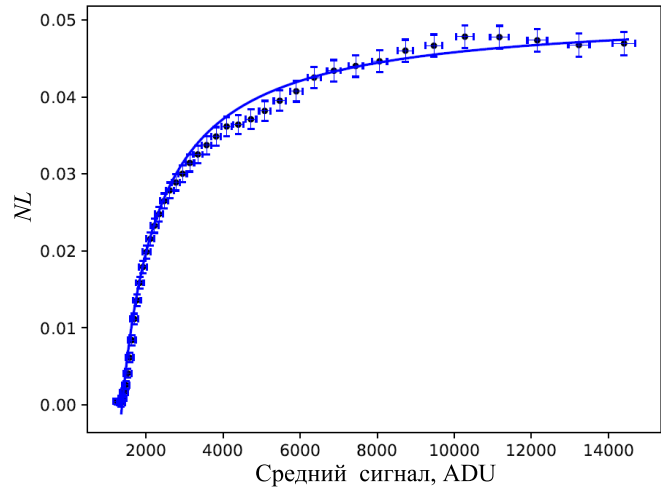


Рис. 5. Зависимость величины нелинейности $NL = s(t)/F_{meas} - 1$ от среднего сигнала (точки) и аппроксимация ее гиперболой (сплошная линия)

3.2. Коэффициент преобразования

Соотношение между цифровыми данными, выраженными в единицах ADU, и количеством зарегистрированных детектором фотоэлектронов характеризуется коэффициентом преобразования (коэффициентом GAIN), который измеряется в $[e^-/ADU]$.

Для измерения величины GAIN нами были получены две серии из 11 снимков модели АЧТ с попарно равными временами накопления. Данные были исправлены за нелинейность, и по ним был вычис-

лен средний уровень сигнала в ADU, а также дисперсии разности парных кадров. По этим сериям построена зависимость дисперсии сигнала от среднего уровня (рис. 6). Величина GAIN определяется как удвоенная обратная величина угла наклона прямой, аппроксимирующей эту зависимость. Для LMP-камеры $GAIN = 520 \pm 9 e^- / ADU$.

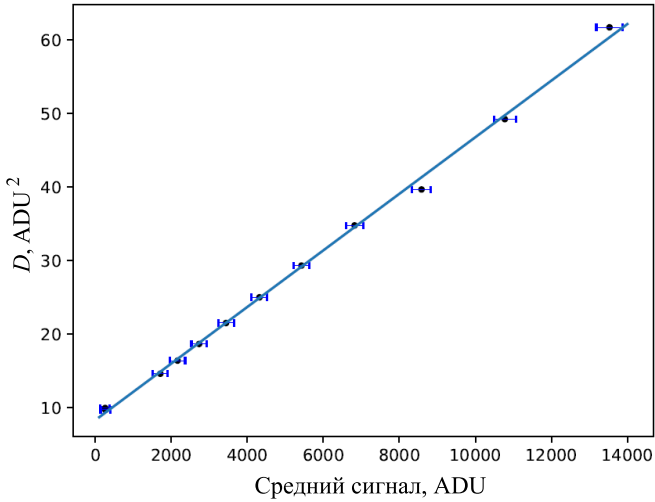


Рис. 6. Зависимость дисперсии разностных кадров от среднего сигнала

3.3. Шум считывания и кадр подложки

Еще один важный параметр любого приемника излучения, определяющий его возможности по наблюдениям предельно слабых объектов, — шум считывания (RN). Его можно измерить по серии кадров подложки (BIAS), которые обычно записываются с нулевой экспозицией при закрытом затворе. Однако у светочувствительного модуля LMP-фотометра нет затвора (в отличие от ПЗС-камер), на нем нельзя установить нулевую экспозицию и даже в темноте он копит сигнал от теплового излучения окружающих тел. Поэтому для записи кадров BIAS мы использовали минимально доступную экспозицию и устанавливали перед входным окном модуля охлажденную в жидком азоте металлическую пластину.

