Положения астероида (433) Eros в системе Gaia по результатам анализа сканов пулковских астронегативов 1900, 1930 годов

М.Ю. Ховричев¹*, Д.А. Бикулова¹, Н.В. Нарижная¹, Т.А. Васильева¹

1 ГАО РАН

Поступила в редакцию 11 ноября 2024 / Принята к публикации 28 ноября 2024

Аннотация

Благодаря росту количества и качества астрометрических измерений астероидов, определения значений параметра A_2 , характеризующего влияние эффекта Ярковского на динамику этих тел, стали носить массовый характер. Для астероидов относительно малого размера (сотни метров) это удается сделать на массиве данных, накопленных за последние 50 лет или даже меньше. Для более крупных тел (10 километров и более) такие вычисления сталкиваются с множеством трудностей. Понятно, что эффект проявляется тем лучше, чем больший охват по времени имеет наблюдательный ряд. Хорошим примером в этом контексте является астероид (433) Eros. Он имеет давнюю историю наблюдений (с 1890-х). Но дисперсия (О-С) для старых наблюдений доходит до нескольких секунд дуги. Поэтому оценки А₂ для него получаются противоречивыми. Очевидно, требуется оцифровка соответствующих старых пластинок и повторные измерения положений астероида. Мы представляем результаты переизмерений пулковских пластинок с изображениями (433) Eros. Они были сняты с помощью пулковского Нормального астрографа в 1900 и 1930 годах. Оцифровка была выполнена с помощью машины NAROO (Парижская обсерватория). Всего получено 18 положений астероида на уровне точности 0.1 - 0.3 arcsec. Величины $(O - C)_{\alpha}$ и $(O - C)_{\delta}$ по модулю не превышают 0.5 arcsec относительно эфемерид NASA/Horizons.

ключевые слова: астрометрические наблюдения астероидов, оцифровка астронегативов, (433) Eros, эффект Ярковского

Введение

Количество высокоточных астрометрических измерений астероидов постоянно растет в силу того, что увеличивается количество телескопов, а также повышается эффективность их работы. Кроме того, астероиды наблюдаются в рамках космических миссий (прежде всего Gaia). Отмечается рост качества положений астероидов, публикуемых в Международном центре малых планет (MPC), так как современные обсерватории уделяют серьезное внимание процессу обработки наблюдений. В немалой степени прогрессу в рамках обсуждаемой области астрономии способствует использование релизов Gaia (Gaia Collaboration и др., 2022) для калибровки снимков. Кроме того, наличие радарных измерений дает новые возможности в исследованиях в области динамики астероидов.

Астероид (433) Егоѕ относится к числу хорошо изученных. Для этого объекта имеется значительная выборка высококачественных данных от старых фотографических измерений конца XIX века до современных космических (например, миссия NEAR Shoemaker (Prockter и др., 2002), завершившаяся посадкой на поверхность астероида) и радиолокационных данных. Одним из интересных аспектов исследования динамики астероида (433) Егоѕ являются попытки определить

^{*}e-mail:deimos@gaoran.ru



Рис. 1: Зависимость A_2 от абсолютной звездной величины (H) для астероидов, для которых $|A_2|/\sigma_{A_2} > 3$. Бары ошибок приведены для астероидов, для которых A_2 отклоняется от прямой, представляющей зависимость $A_2(H)$, более чем на 3- σ . Оценки величин H и A_2 , стандартные ошибки σ_{A_2} для построения данного рисунка взяты из базы данных SBDB NASA/JPL.

ускорение A_2 , которое обычно объясняется влиянием эффекта Ярковского. Например, в работе Демара (Desmars, 2015) приводится значение $(-0.765 \pm 0.977) \cdot 10^{-15} AU/day^2$, полученное стандартным способом в рамках процедуры улучшения орбит.

(433) Егоз – относительно крупный астероид (34.4 км × 11.2 км × 11.2 км, $H = 10.41^m)^1$. На рис. 1 приведена зависимость $|A_2|$ от абсолютной звездной величины (H) для астероидов с $|A_2|/\sigma_{A_2} > 3$ (то есть речь идет об объектах с надежно определенными значениями A_2). Из данных рис. 1 следует, что для астероидов сопоставимых с (433) Егоз по размерам нет надежных определений A_2 (что подтверждается вышеприведенной оценкой из работы (Desmars, 2015)). Из этого же графика следует, что для (433) Егоз величина A_2 должна быть порядка $\approx 10^{-15} AU/day^2$.

