

УДК 523.34

НОВЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ

*Ю.А. Нефедьев, Н.Ю. Вараксина, К.О. Чуркин,
Р.Р. Заббарова, А.О. Андреев*

Аннотация

В работе предложен метод определения ориентации современных космических звездных каталогов относительно динамической системы координат на основе наблюдений покрытий звезд Луной. Редукции покрытий за неровности краевой зоны Луны были выполнены с использованием двух карт «Уоттса» и «Казань». Это позволило получить более точные значения поправок за неровности краевой зоны, а также оценить преимущества и дефекты этих карт. Метод позволяет определять параметры вращения осей звездного каталога и положение осей отсчета координат в пределах точности координат исследуемого каталога.

Ключевые слова: динамическая система координат, инерциальная система координат, космические миссии, звездные каталоги.

Введение

В настоящее время существуют только две системы карт «Уоттса» [1] и «Казань» [2], которые можно использовать при редукции наблюдений, полученных в небесной системе координат. Достигнуты большие успехи в создании инерциальной системы координат, то есть системы отсчёта, по отношению к которой пространство является однородным и изотропным, а время – однородным [3]. На основе космических наблюдений получена система координат и собственных движений 118218 звезд каталога Hipparcos с миллисекундной точностью. Ориентация космической системы координат относительно динамической производилась по результатам наблюдений 48 малых планет с астрометрического спутника HIPPARCOS [4]. Существенным недостатком этого метода является плохая обусловленность системы условных уравнений, что сильно влияет на результаты решения с помощью метода наименьших квадратов. Включение наблюдений, полученных с использованием наземных телескопов, заметно увеличивает точность результатов и улучшает обусловленность системы условных уравнений. При этом положение начала отсчета прямых восхождений в каталоге Hipparcos требует дальнейшего уточнения. Таким образом, применение для решения этой задачи альтернативного метода, основанного на данных многолетних наблюдений покрытий звезд Луной с 1960 г. до настоящего времени, позволяет получить результаты, свободные от недостатков метода, основанного на наблюдениях малых планет. Применение же более совершенных карт краевой зоны Луны при редукции наблюдений позволит получить более надежные результаты по сравнению с зарубежными аналогами при прочих равных условиях. Следует также отметить, что ошибка равноденствия каталога FK4 относительно динамического в основном была выведена на основе анализа наблюдений покрытий звезд Луной.

1. База данных 423000 покрытий звезд Луной

База данных наблюдений лунных покрытий с 1943 по 1980 г. в основном была создана в 1981 г. в Гринвической обсерватории (основной астрономической организации Великобритании). Эта база, в которую вошло 225121 наблюдение, была опубликована в [5]. Однако в нее не вошли наблюдения, выполненные в СССР, количество которых составляло до 1980 г. 7698 наблюдений. Нами было продолжено создание базы на последующие годы с использованием сетей Интернета и печатных изданий, часть которых была любезно предоставлена сотрудниками Национальной обсерватории Японии. В результате общее количество вошедших в созданную базу данных наблюдений покрытий звезд Луной составило 430322.

Кратко историю создания мировой базы наблюдений покрытий звезд Луной можно представить следующим образом. Наблюдения покрытий звезд Луной важны для определения изменений в скорости вращения Земли и для улучшения фундаментальных постоянных лунной теории. Они содействовали началу кампании, которая привела к координации, систематической регистрации и обработке наблюдений покрытий звезд Луной, полученных большим числом наблюдателей. Журнал “Nautical Almanac” согласился взять ответственность за координирование сбора и обработки наблюдений покрытий, начатых в 1943 г. Все наблюдения покрытий были записаны на магнитные ленты. Л. Моррисон в 1978 г. составил “Catalogue of observations of occultations of stars by the Moon for the years 1943 to 1971” [6]. Результаты наблюдений были перенесены с магнитных лент на микрофиши. При создании нашей базы данных наблюдений покрытий на последующие годы мы старались добиться максимального соответствия структуры представленных данных базе наблюдений, опубликованной Моррисоном.