В данной работе для оценки шума считывания и формирования кадра подложки было получено 4 серии по 1000 последовательных кадров с временем накопления 346 мкс. По этим сериям попиксельным усреднением сигнала были вычислены средний кадр (кадр BIAS) и кадр распределения среднеквадратического отклонения регистрируемого сигнала (т.е. кадр распределения величины шума считывания). Усредненное по всему кадру значение $RN = 2.3 \pm 0.6 ADU$ или, в пересчете на электроны, $1200 \pm 310 e^-$.

Для определения BIAS используются те же серии с минимальным временем накопления, что и для измерения шума считывания. Теперь по этим сери-

ям было вычислено попиксельно среднее значение, которое и представляет собой необходимую нам величину BIAS, т.к. выше уже сказано, что на этих кадрах остается только он. Полученное значение $BIAS = 960.5 \pm 2.2 ADU$.

Как будет показано ниже, у детектора камеры высокий темновой ток. Однако его шум на минимальной экспозиции не превышает $\sim 60 e^-$ (0.1 ADU), и мы пренебрегали его вкладом при вычислении RN и BIAS.

3.4. Темновой ток

Еще один параметр детектора может быть фактором, ограничивающим чувствительность, — темновой ток. При большой величине он может являться одним из главных источников шума. Измерение темнового тока у ИК-детекторов требует использования холодной заглушки, устанавливаемой перед входным окном приемника, и помещения приемника в охлаждаемый корпус для исключения отражения излучения теплых деталей прибора от заглушки к детектору.

В нашем случае мы использовали охлажденную в жидком азоте зачерненную металлическую пластину, расположенную в 5 мм от входного окна светочувствительного модуля. На снимках, полученных в этих условиях, сигнал состоит из BIAS с шумом считывания, накопленного за время экспозиции темнового сигнала, собственного теплового излучения входного германиевого окна детектора и отраженного от холодной заглушки излучения, которое всегда остается, несмотря на принятые меры защиты. Входное окно модуля просветлено, поэтому мы будем пренебрегать его вкладом (вернее, будем считать этот вклад частью темнового тока детектора, зависящей от внешней температуры). Отраженное от холодной заглушки излучение благодаря наличию холодной диафрагмы внутри светочувствительного модуля попадает только на внешние края кадра. То есть исследуя центральную часть кадра, можно получить оценку темнового тока.

Нами было проведено 8 серий измерений темнового тока при температуре входного окна $\approx 6^\circ C$. В каждой из них темновой ток вычислялся для области кадра размером 250×250 пикселей по серии кадров, полученных с экспозициями от минимальной до 65 мс. Для каждого пикселя в этой области была проведена линейная аппроксимация зависимости накопленного сигнала от времени. Гистограмма распределения темнового тока для одной из серий показана на рис. 7. Видно, что ее форма близка к нормальному распределению. Это говорит в пользу корректного вырезания незасвечиваемой отраженным излучением области кадра. Среднее значение темнового тока, измеренное в этой серии, получается равным $19.6 ADU/мс$. Средняя по всем сериям величина темнового тока LMP-фотометра оказалась равна $17.8 \pm 2.2 ADU/мс$ или $\approx (9.3 \pm 1.1) \times 10^6 e^-/с$.

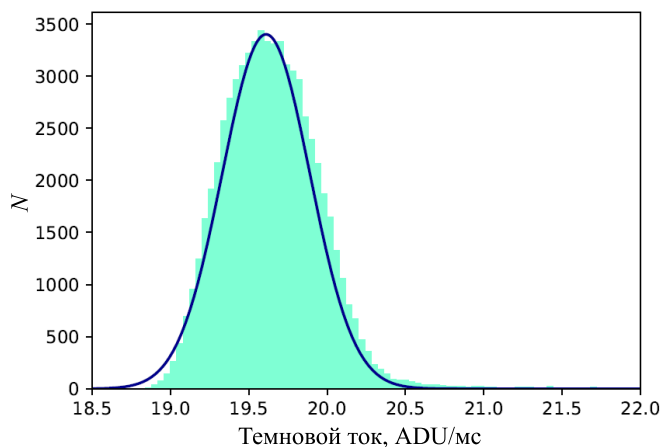


Рис. 7. Гистограмма распределения величины темнового сигнала по пикселям в центральной области детектора и кривая нормального распределения со средним темновым током 19.61 и $\sigma = 0.28$

