



Результаты астрометрических наблюдений АСЗ на пулковском 40-см телескопе в обсерватории Ассы-Тургень

М.Ю. Ховричев^{1,3*}, А.Д. Лунченко², С.И. Лазневой², А.А. Осетрова²

¹ ГАО РАН, ²СПбГУ, ³ИПА РАН

Аннотация

Мы представляем результаты астрометрических наблюдений двух астероидов, 2005 ХУ7 и 2007 УМ12. Оба объекта относятся к астероидам, сближающимся с Землей. Наблюдения были выполнены в сентябре-ноябре 2023 года с помощью 40-см пулковского телескопа в обсерватории Ассы-Тургень (Казахстан). Измерения пиксельных координат звезд и астероидов производились посредством варьирования положений фотоцентров, величин фона и потока для ФРТ (функции рассеяния точки), построенной на основе анализа изображений звезд. Астрометрическая калибровка производилась методом шести постоянных с помощью данных каталога Gaia DR3. Звезды в области радиусом 4 угловые минуты от астероида не участвовали в астрометрической редукции и использовались для вычисления поправок для коррекции систематических ошибок координат астероида. В итоге внутренняя точность измерений координат астероидов оказалась лучше 0.1 угловой секунды. Для каждой серии ПЗС-кадров производилось вычисление среднего положения и компонент скорости видимого движения по небесной сфере. В результате характерная точность координат достигла величин 0.024 – 0.088 угловых секунд. В дополнение к этому было произведено численное интегрирование уравнений движения астероидов с варьированием компонент вектора состояния и добавлением параметра A_2 (ускорение, обусловленное эффектом Ярковского). Вопреки ожиданиям, для астероида 2007 УМ12 значение A_2 оказалось незначимым. Это может быть объяснено низким качеством астрометрических данных для эпохи первого сближения астероида с Землей и/или приливными эффектами, изменившими вращательное состояние астероида во время сближения. Для 2005 ХУ7 эффект на грани значимости $A_2 = (8.1 \pm 6.4) \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², что не противоречит известным данным о величине эффекта Ярковского для астероидов данного размера.

Введение

Изучение динамики астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), актуально в самых разных контекстах. Наиболее интригующий из них – контекст астероидно-кометной опасности. Чисто научный интерес к этим объектам связан с тем, что из-за сближений с Землей удастся собрать достаточно много полезной и информации об этих астероидах (от орбитальных параметров до оценок размеров, параметров вращения). Для аналогичных по размерам астероидов главного пояса такие данные можно получить только в ходе космических миссий или в ходе наблюдений, выполняемых на больших телескопах (например, VLT). В результате появляется возможность проследить динамическую эволюцию популяции АСЗ и судить о процессах в Солнечной системе на космогонических масштабах времени.

Как показано во множестве исследований (например, Michel, Morbidelli и Bottke, 2005), главным драйвером орбитальной эволюции АСЗ является эффект Ярковского (Ярковский, 1901), обусловленный анизотропным характером переизлучения электромагнитных волн с поверхности астероида. Модель данного явления хорошо разработана. В этом можно убедиться на примере

*e-mail:deimos@gaoran.ru

работ David Vokrouhlický, 1999 и D. Vokrouhlický, Milani и Chesley, 2000. Главное проявление эффекта – вековое изменение большой полуоси гелиоцентрической орбиты астероида, составляющее величину порядка 10^{-3} а.е. за миллион лет. Изучению этого эффекта в контексте вращательной динамики астероидов посвящены статьи Мартюшевой, Мельникова, Лобановой (Мартюшева и Мельников, 2023; Лобанова и Мельников, 2023).

Изменение орбит АСЗ под действием эффекта Ярковского выявлено на основе наблюдений, оценены величины изменения больших полуосей (например, Desmars, 2015, Dziaduga и др., 2022). Высокоточная астрометрия АСЗ здесь играет колоссальную роль. Прежде всего это данные космической миссии Gaia и радарных наблюдений. В настоящее время доступен дополнительный релиз данных Gaia, предоставляющий новые результаты измерений координат тел Солнечной системы (Focused Product Release (Gaia FPR), Gala Collaboration, 2023). Некоторая трудность здесь в том, что наблюдения тел Солнечной системы не является главной задачей миссии Gaia. Особенности сканирования небесной сферы в этом проекте и малый блеск АСЗ приводят к тому, что объекты этого типа слабо представлены в наборе данных Gaia FPR. Это делает весьма актуальными высокоточные наземные астрометрические наблюдения АСЗ. В настоящее время их осуществляет множество обсерваторий мира. Точность астрометрических измерений значительно выросла за последние годы.

Эти и другие работы, кроме собственных результатов, представляют главный вывод: эффект реален, хорошо заметен для АСЗ с размерами до 1 км. В работе Марсдена и коллег (Marsden, Sekanina и Yeomans, 1973) предложено обозначать негравитационные ускорения A_1 , A_2 , A_3 . Ускорение A_2 направлено перпендикулярно гелиоцентрическому радиус-вектору, и именно его величину оценивают, когда пытаются выявить эффект Ярковского в движении астероида. Наиболее надежно параметр A_2 определяется для астероидов размерами порядка сотен метров. Такие объекты относительно легко наблюдать, и существует ненулевая вероятность зафиксировать значимую величину A_2 на основе рядов наблюдений протяженностью 10-20 лет. Понятно, что A_2 зависит от многих факторов. Определяющую роль играют параметры вращения астероида (период осевого вращения и ориентация оси вращения) и его термофизические свойства (теплопроводность вещества астероида). Поэтому накопление оценок A_2 является актуальной задачей, так как ее решение даст важную информацию для построения физических моделей АСЗ.