Если проанализировать распределение 430322 наблюдений покрытий звезд Луной по годам с 1823 по 2003 г., то хорошо просматриваются несколько групп пиков в периоды 1895–1900 гг., 1913–1918 гг., 1931–1936 гг., 1949–1954 гг., 1967–1972 гг., 1985–1990 гг., которые связаны с периодами, когда покрывались самые звезды Плеяд [7, 8]. Другие большие пики не связаны с периодами покрытий какой-либо из четырех ярких звезд рассеянного скопления Плеяд в созвездии Тельца. Анализ показывает также наличие годового цикла в количестве наблюдений: максимум покрытий, которые наблюдались на телескопах, установленных в температурной зоне северного полушария Земли, приходится на зимние месяцы, так как в это время наиболее длинные ночи. Это являлось основной причиной увеличения количества наблюдений за годичный период.

Российские наблюдения покрытий по структуре представленных в них данных содержат несколько меньше информации, чем зарубежные. Например, в описании наблюдательного материала часто отсутствуют данные о наблюдателе и телескопе. Нам при редукции этих наблюдений помогло то, что Казань была дублирующим центром сбора наблюдений покрытий звезд Луной на территории СССР (основным Центром являлась Киевская астрономическая обсерватория) и поэтому мы были одними из основных участников в проекте по созданию базы данных наблюдений, выполненных на территории СССР, а затем на территории СНГ. Данная база включает в себя 16044 наблюдения. Самый значительный подъем количества наблюдений пришёлся на 80-е годы XX в., затем произошел резкий спад наблюдательной активности.

Что касается количества станций наблюдения покрытий на территории СССР в зависимости от временной шкалы, то можно сказать, что самое большое количество пунктов наблюдения покрытий было образовано в 70–80-е годы XX в. Затем произошел медленный спад наблюдательной активности, с 1991 г. остались единичные пункты наблюдения покрытий звезд Луной, расположенные в основном

на территории Украины. Что касается зарубежных станций, если и было снижение наблюдательной активности в мире в целом в 1941 г., то в следующие годы происходил только ее рост и в настоящее время наблюдения покрытий звезд Луной остаются одними из самых массовых наблюдательных мировых программ.

Был проведен анализ зависимости количества наблюдений от метода их наблюдения. Отметим, что 94.3% наблюдений покрытий были сделаны визуально с использованием в основном телескопов со сравнительно малой апертурой. Из всего массива наблюдений покрытий только около 11% были выполнены профессиональными астрономами, а остальные – любителями. Лишь 5.7% всех наблюдений сделаны с использованием фотоэлектрического оборудования, с помощью которого время покрытия фиксируется с точностью 0.001 с. Этим наблюдениям при редуцировании покрытий придавалось большее значение по сравнению с визуальными наблюдениями покрытий, но всё же основной вклад в ошибки редуцированных покрытий вносят ошибочные положения в звездных каталогах и особенно поправки за неровности краевой зоны Луны. Количество наблюдений, выполненных с использованием фотоэлектрической регистрации, непрерывно возрастало начиная с 1967 г., и если Моррисон и Сома [5, 9] могли использовать в своих исследованиях только 4186 фотоэлектрических покрытий, то в созданном нами банке данных содержится уже 22626 таких наблюдений.

Так как все моменты покрытий, используемые в нашем анализе, соответствуют или покрытиям темной стороной лимба Луны (DD) в период первой половины лунации, или открытиям (RD) в течение второй половины, предполагается, что распределение наблюдений в каждой лунации имеет хорошую корреляцию с фазой Луны.

Что касается идентификации звезд и выборке наблюдений, то если Моррисон [5] рассматривал только те звезды, которые содержались в каталоге 3539 зодиакальных звезд (ZC) или в звездном каталоге Смитсоновской астрофизической обсерватории (SAOC), мы пошли следующим путем. Имея номер покрываемой звезды по ZC или SAOC, мы переходили к каталогу PPM, а затем, используя построенный нами совмещенный каталог PPM–Hipparcos, переходили уже к номеру искомой звезды в каталоге Hipparcos. Структура самой базы наблюдений покрытий была приведена к единой форме.

Таким образом, впервые в мировой практике осуществлено создание полной базы данных 430322 наблюдений покрытий звезд Луной. Полученные данные приведены в цифровую форму, в настоящей работе они используются для построения метода определения ориентации звездных каталогов.

