

УДК 681.785.422:52-76

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ КАМЕРЫ ASTRONIRCAM

© 2023 А. М. Татарников^{1,2*}, С. Г. Желтоухов^{1,2}, Н. И. Шатский¹,
М. А. Бурлак¹, Н. А. Масленникова^{1,2}, А. А. Вахонин^{1,2}¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, 119191 Россия

Поступила в редакцию 16 апреля 2023 года; после доработки 21 мая 2023 года; принята к публикации 21 мая 2023 года

Описаны особенности фотометрического режима работы камеры-спектрографа ближнего ИК-диапазона ASTRONIRCAM, установленной на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ. Описаны алгоритмы первичной коррекции и общей конвейерной обработки (pipeline) получаемых данных. Представлены уравнения трансформации из фотометрической системы обзора 2MASS в инструментальную полосу Y . Для широкополосных фильтров J , H , и K получены цветовые коэффициенты трансформации между инструментальной фотометрической системой и стандартной системой МКО-NIR (Mauna Kea Observatories Near-Infrared), которые показывают, что система камеры близка к стандартной. Определено, что для среднего уровня яркости фона при наблюдениях в зените и размере изображений звезд $1''$ за 3000 с накопления на уровне $SNR = 3$ регистрируются звезды с блеском $J = 22^m$, $H = 20^m.5$, $K = 19^m.5$.

Ключевые слова: инструменты: детекторы — инструменты: фотометры — инфракрасный диапазон: общие вопросы — методы: редукция данных

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасная камера-спектрограф ASTRONIRCAM (the ASTRONomical NearInfraRed CAMera) — один из штатных инструментов 2.5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Shatsky et al., 2020), установленный на нем в 2015 году. Камера работает в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм в двух режимах — спектральном и фотометрическом. Спектральный режим подробно описан в статье Zheltoukhov et al. (2020), а конструкция камеры и особенности ее работы — в статье Nadjip et al. (2017).

Оптическая схема камеры включает в себя входное окно, фокальную турель с входной диафрагмой и спектральными щелями, коллиматорный объектив, две турели фильтров и камерный объектив. Она перестраивает входное изображение с соотношением примерно 1:1.5, обеспечивая поле зрения $4'.6 \times 4'.6$ с масштабом $0''.27/\text{пиксел}$. Все элементы оптической схемы расположены в охлаждаемом жидким азотом криостате. Камера установлена на механическом деротаторе в фокусе Несмита телескопа. В целях безопасности при

работе заданы ограничения на максимально возможные углы поворота камеры ($\pm 90^\circ$ относительно горизонтального положения камеры). Zheltoukhov et al. (2020) показали, что возникающие при вращении деформации оптической схемы камеры не превышают 0.002 пиксела/град.

Основным элементом, определяющим возможности камеры ASTRONIRCAM, является широкоформатный детектор Hawaii-2RG производства компании Teledyne Scientific and Imaging LLC с длинноволновой границей чувствительности 2.5 мкм и размером пиксела 18 мкм. Квантовая эффективность приемника в рабочем диапазоне длин волн около 94%, шум считывания $12 e^-$, емкость пикселей порядка $120\,000 e^-$, коэффициент преобразования сигнала $gain \approx 2.2 e^-/\text{ADU}$. Для управления работой детектора и оцифровки сигнала используется контроллер ARC Gen III (Leach and Low, 2000). Подробнее устройство детектора и его основные параметры рассмотрены в работе Nadjip et al. (2017). Одна из основных особенностей приемника — возможность работы в режиме неразрушающего считывания (Non-Destructive Readout). Не прерывая процесса накопления, можно считывать накопленный сигнал, последовательно опрашивая с частотой 300 кГц

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

Таблица 1. Параметры широкополосных фотометрических фильтров

Фильтр	$\lambda_{center}, \mu\text{m}$	$\lambda_{0.1\ blue}, \mu\text{m}$	$\lambda_{0.5\ blue}, \mu\text{m}$	$\lambda_{0.1\ red}, \mu\text{m}$	$\lambda_{0.5\ red}, \mu\text{m}$	$T_{mean}, \%$
<i>Y</i>	1.019	0.961	0.969	1.071	1.078	90
<i>J</i>	1.249	1.161	1.167	1.334	1.343	86
<i>H</i>	1.635	1.481	1.491	1.782	1.796	93
<i>Ks</i>	2.143	1.985	1.993	2.298	2.315	86
<i>K</i>	2.191	2.021	2.035	2.352	2.368	89

пиксели детектора. Экспозиция начинается с попиксельного же сброса сигнала, поэтому в итоге для каждого пиксела детектора экспозиция продолжается одинаковое время. При этом в каждом пикселе время начала накопления сигнала сдвигается примерно на 3 мкс по отношению к предыдущему. Из-за такой особенности работы невозможно наблюдать объекты, изображение которых перемещается по поверхности детектора. Кроме того, из-за неодновременности накопления эффекты атмосферного дрожания на разных участках детектора проявляются по-разному. Это приводит к тому, что при работе с короткими экспозициями для достижения высокой точности фотометрии требуется усреднять большое число отдельных кадров. Для увеличения скорости считывания в контроллере используется четыре независимых усилителя.

В контроллере камеры ASTRONIRCAM реализованы два основных режима работы — режим двойной коррелированной выборки (CDS — correlated double sampling) и режим up-the-ramp (Fowler and Gatley, 1991). В первом случае детектор опрашивается два раза за экспозицию — в начале и в конце, а в качестве результата накопления выступает разность считанных кадров. Результирующий кадр свободен от шума подложки и содержит полный накопленный полезный сигнал. В случае использования метода up-the-ramp считывание сигнала с детектора производится многократно по мере его накопления. Далее для каждого пиксела детектора по полученным отсчетам (с учетом нелинейности) методом наименьших квадратов строится линейная функция, описывающая темп накопления сигнала во время экспозиции. Итоговый кадр также свободен от шума подложки, и, кроме того, уменьшается эффективный шум считывания. Как показано в работе Benford et al. (2008), режим up-the-ramp обладает целым рядом преимуществ, и наблюдения с ASTRONIRCAM проводятся с использованием этого режима.

Оптическая схема камеры была рассчитана под формат 1К × 1К приемника предыдущего поколения Hawaii-1. В ходе изготовления прибора производитель заменил детектор на более современный и

крупный Hawaii-2RG. Поменять оптическую схему уже не представлялось возможным, из-за этого в фотометрическом режиме освещается только центральная область детектора размером 1К × 1К пикселей (в спектральном режиме рабочей является бóльшая площадь), которая читается через два усилителя. Минимальная экспозиция (время между двумя последовательными считываниями сигнала с пикселя) при работе в формате 1К × 1К ограничена временем 1.8 с, которое определяется как отношение произведения ширины полосы детектора для одного канала считывания (512) и стороны кадра (1024) к частоте считывания (300 000): $512 \times 1024 / 300\,000 \approx 1.8$. При необходимости его можно сократить, уменьшив размер считываемой области по вертикали, — время минимальной экспозиции сократится пропорционально.

Целью настоящей работы являлось определение параметров ASTRONIRCAM при работе в фотометрическом режиме, описание алгоритма первичной редукции получаемых в этом режиме данных и определение коэффициентов редукции из инструментальной фотометрической системы в систему МКО-NIR.

2. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ С ASTRONIRCAM

Наблюдения в фотометрической моде — наиболее востребованный режим работы камеры-спектрографа ASTRONIRCAM. Он реализуется в камере при установке в фокальной турели открытой входной диафрагмы, а в двух других турелях (их называют по ходу движения входного пучка «верхняя» и «нижняя») — широкополосных или узкополосных светофильтров. В «верхней» расположены широкополосные светофильтры (см. таблицу 1) фотометрической системы МКО-NIR (Tokunaga et al., 2002) *J*, *H*, *K* и *Ks*, фильтр *Y* (установлен в мае 2021 г.), а также элементы, реализующие спектральный режим, — фильтры сортировки порядков и гризмы кросс-дисперсии. В следующей турели («нижней») расположены узкополосные светофильтры (см. таблицу 2),

основная гризма и два поляризационных свето-фильтра. Так как детектор камеры работает в режиме непрерывного попиксельного считывания, то она не имеет затвора. Для записи темновых токов и прекращения доступа света к детектору используется холодная заглушка, установленная во второй турели. Время смены фильтров 15–20 с.

Систематические фотометрические наблюдения с узкополосными фильтрами и с фильтрами J , H , K , K_s были начаты в 2016 г., а с фильтром Y — в середине 2021 г. Все наблюдения проводятся с применением так называемого *дизеринга* — после каждой экспозиции (продолжительностью 2–100 с) телескоп смещается на $3''$ – $5''$. Это позволяет уменьшить влияние горячих пикселей при обработке, а также уменьшает амплитуду послесвечения (*персистенции*). Кроме того, благодаря дизерингу при наблюдениях точечных объектов, складывая полученные кадры без совмещения изображений звезд на них, можно получить кадр фона неба, который впоследствии будет вычтен при обработке. При наблюдениях в коротковолновых фильтрах ($\lambda_{\text{center}} < 2$ мкм), где инструментальным фоном можно пренебречь, благодаря высокому уровню фона неба в ИК-диапазоне суммарный кадр фона можно использовать и как кадр плоского поля. При наблюдениях протяженных объектов фон снимается отдельно — каждые 3–8 кадров телескоп смещается на соседнюю площадку, где снимается 1–2 кадра фона. Полученные отдельные кадры проходят через конвейер (pipeline) первичной обработки (см. ниже). После чего для увеличения S/N можно складывать отдельные кадры. Для фотометрии ярких объектов в этом, как правило, нет необходимости. Фотометрическая привязка осуществляется к звездам поля, оценки блеска которых есть в каталоге обзора 2MASS (Skrutskie et al., 2006). При этом используются уравнения трансформации в фотометрическую систему MKO-NIR, приведенные в работе Tatarsnikov and Tatarsnikov (2023) (до 2022 г. нами использовались уравнения из работы Leggett et al. (2006)).

Наблюдаемый на 2.5-м телескопе в ближнем ИК-диапазоне фон в основном складывается из двух компонентов — инструментального фона и излучения атмосферы. Первый компонент зависит от температуры элементов телескопа, попадающих в поле зрения камеры, и проявляется только в длинноволновых фильтрах. Обработка всего массива наблюдений, выполненных с камерой в фотометрическом режиме, показала, что средний уровень фона неба в каждом фильтре является постоянной величиной и не зависит от сезона. Тем не менее этот компонент показывает высокую переменность (30–100%) как от ночи к ночи, так и на масштабе

Таблица 2. Параметры узкополосных фотометрических фильтров

Фильтр	$\lambda_{\text{center}}, \mu\text{m}$	$\Delta\lambda_{0.5}$	$T_{\text{max}}, \%$
Methane off / CH4 off	1.583	0.058	83.3
Methane on / CH4 on	1.653	0.065	96
[Fe II]	1.644	0.026	95.6
H ₂ v = 1–0 (S1)	2.132	0.046	92.2
Br γ	2.167	0.021	90.3
K _{cont}	2.273	0.039	90.3
CO	2.285	0.030	90.1

Таблица 3. Яркость фона неба в зените и инструментального фона для разных температурных значений, в единицах ADU/(s × pixel)

Filter	Sky ($M_z = 1$)	Instrumental		
		$T = -10^\circ\text{C}$	$T = 0^\circ\text{C}$	$T = +10^\circ\text{C}$
J	80 ± 20	–	–	–
H	480 ± 100	–	–	–
K	150 ± 30	150 ± 30	300 ± 50	690 ± 100

времени в десятки минут (от 10% в полосе J до 30% в полосе H). В таблице 3 приведены средние измеренные значения инструментального фона и фона неба Tatarsnikov et al. (2023).

Возможность наблюдений слабых объектов сильно зависит от уровня фона и качества изображения. При фиксированных условиях — уровень фона соответствует указанному в таблице 3 для $M_z = 1$, $T_{\text{inst}} = 0^\circ\text{C}$, $FWHM$ звездных изображений $1''$ и суммарное время накопления сигнала 3000 с — предельные звездные величины (оценки блеска объектов, наблюдаемых с $SNR = 3$) следующие: $J = 22^{\text{m}}$, $H = 20^{\text{m}5}$, $K = 19^{\text{m}5}$.

3. НЕЛИНЕЙНОСТЬ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРЕПОЛНЕНИЯ

В работе Nadjip et al. (2017) было показано, что нелинейность детектора камеры связана с изменением электрической емкости чувствительных ячеек по мере изменения заряда в них. Из-за этого на кривой накопления сигнала нет линейного участка — она нелинейна во всем интервале сигналов. При заполнении примерно 90% емкости ячейки величина нелинейности достигает 15%. Коррекция за нелинейность выполняется в соответствии с алгоритмом, описанном в (Hilbert, 2008), за одним исключением. В работе (Hilbert, 2008) считается, что начальный участок кривой накопления сигнала можно считать слабо подверженным влиянию

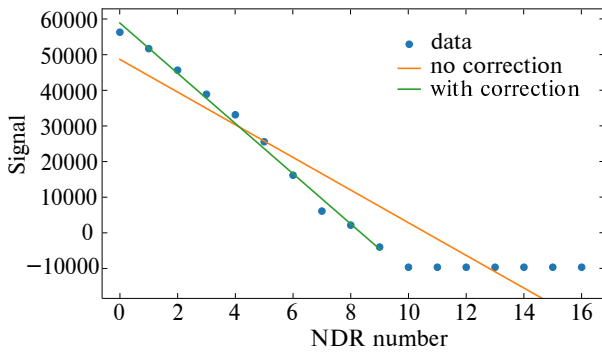


Рис. 1. Пример зависимости сигнала от времени в пересвеченном пикселе (приведены реальные данные, считанные с детектора). Зависимость не является точной прямой из-за эффектов, связанных, например, с вариацией *FWHM* звезды и атмосферной прозрачности. Оранжевая прямая показывает скорость накопления сигнала, измеренную по всем считываниям, зеленая — скорость накопления сигнала, измеренную после работы алгоритма коррекции.