Данное исследование имеет целью получить высокоточные астрометрические измерения для ряда АСЗ, на основе которых можно повысить качество оценок A_2 . Необходимость повышения точности таких измерений вытекает из того, что основной массив наблюдений в базе данных Международного Центра Малых Планет (МРС) характеризуется точностью порядка секунд дуги, а данных Gaia для АСЗ, как отмечалось выше, пока очень мало. В нашей работе мы стремимся полностью реализовать потенциал, заложенный в цифровых изображениях астероидов на ПЗС-кадрах. Аппроксимация этих изображений с помощью современных методов оптимизации дает точность пиксельных координат x, y на уровне десятых долей пикселя. При масштабе изображений на уровне десятых долей секунды на пиксель можно ожидать соответствующей точности координат в международных базах данных. Но мы это видим для небольшого числа обсерваторий. Одной из причин этого может быть недостаточно строгий подход к анализу изображений. Еще одна причина появления наблюдений с ошибками порядка секунды дуги – использование данных широкоугольных систем, которые в основном предназначены для обнаружения новых астероидов, и не могут обеспечить астрометрические данные нужного качества для динамических исследований.

Летом 2022 года в обсерватории Ассы-Тургень в рамках программы сотрудничества ГАО РАН с АФИФ (Казахстан) был установлен 40-см телескоп. К настоящему моменту начались удаленные наблюдения на этом инструменте по разным программам исследований (Ховричев и др., 2022). Осенью 2023 года были выполнены астрометрические наблюдения ряда АСЗ (1998 HH49, 1998 KV2, 1998 QK28, 2004 OT11, 2005 XY7, 2007 PE8, 2007 UM12). Включение в наблюдательную программу этих астероидов обусловлено их текущим сближением с Землей и тем, что первое сближение (в момент открытия) было более 10-лет назад. Попытка совместного анализа данных двух сближений (или данных, полученных на интервале более 10 лет) имеет шансы получить

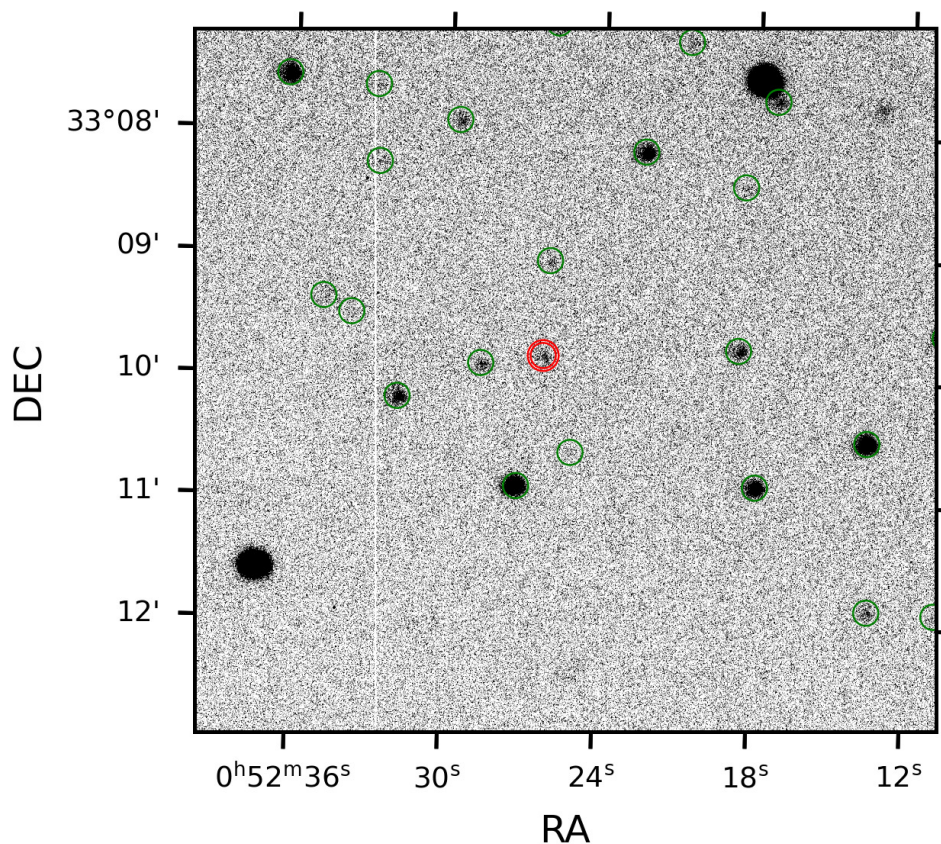


Рис. 1: Фрагмент ПЗС-кадра (время накопления – 30 секунд), полученного с помощью пулковского 40-см телескопа в обсерватории Ассы-Тургень. В центре кадра красным кружком выделен исследуемый объект – астероид 2007 UM12. Зелеными метками выделены звезды Gaia с блеском в диапазоне $14 < G < 18.5$.

