УДК 520.48, 520.16
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-262

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ В САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ПО ДАННЫМ КАМЕРЫ ВСЕГО НЕБА

С.С. Карнаухов, М.В. Еселевич

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия,
semenkarn31@iszf.irk.ru

MEASURING ATMOSPHERIC TRANSPARENCY AT THE SAYAN SOLAR OBSERVATORY BASED ON ALL-SKY CAMERA DATA

S.S. Karnaukhov, M.V. Eselevich

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, semenkarn31@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлена методика определения атмосферной экстинкции по данным камеры всего неба, установленной в Саянской солнечной обсерватории. Описан автоматизированный алгоритм обработки, включающий калибровку кадров на основе модели яркости сумеречного неба, поиск звезд с учетом эквидистантной проекции объектива fish-eye и фотометрию с использованием эллиптических апертур. Сопоставление измеренных потоков звезд с внеатмосферным блеском в полосе V из каталога Hipparcos позволили определить коэффициенты экстинкции по данным зеленого спектрального канала камеры. Показано, что методика устойчиво разделяет ясные и облачные условия и обеспечивает оценки прозрачности, достаточные для оперативного мониторинга и статистического анализа многолетнего архива наблюдений.

Ключевые слова: камера всего неба, атмосферная экстинкция, апертурная фотометрия, калибровка изображений, прозрачность атмосферы, Саянская солнечная обсерватория.

Abstract. This paper presents a method for determining atmospheric extinction using data from the all-sky camera installed at the Sayan Solar Observatory. We describe an automated processing algorithm that includes frame calibration based on twilight sky modeling, stars detection, taking account of the equidistant projection of the “fish-eye” lens, and photometry with elliptical apertures. Matching measured fluxes of stars with V-band magnitudes from the Hipparcos catalog yielded extinction coefficients for the camera’s green spectral channel. The method reliably distinguishes clear and cloudy conditions and provides transparency estimates sufficient for operational monitoring and statistical analysis of a long-term observational archive.

Keywords: all-sky camera, atmospheric extinction, aperture photometry, image calibration, atmospheric transparency, Sayan Solar Observatory.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка атмосферной экстинкции и мониторинг оптической прозрачности неба являются стандартными задачами наблюдательной астрономии. Традиционно для этих целей используются специализированные фотометры, однако на территории обсерваторий в штатном режиме эксплуатируются широкоугольные камеры всего неба, предназначенные преимущественно для контроля облачности. Применение такого оборудования для фотометрии позволяет расширить функциональность существующей инфраструктуры и проводить статистический анализ прозрачности атмосферы на основе многолетних архивов наблюдений.

В Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН много лет используется камера всего неба. Она прошла несколько модернизаций фотоприемной камеры, корпуса, защитного стекла и в последней конфигурации используется последние два года. Основным назначением камеры при ее установке был визуальный контроль погодных условий при проведении ночных наблюдений в обсерватории — с этой ролью устройство успешно справляется на протяжении многих лет. В то же время за годы использования камеры накоплен достаточной большой массив ночных изображений, которые можно использовать для анализа погодных условий в обсерватории, в том числе для определения прозрачности атмосферы. Цель работы — адаптация данных с камеры всего неба Саянской солнечной обсерватории для оценки атмосферной экстинкции. Описан алгоритм обработки, основанный на распространенных решениях цифровой фотометрии, модифицированных под аппаратные особенности камеры. Алгоритм реализован на языке Python с использованием библиотек Astropy, Photutils, Scipy, Numpy [Astropy Collaboration et al., 2022; Harris et al., 2020; Virtanen et al., 2020].

