

Цветовые уравнения трансформации между фотометрическими системами 2MASS и камеры ASTRONIRCAM 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ

А. М. Татарников^{1,2,*}, А. А. Татарников^{1,2,†}

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 07.01.2023; после доработки 18.01.2023; принята к публикации 20.01.2023)

В работе рассмотрен метод определения коэффициентов уравнений связи между разными фотометрическими системами, основанный на фотометрировании всех звезд поля, регистрируемых при наблюдениях первичных стандартов одной из фотометрических систем. С использованием этого метода получены уравнения связи между фотометрической системой камеры ASTRONIRCAM 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ и системой каталога обзора всего неба 2MASS.

PACS: 95.85.Jq. УДК: 520.8.07.

Ключевые слова: ИК астрономия, фотометрия, фотометрические системы.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2320801](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2320801)

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2014 г. под Кисловодском начала работу новая астрономическая обсерватория — Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ [1], основным инструментом которой является 2.5-метровый телескоп. Один из штатных наблюдательных приборов телескопа — инфракрасная камера-спектрограф AstroNIRCam. Камера оснащена приемником излучения Hawaii-2RG, набором широкополосных, узкополосных и поляризационных фильтров, набором гризм и фильтров сортировки порядков для работы в спектральном режиме. При работе в фотометрическом режиме камера имеет поле зрения $4.6' \times 4.6'$ при формате кадра 1024×1024 пикселей, масштаб изображения $0.269''/\text{пикселей}$. Подробное описание камеры приведено в работе [2].

Одной из проблем наблюдательной астрономии является отсутствие единой фотометрической системы. В ближнем ИК-диапазоне использовалось и используется большое число различных систем. Одна из первых и долгое время бывшая одной из наиболее популярных — фотометрическая система Джонсона с фильтрами *JHK* на спектральный диапазон 1–2.5 мкм [3]. Потом появились другие системы (например, MSSO [4], AAO [5], SAAO [6], LCO [7] и др.). Однако положение фотометрических полос на шкале длин волн в наземной ИК-астрономии не может быть произвольным: оно привязано к окнам прозрачности земной атмосферы, которые приходятся на 1.25 мкм, 1.65 мкм и 2.2 мкм. Поэтому полосы в других фотометри-

ческих системах получили те же названия — *JHK*. Фильтры отличаются формой и шириной полос пропускания и могут незначительно отличаться по величине центральной длины волны. Установленные в ASTRONIRCAM широкополосные фильтры *J*, *H* и *K* вместе с детектором реализуют кривые реакции относительно новой фотометрической системы MKO–NIR (Mauna Kea Observatories Near-InfraRed [8], [9]), уже получившей, тем не менее, признание в мире благодаря оптимальному (для горных обсерваторий с высотой 2000 м и выше) выбору ширины полос пропускания фильтров. На небе система MKO–NIR установлена через совокупность первичных стандартов, звездные величины которых приведены в статье [10].

Несмотря на то, что фотометрическая система MKO–NIR в последнее время получила широкое распространение (она используется, например, на обсерватории Мауна-Кеа, телескопах Keck, NOT, Gemini и др.), наибольшее число оценок блеска звезд в ИК-диапазоне было получено в других фотометрических системах. Так, обзор 2MASS (Two Micron All-Sky Survey [11]), проведенный в 1997–2001 гг., представляет собой обзор всего неба в собственной фотометрической системе, в которую входят фильтры *J*, *H*, *Ks*. Обзор получился достаточно глубоким (до 16 звездной величины) и является наиболее популярным среди других инфракрасных обзоров на данный момент. Можно с уверенностью утверждать, что звезды из каталога 2MASS попадут в поле зрения при наблюдениях практически с любой камерой, и их можно использовать в качестве звезд сравнения при условии существования уравнений редукции из фотометрической системы 2MASS в фотометрическую систему используемой камеры.

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

† E-mail: aleksandr.tatarnikov.1999@mail.ru

В 2006 г. Леггетт и др. опубликовали работу [10], в которой приведены цветовые уравнения для редукции данных из нескольких фотометрических систем в звездные величины системы MKO–NIR. В частности, там есть уравнения и для системы 2MASS. При определении коэффициентов этих уравнений авторы использовали измерения 84 звезд из 115, входящих в список первичных стандартов системы MKO–NIR. Наблюдения проводились в ночи со стабильной высокой прозрачностью атмосферы. В среднем каждый стандарт наблюдался в 3–4 ночи за промежуток времени с января 2001 г. по декабрь 2004 г. В полосе J диапазон звездных величин стандартов $11^m \div 15^m$, диапазон показателей цвета $J - K$ составил $-0.2 \div 1.8$, характерная величина ошибки оценки блеска $< 0.02^m$. При этом в каталоге 2MASS ошибки наблюдений этих звезд были больше — от 0.02^m до 0.05^m .

