

# ПРИЛИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ АСТЕРОИДОВ КАК ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ ВЕЛИЧИНЫ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО

А. В. Мельников<sup>1</sup>, М. Ю. Ховричев<sup>1</sup>, И. А. Баляев<sup>1</sup>, К. С. Лобанова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

## Резюме

Мы рассмотрели возможные приливные скачки значений параметров вращательного состояния астероидов во время их сближений с планетами. Эти резкие изменения периода вращения и наклона оси вращения приводят к значительным изменениям в орбитальной динамике из-за соответствующего изменения величины ускорения Ярковского  $A_2$ . Проведенное моделирование эволюции параметров вращения астероидов из-за их сближений с планетами подтверждает вывод о том, что значительные изменения  $A_2$  могут происходить, когда минимальное планетоцентрическое расстояние составляет менее десяти планетных радиусов. Мы обнаружили девять астероидов с аномальными значениями  $A_2$ . Однако нет точных доказательств того, что эти расхождения  $A_2$  можно объяснить только приливными эффектами.

## Введение

Исследование дрейфа Ярковского [1] имеет важное значение для понимания эволюции орбиты астероидов. Физическая модель эффекта Ярковского хорошо разработана (см., например, [2]). Величину ускорения, вызванного действием эффекта Ярковского, для астероидов часто приводят в обозначениях из работы [3], а именно: указывают трансверсальную компоненту ускорения  $A_2$ , поскольку ее удастся оценить с помощью процедуры улучшения орбиты. Значение рассматриваемого эффекта зависит как от физических параметров астероида, так и от его вращательного состояния. Различные физические явления могут изменять вращательное состояние астероида: период вращения и ориентацию оси вращения. Одним из таких явлений является приливное возмущение во вращении астероида во время тесного сближения с планетой. В данной работе мы попытались оценить величины приливных возмущений во вращательном состоянии и их влияние на орбитальную эволюцию астероидов из-за изменения величины  $A_2$ .

## Численные эксперименты

В соответствии с методикой, описанной в [4], были проведены численные эксперименты для моделирования динамики вращения астероида во время тесных сближений с планетами. Предполагалось, что астероид представляет собой твердое тело с главными центральными моментами инерции  $A < B < C$ . Были построены и проанализированы зависимости от физических и орбитальных параметров астероида значений  $\Delta P$  и  $\Delta\gamma$ , характеризующих возмущения в его вращательной динамике, возникающие из-за сближения с планетой. Величина  $\Delta P$  соответствует изменению периода вращения астероида,  $\Delta\gamma$  — изменению угла между осью вращения астероида и нормалью к плоскости его орбиты. Принято:  $\Delta P = P_{\text{final}} - P_0$ ,  $\Delta\gamma = \gamma_{\text{final}} - \gamma_0$ , где нижний индекс «final» соответствует величинам после момента сближения (при удалении астероида от геоцентра на расстояние  $100 R_E$ , где  $R_E$  — радиус Земли), а  $P_0$  и  $\gamma_0$  — начальные (до сближения) значения указанных параметров. Аналогично исследовалось изменение величины  $\Delta A_2 = A_2^{\text{final}} - A_2^0$ .

Приведенный на левой панели Рис. 1 пример диаграммы, построенной для астероида (99942) Апофис, иллюстрирует связь между изменением периода вращения астероида  $\Delta P$  и параметрами его геоцентрической орбиты ( $e$ ,  $d = a(e - 1)$ , где  $e$  — эксцентриситет,  $a$  — большая полуось). Указаны принятые (см. [6]) значения  $A/C$ ,  $B/C$ ,  $P_0$  и  $\gamma_0$ . Путем численных экспериментов установлено, что в рамках модели твердого тела значительные изменения  $P$  и  $\gamma$ , приводящие к последующему значительному изменению  $A_2$ , могут происходить только во время очень тесных сближений ( $d \leq 10 R_E$ ) и при относительно медленном начальном вращении астероида ( $P_0 > 5$  ч).