значимые величины для параметра A_2 . Данная статья представляет данные астрометрических наблюдений АСЗ 2005 XY7 и 2007 UM12. Кроме того, делается попытка оценить величину A_2 для этих двух астероидов.

Текст работы состоит из трех разделов. Наблюдения и обработка данных описаны в следующей части работы (1). Раздел 2 информирует читателя о том, какие данные получены и каково их качество. Методика вычисления параметра A_2 и полученные результаты описаны в разделе 3. В разделе 4 формулируются основные итоги исследования.

1 Наблюдения и обработка данных

Как отмечалось во Введении, наблюдения избранных АСЗ были выполнены с помощью пулковского 40-см телескопа ($D = 0.4$ м, $F = 4$ м) в обсерватории Ассы-Тургень (АФИФ, Казахстан). К настоящему времени на телескопе установлена камера Atik 16200, дающая рабочее поле 24×19 угловых минут при масштабе 0.318 arcsec/pix. При времени накопления 30 секунд на кадрах получаются звезды до 18.0 звездной величины. Поэтому инструмент хорошо подходит для наблюдений ярких АСЗ.

Рис. 1 содержит фрагмент типичного ПЗС-кадра. Как видно из этого изображения, опти-

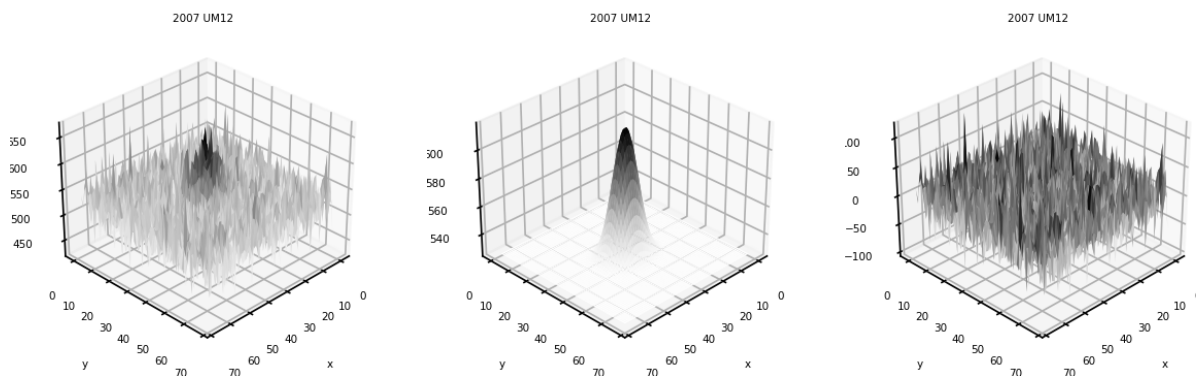


Рис. 2: Пример аппроксимации изображения астероида посредством PSF. Слева – исходное изображение, в центре – его модель, справа – результат вычитания модели из исходного изображения. Из правой картинке видно, что после вычитания осталась только шумовая компонента изображения, как и должно быть, если параметры модели вычислены корректно.

ческая система телескопа нуждается в дальнейшей юстировке (просматривается асимметрия в изображениях звезд). Необходимо совершенствование системы гидирования для увеличения времени накопления. В настоящее время при выдержке более 40 секунд замечен сдвиг изображений звезд. Тем не менее, в высокогорных условиях при относительно скромной величине диаметра объектива за 30 секунд удастся накопить вполне достаточный сигнал для звезд вплоть до 18-ой звездной величины. Сложение нескольких кадров с учетом сдвига, поворота увеличивает экспозицию и позволяет увеличить проницаемость до 20-ой звездной величины. Для наблюдений АСЗ такие суммирования не очень полезны, так как приходится иметь дело с изображением следа астероида, вызванного его быстрым видимым движением по небесной сфере.

Технология астрометрических измерений ПЗС-кадров, которую мы используем, основана на построении функции рассеяния точки (ФРТ или PSF) на основе аппроксимации изображений звезд с большими отношениями сигнал-шум в окрестности астероида (Bikulova, 2021 или Khovrichev и др., 2018). Для изображений астероида и звезд в дальнейшем варьируются только величины фона, потока и пиксельных координат фотоцентра x, y . Применение нелинейного метода наименьших квадратов (алгоритма Левенберга-Марквардта) дает не только оценки координат, но и их стандартные ошибки ε_{RA} и ε_{DEC} приведенные к системе экваториальных координат (типичные величины ε_{RA} и ε_{DEC} показаны в таблице 1).

Представление об эффективности процедуры «измерения изображений» дает рис. 2. Здесь показано исходное изображение, его модель, построенная на основе PSF, x, y , оценок фона и потока. В правой части рис. 2 показан результат вычитания «исходное изображение минус модель», на основе которого можно судить о качестве аппроксимации. Как уже упоминалось, АСЗ характеризуются быстрым видимым движением по небесной сфере (сотни и тысячи угловых секунд в час). Для таких растянутых изображений мы применяли свертку отрезка с помощью PSF, откалиброванной по звездам. Такой подход давно применяется для решения подобных задач (например, Vereš и др., 2012).