Использование для определения коэффициентов уравнений трансформации только первичных стандартов, как это было сделано в [10], имеет преимущества: звездные величины таких звезд известны с высокой точностью, они проверены на отсутствие переменности, их блеск находится в удобном для наблюдений диапазоне, что позволяет проводить фотометрию с высокой точностью за малое время накопления. Однако есть и ряд недостатков: относительно малое число звезд из списка стандартов доступно для точной фотометрии (т.е. понимается достаточно высоко) в средних широтах, небольшой диапазон изменения показателя цвета (< 2 , что снижает достоверность определения цветовой поправки), наконец, необходимость редукции из инструментальной в стандартную систему перед применением уравнений.

На 2.5-метровом телескопе КГО стандарты из списка [10] неоднократно наблюдались с 2017 до 2022 г. При этом на кадрах, наряду со стандартными звездами, регистрировались и звезды поля, блеск которых известен из каталога 2MASS. Это дает возможность провести фотометрию звезд поля, используя в качестве стандарта звезду из списка первичных стандартов системы MKO–NIR, после чего, собрав все данные вместе, получить уравнения связи двух фотометрических систем. Такой подход позволяет значительно увеличить число звезд и, главное, расширить диапазон цветов звезд, по которым строятся уравнения. Это позволит использовать звезды каталога 2MASS в качестве звезд сравнения и уменьшит ошибку привязки к ним при наблюдениях с камерой ASTRONIRCAM.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения для настоящей работы проводились в 2017–2022 гг. на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью инфракрасной камеры ASTRONIRCAM при стабильной прозрачности атмосферы, контролируемой по данным астроклима-

тического поста КГО. Объектами наблюдений являлись первичные фотометрические стандарты системы MKO–NIR из списка [10]. Наблюдения проводились в режиме дзиринга — небольших смещений телескопа (на 5–7 угловых секунд) после каждого полученного кадра. Характерное время накопления одного кадра 10 с, за одно наблюдение одного стандарта получалось 8–12 отдельных кадров. Все полученные кадры прошли процедуру первичной обработки, в ходе которой проводилась коррекция нелинейности чувствительности детектора и нормировка на кадр плоского поля. По итогам наблюдений в фильтрах J , H и K было получено более 6000 изображений окрестностей 73 стандартов (многие стандарты наблюдались в несколько ночей).

Алгоритм фотометрической обработки кадров был реализован на языке Python. С помощью пакета *photutils* вычислялся и вычитался фон, находились все звезды на кадре и проводилась их апертурная фотометрия. Затем с помощью программы *Astrometry.net* [12] и пакета *Astropy* производилось отождествление звезд на кадре со звездами каталога 2MASS, и измеренные ранее потоки переводились в звездные величины путем сравнения со стандартом из списка [10], попавшего на этот кадр. Как показано в работе [2], инструментальная фотометрическая система камеры ASTRONIRCAM очень близка к стандартной системе MKO–NIR, поэтому получившиеся оценки блеска звезд можно считать относящимися к последней.

Не все площадки вокруг первичных стандартов прошли автоматическую обработку: на части из них оказалось мало звезд из инфракрасного рабочего каталога *Astrometry.net* для успешного автоматического отождествления звезд с каталогом 2MASS. Такие площадки не использовались в дальнейшей работе.

2. ЦВЕТОВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАЗНОСТИ БЛЕСКА В РАЗНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ФОТОМЕТРИИ

Для поиска уравнений связи между двумя фотометрическими системами обычно исследуют зависимость разности звездных величин между наиболее близкими полосами систем δmag от соответствующего показателя цвета (см., например, [10], [13]). В случае фотометрических систем обзора 2MASS и ASTRONIRCAM можно использовать зависимости δJ , δH и δK от показателей цвета $J-K$, $J-H$ и $H-K$. Как было сказано выше, фотометрические полосы J , H , K системы 2MASS и J , H , K ASTRONIRCAM (или MKO–NIR) заданы в одном спектральном интервале. Поэтому можно ожидать отсутствие или наличие лишь слабой цветовой зависимости разности величин. Однако, как это видно из работы [10], для 2MASS и MKO–NIR существует как заметный разброс значений δmag для близких значений показателей цвета, так и цветовая зави-