1. АППАРАТУРА И КАЛИБРОВКА

Камера всего неба состоит из объектива fish-eye FE185C046HA-1 и фотоприемной камеры ZWO ASI224MC, характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры камеры всего неба

Параметр	Значение
Сенсор	1/3" CMOS IMX224/IMX225
Разрешение	1304x976 (1,2 Мп)
Размер пикселя	3.75 мкм
АЦП	12 бит
Спектральный фильтр	Байера (RGB)
Фокусное расстояние объектива	1.4 мм
Тип проекции объектива	Эквидистантная

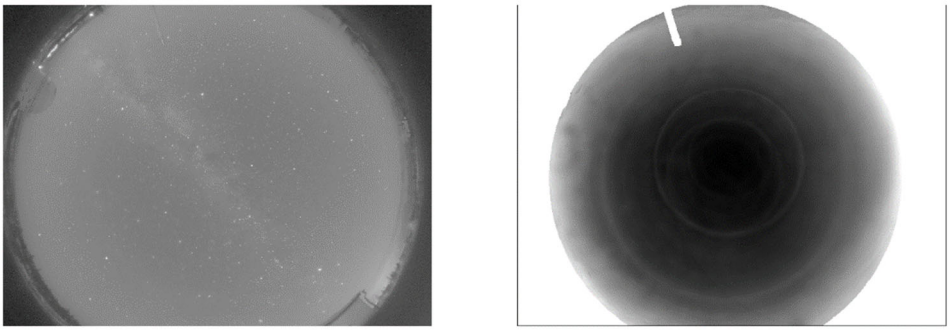

Рис. 1. Пример кадра ночного неба в зеленом канале (слева) и кадр плоского поля (справа)

При работе камеры в ночное время регистрируются кадры с экспозицией 2 мин. В качестве рабочего выбран зеленый спектральный канал камеры (0.47–0.61 мкм), близкий к стандартной полосе V фотометрической системы Джонсона (0.5–0.59 мкм) [Bessell, 2005].

Коррекция темнового тока и теплового шума осуществлялась вычитанием усредненного темнового кадра, полученного при закрытом объективе. Устранение неравномерности пропускания оптики, виньетирования и вариаций чувствительности пикселей выполнялось делением на кадр плоского поля.

На рис. 1 показан пример ночного кадра в зеленом канале камеры и итоговый кадр плоского поля, использованный для калибровки рабочих кадров.

Плоское поле формировалось на основе наблюдений сумеречного неба в ясную погоду; использовались данные утренних и вечерних сумерек, полученные в разные сезоны года, что обеспечило равномерное покрытие поля зрения при последующем усреднении. Для формирования плоского поля использовалась модель распределения яркости неба, рассчитанная с помощью пакета LibRadTran/UVSPEC [Emde et al., 2016] для зеленого спектрального канала с учетом спектральной чувствительности матрицы. Для калибровки были выбраны экспериментальные данные в диапазоне зенитных углов Солнца 91°–91.5° из-за лучшего согласования с моделью.

Отдельные кадры плоского поля вычислялись как отношение модельной яркости к яркости кадров, полученных во время сумерек, с последующей нормировкой по средней яркости в зенитной области (зенитный угол < 2.5°). При этом все пиксели, достигшие насыщения или близкие к нему, исключались из расчетов. Итоговый кадр плоского поля получен усреднением серии таких кадров, полученных в разные сезоны года при разных азимутальных положениях Солнца.

2. АЛГОРИТМ ПОИСКА ИСТОЧНИКОВ И ФОТОМЕТРИИ

Для камеры всего неба первоначально были определены параметры преобразования между координатами пикселей на изображении и горизонтальными координатами на небе (азимут—высота). При этом учитывалась эквидистантная проекция объектива, описываемая формулой $r = f\theta$, где r — линейное расстояние от центра изображения, f — фокусное расстояние, θ — угол относительно оси объектива. Определенные параметры позволяют учесть отклонение оптической оси объектива от зенита, масштаб изображения и его поворот. Модальная ошибка определения координат небесных объектов на изображении составила ~0.25 пкс или 0.04° на небе.

Пересчет горизонтальных координат в другие системы (например, экваториальные) выполнялся стандартными методами по известным географическим координатам камеры и моменту измерений.

Обработка ранее откалиброванных кадров включает следующие этапы.

1. Определение и вычитание неравномерного фона.
2. Пороговое детектирование и сегментация источников (звезд) на кадре с использованием алгоритма водораздела [Vincent, Soille, 1991].
3. Формирование эллиптических апертур для каждого источника на кадре и измерение потока с учетом локального фона в кольцевой апертуре вокруг основной апертуры [Howell, 2006]. Источники с перекрывающимися апертурами отбрасываются.
4. На основе скорректированного потока вычисляется инструментальный блеск по стандартной логарифмической зависимости [Sterken, Manfroid, 1992].
5. Сопоставление найденных источников с каталогом по экваториальным координатам.

