УДК 520.8
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-339

АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА КАМЕРЫ ВСЕГО НЕБА И АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ МЕТОДОМ ЛОМБА—СКАРГЛА

И.Н. Семенов, Т.Е. Сыренова

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

ASTROMETRIC CALIBRATION OF THE ALL-SKY CAMERA AND ANALYSIS OF WAVELINE DISRUPTIONS IN THE UPPER ATMOSPHERE BY THE LOMB—SKARGLE METHOD

I.N. Semenov, T.E. Syrenova

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

Аннотация. Рассматривается метод анализа снимков, сделанных с помощью камеры всего неба ASI6030, включающий в себя предобработку кадров, астрономическую привязку и вычисление параметров волновых явлений верхней атмосферы. Камера располагается в геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (Торы, 51.80° N, 103.07° E). Данные получены с камеры всего неба с применением оптического фильтра 630 нм, детектирующего свечение атомарного кислорода на высоте 180–300 км (с максимумом ~250 км).

Ключевые слова: камера всего неба, астрометрическая калибровка, волновые возмущения верхней атмосферы, метод Ломба—Скаргла.

Abstract. This paper describes a method for analyzing images from the all-sky camera, which includes preprocessing of frames, astronomical referencing, and calculation of parameters of wave events in the upper atmosphere. The camera is located in the ISTP SB RAS Geophysical Observatory (Tory, 51.80° N, 103.07° E). The data was obtained from the all-sky camera with an optical filter of 630 nm, which detects the airglow of atomic oxygen at 180–300km (maximum at ~250 km).

Keywords: all-sky camera, astrometric calibration, wave disturbances in the upper atmosphere, Lomb—Scargle method.

ВВЕДЕНИЕ

Камеры всего неба являются эффективным инструментом мониторинга свечения верхней атмосферы, благодаря которому виден характер распространения волновых возмущений в верхней атмосфере.

Волны, о которых идет речь [Базметова и др., 1999], представляют собой внутренние гравитационные волны (ВГВ) — колебания в устойчиво стратифицированной атмосфере, возникающие под действием силы плавучести при вертикальном смещении воздушных масс. Достигая ионосферных высот и вызывая там вариации концентрации заряженных частиц, ВГВ проявляются в виде перемещающихся фронтов или полос на изображениях камер всего неба. Чтобы количественно описать наблюдаемую картину, необходима точная географическая привязка каждого пикселя изображения. Это требует решения задачи астрометрической калибровки — установления связи между пиксельными координатами (x, y) и горизонтальными небесными координатами (азимут *az*, высота *alt*).

Классические подходы к калибровке камер всего неба используют экспоненциальные или полиномиальные модели радиальной дисторсии, параметры которых определяются по опорным звездам [Barghini et al., 2019]. В настоящей работе развита методика, основанная на итерационном отождествлении звезд каталога Hipparcos с последовательным усложнением модели. После калибровки к предобработанным изображениям применяется метод Ломба—Скаргла для спектрального анализа и извлечения волновых параметров [Kalicinsky et al., 2020].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

Использованы данные камеры всего неба ASI0 (длина волны 630.0 нм, линия высвечивания атомарного кислорода OI), установленной в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (Торы, 51.80° N, 103.07° E, высота 680 м над уровнем моря). Анализировалась ночь с 4 на 5 января 2022 г. Загружено 168 последовательных FITS-файлов. Экспозиция каждого кадра составляла 55 с.

АСТРОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА

Для описания проекции «рыбий глаз» использовалась радиальная модель, связывающая расстояние r от оптического центра (x_0, y_0) с зенитным углом z = 90° – *alt*. Модель задается полиномом 7-й степени

$$z(r) = a_1 r + a_2 r^3 + a_3 r^5 + a_4 r^7. \quad (1)$$

Азимут определяется геометрически с учетом поворота камеры a_0:

$$az = (a_0 + arctan2(y - y_0, x - x_0)). \quad (2)$$

Полный набор параметров включает семь величин: $\theta = \{a_0, x_0, y_0, a_1, a_2, a_3, a_4\}$.