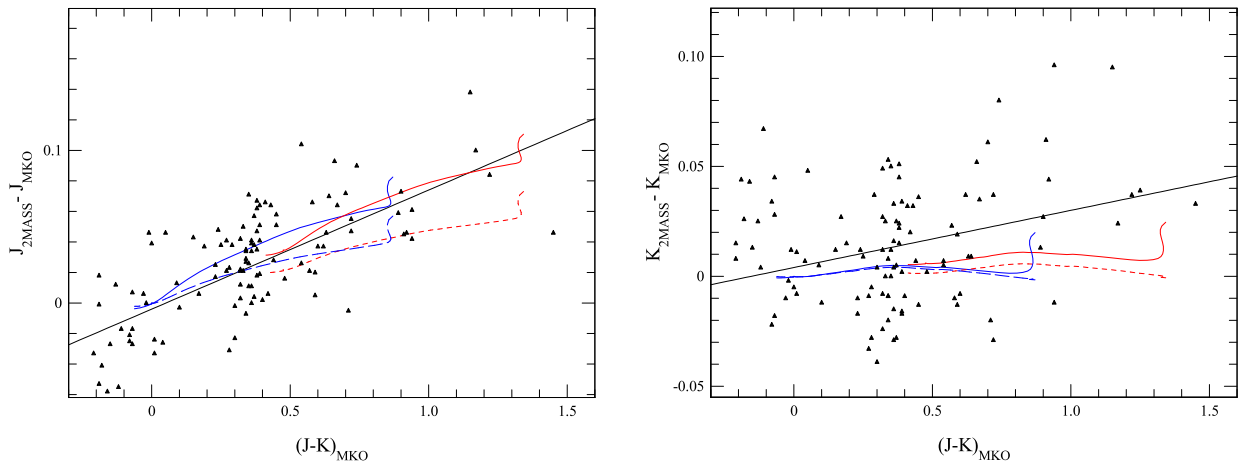


Рис. 1. Зависимость разностей звездных величин в системах 2MASS и MKO–NIR от показателей цвета $(J-K)_{MKO}$ для звезд-стандартов из списка [10] (треугольники) и моделей звездных атмосфер Phoenix [14] (синие линии для $E(B-V) = 0$ и красные линии $E(B-V) = 1$). Штриховые кривые показывают результат синтетической фотометрии со стандартными кривыми реакции 2MASS, сплошные кривые — с модифицированными кривыми (см. пояснения в тексте). Прямые линии — линейные зависимости, определенные по звездам-стандартам в работе [10]

симость разности δmag . Для исследования причин этого проведем синтетическую фотометрию в выбранных фотометрических системах моделей звездных атмосфер, представленных в библиотеке моделей и синтетических спектров Phoenix [14].

Кривые реакции фотометрических полос J , H , K_s обзора 2MASS описаны в работе [11] и были взяты нами с сайта проекта¹. Отметим, что в кривых реакции включен весь тракт от кривой чувствительности детектора до пропускания земной атмосферы. Кривые пропускания фильтров камеры ASTRONIRCAM предоставлены производителем камеры и опубликованы на сайте КГО². Используемый в камере детектор Hawaii-2RG в диапазоне длин волн 1–2.4 мкм имеет плоскую кривую чувствительности с квантовой эффективностью 94% (данные для детектора ASTRONIRCAM приведены поставщиком в сопроводительных документах, кривые аналогичных детекторов опубликованы, например, в [15]). Это позволяет не учитывать влияние формы этой кривой при вычислениях. Фильтры системы MKO–NIR спроектированы таким образом, чтобы минимизировать влияние полос поглощения земной атмосферы. Поэтому соответствующие поправки нами также не вносились. В качестве стандарта при синтетической фотометрии использовалась модель с параметрами $T_{eff} = 9600$ К и $\log g = 4$, близкими к параметрам Веги, которой были приписаны нулевые звездные величины во всех полосах.