В научной периодике есть еще ряд исследований, авторы которых представили оценки A_2 для десятков астероидов (например, Del Vigna и др., 2018, Dziadura и др., 2023). Обе команды исследователей пытались получить величину A_2 для (433) Егоѕ, но сочли результаты сомнительными, показав, как сильно меняется оценка эффекта, если включать или исключать старые наблюдения конца XIX – первой половины XX века. Их вывод сводится к тому, что недостаточное качество фотографических измерений не позволяет произвести полноценный анализ. Действительно, разности $(O-C)_{\alpha}$ с дисперсией в несколько секунд дуги, которые показаны на рис. 2, подтверждают данный вывод (разности $(O-C)_{\delta}$ выглядят аналогично). Здесь и далее под $(O-C)_{\alpha}$ подразумевается $(O-C)_{\alpha} \cos \delta$.

Авторы упомянутых выше работ указывают, что, по-видимому, эффект (ненулевое значение A_2) в движении астероида существует. Интрига состоит в том, что астероид характеризуется большим значением наклона его оси вращения к плоскости орбиты (около 89 градусов). Поэтому величина суточного эффекта Ярковского должна быть почти точно равна нулю. Отчасти ненулевое значение A_2 для (433) Егоз можно пытаться объяснить тем, что астероид имеет сложную, вытянутую форму, а также наблюдаются вариации альбедо по поверхности. В работе Xu и коллег (Xu и др., 2022) проводится моделирование суточного эффекта Ярковского для объектов

¹указанные величины взяты из базы SBDB NASA/JPL



Рис. 2: Поведение $(O-C)_{\alpha}$ со временем для астероида (433) Егоз по всем измерениям, доступным в MPC.

неправильной формы. Показано, что величина A₂ может существенно (на десятки процентов) отличаться от оценок, полученных в рамках стандартной модели эффекта.

Авторы цитированных выше работ заключают что, повторное измерение и анализ старых астрометрических наблюдений (433) Егоз должны внести некоторую ясность в вопрос относительно величины и природы A_2 для данного астероида. Мы выполнили часть этой работы, оцифровав старые астронегативы, полученные в Пулковской обсерватории в 1900 и 1930 годах, и представляем результаты в этой статье. То есть главная цель данной работы – провести оцифровку соответствующих фотопластинок, выполнить их астрометрическую обработку, показать, что полученные координаты имеют точность, позволяющую использовать их в дальнейших динамических исследованиях движения астероида (433) Егоз.

1 Оцифровка астронегативов, их астрометрическая калибровка и получение координат астероида (433) Eros в системе Gaia

1.1 Особенности процедуры оцифровки астронегативов

Фотографические наблюдения (433) Егоз проводились в Пулковской обсерватории на Нормальном астрографе (D = 0.33 м, F = 3.463 м). Использовались фотопластинки размером 16×16 см. Эффективное поле зрения составляет 2×2 градуса. Соответствующий угловой масштаб равен 59.56 arcsec/мм.

Чтобы оценить возможность получить требуемую точность итоговых координат астероида, предварительные измерения проводились с помощью пулковского сканера MDD (М. Ү. Khovritchev и др., 2021). Эта система позволяет быстро оцифровывать область интереса (область с изображением астероида и необходимым числом опорных звезд) каждой фотопластинки.

Всего в период до 1941 года было снято 17 пластинок с изображениями исследуемого астероида. Пригодными для дальнейшего анализа оказались 8 пластинок (две 1900 года и шесть – 1930 года). Главная причина, по которым значимая часть пластинок не была переизмерена, состоит в том, что оригиналы журналов наблюдений для того периода не сохранились. Скорее всего они были утеряны в годы Великой Отечественной войны. Но, помимо журналов наблюдений, в Пулкове было принято вести параллельные записи о проведенных наблюдениях (возможно для дальнейшего статистического анализа), в которых, увы, не всегда отображались все подробности съемки.



Рис. 3: Пример исходного скана с фотопластинки 1930 года (слева) и структура изображения трека астероида (справа). На исходном скане видно, что на данной пластинке сделано три экспозиции разной продолжительности.