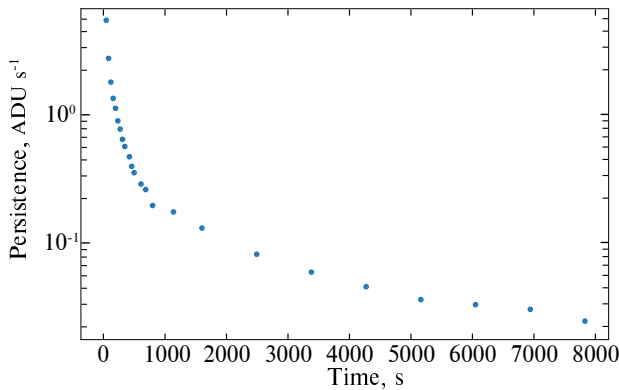


Рис. 2. Зависимость уровня персистенции от времени.

нелинейности и использовать его для определения истинного темпа поступления сигнала на ячейку детектора при определении коэффициентов коррекции в лабораторных условиях. В нашей реализации алгоритма коррекции в качестве соответствующей прямой используется касательная, проведенная к параболе в начальной точке, описывающей тестовые точки, и коэффициенты корректирующего полинома определяются для каждого пиксела по кривой отклонения тестовых точек от полученной касательной.

Тот факт, что детектор Hawaii-2RG работает в режиме неразрушающего считывания, позволяет исследовать не только полный полученный от объектов сигнал, но и историю его накопления. При наблюдениях площадок, на которых вместе со слабыми объектами находятся яркие звезды, возникает проблема быстрого переполнения соответствующих ячеек детектора, что ограничивает максимальную выдержку кадра в целом. Ситуация усугубляется высокой яркостью фона в ближнем

инфракрасном диапазоне (например, в полосе *K* пиксель полностью заполняется сигналом от фона за время порядка 1 минуты). Нами разработан и реализован алгоритм, позволяющий восстановить информацию из пересвеченных пикселей. Для этого при анализе всех считываний одной экспозиции определяется, на каком считывании вышел в насыщение каждый из пересвеченных пикселей. После этого для вычисления суммарного потока в нем используются только первые непересвеченные считывания. Характерный пример зависимости сигнала в пересвеченном пикселе от номера считывания (номер считывания прямо пропорционален времени накопления) можно увидеть на рис. 1. Как видно, насыщение ячейки в этом случае произошло в районе считывания номер 10. Таким образом, по первым 10 считываниям можно определить скорость накопления сигнала в данном пикселе.

4. ПЕРСИСТЕНЦИЯ

Малоизученным фактором, влияющим на качество получаемых данных, является эффект персистенции (Smith et al., 2008) — относительно длительное увеличение темнового тока в пикселях, получивших сильную «засветку» в ходе экспозиции (интегрирования сигнала). На рис. 2 показан пример зависимости сигнала персистенции от времени для детектора ASTRONIRCAM. Видно, что эффект может проявляться часами, искажая наблюдаемую картину. Наибольшее влияние он оказывает на спектральные наблюдения, во время которых средний сигнал на детекторе значительно ниже, чем во время фотометрических инфракрасных наблюдений, и относительный вклад персистенции может быть очень значительным. Однако и при фотометрических наблюдениях с инфракрасными коротковолновыми или узкополосными фильтрами, когда значительно снижается уровень фона, эффект персистенции хорошо заметен. О природе эффекта до сих пор ведутся споры, разрабатываются феноменологические модели и делаются попытки построения алгоритмов коррекции (см., например, Tulloch et al. (2019)).

Поведение персистенции в нашем случае имеет две особенности. Так, при превышении засветкой определенного предела, составляющего примерно две полные емкости ячейки, амплитуда эффекта почти перестает расти с увеличением засветки. Почти не наблюдается персистенция и после малых засветок (менее половины емкости ячейки).

Для детектора камеры ASTRONIRCAM по результатам измерений на протяжении нескольких часов величины остаточного сигнала в многочисленных площадках, засвеченных разным уровнем освещенности, нами была разработана феноменологическая модель эффекта персистенции. Для

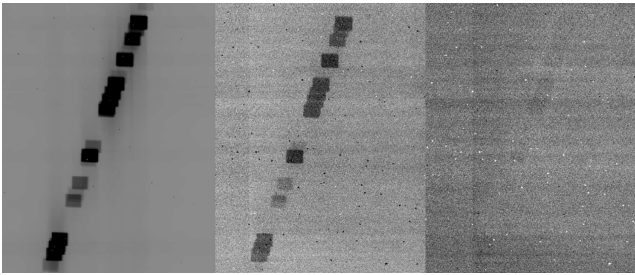


Рис. 3. Пример работы алгоритма коррекции персистенции. Слева исходная засветка спектром аргоновой лампы с широкой щелью, в центре — персистенция, справа — результат коррекции.

описания эффекта с достаточной точностью мы используем четыре экспоненциальных профиля, с временными шкалами 20, 100, 580 и 4800 секунд. Существует и более долговременная персистенция, но ее амплитуда очень мала и мало влияет на получаемые данные. Экспоненты имеют общие для всех пикселей коэффициенты, зависящие от уровня засветки. После сложения всех компонентов происходит умножение на коэффициент, индивидуальный для каждого элемента детектора.

Для коррекции эффекта персистенции создана программа на языке Python, являющаяся частью общей системы конвейерной обработки данных. Время работы программы — $O(n)$ — определяется количеством обрабатываемых кадров, а алгоритм можно описать следующим образом:

- 1) собирается информация о всех кадрах, полученных в обрабатываемую ночь, включая фокусировочные;
- 2) на основе созданной модели с учетом всех кадров данной ночи, снятых до обрабатываемого кадра, вычисляется добавочный сигнал от персистенции;
- 3) расчетная персистенция вычитается из каждого считывания корректируемого кадра.

Пример результата работы программы коррекции персистенции представлен на рис. 3. Как показала практика использования алгоритма коррекции, найденные коэффициенты модели не устаревают как минимум на временах порядка года. На рис. 4 приведен фрагмент кадра, «хранящего историю» засветки яркой звездой в течение многих последовательных экспозиций. Из кадра, при обработке которого был отключен этап коррекции персистенции, был вычтен кадр, прошедший такую обработку с коэффициентами коррекции, полученными почти за год до этого. На рисунке хорошо видна описанная особенность персистенции — равномерность распределения сигнала вблизи центра каждого пятна, где в ходе экспозиции емкость ячейки была перекоплена примерно в 2.5 раза.

Кроме регулярной структуры, оставшейся от диджинга яркой звезды во время серии из 108 экспозиций, на рис. 4 заметны и пятна персистенции, оставшиеся от предыдущих серий.

5. Y-ФИЛЬТР, РЕДУКЦИЯ ИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЗОРА 2MASS

В мае 2021 г. в верхнее колесо фильтров ASTRONIRCAM, в котором установлены широкополосные фильтры J, H, K, K_s , был добавлен новый широкополосный фильтр производства Asahi Spectra (Япония), реализующий фотометрическую полосу Y , аналогичную полосе Y камеры WFCAM телескопа UKIRT (центральная длина волны 1.019 мкм, $FWHM = 0.100$ мкм). Кривые пропускания всех фильтров приведены на сайте КГО ГАИШ¹. Кривая пропускания Y -фильтра вписана в узкое окно прозрачности между двумя сильными полосами поглощения земной атмосферы — 0.95 мкм и 1.1 мкм. Считается, что показатель цвета ($Y - J$) можно использовать для разделения карликов поздних спектральных классов и квазаров с большим красным смещением (Casali et al., 2007).