Результатом обработки каждого кадра является таблица параметров всех найденных источников (координаты, поток, инструментальная величина, каталожные данные и флаги качества), которая используется для расчета атмосферной прозрачности. В качестве каталожных данных для звезд использовались экваториальные координаты в системе J2000 и внеатмосферный блеск в полосе V системы Джонсона, взятые из каталога Hipparcos [Perryman et al., 1997].

3. РАСЧЕТ ЭКСТИНКЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения коэффициента экстинкции используется традиционный подход измерения стандартных звезд с различными воздушными массами на основе уравнения [Bessell, 2005]

$$m_i = m_0 + kX + ZP \quad (1)$$

Здесь m_i — инструментальная блеск звезды, m_0 — каталожный блеск звезды, k — коэффициент экстинкции, X — воздушная масса, ZP — нуль-пункт. Цветовые поправки в расчете не учитываются из-за недостаточной точности измерений. Воздушная масса рассчитывается по упрощенной формуле $X = 1/\cos(z)$, где z — зенитный угол [Hardie, 1962]. Коэффициент экстинкции и нуль-пункт определяются из линейной аппроксимации величины $m_i - m_0$, построенной относительно X для всех звезд.

Для уменьшения ошибки расчет коэффициента экстинкции выполняется по инструментальному блеску звезд, усредненному по серии из 10 последовательных кадров, что при экспозиции 2 мин соответствует интервалу времени ~20 мин. Максимальная длина усредняемой серии ограничена изменением зенитного угла звезд.

Для расчета используются звезды ярче $V = 6$ зв. величины, с ошибкой инструментального блеска < 0.08 зв. величины в диапазоне воздушных масс от 1 до 4. При этом используются только источники, не имеющие насыщенных или горячих пикселей в области фотометрии, а также детектируемые на всех кадрах серии.

Для повышения точности оценки выполняется фильтрация выбросов, отклоняющихся от линейной аппроксимации более чем на 3σ, с последующим повторным расчетом. Результат линейной аппроксимации для одной серии показан на рис. 2. Наклон аппроксимирующей прямой соответствует коэффициенту экстинкции $k = 0.19 \pm 0.02$.

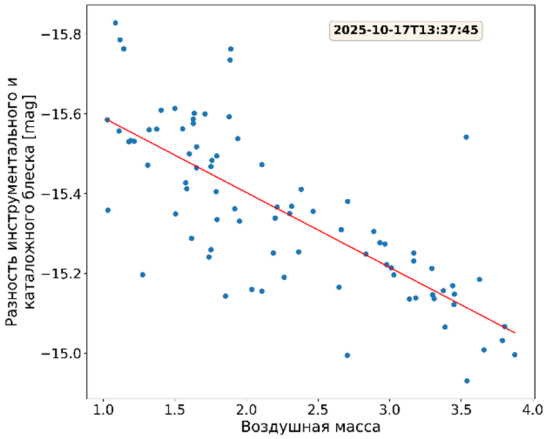

Рис. 2. Зависимость разности инструментального и каталожного блеска от воздушной массы; сплошная линия — линейная аппроксимация

По последовательности серий кадров получена динамика изменения коэффициента экстинкции в течение ночи. На рис. 3 показаны примеры определения экстинкции в течение ясной и облачной ночей.

Полученные для ясного неба значения коэффициента экстинкции соответствуют характерным значениям коэффициента экстинкции в полосе V для других обсерваторий (например [Aceituno et al., 2011]). В облачные ночи наблюдаются значительные колебания экстинкции и рост погрешности, что отражает пространственную и временную неоднородности облачного покрова.