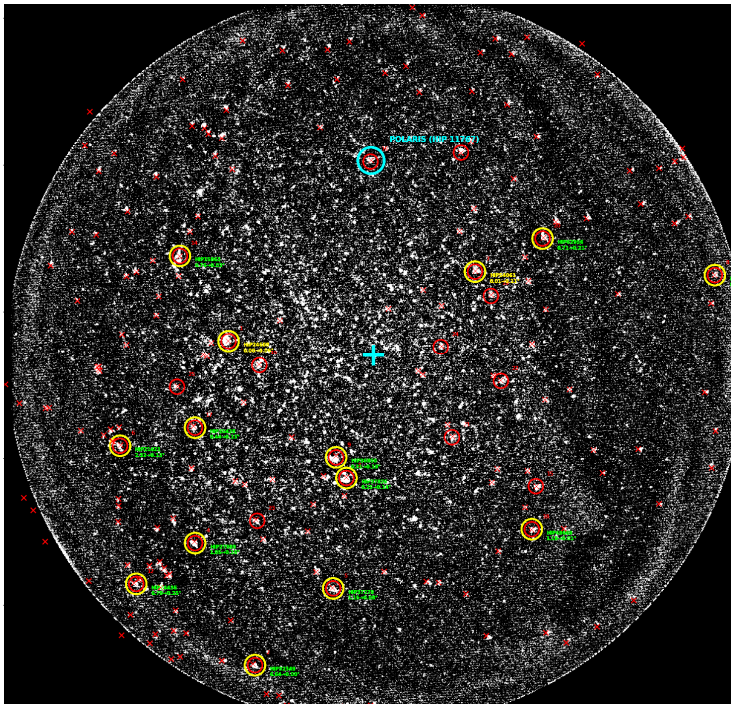

Рис. 1. Результат астрономической калибровки камеры всего неба по кадру (04–05.01.2022)

Процедура калибровки выполнялась в три этапа. На 1 этапе среди 10 ярчайших звезд кадра и каталога методом треугольников найдены начальные соответствия. Для каждой гипотезы (тройка звезд) методом наименьших квадратов (МНК) оптимизировались параметры экспоненциальной модели $u = Vr + S(e^{Dr} - 1)$ [2]. Выбиралась гипотеза с минимальной среднеквадратичной ошибкой. На 2 этапе модель пересчитывалась с центром в зените на расширенном наборе (~100 соответствий), среднее квадратичное отклонение (СКО) снизилась до ~0.3°. На этапе 3 выполнено азимутальное сопоставление 20 ярчайших звезд кадра и каталога. По сформированным парам построена финальная полиномиальная модель. Итоговые параметры калибровки: поворот камеры a_0=359.6320°, оптический центр x_0=503 пкс, y_0=541 пкс, линейный масштаб a_1=0.14108068 °/пкс, кубическая дисторсия a_2=−1.1467×10^{-9} °/пикс^3, дисторсия 5-го порядка a3=5.4125×10^{-13} °/пикс^5., дисторсия 7-го порядка a4=−7.6860·10^{-19} °/пкс^7. На рис. 1 представлен результат астрономической калибровки. Кругами обозначены яркие звезды, использующиеся в первых этапах калибровки, синий круг — полярная звезда. Крестиками обозначены звезды, построенные с данными финальной калибровки.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Из обработанных кадров (с вычтенным фоном и удаленными звездами) извлечены кривые блеска в четырех областях: (508, 538), (585, 572), (518, 637), (596, 671) пкс. Для анализа периодичностей применена периодограмма Ломба—Скаргла, предназначенная для неравномерно дискретизированных данных. Нормированная периодограмма для временного ряда xi, измеренного в моменты t_i (i = 1, ..., N), определяется выражением

$$P(w) = \frac{1}{2\sigma^2}\left[\frac{\left(\Sigma_{i=1}^{N}(x_i-\underline{x})coscos\,\omega(t_i-\tau)\right)^2}{\Sigma_{i=1}^{N}\omega(t_i-\tau)} + \frac{\left(\Sigma_{i=1}^{N}(x_i-\underline{x})sinsin\,\omega(t_i-\tau)\right)^2}{\Sigma_{i=1}^{N}\ \omega(t_i-\tau)}\right], \quad (3)$$

где $\bar{x} = (1/N)\,\Sigma\, x_{\mathrm{i}}$ — среднее значение, $\sigma^2 = (1/(N-1))\,\Sigma\,(x_{\mathrm{i}} - \bar{x})^2$ - дисперсия, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота. Временной сдвиг τ обеспечивает ортогональность базисных функций и определяется из условия:

$$tan\,tan\,(2\pi\tau) = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}\ \ sin\,(2\omega t_i)\right)}{\left(\Sigma_{i=1}^{N}coscos\,(2\omega t_i)\right)}. \quad (4)$$

Поиск частот выполнялся в диапазоне периодов от 8 мин до 2 ч с шагом 0.60 с. По глобальному максимуму мощности $P(\omega)$ определен доминантный период T_0 = 2940 с (49.0 мин). Соответствующая частота $\omega_0 = 2\pi/T_0$.