Для фотометрической привязки наблюдений в ближнем ИК-диапазоне обычно используют звезды поля, оценки блеска которых есть в каталоге обзора 2MASS Skrutskie et al. (2006). В работе Tatarsnikov and Tatarsnikov (2023) описана методика получения уравнений связи и определены соответствующие коэффициенты этих уравнений для фотометрических полос J, H, K камеры ASTRONIRCAM и обзора 2MASS. Следуя этой методике, мы провели в полосе Y фотометрические наблюдения площадок неба размером около $4'5 \times 4'5$ вокруг 24 звезд² из списка (Leggett et al., 2006) стандартов системы MKO-NIR, имеющих точные Y -величины. При этом удалось получить надежные оценки блеска для почти 300 звезд, ошибки оценок блеска которых в полосах J, H, K_s обзора 2MASS не превышали 0^m06 . На рис. 5 представлены цветные зависимости величины поправки к блеску звезд в полосе J_{2MASS} , которые необходимо прибавить для того, чтобы получить звездную величину в полосе Y . Судя по графикам, указанные зависимости распадаются на два участка, хорошо описываемые прямыми (см. таблицу 4). Переходные точки на графиках находятся вблизи значений показателей цвета, соответствующих звездам наиболее поздних M-классов (Koornneef,

¹<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/astronircam/>

²<https://about.ifa.hawaii.edu/ukirt/calibration-and-standards/photometric-calibration/fs-zy-mko-wfcam/>

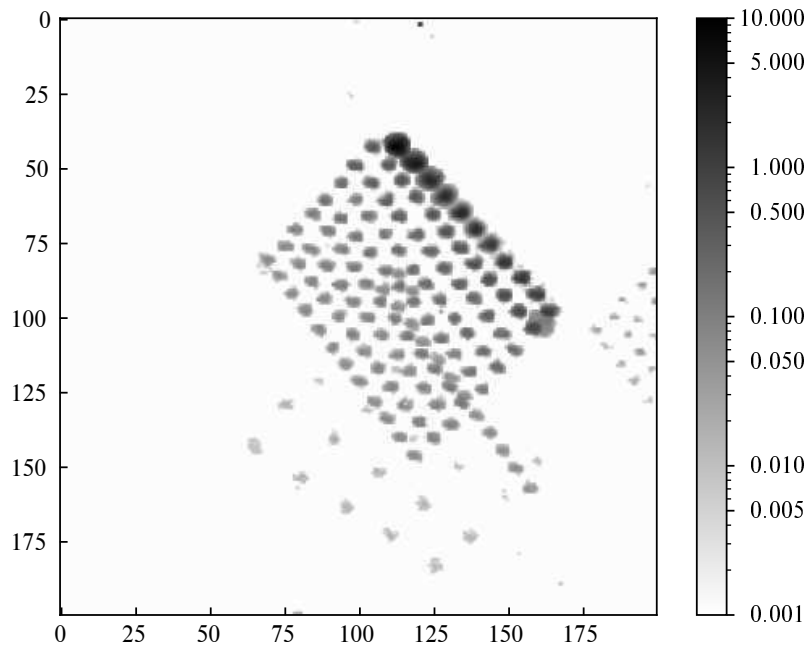


Рис. 4. Фрагмент изображения, полученного вычитанием из кадра без коррекции персистенции кадра с выполненной коррекцией. Справа показана логарифмическая шкала в ADU.

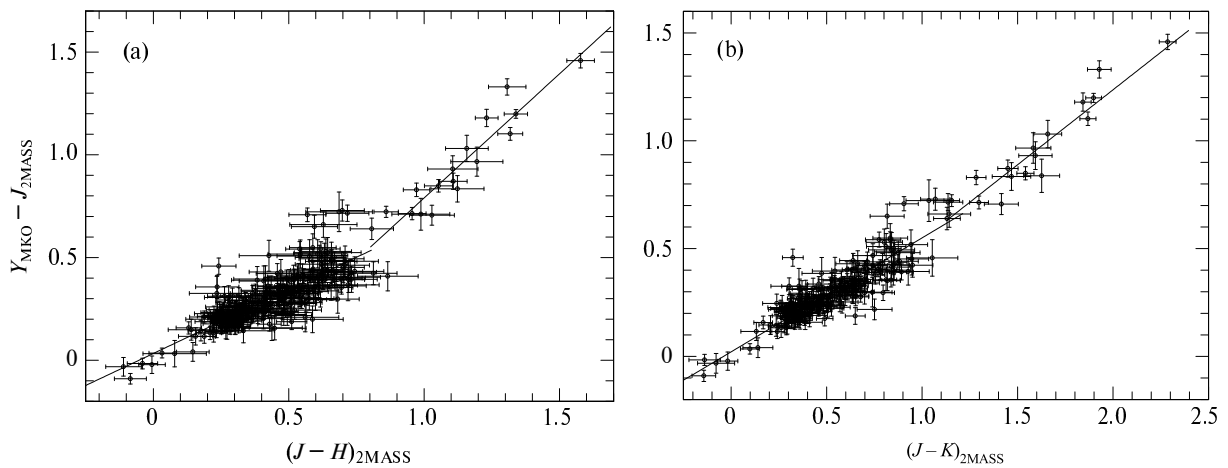


Рис. 5. Зависимости величины поправки $Y_{\text{MKO}} - J_{2\text{MASS}}$ от показателя цвета $(J - K)_{2\text{MASS}}$ (a) и $(J - H)_{2\text{MASS}}$ (b).

1983). Объекты, попадающие в области с более красными показателями цвета, по-видимому, представляют собой звезды с большим межзвездным покраснением.

Судя по систематическим отклонениям точек для голубых показателей цвета от полученных нами прямых (особенно для зависимости от $J - H$), возможно, существует еще одно семейство точек со своей зависимостью от цвета. Малое число точек для $(J - H) < 0.1$ и относительно большие ошибки 2MASS-фотометрии для них пока не позволяют определить его параметры.

6. ПОЛУЧЕНИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ ДАННЫХ

Первичная калибровка наблюдений с матричными приемниками обычно включает в себя коррекцию полученных кадров за «плохие» пиксели, сигнал подложки (bias), темновой ток, «плоское поле» и нелинейность.

Плохие пиксели детектора ASTRONIRCAM были подробно исследованы нами ранее — их особенности, классификация и изменение их числа со временем приведены в работе Maslennikova et al. (2020). Оказалось, что к пикселям с нормальным поведением относятся 99.6% пикселей в области, используемой в фотометрическом режиме.