Отбор ясных и облачных ночей для иллюстрации результатов выполнялся визуально по данным камеры всего неба. Разработанная методика позволяет получать измерения коэффициента экстинкции в полосе V по данным камеры всего неба, работающей в режиме мониторинга. Полученные измерения экстинкции имеют невысокую точность, но позволяют выполнить статистический анализ прозрачности атмосферы по многолетнему архиву наблюдений Саянской солнечной обсерватории.

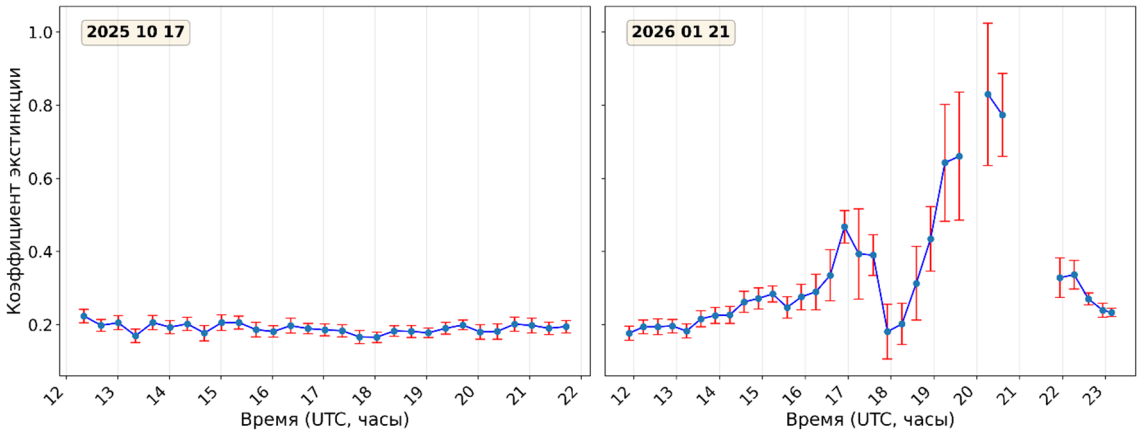

Рис. 3. Изменения коэффициента экстинкции в течение ночи в ясную погоду (слева) и при облачности (справа); бары погрешностей показывают стандартные ошибки коэффициента экстинкции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика определения атмосферной экстинкции по данным камеры всего неба Саянской солнечной обсерватории. Разработанный алгоритм обработки, включающий инструментальную калибровку, детектирование источников и апертурную фотометрию, позволяет получать измерения коэффициента экстинкции в полосе V. Методика устойчиво разделяет ясные и облачные условия и пригодна для оперативного мониторинга и статистического анализа многолетнего архива наблюдений. В перспективе планируется адаптация подхода для построения локальных карт прозрачности неба с пространственным разделением поля зрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Aceituno J., Sánchez S.F., Aceituno F.J., et al. An All-Sky Transmission Monitor: ASTMON // Publ. Astron. Soc. Pac. 2011. V. 123, N 9. P. 1076–1086.

Astropy Collaboration, Price-Whelan A.M., Lim P.L., Earl N., Starkman N., et al. The Astropy Project: Building an Open-science Project and Status of the v5.0 Core Package // Astrophys. J. 2022. V. 935, N 2. Art. 167.

Bessell M.S. Standard photometric systems// Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2005. V. 43. P. 293–336. DOI: 10.1146/annurev.astro.41.082801.100251.

Emde C., Buras-Schnell R., Kylling A., et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9, N 5. P. 1647–1672.

Hardie R.H. Photometric reductions // Astronomical Techniques / Ed. W.A. Hiltner. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1962. P. 178–208.

Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., Gommers R., Virtanen P. et al. Array programming with NumPy // Nature. 2020. V. 585. P. 357–362.

Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 220 p.

Perryman M.A.C., Lindegren L., Kovalevsky J., Høg E., Bastian U. et al. The Hipparcos Catalogue // Astron. Astrophys. 1997. V. 323. P. L49–L52.

Sterken C., Manfroid J. Astronomical Photometry: A Guide. Astrophysics and Space Science Library. Vol. 175. Dordrecht/Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992.

Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1991. V. 13, N 6. P. 583–598.

Virtanen P., Gommers R., Oliphant T.E., et al. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python // Nat. Methods. 2020. V. 17. P. 261–272.