2. Метод определения ориентации звездных каталогов на основе наблюдений покрытий звезд Луной

Первый метод определения ориентации системы координат звездного каталога состоит в следующем. Пусть ориентация системы координат каталога относительно динамической системы координат определяется углами поворота ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z вокруг осей x , y , z динамической системы координат, тогда для поправок $\Delta\alpha_{O-C} = \alpha_{cat} - \alpha_{dyn}$, $\Delta\delta_{O-C} = \delta_{cat} - \delta_{dyn}$, где “O–C” обозначает наблюдаемое значение минус вычисленное, можно записать уравнение

$$\Delta\alpha_{O-C} \cos \delta = \sin \delta \cos \alpha \epsilon_x + \sin \delta \sin \alpha \epsilon_y - \cos \delta \epsilon_z, \quad \Delta\delta_{O-C} = -\sin \alpha \epsilon_x + \cos \alpha \epsilon_y, \quad (1)$$

справедливое для малых углов поворота.

Эти уравнения могут использоваться для определения углов ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z . Так как

$$\epsilon_x = -\Delta\epsilon, \quad \epsilon_y = \Delta L \sin \epsilon, \quad \epsilon_z = \Delta A - \Delta L \cos \epsilon, \quad (2)$$

мы получим условные уравнения для определения перечисленных ниже поправок

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{O-C} &= -\Delta A + \Delta L \cos \varepsilon (1 + \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{tg} \delta \sin \alpha) - \Delta \varepsilon \operatorname{tg} \delta \cos \alpha, \\ \Delta\delta_{O-C} &= -\Delta D + \Delta L \sin \varepsilon \cos \alpha + \Delta \varepsilon \sin \alpha,\end{aligned}\quad (3)$$

где ΔA , ΔD – поправки к равноденствию и положению экватора каталога, ΔL , $\Delta \varepsilon$ – поправки долготы Луны и наклона эклиптики к экватору. Количество условных уравнений равно количеству выполненных наблюдений.

Скорости ω_x , ω_y , ω_z изменения углов ε_x , ε_y , ε_z определяются формулами

$$\omega_x = -\Delta\dot{\varepsilon}, \quad \omega_y = \Delta\dot{L} \sin \varepsilon, \quad \omega_z = \Delta\dot{A} - \Delta\dot{L} \cos \varepsilon, \quad (4)$$

где точки сверху обозначают производные по времени. Выражения для углов поворота $\varepsilon_x(t)$, $\varepsilon_y(t)$, $\varepsilon_z(t)$ будут иметь вид [10]

$$\varepsilon_x(t) = \varepsilon_x + \omega_x(t - t_0), \quad \varepsilon_y(t) = \varepsilon_y + \omega_y(t - t_0), \quad \varepsilon_z(t) = \varepsilon_z + \omega_z(t - t_0). \quad (5)$$

Подставляя (2) и (4) в (5), получаем

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_{O-C} &= -(\Delta A + \Delta\dot{A}(t - t_0)) + (\Delta L + \Delta\dot{L}(t - t_0)) \cos \varepsilon (1 + \operatorname{tg} \varepsilon \operatorname{tg} \delta \sin \alpha) - \\ &\quad - (\Delta \varepsilon + \Delta\dot{\varepsilon}(t - t_0)) \operatorname{tg} \delta \cos \alpha, \\ \Delta\delta_{O-C} &= -\Delta D + (\Delta L + \Delta\dot{L}(t - t_0)) \sin \varepsilon \cos \alpha + (\Delta \varepsilon + \Delta\dot{\varepsilon}(t - t_0)) \sin \alpha.\end{aligned}\quad (6)$$

Учитывая, что $(\Delta\alpha_{O-C} \cos \delta)'_m = (\alpha_{\text{cat}} - \alpha_{\text{dyn}})$ и $(\Delta\delta_{O-C})'_m = (\delta_{\text{cat}} - \delta_{\text{dyn}})$, получим систему условных уравнений. Найдя неизвестные поправки методом наименьших квадратов, получаем параметры ориентации системы координат каталога Hipparcos относительно динамической системы координат $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$.

Второй путь построения системы координат каталога состоит в следующем. Пусть

$$\Delta\sigma = \sum_{k=1}^N \frac{\partial\sigma}{\partial Q_k} \Delta Q_k, \quad (7)$$

где σ – угловое расстояние от звезды до эфемеридного центра масс Луны на момент покрытия, $\partial\sigma/\partial Q_k$ – известные из вычислений коэффициенты, N – число определяемых параметров.