Для каждой значимой гармоники ω_k фаза определяется как:

$$\tilde{\varphi}_k = arctan\,arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\ \ (x_i-\underline{x})sinsin\,\omega_k(t_i-\tau)}{\sum_{i=1}^{N}\ \ (x_i-\underline{x})coscos\,\omega_k(t_i-\tau)}\right). \quad (5)$$

Для сети из M = 4 точек измеренная фазовая разность между точками i и j составляет $\Delta\tilde{\varphi}_{\mathrm{ij}} = \tilde{\varphi}_{\mathrm{i}} - \tilde{\varphi}_{\mathrm{j}}$. Волновой вектор $k = (k_x, k_y)$ оценивался методом наименьших квадратов из системы линейных уравнений для фазовых разностей:

$$\{\sum_{ij}\ \ \Delta\varphi_{ij}\Delta x_{ij} = k_x\sum_{ij}\ \ \Delta x_{ij}^2 + k_y\sum_{ii}\ \ \Delta x_{ij}\Delta y_{ij}\ \sum_{ij}\ \ \Delta\varphi_{ij}\Delta y_{ij} = k_x\sum_{ij}\ \ \Delta x_{ij}\Delta y_{ij} + k_y\sum_{ii}\ \ \Delta y_{ij}^2\,. \quad (6)$$

где $\Delta x_{\mathrm{ij}} = x_{\mathrm{i}} - x_{\mathrm{j}}$, $\Delta y_{\mathrm{ij}} = y_{\mathrm{i}} - y_{\mathrm{j}}$ — расстояния между точками в географических координатах (км). Суммирование ведется по всем парам точек (всего

6 пар для 4 точек). Решение системы (6) дает компоненты k_x и k_y, откуда находятся основные параметры волны:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k}, \quad k = \sqrt{(k_x{}^2 + k_y{}^2)}, \tag{7}$$

$$v = \frac{\lambda}{T}, \tag{8}$$

$$\alpha = \left(\frac{k_x}{k_y}\right), \tag{9}$$

где λ — длина волны (км), v — скорость распространения (км/с), α — азимут распространения (0° — север, 90° — восток).

Анализ выполнялся в скользящем окне шириной 31 кадр (±15 кадров от центрального) для оценки временной эволюции параметров. Для каждого положения окна вычислялись фазы (5) в 4 точках, затем по системе (6) находился волновой вектор, и по формулам (7)–(9) — длина волны, скорость и азимут.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Финальная калибровочная модель обеспечила проецирование ~200 звезд каталога Hipparcos на кадр с финальной среднеквадратичной ошибкой СКО ≈ 0.13°. Полярная звезда (HIP 11767) использовалась как контрольная точка: ее предсказанное положение (вычисленное по модели) совпало с реальным положением на кадре с минимальным отклонением.

Параметры доминантной волны (медианные значения по скользящему окну)

Параметр	Значение
Период T_0	2940 с (49.0 мин)
Длина волны λ	111 км
Скорость v	0.038 км/с (38 м/с)
Азимут α	130° (юго-восток/северо-запад)

На рис. 2 показаны графики волновых характеристик. Предполагается, что всплески длины волны вызваны в результате прохождения звезд, замененных на медианные значения, через точки измерения, этим же объясняется крутизна фронта всплесков. Суточный ход направления распространения (азимута) находится в диапазонах –60° или +100° — это два диаметрально противоположных значения, что обозначает правильность нахождения оси распространения. Предполагается, что неопределенность распространения волны вдоль оси вызвана тем же явлением, что и выбросы значения длины волны, так как моменты «провалов» азимута сопоставимы с моментами всплесков длин волн. Скорость волны составляет ~40 м/с., она слишком мала для АГВ (~300 м/с.), но и достаточно высока, чтобы отделить ее от инерциальных эффектов. Поэтому предполагается, что данная скорость характерна для ВГВ.

Анализ эволюции параметров показал устойчивость характеристик волны на протяжении всего времени наблюдения. Длина волны варьировалась в диапазоне 80–150 км, скорость — 25–55 м/с, азимут — 120°–150°. Полученные значения скорости и длины волны попадают в диапазон, характерный для внутренних гравитационных волн (ВГВ) на высотах мезосферы — нижней термосферы (80–400 км). Период ~50 мин является типичным для среднемасштабных ВГВ.

Наблюдаемое юго-восточное направление распространения (азимут ~130°) может быть связано с преобладающим направлением фонового ветра на высотах свечения OI 630 нм [Базметова и др., 1999].