Таблица 4. Цветовые уравнения для Y полосы

Показатель цвета	Уравнение
$(J - H)_{2\text{MASS}} < 0.8$	$(Y - J_{2\text{MASS}}) = 0.624_{\pm 0.033}(J - H)_{2\text{MASS}} + 0.033_{\pm 0.012}$
$(J - H)_{2\text{MASS}} > 0.8$	$(Y - J_{2\text{MASS}}) = 1.208_{\pm 0.122}(J - H)_{2\text{MASS}} - 0.418_{\pm 0.141}$
$(J - K)_{2\text{MASS}} < 1.2$	$(Y - J_{2\text{MASS}}) = 0.528_{\pm 0.014}(J - H)_{2\text{MASS}} + 0.022_{\pm 0.010}$
$(J - K)_{2\text{MASS}} > 1.2$	$(Y - J_{2\text{MASS}}) = 0.695_{\pm 0.073}(J - H)_{2\text{MASS}} - 0.154_{\pm 0.116}$

Остальные пиксели можно разделить на несколько групп, используя кадры ночного фона неба (исследуются первые считывания при наблюдениях фона в полосе H со скоростью накопления сигнала $300\text{--}500 \text{ ADU s}^{-1}$): «теплые» (их около 500, скорость накопления сигнала превышает среднее значение больше чем на 5σ), «холодные» (около 3000, скорость накопления сигнала ниже среднего значения больше чем на 5σ , но не равна 0), «горячие» (шесть пикселей, перекоплены уже при первом считывании), «мертвые» (меньше 10, не накапливают сигнал) и «обратные» (около 100, имеют отрицательную скорость накопления сигнала в первых считываниях). Общее количество плохих пикселей и численность групп не зависят от скорости охлаждения камеры при заливке и от количества заливок. За семь лет эксплуатации (с 2015 г.) заметных признаков старения детектора ASTRONIRCAM не наблюдается, количество плохих пикселей статистически остается постоянным.

Как было сказано выше, детектор камеры ASTRONIRCAM работает в режиме *up-the-ramp*, поэтому получаемые с него данные свободны не только от сигнала подложки, но и от его шума.

Коррекция нелинейности чувствительности детектора камеры была описана выше. Данные, требующиеся для определения коэффициентов корректирующих полиномов, были получены в лабораторных условиях при постоянной окружающей температуре. Источником излучения служила металлическая заслонка, установленная непосредственно перед входным окном, имеющая температуру окружающей среды. Алгоритм получения коэффициентов описан Hilbert (2008). Проверки показывают, что коэффициенты не подвержены старению.

Темновой ток детектора равен $0.02e^{-s^{-1}}$ (Nadjir et al., 2017) и не заметен на фоне других сигналов и их шумов (например, сигнал от фона неба в полосе Y в тысячи раз превышает эту величину), поэтому за темновой ток получаемые изображения также не исправляются.

Калибровочные кадры «плоского поля» фотометрического режима ASTRONIRCAM получают двумя способами. Для коротковолновых полос

($\lambda_{\text{center}} < 2 \mu\text{m}$) для этого могут быть использованы как специальные наблюдения сумеречного неба, так и кадры, полученные в ходе ночных наблюдений точечных источников. В длинноволновых фильтрах (в том числе узкополосных) из-за наличия фонового излучения частей телескопа, попадающих в пучок, для формирования кадров плоского поля можно использовать только сумеречные наблюдения, выполненные при высокой яркости неба (с экспозициями примерно в 6 с при полном заполнении емкости пиксела за 10 с). В узкополосных фильтрах снимать кадры плоского поля надо при «погружении» Солнца под горизонт примерно на $0^\circ\text{--}2^\circ$, в полосе K — на 3° . По сумеречному небу обычно выполняется и получение кадров плоского поля в полосе Y , что связано с относительно низкой яркостью фона ночного неба на этой длине волны, не позволяющей получить достаточное S/N в ходе ночных наблюдений. Все наблюдения выполняются в режиме дизеринга.

По отдельным кадрам плоских полей для каждого фильтра формируется итоговый кадр плоского поля. Для этого используется алгоритм, применявшийся на камере WFPC космического телескопа им. Хаббла и описанный в работе Hsu and Ritchie (1993).

Благодаря вакуумированию всего объема камеры и расположению ASTRONIRCAM в фокусе Несмита, из-за чего входное окно камеры оказывается всегда расположено вертикально и практически не собирает пыли, воспроизводимость кадров плоского поля получается высокая — СКО отношения двух кадров плоского поля, полученных в разные даты (в том числе в разные сезоны), не превышает 0.004, а систематические отличия меньше чем 0.007.

При обработке изображений, полученных с узкополосными фильтрами, может потребоваться перевод отсчетов напрямую в энергетические единицы. Для определения соответствующих калибровочных коэффициентов использовались серии кадров, сделанных при фотометрической погоде. На них были выбраны несколько звезд с показателем цвета $J - K < 0.8$, спектральное распределение энергии которых по данным о блеске в полосах J , H , K аппроксимировалось кривой излучения

Таблица 5. Калибровочные коэффициенты для узкополосных фильтров ($1 \text{ ADU} = x \text{ эрг/см}^2$)

Фильтр	Калибровочный коэффициент
H_2	$(6.81 \pm 0.115) \times 10^{-17}$
K_{cont}	$(7.85 \pm 0.082) \times 10^{-17}$
$B\gamma$	$(7.11 \pm 0.101) \times 10^{-17}$
H	$(10.7 \pm 0.103) \times 10^{-17}$
$[\text{Fe II}]$	$(10.5 \pm 0.123) \times 10^{-17}$
CO	$(8.04 \pm 0.124) \times 10^{-17}$

абсолютно черного тела (АЧТ). Затем кривая перенормировалась так, чтобы соответствовать блеску звезды в полосе K (или H , в зависимости от центральной длины волны узкополосного фильтра, в котором была получена серия). Эта операция позволяет учесть изменение потока в спектре звезды с длиной волны при переходе от значений монохроматической освещенности, полученной для центральной длины волны полосы K , к потоку в узкополосном фильтре. Полученный в итоге спектр абсолютно черного тела сворачивался с кривой пропускания узкополосного фильтра, и вычислялся поток от каждой звезды на границе атмосферы. Методом апертурной фотометрии для каждой звезды было также измерено среднее количество отсчетов, накопленных за 1 с экспозиции. Калибровочная константа равна среднему (по выбранным звездам) отношению потока, вычисленного по спектру АЧТ, к числу отсчетов (таблица 5).

7. НЕЙТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР

Высокая эффективность камеры в фотометрическом режиме (40–50%, включая пропускание телескопа, Nadjir et al. (2017)) не позволяет наблюдать яркие звезды. Низкая эффективность ASTRONIRCAM в режиме кросс-дисперсии (1–2% (Zheloukhov et al., 2020)), наоборот, способствует наблюдениям ярких объектов (вплоть до отрицательных звездных величин). Установка объектов на щель спектрографа производится в фотометрическом режиме. При этом на детекторе остается значительный след от эффекта персистенции, который не всегда удается скорректировать из-за близости по времени к моменту засветки и неопределенности ее величины (перенасыщение наблюдается уже в первом считывании сигнала с детектора). Для решения этой проблемы перед входным окном ASTRONIRCAM в 2022 г. был установлен внешний подвижный нейтральный светофильтр NENIR215B (THORLABS). Перемещение светофильтра осуществляется линейным актюатором. Кривая пропускания фильтра

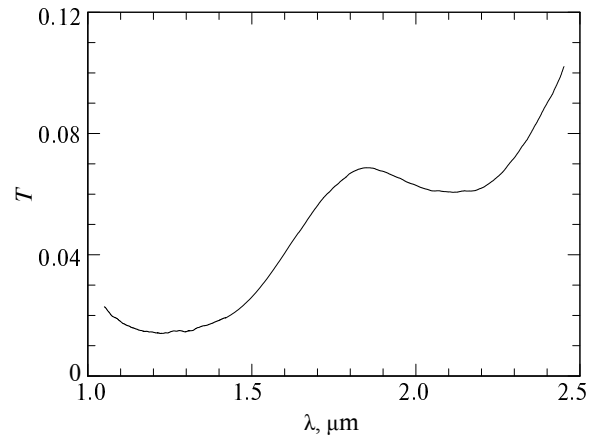


Рис. 6. Пропускание нейтрального светофильтра NENIR215B (по результатам измерения на спектрографе ASTRONIRCAM).