В настоящее время лунные и планетные эфемериды имеют высокую точность и положения звезд определены с точностью миллисекунды в каталоге Hipparcos. Поэтому число параметров в уравнении (7) можно минимизировать, оставив только параметры теории движения Луны, положение нуль-пункта прямых восхождений каталога Hipparcos, наклон экватора к эклиптике, поправки к системе координат карт краевой зоны Луны и поправку к положению экватора системы каталога Hipparcos. Тогда условные уравнения (7) будут иметь следующий вид:

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial\lambda} \Delta\lambda + \frac{\partial\sigma}{\partial\alpha_0} \Delta\alpha_0 + \frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon} \Delta\varepsilon, \quad (8)$$

где

$$\Delta\lambda = \Delta w_1^0; \quad \Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0;$$

$$\begin{aligned}\Delta\alpha_0 &= (\Delta A + \Delta\alpha_s \sin \alpha_{\text{cat}} + \Delta\alpha_c \cos \alpha_{\text{cat}}) - \\ &\quad - (\Delta R_0 + \Delta R_{1c} \cos \theta'_* + \Delta R_{2s} \sin 2\theta'_* + \Delta R_{2c} \cos 2\theta'_*); \end{aligned}$$

w_1^0 – постоянный член в разложении средней долготы Луны, ΔA – постоянная поправка к равноденствию каталога, $\Delta\alpha_s$, $\Delta\alpha_c$ – поправки в прямом восхождении звездного каталога, ΔR , ΔR_{1c} , ΔR_{2s} , ΔR_{2c} – поправки к системе координат карт краевой зоны Луны, ϵ_0 – постоянный член наклонности экватора к эклиптике, $\Delta\alpha_s$ – систематическая поправка в прямом восхождении каталога Hipparcos меняющаяся как $\cos\alpha$; ΔR_{1c} – широтный компонент сдвига Datum карт краевой зоны Луны, ΔR_{2s} – долготный компонент поправки эллиптичности Datum карт краевой зоны Луны, ΔR_{2c} – широтный компонент поправки эллиптичности Datum карт краевой зоны Луны.

Решение условных уравнений (5) находится методом наименьших квадратов посредством итераций, то есть вначале определяются приближенные поправки, затем после их учета находятся другие требуемые величины. Другими словами, решение строится посредством последовательных приближений. Нами были обработаны наблюдения покрытий с 1940 по 2010 г. Общее количество редуцируемых наблюдений составило 350000. Эпоха полученных параметров 1991 07 20.0 TDB. В результате были получены следующие значения искомым величин:

$$\epsilon_x = (30 \pm 24) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек};$$

$$\epsilon_y = (-11 \pm 12) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек};$$

$$\epsilon_z = (16 \pm 27) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек};$$

$$\omega_x = (7 \pm 10) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек/сут};$$

$$\omega_y = (-14 \pm 19) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек/сут};$$

$$\omega_z = (-12 \pm 26) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек/сут};$$

$$\Delta A = (74 \pm 48) \cdot 10^{-3}, \text{ угл. сек};$$

$$\Delta D = (45 \pm 19) \cdot 10^{-3}, \text{ угл. сек};$$

$$\Delta L = (41 \pm 38) \cdot 10^{-3}, \text{ угл. сек};$$

$$\Delta\epsilon = (50 \pm 41) \cdot 10^{-4}, \text{ угл. сек}.$$

Анализ значений поправок координатных систем при использовании карт «Уоттса» и карт «Казань» показал хорошее согласие оценок неизвестных. Ошибки полученных значений в случае использования карт «Казань» в некоторых случаях даже меньше, чем при редуциях наблюдений с использованием карт «Уоттса».

Сравнение наших результатов с поправками, полученными в работах [10] и [11], показывают не только хорошее согласие параметров, но во многих случаях и уменьшение ошибок определения поправок, особенно в значениях скоростей изменения углов ориентации каталога. По-видимому, это есть следствие большого наблюдательного массива покрытий и его протяженности во времени. Здесь немаловажную роль сыграл также тот факт, что в работе [11] при редуции наблюдений малых планет не учитывался фазовый эффект.

Заключение

Выполнен анализ современных каталогов звездных положений и произведено исследование ориентации и положения нуля-пункта космического каталога Hipparcos на основе нового метода редуции наблюдений покрытий звезд Луной. С этой целью была построена база данных 430322 таких наблюдений в цифровом виде, не имеющая аналогов в мире.