Помимо «нормальных» пикселей, скорость накопления темнового сигнала в которых соответствует нормальному распределению, расположенных как в исследованной нами области, так и на краях кадра, существует ≈ 200 шт. пикселей ($< 0.1\%$ от числа рабочих), темновой ток которых значительно ($> 4\sigma$) превышает среднее значение. Это т.н. «горячие» пиксели, характеризующиеся повышенным темпом генерации «темновых» электронов.

3.5. Первый свет и наблюдения с LMP-фотометром

Первый свет с прототипом фотометра был получен в 31.01.2023 на 2.5 метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ. В качестве объекта для первых наблюдений была выбрана известная углеродная звезда SW Leo как один из наиболее ярких объектов на инфракрасном небе. При этих наблюдениях было уточнено положение фокальной плоскости телескопа (вынос за фланец фокуса Нэсмита N3 при положении вторичного зеркала, соответствующего режиму изображения в другом фокусе Нэсмита N1, где установлена камера ближнего ИК-диапазона ASTRONIRCAM, составил 102 см), сделаны оценки уровня фона, шума, характерного времени экспозиции, FWHM звездных изображений и получены изображения Юпитера и Марса (рис. 8). В апреле 2023 г. были получены изображения Венеры в фильтрах *K*, *L* и *M*, показанные на рис. 9. Интересно отметить, несмотря на то, что во время наблюдений фаза планеты была равна 0.75, в полосе *M* виден весь диск Венеры.

Прототип фотометра имеет поле зрения без виньетирования $30''$, с виньетированием на уровне 50% — $50''$. Масштаб изображения $\approx 0.15''/\text{пиксел}$. Характерные размеры звездных изображений (FWHM) на суммарных снимках $\sim 0.6 - 0.7''$ (4–5 пикселей), что достаточно близко к дифракци-

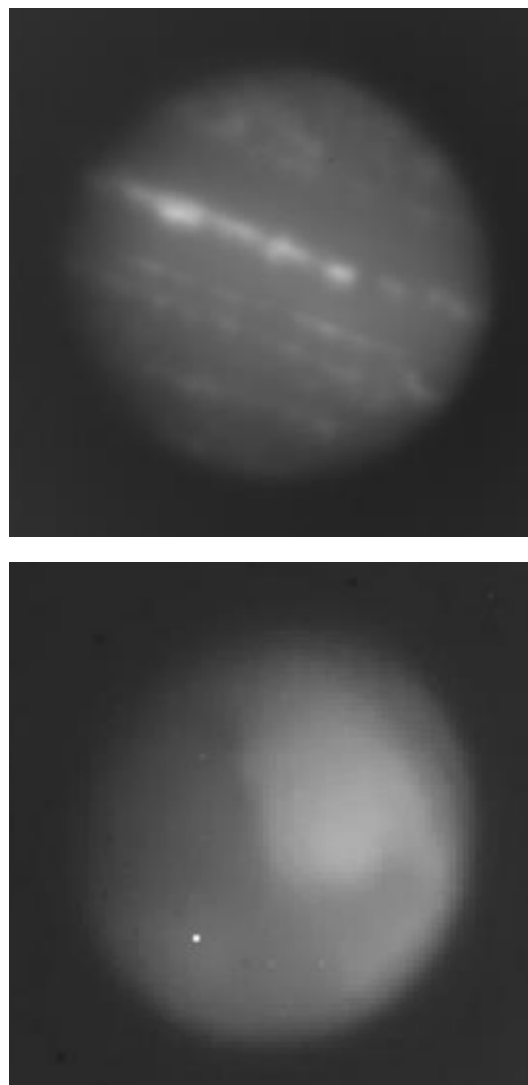


Рис. 8. Фотографии Юпитера и Марса, полученные 02.02.2023 при тестировании фотометра. Угловые размеры планет в момент наблюдений $36''$ и $10.7''$ соответственно

онному пределу для длины волны 4.8 мкм ($0.48''$). На рис. 10 показан пример изображения звезды, полученного при спокойной атмосфере с экспозицией 10 мс (одиночный кадр). На нем хорошо видно первое дифракционное кольцо и фрагменты следующих.