Стратегия обработки данных, принятая для анализа выполненных наблюдений, во многом позаимствована из пулковских наблюдений видимых тесных сближений АСЗ со звездами Gaia (Bikulova, 2021). Отличие состоит в том, что мы подбирали звезды Gaia (контрольные звезды), расположенные в пределах окружности радиусом четыре угловые минуты с центром в точке, где находилось изображение астероида. Положения этих звезд измерялись по той же методике, что использовалась для определения координат астероида. Разности $O - C$ для этих звезд вычислялись, естественно, с помощью данных Gaia DR3. Характерные величины этих разностей даны в колонках ΔRA и ΔDEC таблицы 1. Использование ΔRA и ΔDEC позволило получить поправки для каждого кадра, учитывающие систематические ошибки проекции телескопа.

Серии ПЗС-кадров насчитывают 40-50 кадров, поэтому в таблице 1 приведен только фрагмент

Таблица 1: Выборка результатов измерений, полученных в ходе анализа отдельной серии ПЗС-кадров

Asteroid ID	JD	RA <i>deg</i>	DEC <i>deg</i>	ε_{RA} <i>arcsec</i>	ε_{DEC} <i>arcsec</i>	ΔRA <i>arcsec</i>	ΔDEC <i>arcsec</i>	N_{cs}
2007 UM12	2460242.205246	37.3410	8.9914	0.1507	0.0831	0.1620	0.0346	21
2007 UM12	2460242.206065	37.3418	8.9903	0.0901	0.0776	0.0601	0.0088	21
2007 UM12	2460242.206880	37.3426	8.9891	0.1794	0.1146	0.0066	-0.0518	21
2007 UM12	2460242.207699	37.3434	8.9880	0.1287	0.0879	0.0560	-0.0687	20
2007 UM12	2460242.208519	37.3442	8.9869	0.0614	0.0640	-0.1048	0.0022	20

...
Здесь N_{cs} - число контрольных звезд. Остальные колонки описаны в тексте.

набора данных, доступного в электронном виде (csv-файлы) в системе астрометрических баз данных Пулковской обсерватории¹.

2 Анализ результатов наблюдений избранных АСЗ

Традиционно результаты обработки измерений каждого кадра наблюдатели отправляют в Центр малых планет Международного астрономического союза (МРС). Понятно, что в таких наборах данных могут быть грубые выбросы, просто некачественные наблюдения. Поэтому для специалистов в области динамики астероидов большой проблемой становится подготовка данных к дальнейшим вычислениям. Мы придерживаемся точки зрения, что гораздо разумнее стараться определять параметры движения астероида на коротком отрезке времени, охватывающем серию ПЗС-кадров. А именно, мы представляем движение астероида линейной моделью вида $\xi = \xi(t_0) + \dot{\xi}(t - t_0)$ и $\eta = \eta(t_0) + \dot{\eta}(t - t_0)$ в тангенциальных координатах. Точка проекции задается средними значениями экваториальных координат астероида, t_0 – средний момент серии ПЗС-кадров, t – центральный момент для каждого отдельного кадра. Применение МНК (метода наименьших квадратов) сразу дает оценки $\xi(t_0), \eta(t_0), \dot{\xi}, \dot{\eta}$ – координат на средний момент серии и компонент скорости видимого движения. В дальнейшем $\xi(t_0), \eta(t_0)$ трансформируются в экваториальные координаты. При длинных сериях разумно вводить в такую модель движения члены второго и третьего порядков. Для наиболее точного определения параметров видимого движения $(\xi(t_0), \eta(t_0), \dot{\xi}, \dot{\eta})$ данные с большими отклонениями от предполагаемой модели исключались из исследуемого ряда по критерию 3σ , уменьшая разброс точек. В таблице 2 приведены результаты второго этапа обработки наблюдений: экваториальные координаты, скорости видимого движения и оценки стандартных ошибок для астероида 2007 UM12. Эти данные доступны по уже приведенной ссылке. Разности $(O - C)$ вычислялись с помощью системы эфемерид [Horizons System](#), [NASA JPL](#). Видно, что координаты астероидов достаточно хорошо согласуются с эфемеридами (разности $(O - C)$ редко превышают 0.1 arcsec). Внутренняя точность полученных координат лучше 0.1 arcsec, а в большинстве случаев стандартная ошибка не превышает 0.05 arcsec. Именно этот набор данных использовался наряду с данными МРС для оценки величины A_2 .