Поэтому часто мы не знаем моменты начала и завершения экспозиций. Наш анализ был проведен для тех пластинок, для которых удалось найти точную информацию. На нескольких пластинках эмульсия со временем деградировала настолько, что не видны изображения астероида или они настолько низкого качества, что невозможно получить результат требуемой точности.

На некоторых пластинках оказалось несколько изображений астероида. Дело в том, что нередко для повышения точности измерений делалось несколько экспозиций участка неба на одну пластинку со сдвигом телескопа. Обычно это был сдвиг по склонению (это отражено на рис. 3). Таким образом, были измерены 18 положений астероида для разных моментов времени.

Некоторое представление о качестве изображений на старых пулковских пластинках позволяет получить рис. 3. Относительно низкое разрешение (масштаб MDD для сканов пластинок Нормального астрографа составляет 1.07 arcsec/pix) ограничивает астрометрическое качество, поэтому было решено произвести повторную оцифровку изображений в Парижской обсерватории с помощью системы оцифровки NAROO (New Astrometric Reduction of Old Observations, Robert и др., 2021). Внутренняя точность измерений NAROO составляет $\approx 0.06 \,\mu$ м, масштаб сканов пластинок Нормального астрографа при этом 0.388 arcsec/pix.

1.2 Аппроксимация изображений астероида (433) Eros на пулковких фотопластинках

Параметры функции рассеяния точек для изображений звезд (PSF) были установлены для каждого скана с использованием звезд Gaia на среднем уровне насыщения. Для изображений звезд методом Левенберга-Маквардта (Levenberg, 1944, Marquardt, 1963) были вычислены оценки уровня фона, потока и координат фотоцентра по осям x и y. Этот подход был использован для снимков (433) Eros, сделанных с короткими экспозициями (1-2 минуты). В некоторых случаях, особенно в более ранних наблюдениях, использовались часовые экспозиции.

Поэтому на сканах изображения астероида являются треками – звездообразными изображениями, растянутыми из-за движения астероида за время накопления. Обычным способом аппроксимации такого изображения является свертка звездной PSF линейным отрезком. На рис. 4 показано исходное изображение трека астероида на скане и результат аппроксимации. Внутренние точности определения пиксельных координат фотоцентра астероида менялись в зависимости от времени накопления и качества астронегатива. Типичное значение стандартных ошибок пиксельных координат астероида с учетом масштаба сканов составило 0.04 arcsec.



Рис. 4: Структура исходного изображения на пластинке 1900 года и иллюстрация аппроксимации изображения. Слева показано исходное изображение. В центре - модель трека, построенная в результате вычислений. Справа - результат вычитания модели из исходного изображения.

1.3 Астрометрическая калибровка

Астрометрическая калибровка сканов проводилась с использованием звезд Gaia, расположенных в области, ограниченной окружностью радиусом 40 угловых минут от изображения астероида. Отбирались звезды в диапазоне блеска $\pm 1^m$ от блеска астероида. В качестве редукционной модели использовалась модель с учетом кубической дисторсии. Для проверки качества привязки использовались контрольные звезды, расположенные в области радиусом 10 угловых минут относительно изображения (433) Егоs. Средние значения разностей координат контрольных звезд с их положениями в Gaia рассматривались как поправки к измеренным положениям астероида. Величины этих поправок варьировались в пределах ± 0.2 агсsес. Их применение всегда приводило к значимому уменьшению величин (O-C) для астероида относительно эфемерид.

2 Результаты измерений

Финальная оценка точности координат астероида складывалась из величин стандартных ошибок калибровки и ошибок определения параметров изображения. Эти оценки нетрудно получить сравнивая разности координат контрольных звезд с данными Gaia. Оказалось, что стандартные ошибки координат астероида составили 0.1 - 0.3 arcsec.

Результаты наших измерений доступны в системе астрометрических баз данных Пулковской обсерватории в виде таблицы таблицы. В ней приводятся юлианские даты центральных моментов экспозиций, экваториальные координаты астероида в системе Gaia, оценки точности аппроксимации изображений (e_ra,e_dec), коэффициенты корреляции между RA и Dec (corr), величины (O-C) относительно эфемерид NASA/Horizons (omc_ra, omc_dec), оценки точности эфемерид по данным NASA/Horizons (e_ra_eph,e_dec_eph), поправки к положению астероида, полученные с использованием контрольных звезд (delta_ra, delta_dec), соответствующие оценки точности (err_ra,err_dec) и число контрольных звезд (Nsc). Все оценки точности, величины (O-C) и поправок даны в секундах дуги (arcsec). Кроме того, указаны номера пластинок и продолжительность экспозиций (exptime) в минутах.