В конце февраля 2023 г. после установки колеса фильтров с LMP-фотометром начаты фотометрические наблюдения звезд, находящихся на разных стадиях эволюции. Например, углеродных звезд V Cyg, χ Cyg, S Cep, T Dra, молодой звезды ZZ Tau IRS ([11]), а также звезд-стандартов разных спектральных классов из списка [1]. По наблюдениям стандартов можно сделать оценку блеска звезд на пределе доступных наблюдений с фотометром. При соотношении сигнал/шум $\text{SNR}=3$ и хорошем качестве изображений за время накопления 20 с можно в полосах *L* и *M* наблюдать звезды до 9.3^m и 8.1^m соответственно.

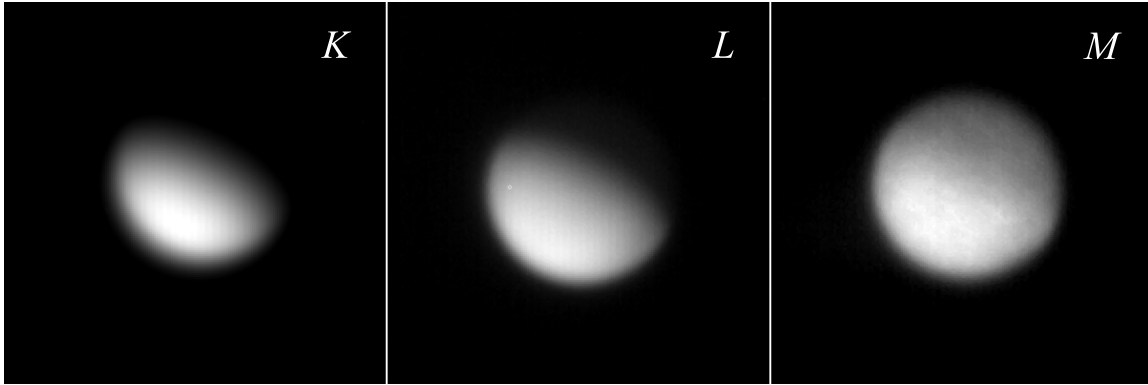


Рис. 9. Снимки Венеры, полученные 13.04.2023. Фаза Венеры 0.75, угловой диаметр $14''$

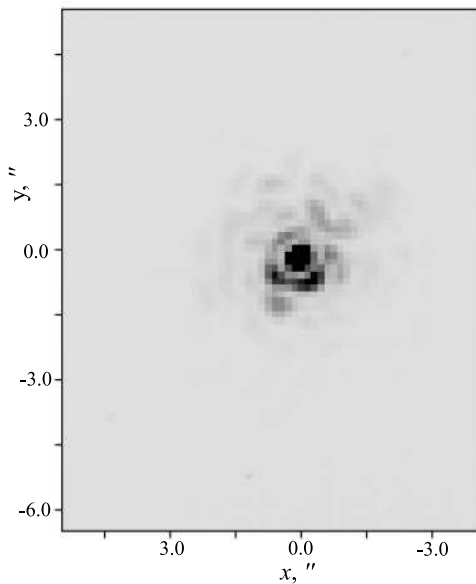


Рис. 10. Распределение яркости в изображении углеродной звезды RW LMi, полученном 02.03.2023 в полосе M