Таблица 2: Финальные результаты измерений координат скоростей видимого движения для АСЗ 2007 UM12 и 2005 XY7

Asteroid ID	MPC	JD	RA <i>deg</i>	DEC <i>deg</i>	ε_{RA} <i>arcsec</i>	ε_{DEC} <i>arcsec</i>	$\dot{RA}$ <i>arcsec/hour</i>	$\dot{DEC}$ <i>arcsec/hour</i>	$\varepsilon_{\dot{RA}}$ <i>arcsec/hour</i>	$\varepsilon_{\dot{DEC}}$ <i>arcsec/hour</i>	$(O - C)_{RA}$ <i>arcsec</i>	$(O - C)_{DEC}$ <i>arcsec</i>
2007 UM12	217	2460227.163112	7.1173	37.0795	0.044	0.047	357.3412	-271.2521	0.3890	0.4212	0.132	0.002
2007 UM12	217	2460229.171350	13.1104	33.1631	0.076	0.088	335.0141	-296.8929	0.5096	0.5884	0.106	-0.009
2007 UM12	217	2460235.270334	27.2953	20.6529	0.043	0.048	240.3658	-293.0985	0.3298	0.3694	0.004	0.001
2007 UM12	217	2460242.218777	37.3545	8.9728	0.035	0.024	148.6403	-205.9979	0.3004	0.2095	-0.002	-0.011
2007 UM12	217	2460252.176333	45.0673	-1.0158	0.087	0.063	72.6724	-103.1799	0.6169	0.4439	-0.360	0.092
2005 XY7	217	2457551.104227	66.3056	36.1691	0.035	0.025	32.7776	0.7665	0.2129	0.1526	0.001	-0.001

¹http://puldb.ru/nsdb/pulkovo40cm_telescope_data.zip

3 Вычисление значений параметра A_2 для исследованных АСЗ

По полученным данным, а также используя данные из MPC, была предпринята попытка оценить эффект Ярковского A_2 для двух астероидов — 2007 UM12 и 2005 XY7.

Метод заключается в том, чтобы, имея набор наблюдаемых координат астероида на определенные даты и варьируя «расширенный» (кроме $\vec{r}$ и $\vec{v}$, включающий в себя A_2) вектор состояния, получить совпадение теоретической орбиты с наблюдаемой лучше, чем при игнорировании эффекта Ярковского (то есть при $A_2 = 0$). Такой подход является стандартным и подробнее представлен, например, в работе Гринберга и коллег (Greenberg и др., 2020).

Для его реализации использовались данные, полученные в предыдущем разделе. Также из базы MPC были взяты дополнительные наблюдения, по которым мы получили те же параметры видимого движения. То есть мы не использовали все положения астероидов из MPC в том виде, как они представлены в этой базе данных. Мы разделяли данные по сериям наблюдений (по коду обсерватории и интервалу времени). Для каждой серии определялись параметры $\xi(t_0), \eta(t_0), \dot{\xi}, \dot{\eta}$ и далее RA, DEC для момента t_0 из $\xi(t_0), \eta(t_0)$. Отбраковывались те измерения, для которых имела место большое (более 3σ) отклонение положения относительно траектории, заданной параметрами видимого движения. Игнорировались случаи, где было только одиночное наблюдение. Внутренняя точность таких рядов для современных профессиональных обсерваторий почти всегда лучше 0.1 arcsec. Имея такие оценки точности мы в дальнейшем использовали их для назначения весов наблюдений при вычислении $\vec{r}$, $\vec{v}$, и A_2 .

Итак, имея вышеописанный набор данных (это несколько десятков точек с RA, DEC для соответствующих моментов времени), используя пакет ASSIST (Holman и др., 2023) и основываясь на соответствующем [примере для вычислений](#), мы составили симуляцию (выполнили численное интегрирование уравнений движения астероида), которая по заданным моментам времени, положениям наблюдателей и расширенному вектору состояния определяет положения астероида в экваториальной системе координат. В качестве интегратора использовался IAS15 (Rein и Spiegel, 2015), который включен в пакет REBOUND. Далее, используя нелинейный МНК (алгоритм Левенберга-Марквардта), мы уточнили начальный ($A_2 = 0$) расширенный вектор состояния (при этом начальные компоненты радиуса-вектора и скорости относительно барицентра Солнечной системы брались из эфемериды [Horizons System, NASA JPL](#)). Следует отметить, что, помимо описанной выше фильтрации, при фитинге учитывался статистический вес каждого наблюдения, зависящий от $\varepsilon_{RA}, \varepsilon_{RA}$ и $(O - C)/\varepsilon$ (здесь $(O - C)$ и ε — суммарные величины по обеим координатам). Результаты выполнения данной процедуры приведены в таблице 3 и на рисунках 3 и 4.

На графиках представлена зависимость разности $(O - C)$ от времени наблюдения для α и δ . Оранжевыми точками отмечены разности без учета эффекта Ярковского, синими квадратами — с учетом. Точками с барирами ошибок выделены наблюдения, представленные в этой работе.

Рассмотрим сначала рисунок 3, отображающий результаты для астероида 2005 XY7. Видно, что благодаря учету A_2 разности на эпоху первого сближения лучше соответствуют эфемериде. А именно, сдвиги точек составляют величины порядка 0.1 arcsec, что сопоставимо с точностью измерений. Это можно рассматривать как признаки значимости эффекта. Аналогичный вывод можно сделать и из численных данных: $A_2 = 8.1 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² при стандартном отклонении $\sigma_{A_2} = 6.4 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Иными словами, можно сказать, что эффект Ярковского для астероида 2005 XY7 находится на грани значимости, точно не ухудшает орбиту (в некоторых местах даже чуть-чуть улучшает), а в перспективе (при накоплении будущих точных наблюдений или еще более аккуратном использовании имеющихся) можно надеяться на достоверное детектирование эффекта.