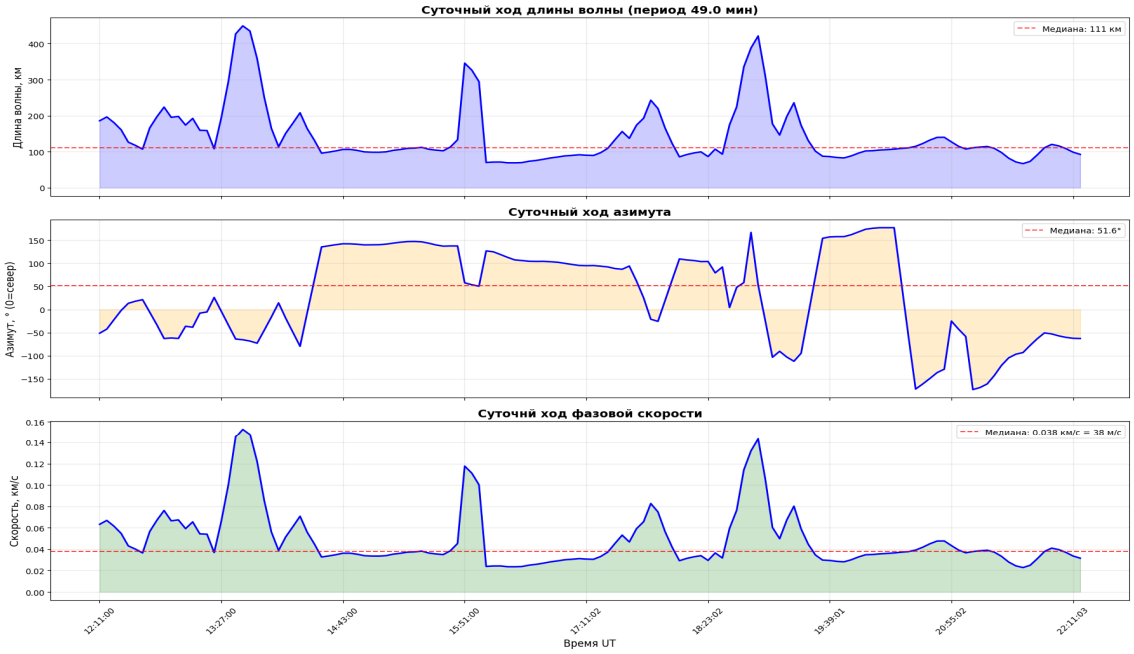

Рис. 2. Суточный ход длины волны (*а*), направления распространения волны (азимута) (*б*), фазовой скорости (*г*)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика астрометрической калибровки камеры всего неба показала высокую точность, достаточную для количественного анализа волновых возмущений. Использование полиномиальной модели 7-й степени позволило улучшить описание радиальной дисторсии на краях кадра. Достигнутая точность (*СКО*~0.13°). До этого реализовывался полный метод, описанный в [Borovička et al., 1995]. Было решено отказаться от его использования, поскольку при вычислении коэффициентов функции искажения и обратном преобразовании небесных координат в пиксельные ассоциированные звезды из каталога смещались не только по значению высоты, но и по азимуту. Предполагается, что это было вызвано непосредственной близостью оптического и зенитного центров кадра, что вызывало шум, данный метод был рассчитан на сильное смещение зенитного центра относительного оптического. Либо же была допущена критическая ошибка в модели.

Применение периодограммы Ломба—Скаргла к калиброванным данным позволило выделить устойчивое волновое возмущение с параметрами, характерными для ВГВ. Получены следующие результаты: длина волны λ ~111 км, фазовая скорость v ~38 м/с, период T ~49 мин. В разных областях кадра получаются разные значения, однако их все еще можно отнести к ВГВ. Так, например, ближе к правому краю окружности λ ~136 км, v ~42 м/с, T ~55 мин; к левому краю —λ ~194 км, v ~47 м/с, T ~70 мин.

Работа выполнена с использованием данных каталога Hipparcos (ESA, 1997) и библиотек Skyfield, Astropy, SciPy.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Оптические инструменты» ИСЗФ СО РАН https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138180/. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Базметова Н.В., Беликович В.В., Игнатьев Ю.А., Понятов А.А. Вертикальные движения в нижней ионосфере и спорадический слой Е // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, №1. С. 26–36.

Barghini D., Gardiol D., Carbognani A., Mancuso S. Astrometric calibration for all-sky cameras revisited // Astron. Astrophys. 2019. V. 626. P. A105.

Kalicinsky C., Reisch R., Knieling P., Koppmann R. Determination of time-varying periodicities in unequally spaced time series of OH temperatures using a moving Lomb—Scargle periodogram and a fast calculation of the false alarm probabilities // Atmospheric Measurement Techniques. 2020. V. 13, N 2. P. 467–477.

Borovička J., Spurný P., Keclíková J. A new positional astrometric method for all-sky cameras // Astron. Astrophys. 1995. V. 112. P. 173–178.