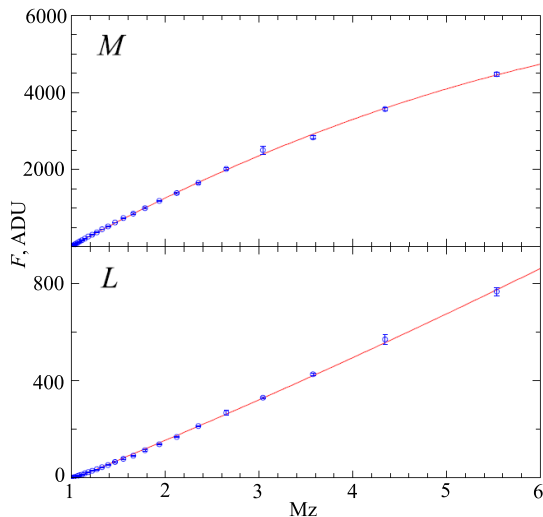


Рис. 11. Зависимость яркости фона неба относительно зенита от воздушной массы для фильтров L и M

С августа 2023 г. LMP-фотометр используется также при исследовании яркости фона неба на длинах волн 3–5 мкм. Для этого была изготовлена отдельная установка, обеспечивающая сканирование неба в выбранном вертикале. Шаг сканирования может быть выбран любым, но используется обычно $\sim 5^\circ$. После каждого шага производится измерение яркости фона в зените, что позволяет в предположении постоянства яркости фона неба на коротких временных интервалах (~ 3 с) компенсировать флуктуации собственного излучения фильтров, объектива и стенок прибора.

Пример записи яркости фона неба, полученной 20 октября 2023 г. в КГО, приведен на рис. 11. Точки на графике представляют собой усредненные по 10 отдельным сканам разности сигнала от фона на воздушной массе Mz и $Mz=1$ (в зените). Видно, что на малых воздушных массах яркость фона практически линейно зависит от Mz в обоих фильтрах, следуя ожидаемой зависимости для сферически симметричных воздушных слоев. На $Mz > 2$ в полосе M наблюдается заметное отличие от прямой — сигнал растет медленнее ожидаемого. Мы связываем это с расположением установки на вершине горы, из-за чего примерно с расстояния > 50 м начинается отклонение поверхности от плоскости и луч зрения начинает пересекать более высокие (более холодные и менее влажные) слои атмосферы, чем если бы мы наблюдали над плоской поверхностью. В полосе L такой зависимости не наблюдается, что связано с меньшей чувствительностью к температуре и влажности воздуха (у этой полосы короче длина волны и атмосфера более прозрачна, см. рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость расширения спектрального диапазона, в котором могут проводиться наблюдения на 2.5-метровом телескопе КГО, в сторону длинных волн не вызывает сомнений — этого требуют современные направления исследований и это позволяет астроклимат обсерватории и появление соответствующего приемника излучения. При этом значи-

тельно расширяются и возможности по исследованию разных классов объектов: молодых звезд, AGB и post-AGB звезд, комет, ярких активных ядер галактик с избытками ИК-излучения и, наконец, объектов с околозвездными пылевыми оболочками.

Реализованный нами на данном этапе вариант конструкции фотометра не является оптимальным с точки зрения минимизации инструментального фона и соответствия масштаба среднему качеству изображения в КГО (вместо рекомендуемых 3 пикселей на FWHM точечного источника реализован вариант с $\approx 5 - 6$ пикселями). Однако он позволяет при минимальном бюджете проекта получить рабочий инструмент, которому доступны сотни тысяч объектов на небе.

Основой прибора является светочувствительный модуль Gavin-615A, который был исследован нами в лабораторных условиях и в реальных условиях подкупольного пространства. Для обеспечения его работы и возможности взаимодействия с комплексом программ и оборудования 2.5-метрового телескопа нами было доработано переданное поставщиком программное обеспечение и разработано новое, реализующее различные режимы работы фотометра.

Детектор модуля имеет большую емкость пиксела (см. табл. 2), что в сочетании с 14-битной разрядностью оцифровки сигнала приводит к большой величине коэффициента преобразования $GAIN \approx 520 \text{ e}^-/\text{ADU}$.

Нелинейность приемника оказалась невелика, и, по нашим оценкам, при полном заполнении пиксела сигналом составляет $\leq 5\%$ (меньше заявленной производителем). Кривая зависимости нелинейности от величины сигнала имеет сложный вид — нелинейность быстро нарастает по мере заполнения ячейки до 4%, но после достижения 30% емкости почти перестает меняться. Для ее учета во всем диапазоне сигнала можно использовать корректирующие функции с найденными нами коэффициентами.