Результаты синтетической фотометрии для двух значений межзвездного покраснения представлены на рис. 1. Кривые зависимости δJ и δK от $J-K$

вычислены для моделей звездных атмосфер с температурами в диапазоне $3000 \div 12000$ К и $\log g = 4.0$ или 4.5 (эти значения характерны для звезд главной последовательности спектральных классов А–М [16]). На графики рис. 1 нанесены также положения звезд-стандартов системы MKO–NIR и прямые, представляющие соответствующие зависимости из работы [10]. Видно, что синтетические кривые проходят заметно ниже прямых, т.е. синтетическая фотометрия предсказывает слабую цветовую зависимость для разности δJ и отсутствие зависимости для δK . Однако оказалось, что разность δJ оказывается очень чувствительна к форме кривой реакции фильтра J системы 2MASS. Увеличение ширины полосы пропускания со стороны коротковолнового края всего на 5% приводит к тому, что синтетическая зависимость оказывается близка к наблюдаемой. Как раз на этом краю кривой реакции этой фотометрической полосы находится депрессия, вызванная поглощением водяного пара атмосферы Земли, и изменение содержания воды в атмосфере может приводить к наблюдаемому эффекту. Изменение ширины полосы пропускания фильтра K на те же 5% практически не меняет положение синтетической зависимости на графике δK vs $(J-K)$. Однако и угол наклона прямой на этой зависимости в 3 раза меньше, т.е. цветовая зависимость δK в целом слабее, что связано с более гладким, монотонным изменением формы спектров звезд в этом спектральном диапазоне для холодных звезд и выполнением закона Рэлея–Джинса для звезд в более широком диапазоне температур (для $T_{eff} > 4000$ К).

¹ https://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/allsky/doc/sec6_4a.html

² <https://arca.sai.msu.ru/instruments?ics=ANC#ics>

Таблица. Коэффициенты уравнений трансформации

δmag	A	σ_A	B	σ_B	$C.I.$
$J_{2MASS} - J_{MKO}$	0.0187	0.0029	0.0609	0.0036	$(J - K)_{MKO}$
$H_{2MASS} - H_{MKO}$	0.0323	0.0022	-0.0618	0.0052	$(H - K)_{MKO}$
$K_{2MASS} - K_{MKO}$	0.0004	0.0034	0.0297	0.0042	$(J - K)_{MKO}$
$J_{MKO} - J_{2MASS}$	-0.0171	0.0029	-0.0593	0.0035	$(J - K)_{2MASS}$
$H_{MKO} - H_{2MASS}$	-0.0307	0.0023	0.0552	0.0060	$(H - K)_{2MASS}$
$K_{MKO} - K_{2MASS}$	-0.0047	0.0035	-0.0218	0.0042	$(J - K)_{2MASS}$