Для астероида 2007 UM12, несмотря на большее количество наблюдений, σ_{A_2} превышает значение A_2 на два порядка (рис.: 4), и говорить о значимости эффекта уже не представляется возможным. Объяснить такое положение вещей можно тем, что астероид 2005 XY7 хоть и наблюдался в одном сближении (2023 год), но из-за большего размера он мог наблюдаться на относительно больших геоцентрических расстояниях, что и произошло. Поэтому измерения для этого

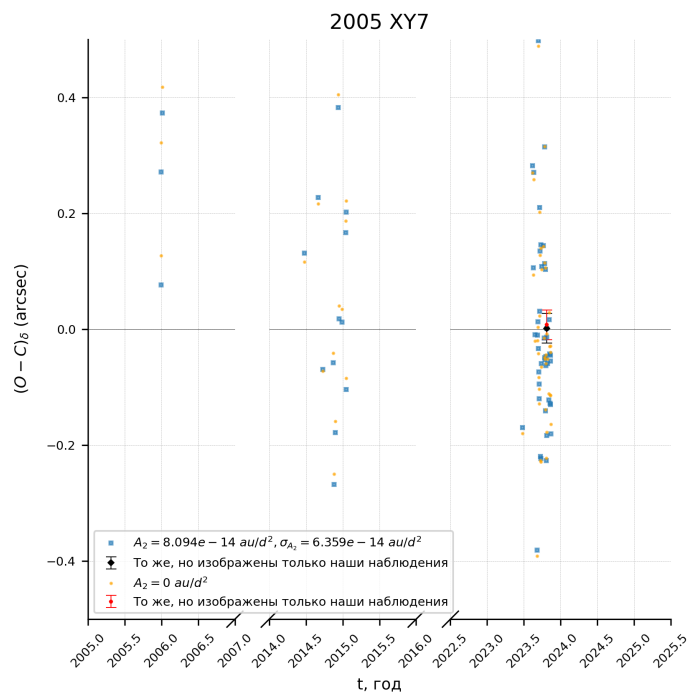
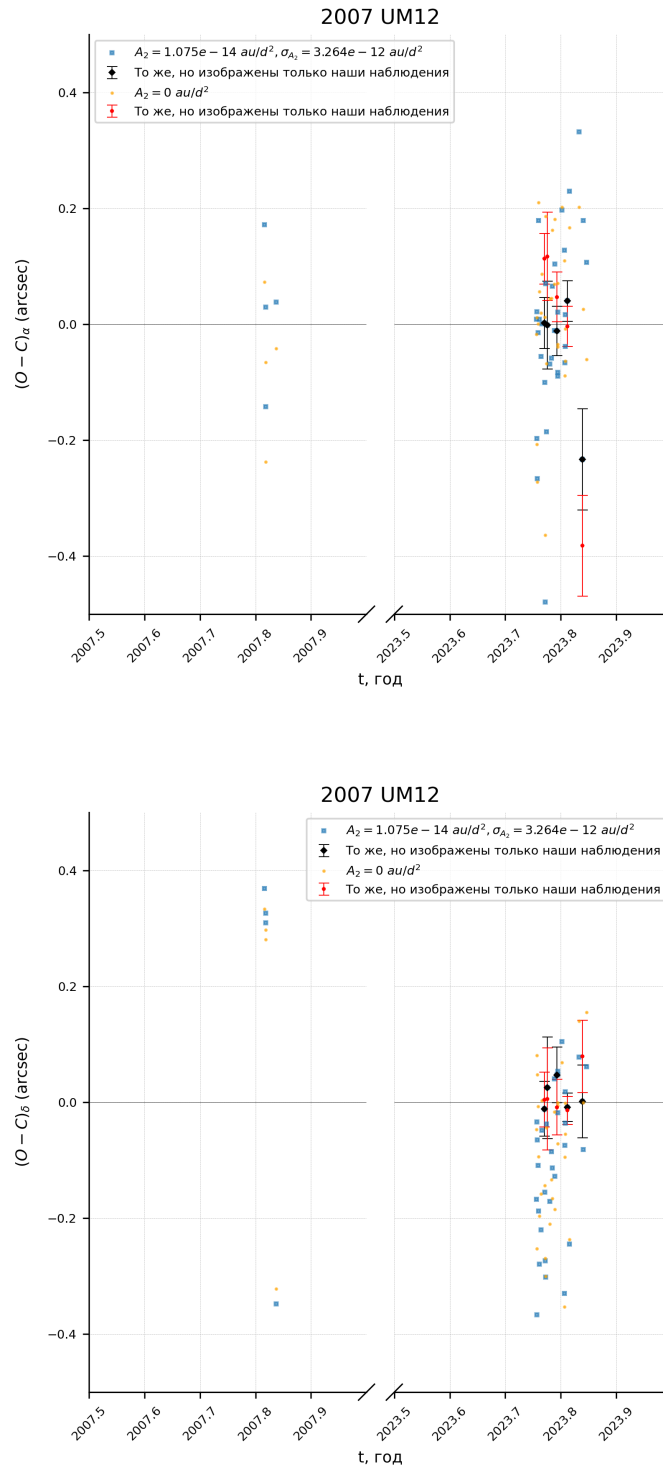


Рис. 3: Зависимость $(O - C)$ астероида 2005 XY7 от времени.