была получена по результатам измерения спектра калибровочной лампы накаливания спектрографа ASTRONIRCAM (рис. 6). Несмотря на название «нейтральный», пропускание фильтра сильно зависит от длины волны и меняется от 1.4% в полосе J до 6.2% в полосе K . Реализуемое ослабление достигает $\Delta J \approx 4^m6$, $\Delta H \approx 3^m3$ и $\Delta K \approx 3^m$ соответственно.

Использование нейтрального светофильтра оказалось возможным и при фотометрических наблюдениях. Высокий уровень фона от неохлаждаемого фильтра наблюдается только в полосе K (он примерно в 3–5 раз выше уровня фона без фильтра), однако при наблюдениях ярких объектов это не мешает измерениям. Для проверки влияния селективного поглощения были проведены наблюдения ряда звезд, показавшие отсутствие заметного влияния фильтра на отношения потоков звезд в кадре. Соответствующие средние отклонения в блеске составили $\Delta J \sim 0.004$, $\Delta H \sim 0.019$, $\Delta K \sim 0.007$. Существует некоторая цветовая зависимость отношений потоков звезд, измеренных относительно стандарта с применением нейтрального фильтра и без него, но даже для наиболее красных звезд с показателем цвета $J - K = 2.9$ (это объект с околозвездной пылевой оболочкой) разность этих отношений не превышает 4%. Для повышения точности редукации данных, полученных с нейтральным фильтром, требуется проведение более тщательного исследования и получение отдельных уравнений приведения инструментальных величин к стандартным.

8. КОНВЕЙЕР ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Конвейер (pipeline) обработки данных камеры ASTRONIRCAM представляет собой набор

скриптов, реализованных на языке программирования Python. Разделение процедуры обработки на отдельные и малосвязанные программы позволяет добиться большей гибкости в разработке и использовании программ. Например, возможно быстро изменять последовательность обработки или выключать отдельные ее этапы. Общение между отдельными компонентами «пайплайна» осуществляется с помощью ключей командной строки и записи необходимых для дальнейшей обработки данных информации в заголовки промежуточных fits-файлов.

Вся обработка выполняется на специально выделенной для этого виртуальной машине (Intel(R) Xeon(R) CPU X5675 @3.07 GHz, 8 ядер, 32 Гб памяти), к которой по сети подмонтированы диски с данными наблюдений. По умолчанию каждый день утром после окончания наблюдений со стандартными настройками запускается обработка всех данных, полученных за ночь. При необходимости можно вручную перезапустить как полный цикл обработки для определенной даты, так и отдельные этапы конвейера. Это может быть необходимо, например, при получении новых калибровочных данных.

В процессе работы «пайплайна» для всех получаемых данных выполняется коррекция за нелинейность. Вместе с ней производится восстановление данных из пересвеченных пикселей, так как этот алгоритм требует анализа не только результирующего кадра, но и всех полученных неразрушающих считываний детектора за время экспозиции. Далее выполняется коррекция персистенции. Ее алгоритм требует информации обо всех ярких засветках детектора, поэтому первичную обработку до этого этапа проходят даже тестовые, фокусирующие и пробные кадры.

Далее идет разделение на фотометрическую и спектральную части редукиции. Подробнее этапы спектральной редукиции описаны в статье Zheltoukhov et al. (2020). Для фотометрических же данных производится вычитание фона, если он был снят одновременно с объектом, а также коррекция за плоское поле.

9. ЦВЕТОВЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Для определения связи инструментальной фотометрической системы и системы МКО начиная с 2016 года в ясные ночи проводились наблюдения звезд-стандартов МКО из работы Leggett et al. (2006). Всего было получено более 500 оценок блеска в фильтрах Y, J, H, K, K_s , однако не для всех звезд удалось получить полный набор величин. В дальнейших вычислениях использовались только те звезды, для которых имелись JHK -оценки, и только те ночи, когда было

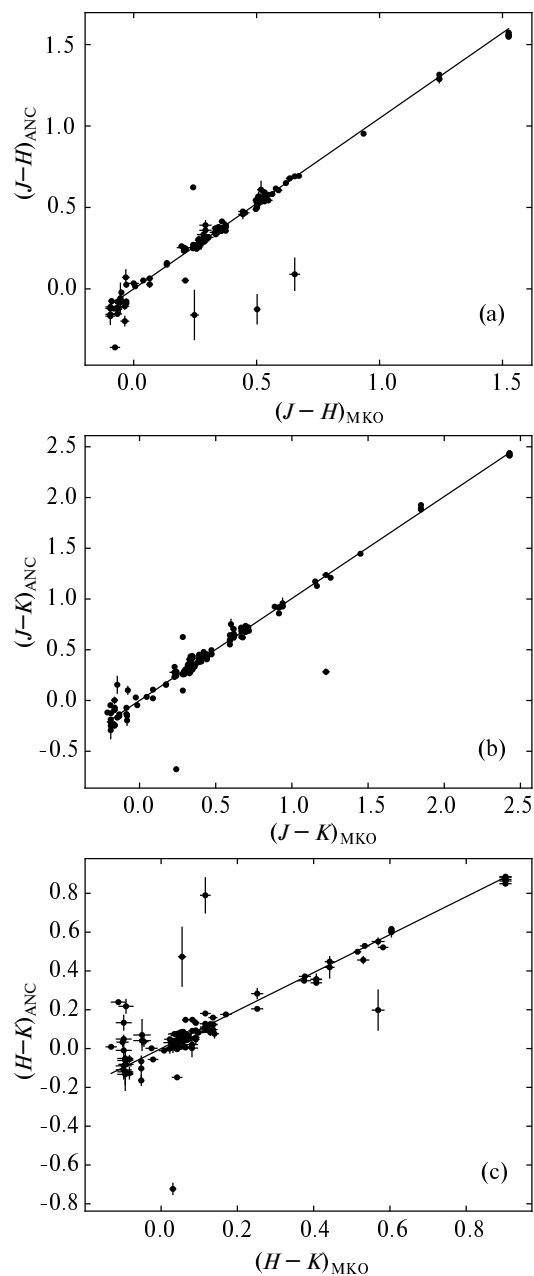


Рис. 7. Сопоставление инструментальной и стандартной цветовой систем для цветов $J - H$, $J - K$, $H - K$.

измерено не менее двух таких стандартов. На рис. 7 представлены соотношения цветов звезд-стандартов в инструментальной системе и в системе МКО, всего использовано 125 оценок. Данные аппроксимировались уравнениями вида $(colour)_{ANC} = k \times (colour)_{MCO}$ для всех доступных цветов: $J - H$, $J - K$, $H - K$. В качестве весов использовались обратные квадраты погрешностей измерений величин в системах ANC и МКО. Полученные коэффициенты k и их ошибки σ_k представлены в таблице 6.