К сожалению, детектор модуля имеет большой темновой ток (состоящий из собственно темнового тока детектора и излучения входного окна светочувствительного модуля), составляющий, по нашим оценкам, $\approx (9.3 \pm 1.1) \cdot 10^6 \text{ e}^-/\text{с}$ при температуре входного окна 6°C . То есть пиксел полностью заполняется темновым сигналом за время $< 1 \text{ с}$. Такая экспозиция для среднего ИК-диапазона не является значимым ограничением, т.к. из-за наличия большого инструментального и атмосферного фонов и большому потоку ИК-квантов от объектов типичное время накопления в ИК-приборах обычно составляет десятки миллисекунд.

При регистрации сигнала шум будет складываться из шума измеряемого сигнала и шумов прием-

ника, среди которых в нашем случае преобладают шум темнового тока и шум считывания, составляющие $1200 \pm 310 \text{ e}^-$. Эти шумы сравниваются при экспозиции примерно 150 мс. При рабочих экспозициях, составляющих 10–20 мс, шум темнового тока становится в 3–4 раза меньше шума считывания.

С LMP-фотометром начаты наблюдения на 2.5-метровом телескопе, показавшие возможность его использования для исследования объектов до 8–9 звездной величины в полосах L, M . Так, получены оценки блеска нескольких ярких углеродных звезд, звезд-стандартов разных спектральных классов из списка [1] и слабой молодой звезды ZZ Tau IRS ([11]), имевшей на момент наблюдений блеск $L = 7.96$ и $M = 6.78$, для которой за время накопления 20 с (сумма 1000 кадров по 20 мс) получено отношение $SNR \sim 10$. Оценка проникающей способности LMP фотометра показывает, что при $SNR=3$ и хорошем качестве изображений за время накопления 20 с можно в полосах L и M наблюдать звезды до $\sim 9^m$ и $\sim 8^m$, соответственно.

В настоящее время одним из факторов, ограничивающим возможности фотометра по наблюдению слабых объектов, является отсутствие деротатора в фокусе Нэсмита №3 2.5-метрового телескопа. Это приводит к вращению поля зрения, которое становится заметно уже при времени измерений, большем нескольких минут. В итоге складывать отдельные кадры для повышения отношения сигнал/шум становится возможным только при наблюдении относительно ярких объектов, ярче приблизительно $7^m - 8^m$, т.е. тех объектов, изображение которых можно зарегистрировать за время наблюдений (включающее время накопления и накладные расходы на считывание сигнала и модуляцию), не превышающее нескольких минут. При наблюдении протяженных объектов требования к яркости еще больше возрастают. Установка механического деротатора или разработка программной коррекции вращения поля становится первоочередной задачей для повышения эффективности работы фотометра.

Авторы благодарят за поддержку Программу развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»). Работа С. Желтоухова (3D-моделирование, сборка и наладка фотометра, создание программного обеспечения, наблюдения) поддержана Российским научным фондом (грант РНФ № 21-12-00210). Авторы выражают благодарность Сеньявину Владимиру Марковичу (кафедра физической химии МГУ) за получение кривых пропускания светофильтров.

[1] Шенаврин В.И., Таранова О.Г., Надзип А.Э. // *Астрономический журнал*. 88. 34. (2011).

(Shenavrin V.I., Taranova O.G., Nadzhip A.E. // *Astron. Rep.* 55, 31 (2011).