Рис. 4: Зависимость $(O - C)$ астероида 2007 UM12 от времени.

АСЗ лучше распределены по времени, чем для 2007 UM12 (два сближения 2007 и 2023 годов), и это сказывается на результатах вычислений.

4 Выводы

В программу астрометрических наблюдений, реализуемых на пулковском телескопе в обсерватории Ассы-Тургень в Казахстане, было включено 7 астероидов: 1998 HH49, 1998 KV2, 1998 QK28, 2004 OT11, 2005 XY7, 2007 PE8, 2007 UM12. Сложность обработки этих наблюдений состоит в том, что в высокогорной обсерватории на данный момент нет скоростного доступа к сети Интернет. Поэтому требуется время для переноса ПЗС-кадров (порядка 10-20 Гб за ночь) на вычислительный сервер Лаборатории Астрометрии и Звездной Астрономии ГАО РАН. На текущий момент завершена обработка серий для астероидов — 2005 XY7 и 2005 UM12, результаты которой представлены в данной статье.

Резюмируя проделанную работу, подчеркнем, несколько важных моментов.

1. В результате обработки серий ПЗС-кадров получены координаты для центральных моментов серии. Точность определения координат (6 и 7 столбец в таблице 2) от 0.04 до 0.1 секунд дуги, что в среднем лучше точности данных для этих астероидов, представленных в базе данных MPC.
2. Систематические ошибки, вызванные дисторсией и другими искажениями проекции объектива, сведены к минимуму за счет использования близких к астероиду звезд, измеренных по той же схеме, что и изображение астероида. Благодаря высокой точности координат звезд в каталоге Gaia DR3 полученные поправки значительно уменьшили систематические ошибки измерений данных астероидов.
3. Удалось получить оценку параметра Ярковского для астероида 2005 XY7: $A_2 = 8.1 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² $\pm 6.4 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Величина эффекта чуть больше одной σ , поэтому эту оценку следует считать предварительной. Понятно, что низкая точность измерений положений астероида в данных MPC для первой эпохи сильно затрудняет решение подобной задачи. Оценки A_2 для обоих АСЗ приведены в таблице 3

Дополнить представленные выводы стоит анализом дополнительных данных об исследованных астероидах.

Таблица 3: Физические параметры исследованных АСЗ и оценки величин A_2

Астероид	H mag	D км	семейство	A_2 (10^{-15} а.е./сут ²)	σ_{A_2}	N
2005 XY7	18.02	0.88	Amor	81	64	478
2007 UM12	21.61	0.17	Amor	11	3264	357

Здесь N - число доступных наблюдений в базе данных MPC.

Оценки диаметра D и абсолютные звездные величины H астероидов 2005 XY7 и 2007 UM12 даны в таблице 3. Диаметр оценивался по следующей формуле Perna, Barucci и Fulchignoni, 2013:

$$\lg(D) = 3.122 - 0.5\lg(p) - 0.2H$$

H – абсолютная звездная величина, D – диаметр объекта и p – геометрического альбедо. Интересно заметить, что, вопреки названию, геометрическое альбедо зависит не от формы тела, а от физического материала астероида. Поскольку геометрическое альбедо для двух данных астероидов неизвестно, мы применяем рекомендованное среднее значение $p = 0.14$ (Stuart и Binzel, 2004).

Ввиду целого ряда обстоятельств не существует точной зависимости между диаметром астероида и величиной изменения большой полуоси. Тем не менее, накопленные оценки A_2 дают зависимость $\frac{da}{dt} \approx D^{-1.06} \cdot 10^{-4}$ а.е. за миллион лет (Greenberg и др., 2020). Для АСЗ 2005 XY7 при диаметре 0.88 км получается $\frac{da}{dt} = 1.15 \cdot 10^{-4}$ а.е. за миллион лет. Наш результат несложно привести к этому виду, используя известное соотношение (смотрите, например, Desmars, 2015):

$$\left\langle \frac{da}{dt} \right\rangle = \frac{2}{na^2(1-e)} A_2.$$

Подсчет дает оценку $\frac{da}{dt} = 2.09 \pm 1.7 \cdot 10^{-4}$ а.е. за миллион лет, что не противоречит величине, полученной выше по эмпирической зависимости $\frac{da}{dt}(D)$. Это еще одно свидетельство в пользу реалистичности полученного параметра A_2 . Для второго астероида, 2012 UM12, по той же зависимости величина эффекта должна быть пропорционально больше (более чем в 4 раза). Но, как мы видели, полученная оценка величины A_2 статистически незначима. Тем не менее стоит обратить внимание на тот факт, что геоцентрические расстояния для 2007 UM12 при сближениях составили 0.15 и 0.08 а.е. соответственно. Это существенно ближе, чем для 2005 XY7 (0.39 а.е. в 2023 году). Поэтому нельзя исключать, что вращательное состояние 2007 UM12 может значительно меняться из-за приливных эффектов, возникающих при сближении с Землей. Следовательно можно ожидать и пропорционального изменения A_2 , зависящего от параметров вращения астероида.