По результатам сравнения с эфемеридами NASA/Horizons типичные значения (O-C) находятся в пределах ±0.5 arcsec по обеим координатам. Дополнительное представление о сходимости полученных измерений с эфемеридой дают данные рис. 5. На этом рисунке величины (O-C) вычислены для эфемериды, полученной путем численного интегрирования движения астероида посредством интегратора REBOUND (Rein и Spiegel, 2015) и приложения ASSIST (Holman и др., 2023), позволяющего использовать эфемериды DE441 (Park и др., 2021) для репрезентации положений Солнца, больших и карликовых планет, ряда астероидов.



Рис. 5: Поведение $(O - C)_{\alpha}$ и $(O - C)_{\alpha}$ со временем для астероида (433) Егоs с 1900 по 1940 годы. Светло-серые кружки представляют исходные значения (O-C). Остальные данные показывают небольшие изменения, обусловленные попыткой применения процедуры улучшения орбиты. Темно-серые точки соответствуют данным MPC. Здесь представлены не все измерения, доступные в базе MPC, а только те, что соответствуют описанным в тексте критериям качества. Черные точки с барами ошибок иллюстрируют результаты наших измерений.

3 Выводы

В данной статье представлены результаты оцифровки пулковских фотопластинок и повторного измерения положений астероида (433) Егоs в системе каталога Gaia, которые могут рассматриваться как исходные данные для дальнейших динамических исследований данного астероида. Мы обработали 8 астронегативов (1-3 экспозиции на фотопластинку), снятых на Нормальном астрографе в Пулковской обсерватории в 1900 и в 1930 годах. Фотопластинки были оцифрованы с помощью установки NAROO (Парижская обсерватория). Всего получено 18 положений астероида на уровне точности 0.1 - 0.3 агсsec. Величины $(O - C)_{\alpha}$ и $(O - C)_{\alpha}$ по модулю не превышают 0.5 агсsec относительно эфемерид NASA/Horizons.

Мы предприняли попытку оценить величину A_2 для исследуемого астероида на основе наших данных и данных MPC. Учитывая анализ данных рис. 2, естественным решением было провести фильтрацию данных MPC. Это было проделано по схеме, представленной в работе Ховричева и коллег (М. Khovritchev и др., 2023). То есть для каждой обсерватории формировались «цепочки» измерений, соответствующим близким моментам времени (серии экспозиций). Внутри этих цепочек вычислялись нормальные места, отбраковывались «выбросы» по критерию 3σ . Далее для сформированного ряда наблюдений (отфильтрованные данные MPC + наши измерения) производилось улучшение орбит с использованием интегратора REBOUND+ASSIST, упомянутых в предыдущем разделе. В ходе процедуры подбиралась оценка A_2 . Величины $(O - C)_{\alpha}$ и $(O - C)_{\delta}$ и соответствующие бары ошибок показаны на рис. 5. Светло-серые кружки представляют исходные значения (O-C), то есть полученные до улучшения орбиты. Остальные точки показывают небольшие изменения, обусловленные попыткой применения процедуры улучшения орбиты. Темно-серые точки с барами ошибок соответствуют данным MPC. Черные точки тоже с барами ошибок иллюстрируют (O-C), полученные в результате оцифровки пулковских фотопластинок.

В итоге получена оценка величины $A_2 = (0.37 \pm 0.16) \cdot 10^{-15} AU/day^2$. Естественно, что это довольно грубая и предварительная оценка. Ведь современные высокоточные данные (Gaia, NEAR Shoemaker, радарные наблюдения) не учитывались. Можно только сказать, что большой охват эпох наблюдений (более 100 лет) и отбраковка явно негодных измерений из MPC привели к тому, что полученная оценка не противоречит соотношению $H - |A_2|$ (рис. 1) и ошибка ее определения значимо меньше, чем, например, в работе Демара (Desmars, 2015).