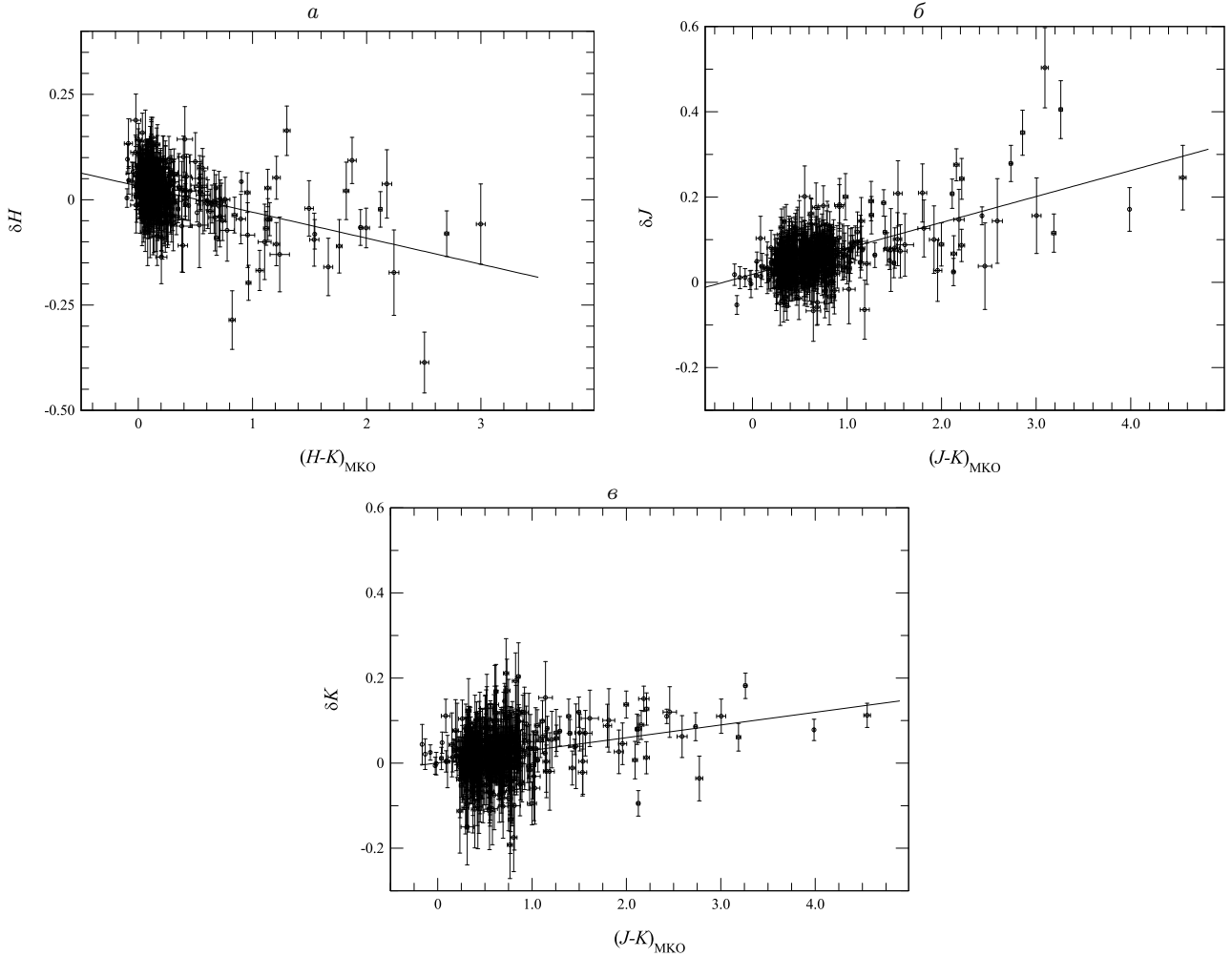


Рис. 2. Зависимость разностей звездных величин в системах 2MASS и MKO–NIR от показателей цвета для звезд поля

3. ЦВЕТОВЫЕ УРАВНЕНИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ

Большой разброс точек относительно аппроксимирующей прямой на рис. 1, малое число звезд с большим значением показателя цвета (положение которых на графике тем не менее сильнее всего влияет на угол наклона прямой) и неопределенности результатов синтетической фотометрии приводят к необходимости увеличения количества точек, по которым строятся цветовые урав-

нения. В нашем случае один из возможных путей повышения точности определения коэффициентов цветовых уравнений — использование звезд поля, оценки блеска которых имеют в каталоге 2MASS необходимую точность, с одной стороны, и эти звезды должны быть достаточно слабыми, чтобы наблюдаться без переполнения на 2.5-м телескопе с камерой ASTRONIRCAM, с другой стороны. Нами были отобраны звезды, удовлетворяющие этим условиям — всего около 600 звезд.

На рис. 2 представлены зависимости разностей блеска $\delta J = J_{2MASS} - J_{MKO}$, $\delta H = H_{2MASS} - H_{MKO}$ и $\delta K = K_{2MASS} - K_{MKO}$ от показателей цвета для звезд поля, у которых ошибки в каталоге 2MASS не превышают 0.07^m , а ошибки нашей фотометрии меньше 0.05^m . В таблице приведены соответствующие коэффициенты уравнений трансформации из фотометрической системы 2MASS в MKO–NIR и обратно, представленных в том же виде, что и в [10]:

$$\delta mag = A_{\pm\sigma_A} + B_{\pm\sigma_B} \times C.I., \quad (1)$$

где δmag — разность звездных величин объекта в разных фотометрических системах, а $C.I.$ — показатель цвета в одной из систем (например, $(J - K)_{MKO}$).

Сопоставление графиков, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что, по сравнению с [10], нам удалось значительно расширить диапазон показателей цвета звезд, используемых при определении уравнений трансформации. Благодаря этому наклон аппроксимирующих прямых определяется надежнее, а ошибки коэффициентов соответствующих линейных зависимостей снижаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимость использования звезд поля в качестве звезд сравнения при фотометрических наблюдениях не вызывает сомнения — звезды-стандарты любой фотометрической системы расположены на небе очень редко и их попадание в кадр при наблюдениях какого-либо объекта практически исключено. В ближнем инфракрасном диапазоне все звезды поля ярче примерно 17^m (в полосе J) имеют фотометрические оценки блеска, представленные в каталоге обзора всего неба 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources [17]. Для использования

данных из этого каталога при наблюдениях с камерой ASTRONIRCAM 2.5-м телескопа КГО ГАИШ нами были получены коэффициенты уравнений цветовой трансформации из фотометрической системы каталога в фотометрическую систему камеры, близкую к системе MKO–NIR (см. таблицу).