Благодарности

Настоящее исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00306, <https://rscf.ru/project/23-22-00306/>.

Список литературы

- Michel, Patrick, Alessandro Morbidelli и William F. Bottke (2005). [Origin and dynamics of Near Earth Objects](#). *Comptes Rendus Physique* 6.3, с. 291—301.
- Ярковский, И. О. (1901). [Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению](#). Брянск: тип. Юдина, с. 17.
- Vokrouhlický, David (1999). [A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments](#). *A&A* 344, с. 362—366.
- Vokrouhlický, D., A. Milani и S. R. Chesley (2000). [Yarkovsky Effect on Small Near-Earth Asteroids: Mathematical Formulation and Examples](#). *Icarus* 148.1, с. 118—138.
- Мартюшева, А. А. и А. В. Мельников (2023). [О величине эффекта Ярковского в динамике потенциально опасных астероидов](#). *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове* 228, с. 147—156.
- Лобанова, К. С. и А. В. Мельников (2023). [О возмущениях во вращательном движении астероида при его тесном сближении с Землей](#). *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове* 229, с. 34—46.
- Desmars, J. (2015). [Detection of Yarkovsky acceleration in the context of precovery observations and the future Gaia catalogue](#). *A&A* 575, A53.
- Dziadura, Karolina и др. (2022). [Computing the Yarkovsky effect for asteroids in Gaia DR3](#). В: *European Planetary Science Congress, EPSC2022—649*.
- Gaia Collaboration (2023). [VizieR Online Data Catalog: Gaia Focused Product Release \(Gaia FPR\) \(Gaia Collaboration, 2023\)](#). *VizieR Online Data Catalog*, с. I/361.
- Marsden, Brian G., Z. Sekanina и D. K. Yeomans (1973). [Comets and nongravitational forces. V](#). *AJ* 78, с. 211.
- Ховричев, М. Ю., А. А. Архаров, В. Ю. Ким и И. С. Измайлов (2022). [Перспективы реализации наблюдательных программ ГАО РАН в обсерватории Ассы-Тургень](#). *Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове* 227, с. 58—76.
- Bikulova, D. A. (2021). [Pulkovo observations of apparent close approaches between near-earth asteroids and the Gaia stars in 2019-2020](#). *Planet. Space Sci.* 204, с. 105245.
- Khovrichiev, M. Yu. и др. (2018). [Searching for Binary Systems Among Nearby Dwarfs Based on Pulkovo Observations and SDSS Data](#). *Astronomy Letters* 44.2, с. 103—118.
- Vereš, Peter и др. (2012). [Improved Asteroid Astrometry and Photometry with Trail Fitting](#). *PASP* 124.921, с. 1197.
- Greenberg, Adam H., Jean-Luc Margot, Ashok K. Verma, Patrick A. Taylor и Susan E. Hodge (2020). [Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids](#). *AJ* 159.3, с. 92.
- Holman, Matthew J. и др. (2023). [ASSIST: An Ephemeris-quality Test-particle Integrator](#). *The Planetary Science Journal* 4.4, с. 69.
- 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, с. 1424—1437.
- Perna, D., M. A. Barucci и M. Fulchignoni (2013). [The near-Earth objects and their potential threat to our planet](#). *A&A Rev.* 21, с. 65.
- Stuart, Joseph Scott и Richard P Binzel (2004). [Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects](#). *Icarus* 170.2, с. 295—311.

The results of the NEA astrometric observations with the Pulkovo 40-cm telescope at the Assy-Turgen observatory

M.Yu. Khovricher^{1,3}, S.I. Laznevoi², A.D. Lunchenko², A. A. Osetrova²

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo, ²Saint Petersburg State University, ³The Institute of Applied Astronomy of the RAS

Abstract

We present the results of astrometric observations of two near-Earth asteroids, 2005 XY7 and 2007 UM12, performed in September–November 2023 with the 40-cm Pulkovo telescope in the Assy-Turgen observatory. Stellar and asteroid pixel coordinates were calculated by varying the photo center position, background, and flux values for the PSF (point spread function) based on the analysis of the stellar images. The stars within the 4-arcmin asteroid-centered ring were not involved in the astrometric calibration. These stars were used for the asteroid systematic correction calculation. As a result, the internal accuracy of asteroid positions was better than 0.1 arcsec. The estimation of the mean position and the apparent rate components were performed for each set of CCD frames. Finally, the typical accuracy of the coordinates reached values of 0.024 – 0.088 arcsec. In addition, the numerical integration of the asteroid motion was made by varying the components of the state vector and A_2 -parameter (Yarkovsky acceleration). The unexpected and statistically insignificant A_2 value for the 2007 UM12 has been found. It can be explained by the low quality of the data related to the first approach of this asteroid to the Earth and/or the tidal effects that changed the rotational state of the asteroid. The value $A_2 = (8.1 \pm 6.4) \cdot 10^{-14}$ a.u. per day² on the significance boundary has been calculated for 2005 XY7 asteroid. This value does not contradict well-known data for the same size asteroids.