- [2] *Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al. // Conference: Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century Proc. 1. 127. (2020).*
- [3] *Наджиб А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У. и др. // Астрофизический бюллетень. 72. 382. (2017).*
- [4] *Корнилов В.Г., Корнилов М.В., Шатский Н.И. и др. // Письма в Астрономический журнал. 42, 678. (2016). (Kornilov V.G., Kornilov M.V., Shatsky N.I. et al. // Astron. Lett. 42, 616 (2016).*
- [5] *Kornilov V., Safonov, B., Kornilov M. et al. // PASP. 126, 482 (2014).*
- [6] *Татарников А.М., Желтоухов С.Г., Никшиев Г.Э. и др. // Астрономический журнал. 101, in press. (2024).*
- [7] *Желтоухов С.Г., Татарников А.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 6, 57. (2022). (Zheltoukhov S.G., Tatarnikov A.M. // Moscow Univ. Phys. 77, 886 (2022)).*
- [8] *Tokunaga A.T., Simons D.A., Vacca, W.D. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 114. 180. (2002).*
- [9] *Hilbert B. // Instrument Science Report WFC3. 39. (2008).*
- [10] *Chilingarian I., Beletsky Y., Moran S. et al. // PASP. 127, 406. (2015).*
- [11] *Бурлак М.А., Додин А.В., Жарова А.В. и др. // Астрофизический бюллетень. (submitted). (2024).*
- [12] *Tatarnikov A.M., Zheltoukhov S.G., Shatsky N.I. et al. // Astrophysical Bulletin. 78, 269. (2023).*
- [13] *Желтоухов С.Г., Татарников А.М., Шатский Н.И. // Письма в Астрономический журнал. (2020). (S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, N. I. Shatsky Astron. Lett. 46, 193 (2020)).*
- [14] *Leggett S.K., Currie M.J., Varricatt W.P. et al. // MNRAS. 373, 781. (2006).*
- [15] *Cohen M., Wheaton Wm. A., Megeath S.T. // Astron. J. 126. 1090. (2003).*

New infrared camera of the Caucasian Mountain Observatory of the SAI MSU: design, main parameters and first light

S. G. Zheltoukhov^{1,2}, A. M. Tatarnikov^{1,2,a}, A. A. Belyakova², E. A. Koksharova²

¹*Experimental Astronomy Department, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia
E-mail: ^aandrew@sai.msu.ru*

The paper presents a prototype of an infrared photometer, made by the SAI of MSU on the base of a commercial infrared module Gavin-615A. The operating spectral range of the photometer is 3-5 μm . Studies of the photometer detector have shown that its parameters correspond to those declared by the manufacturer. Nonlinearity of the detector does not exceed $\sim 5\%$ in the whole range of signals, coefficients of correction function were determined. Additionally, we determined the readout noise $RN = 1200 \pm 210 \text{ e}^-$, conversion coefficient $GAIN = 520 \pm 9 \text{ e}^-/\text{ADU}$, the $BIAS = 960.5 \pm 2.2 \text{ ADU}$, and dark current $\approx (9.3 \pm 1.1) \cdot 10^6 \text{ e}^-/\text{s}$, which consists of the sum of the detector dark current and radiation of the entrance window of the detector module. The value of dark current was measured at the window temperature of 6°C . Observations were started with the photometer at the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory of MSU, the first results are given in the paper. The unvignetted field of view is $30''$. In the M band under good atmospheric conditions, an image quality is close to diffraction limit. Images of a star with magnitude $L = 7.96$ and $M = 6.78$ were obtained with exposure of 20 seconds and a $SNR \sim 10$ ratio. It is shown that at high image quality with $SNR=3$ and exposure of 20 seconds it is possible to observe stars up to $L \sim 9^m$ and $M \sim 8^m$. The main module of the photometer was also used for measurements of the sky background brightness.

PACS: 95.85.Jq.

Keywords: infrared astronomy, photometry, photometric systems.

Received 27 November 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2024. 79, No. 1. Pp. 97–106.*

Сведения об авторах

1. Желтоухов Сергей Геннадьевич — аспирант физического факультета МГУ, вед. программист; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: sergei.jeltouhov@yandex.ru.
2. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: andrew@sai.msu.ru.
3. Белякова Александра Андреевна — студентка 3 курса астрономического отделения физического факультета МГУ; тел.: (495) 939-16-61.
4. Кокшарова Елизавета Андреевна — студентка 3 курса астрономического отделения физического факультета МГУ; тел.: (495) 939-16-61.