Базу наблюдений покрытий звезд Луной можно использовать в обсерваториях, где ведутся работы по исследованию динамических селенодезических параметров,

а методы ее редуцирования с успехом можно применять при анализе современных космических каталогов. Важность решения этих задач особенно становится актуальной в настоящее время, когда мировая тенденция снова направлена на расширение и углубление лунных исследований. Эти положения отчетливо прослеживаются в работе [12].

Необходимо отметить, что одной из важнейших задач для уточнения ориентации системы ICSR относительно динамической является составление новых карт для краевой зоны Луны с использованием данных спутниковой альтиметрии. Данные, полученные в рамках программы «Аполлон» и других космических миссий, недостаточны для построения такого рода карт. Желательно получить топографические данные краевой зоны в будущих миссиях к Луне.

Summary

Yu.A. Nefedev, N.Yu. Varaksina, K.O. Churkin, R.R. Zabbarova, A.O. Andreev. A New Method for Studying Modern Star Catalogues.

In this article, we propose a method for determining the orientation of modern star catalogues relative to a dynamic coordinate system based on occultation observations. The reductions of occultations taking into account the corrections for the irregularities of the lunar marginal zone were performed using two maps (Watts and Kazan). This allowed us to obtain more precise values of the corrections for the irregularities of the marginal zone and to evaluate the advantages and disadvantages of these maps. The method makes it possible to find the rotation parameters of the axes of the star catalogue, and the position of the reference coordinate axes within the accuracy of the coordinates of the catalogue under study.

Keywords: dynamic coordinate system, inertial coordinate system, space mission, star catalogues.

Литература

1. *Watts C.B.* The marginal zone of the moon. – Washington: U.S. Govt. Print. Off., 1963. – 951 p.
2. *Nefedev Yu.A., Rizvanov N.G.* The results of an accurate analysis of EAO charts of the Moon marginal zone constructed on the basis of lunar occultations // *Astronomische Nachrichten*. – 2002. – V. 323, No 2. – P. 135–138.
3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. – М.: Физматлит, 2004. – 224 с.
4. *Нефедьев Ю.А., Нефедьева А.И., Боровских В.С.* Космический эксперимент Hipparcos. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2002. – 288 с.
5. *Morrison L.V., Appleby G.M.* Analysis of lunar occultations. II – Personal equation // *Mon. Not. R. astr. Soc.* – 1981. – V. 196. – P. 1005–1011.
6. *Morrison L.V.* Catalogue of observations of occultations of stars by the moon, 1943–1971 // *Roy. Greenwich Obs. Bull.* – 1978. – No 183. – P. 1–14.
7. *Nefedev Yu.A., Nefedjeva A.I., Rizvanov N.G.* Method of determination of the orientation of a space system of coordinates on the basis lunar occultations // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2003. – V. 22, No 4–5. – P. 633–637.
8. *Nefedev Yu., Varaksina N., Kutlenkov M., Churkin K.* The building of the occultation observations base // *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*. – Nantes, France, 2011. – V. 6. – Art. EPSC-DPS2011-135.
9. *Soma M.* An analysis of lunar occultations in the years 1955–1980 using the new lunar ephemeris ELP2000 // *Celestial Mechanics*. – 1985. – V. 35, No 1. – P. 45–88.

10. *Batrakov Yu.V., Chernetenko Yu.A., Gorel G.K., Gudkova L.A.* Hipparcos catalogue orientation as obtained from observations of minor planets // *Astron. Astrophys.* – 1999. – V. 352. – P. 703–711.
11. *Bange J.-F., Bec-Borsenberger A.* Determination of the masses of minor planets // *Proceedings of the ESA Symposium “Hipparcos – Venice’97”.* – Venice, Italy, 1997. – P. 169–172.
12. *Galimov E.M., Polishchuk G.M., Sevastianov N.N.* Objectives and facilities of lunar exploration by Russia // *8th ILEWG Conference on Exploration and Utilization of the Moon.* – Beijing, China, 2006. – P. 15–16.

Поступила в редакцию
17.04.12

Нефедьев Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *star1955@mail.ru*

Вараксина Наталья Юрьевна – младший научный сотрудник Астрономической обсерватории им. В.П. Энгельгардта Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *vnu_357@mail.ru*

Чуркин Константин Олегович – аспирант Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *konstantinch-n87@mail.ru*

Заббарова Регина Рустемовна – аспирант Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *zregr22@rambler.ru*

Андреев Алексей Олегович – студент Института физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия.

E-mail: *alexey-andreev93@mail.ru*