Благодарности

Авторы благодарят сотрудника Парижской обсерватории Венсана Робера (Vincent Robert) за помощь в оцифровке пулковских фотопластинок с помощью комплекса NAROO. Это исследование было бы невозможно без поддержки в рамках программы научных стажировок им. Мечникова, реализуемой посольством Франции в Москве («Bourses Metchnikov - séjours scientifiques», 156277U).

Финансирование

Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда № 23-22-00306 "Синергия возмущений во вращательном и орбитальном движениях сближающихся с планетами астероидов https://rscf.ru/project/23-22-00306/.

Список литературы

- Gaia Collaboration и др. (2022). Gaia Data Release 3: Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure. arXiv e-prints.
- Prockter, L. и др. (2002). The NEAR shoemaker mission to asteroid 433 eros. Acta Astronautica 51, c. 491—500.
- Desmars, J. (2015). Detection of Yarkovsky acceleration in the context of precovery observations and the future Gaia catalogue. A&A 575, A53.
- Del Vigna, А. и др. (2018). Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data. A&A 617, A61.
- Dziadura, Karolina и др. (2023). The Yarkovsky effect and bulk density of near-Earth asteroids from Gaia DR3. A&A 680, A77.
- Xu, Yang-Bo, Li-Yong Zhou, Hejiu Hui и Jian-Yang Li (2022). The diurnal Yarkovsky effect of irregularly shaped asteroids. A&A 666, A65.
- Khovritchev, M. Yu. и др. (2021). Astrometric measurement and reduction of Pulkovo photographic observations of the main Saturnian satellites from 1972 to 2007 in the Gaia reference frame. A&A 645, A76.
- Robert, V. и др. (2021). The NAROO digitization center. Overview and scientific program. A&A 652, A3.
- Levenberg, Kenneth (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quaterly Journal on Applied Mathematics 2, c. 164–168.
- Marquardt, Donald W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11.2, c. 431–441.
- Rein, Hanno и David S. Spiegel (2015). IAS15: a fast, adaptive, high-order integrator for gravitational dynamics, accurate to machine precision over a billion orbits. MNRAS 446.2, c. 1424—1437.
- Holman, Matthew J. и др. (2023). ASSIST: An Ephemeris-quality Test-particle Integrator. The Planetary Science Journal 4.4, с. 69.
- Park, Ryan S., William M. Folkner, James G. Williams и Dale H. Boggs (2021). The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441. AJ 161.3, с. 105.
- Khovritchev, Maxim, Sergey Laznevoi, Alexandra Lunchenko μ Angelina Osetrova (2023). The results of the NEA astrometric observations with the Pulkovo 40-cm telescope at the Assy-Turgen observatory. *Publications of the Pulkovo Observatory* 231, c. 9–20.

The positions of asteroid (433) Eros in the Gaia system based on the results of the analysis of scans of Pulkovo astronegatives taken in 1900 and 1930

M.Yu. Khovrichev¹, D.A. Bikulova¹, N.V. Narizhnaya¹, T.A. Vasileva¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 11 November 2024 / Accepted 28 November 2024

Abstract

In recent years, A_2 parameter determinations became available for many asteroids due to astrometric measurements' quantity and quality improvement. It is well known that the A_2 parameter is associated with the influence of the Yarkovsky drift of asteroid orbits. The mentioned A_2 determinations can be performed using a 50-year (or even less) time series of positional data for relatively small asteroids (with a size of about hundreds of meters). These calculations meet many difficulties for larger bodies (more than 10 kilometers). Logically, a relatively long time series with 100-year coverage leads to a significantly good effect manifestation. The (433) Eros asteroid is an illustrative case in the considered context. It has a long history of observations (since the 1890s). Unfortunately, the (O-C) dispersion for old observations reaches several arc seconds. Therefore, A_2 value estimation for this body is complicated. Digitization of the corresponding old photographic plates and remeasurements of the asteroid positions are required. We present the results of the remeasurements of the Pulkovo photographic plates containing (433) Eros images. These astronegatives were taken with the Pulkovo Normal Astrograph in 1900 and 1930. Digitization was performed with the NAROO digitization center (Paris Observatory). A total of 18 asteroid positions were obtained at the accuracy level of 0.1 - 0.3 arcsec. The absolute values of $(O-C)_{\alpha}$ and $(O-C)_{\delta}$ do not exceed 0.5 arcsec relative to the NASA/Horizons ephemerides.

key words: astrometric observations of asteroids, digitization of astronegatives, (433) Eros, Yarkovsky effect