Уравнения трансформации 2MASS — MKO вида (1) ранее были получены в работе [10] по наблюдениям примерно 80 первичных стандартных звезд, показатели цвета которых заключены в относительно узком интервале $\Delta(J - K) \sim 1.3$. В нашей работе для получения уравнений связи фотометрических систем использовались наблюдения областей неба радиусом около $2'$ вокруг первичных стандартов системы MKO–NIR, выполненные в 2017–2022 гг. На каждом из этих кадров относительно основного стандарта была проведена фотометрия всех звезд поля, попавших в каталог 2MASS. Таким образом удалось в несколько раз увеличить число звезд, по которым определялись коэффициенты цветowych уравнений. Это позволило примерно в 3 раза расширить диапазон показателей цвета, значительно увеличив число звезд с $(J - K) > 1.5$, которые и определяют наклон линейной функции зависимости поправки от цвета.

Найденные нами коэффициенты уравнений трансформации достаточно близки к коэффициентам, опубликованным в работе [10], что является дополнительным аргументом близости инструментальной фотометрической системы камеры ASTRONIRCAM к стандартной системе MKO–NIR.

Работа поддержана грантом РФФИ 20-02-00643. Авторы выражают признательность коллективу операторов 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ (М.А. Бурлак, Н.А. Масленникова, С.Г. Желтоухову и др.) за наблюдения. Авторы благодарят за поддержку Программу развития Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (Научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»).

- [1] Shatsky N., Belinski A., Dodin A. et al. // Ground-Based Astronomy in Russia. Proc. 2020. **1**. P. 127.
- [2] Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д.У. и др. // Астрофизический бюллетень. 2017. **72**. P. 382.
- [3] Johnson H.L. // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 1966. **4**. P. 193.
- [4] Jones T.J., Hyland A.R. // MNRAS. 1982. **200**. P. 509.
- [5] Allen D.A., Gragg T.A. // MNRAS. 1983. **203**. P. 777.
- [6] Carter B.S. // MNRAS. 1990. **242**. P. 1.
- [7] Persson S.E., Murphy D.C., Krzeminski W. et al. // Astron. J. 1998. **116**. P. 247.
- [8] Simons D.A., Tokunaga A. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2002. **114**. P. 169.
- [9] Tokunaga A.T., Simons D.A., Vacca W.D. // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2002. **114**. P. 180.
- [10] Leggett S.K., Currie M.J., Varricatt W.P. et al. // MNRAS. 2006. **373**. P. 781.
- [11] Cohen M., Wheaton Wm. A., Megeath S. T. // Astron. J. 2003. **126**. P. 1090.
- [12] Lang D., Hogg D. W., Mierle K. et al. // AJ. 2010. **137**. P. 1782.
- [13] Bilir S., Ak S., Karaali S. et al. // MNRAS. 2008. **384**. P. 1178.
- [14] Husser T.-O., Wende-von Berg S., Dreizler S. et al. // Astron. and Astroph. 2013. **553**. P. A6.
- [15] Jerram P., Beletic J. // Proc. of SPIE. 2018. **11180**. P. 111803D-1.
- [16] Straizys V. and Kuriliene G. // Astrophysics and Space Science. 1981. **80**. P. 353.
- [17] Cutri R.M., Skrutskie M.F., Van Dyk S. et al. // vizier:II/246. 2003.

Color Transformation Equations between Photometric Systems of the 2MASS Catalog and the ASTRONIRCAM Camera of the SAI MSU 2.5-m Telescope

A. M. Tatarnikov^{1,2,a}, A. A. Tatarnikov^{1,2,b}

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, ^baleksandr.tatarnikov.1999@mail.ru

In this paper, we consider a method for determining the coefficients of the transformation equations between different photometric systems based on the photometry of all field stars recorded during observations of the primary standards of one of the photometric systems. Using this method, the coefficients of color transformation equations between the photometric systems of the ASTRONIRCAM camera of the CMO SAI MSU 2.5-m telescope and the 2MASS all-sky survey catalog are obtained.

PACS: 95.85.Jq.

Keywords: infrared astronomy, photometry, photometric systems.

Received 07 January 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 2. Pp. 221–226.

Сведения об авторах

1. Татарников Андрей Михайлович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: andrew@sai.msu.ru.
2. Татарников Александр Андреевич — студент 5 курса, ст. техник; тел.: (495) 939-16-61, e-mail: aleksandr.tatarnikov.1999@mail.ru.