Таблица 6. Цветовые коэффициенты

Цвет	$k \pm \sigma_k$	$c \pm \sigma_c$		
		δJ	δH	δK
$J - H$	1.048 ± 0.014	0.005 ± 0.011	-0.001 ± 0.014	-0.011 ± 0.019
$J - K$	1.005 ± 0.012	0.003 ± 0.007	-0.002 ± 0.009	-0.007 ± 0.011
$H - K$	0.979 ± 0.025	0.008 ± 0.017	-0.011 ± 0.021	-0.018 ± 0.028

Далее требовалось оценить коэффициенты, связывающие цвет звезды и разность ее величин в стандартной и инструментальной системах ($\delta J = J_{\text{ANC}} - J_{\text{MКО}}$, $\delta H = H_{\text{ANC}} - H_{\text{MКО}}$, $\delta K = K_{\text{ANC}} - K_{\text{MКО}}$). В отличие от оптического диапазона, где для подобной цели снимают площадки и получают одновременные наблюдения для большого количества звезд-стандартов, для фотометрических систем ИК-фильтров приходится снимать стандарты последовательно. За одну ночь не удается получить достаточное для надежной оценки свойств системы количество данных. Однако наблюдения, выполненные в разные ночи, могут иметь разный нуль-пункт, который связан с состоянием земной атмосферы, и не могут быть сопоставлены напрямую. Поэтому были отобраны ночи, которые имели хотя бы по одной общей звезде с одной определенной ночью, чтобы можно было использовать общую звезду для оценки этого нуль-пункта для каждой ночи относительно исходной ночи. В качестве таковой мы выбрали ночь 6 ноября 2016 г., в которую с высокой точностью было измерено наибольшее число стандартов (13). К данным этой ночи выполнялась привязка следующей ночи и т.д. Для этого сначала величины общей звезды в исходную и новую даты приводились к воздушной массе, равной 1, согласно уравнению $m_{\text{corr}} = m - \kappa \times (M(z) - 1)$, где $M(z)$ — воздушная масса, κ — коэффициент поглощения в атмосфере в звездных величинах на 1 воздушную массу. В работе Lombardi et al. (2011) была исследована зависимость этих коэффициентов от содержания паров воды в атмосфере для обсерватории Параналь и показано, что сами коэффициенты малы, а их зависимость от влажности слабая. У нас не было достаточно данных, чтобы оценить эти коэффициенты для КГО ГАИШ, поэтому мы приняли значения, полученные для Параналья в случае максимально зафиксированного содержания паров воды, которое совпадает с характерными значениями, наблюдаемыми, согласно Kornilov et al. (2016), в КГО ГАИШ с октября по март ($\text{PWV}^3 = 4-7$ мм), когда были получены основные наблюдения стандартов: $\kappa_J = 0.06$, $\kappa_H = 0.05$, $\kappa_K = 0.04$. Затем

³Precipitable water vapor.

для каждого фильтра мы находили разность инструментальных величин общей звезды в исходную и новую даты и вносили эти поправки в величины всех звезд, снятых в новую дату. Таким образом, у нас набралась 51 оценка. Для них были решены уравнения вида $\delta m = c \times (\text{colour})_{\text{MКО}}$, где δm — это разности JHK -величин в инструментальной и стандартной системах, приведенные к воздушной массе, равной единице, с коэффициентами поглощения κ , указанными выше, а colour — цвета $J - H$, $J - K$, $H - K$ в системе MКО.

На рис. 8 показаны разности между инструментальной и стандартной системами в зависимости от цвета. При совпадении этих систем цветовой зависимости наблюдаться не должно, и точки на графиках будут распределены относительно горизонтальной прямой $\delta m = 0$ в соответствии с ошибками измерений. Вид наших графиков на рис. 8 близок к этому случаю. Тем не менее мы провели линейные аппроксимации, выполненные с учетом погрешностей измерений. Значения полученных коэффициентов c и их ошибок σ_c приведены в таблице 6. Видно, что коэффициенты c действительно близки к нулю, что говорит о близости фотометрической системы камеры ASTRONIRCAM к стандартной системе MКО-NIR и позволяет в большинстве случаев использовать для дифференциальной фотометрии звезды с отличающимися цветами, не вводя поправку за цвет.

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены описание фотометрического режима работы камеры-спектрографа ASTRONIRCAM, получения калибровочных данных и процедур первичной калибровки, а также алгоритм работы конвейера автоматической обработки данных.

В 2021–2022 гг. в криостат камеры был установлен фильтр, реализующий фотометрическую полосу Y (центральная длина волны 1.02 мкм, см. таблицу 1), а перед входным окном криостата — неохлаждаемый нейтральный светофильтр. Для Y -фильтра получены уравнения связи показателей цвета ($Y - J_{2\text{MASS}}$) и $(J - H)_{2\text{MASS}}$, а для нейтрального светофильтра — кривые пропускания в диапазоне 1 – 2.45 мкм. Несмотря

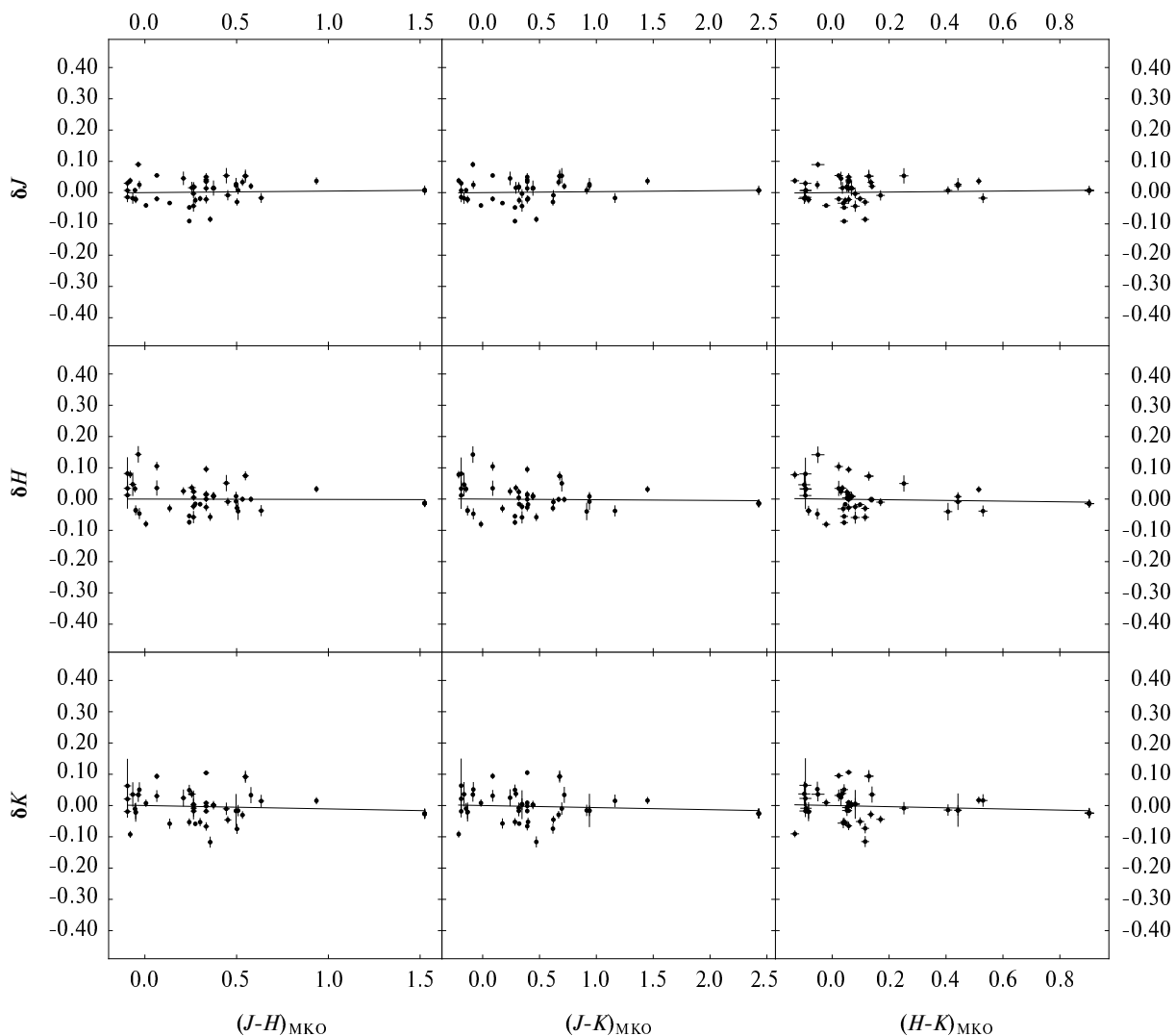


Рис. 8. Зависимость разности JHK -величин в инструментальной и стандартной системах от цветов $J - H$, $J - K$, $H - K$. Прямые представляют собой линейные аппроксимации.

на то что пропускание нейтрального фильтра значительно (более чем в 4 раза) меняется в рабочем диапазоне длин волн, его можно использовать при фотометрических наблюдениях ярких звезд. В полосах J и K цветовая поправка при этом близка к 0, а в полосе H она становится заметна лишь для очень красных ($J - K > 2^m$) объектов. Использование нейтрального фильтра значительно расширяет диапазон доступных фотометрическим наблюдениям объектов — становятся возможны наблюдения ярких объектов (слабее, чем $J \sim 5^m$, $H \sim 7^m$, $K \sim 7^m$).

По наблюдениям фотометрических стандартов получены цветовые уравнения связи инструментальной системы камеры ASTRONIRCAM и стандартной системы МКО-NIR. Коэффициенты зависимости разности соответствующих звездных величины от цвета оказались малы:

$$\begin{aligned} \delta J / (J - K) &= 0.003 \pm 0.007, \\ \delta H / (J - K) &= -0.002 \pm 0.009, \\ \delta K / (J - K) &= -0.007 \pm 0.011. \end{aligned}$$

Этот результат говорит о близости инструментальной фотометрической системы камеры к стандартной и позволяет в большинстве случаев не проводить дополнительную редукцию для перехода к системе МКО-NIR при обработке.

Многочисленные наблюдения слабых объектов (например, в ходе работ по фотометрической поддержке наблюдений объектов, открытых космической обсерваторией СРГ, Belinski et al. (2023)), показывают, что возможности фотометрического режима ASTRONIRCAM в условиях, когда уровень фона соответствует указанному в таблице 3 для $M_z = 1$, $T_{\text{inst}} = 0^\circ\text{C}$, $FWHM$ звездных изображений $1''$ и суммарное время накопления сиг-

нала 3000 с, ограничены следующими величинами:
 $J = 22^m$, $H = 20^m5$, $K = 19^m5$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят за поддержку работы Программу развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»). С. Желтоухов благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» № 21-2-10-35-1.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Benford, T. R. Lauer, and D. B. Mott, SPIE Conf. Proc. **7021**, p. 70211V (2008).
2. M. Casali, A. Adamson, C. Alves de Oliveira, et al., *Astron. and Astrophys.* **467** (2), 777 (2007).
3. A. A. Belinski, A. V. Dodin, S. G. Zheltoukhov, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3) (2023) (in press).
4. A. M. Fowler and I. Gatley, SPIE Conf. Proc. **1541**, p. 127 (1991).
5. B. Hilbert, *Instrument Science Report WFC3 2008-39*, (2008).
6. J. C. Hsu and C. E. Ritchie, ASP Conf. Ser. **52**, 418 (1993).
7. J. Koornneef, *Astron. and Astrophys.* **128** (1), 84 (1983).
8. V. G. Kornilov, M. V. Kornilov, N. I. Shatsky, et al., *Astronomy Letters* **42** (9), 616 (2016).
9. R. W. Leach and F. J. Low, SPIE Conf. Proc. **4008**, p. 337 (2000).
10. S. K. Leggett, M. J. Currie, W. P. Varricatt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373** (2), 781 (2006).
11. G. Lombardi, E. Mason, C. Lidman, et al., *Astron. and Astrophys.* **528**, A43 (2011).
12. N. A. Maslennikova, N. I. Shatsky, and A. M. Tatarnikov, SPIE Conf. Proc. **11454**, p. 1145432 (2020).
13. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (3), 349 (2017).
14. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, 2020), pp. 127-132.
15. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006).
16. R. M. Smith, M. Zavodny, G. Rahmer, and M. Bonati, SPIE Conf. Proc. **7021**, p. 70210J (2008).
17. A. M. Tatarnikov and A. A. Tatarnikov, *Moscow University Physics Bulletin* **78** (2) (2023) (in press).
18. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, and A. Tarasenkov, *Moscow University Physics Bulletin* (2023) (in press).
19. A. T. Tokunaga, D. A. Simons, and W. D. Vacca, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114** (792), 180 (2002).
20. S. Tulloch et al. (ESO Detector Systems Group), *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **5**, id. 036004 (2019).
21. S. G. Zheltoukhov, A. M. Tatarnikov, and N. I. Shatsky, *Astronomy Letters* **46** (3), 193 (2020).

Photometric Operation Mode of ASTRONIRCAM Camera

A. M. Tatarnikov^{1,2}, S. G. Zheltoukhov^{1,2}, N. I. Shatsky¹, M. A. Burlak¹, N. A. Maslennikova^{1,2} and A. A. Vakhonin^{1,2}

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

We explain the details of the photometric operation mode of ASTRONIRCAM near-IR spectrograph camera mounted on the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory of Sternberg Astronomical Institute and describe algorithms used for primary correction and overall pipeline reduction of the acquired data. We present the transformation equations from the 2MASS photometric system to the instrumental Y -band system. We derive color transformation coefficients between the instrumental photometric system and standard MKO-NIR (Mauna Kea Observatories Near-Infrared) system for the J , H , and K -band filters and show that the camera system is close to the standard photometric system. We found that in the case of observations at zenith, average background brightness level, and $1''$ seeing stars with $J = 22^m$, $H = 20^m5$, $K = 19^m5$ can be measured with a 300-s exposure at the signal-to-noise ratio $SNR = 3$.

Keywords: *instruments:detectors—instruments:photometers—infrared range: general questions—methods: data reduction*