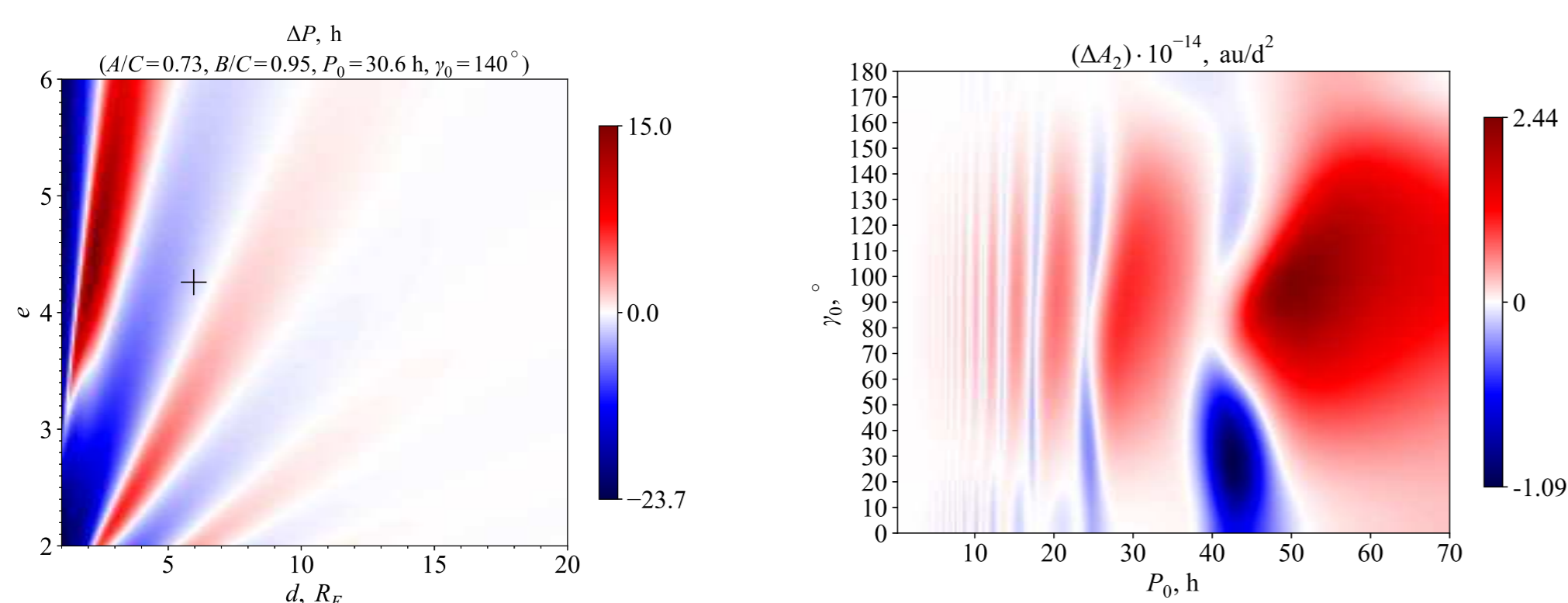


Рис. 1. График слева показывает, как изменение периода вращения  $\Delta P$  астероида Апофис вследствие его сближения с Землей в 2029 году зависит от параметров геоцентрической орбиты  $d = a(e - 1)$  и  $e$ . Крестик указывает положение астероида [6]. График справа иллюстрирует, как  $\Delta A_2$  зависит от начальных значений периода вращения ( $P_0$ ) и угла ( $\gamma_0$ ) между осью вращения и нормалью к плоскости орбиты в случае, когда астероид претерпевает приливную «деформацию» в точке сближения. До сближения отношение моментов инерции  $A/C = 0.73$ ,  $B/C = 0.95$ , но в точке сближения и далее  $A/C = 0.36$ . Параметры орбиты модельного астероида такие же, как у Апофиса.

Известно, что многие известные астероиды описываются моделью «куча щебня» [5]. В этом случае при сближении с планетой возможна приливная деформация фигур, которая существенно скажется на вращательной и затем на орбитальной истории астероида. На правой панели Рис. 1 показан пример изменения  $A_2$  для модельного астероида, похожего

на Апофис (с теми же параметрами). Предполагалось, что в перигеоне геоцентрической орбиты астероид претерпевает деформацию/разрушение с изменением его инерционных параметров: до сближения  $A/C = 0.73$ , после —  $A/C = 0.36$ ;  $B/C = 0.95$  и остается неизменным. Видно, что  $\Delta A_2$  сопоставима с текущим значением [7]  $A_2 = -2.9 \cdot 10^{-14}$  а.е./сут<sup>2</sup> для Апофиса. В численных экспериментах установлено, что во время приливной деформации  $A_2$  астероида может измениться в 2–3 раза и даже изменить направление дрейфа Ярковского. Таким образом, тесное сближение способно привести к значимому скачку значения негравитационного ускорения и соответствующему изменению орбиты.

## Поиск астероидов с аномальными значениями $A_2$

В настоящее время величины ускорения  $A_2$  удается оценить в ходе процедуры улучшения орбиты астероида. Поэтому, если наблюдениями охвачен период времени, в течение которого имели место значимые изменения  $A_2$ , то можно ожидать, что оценка, полученная из анализа астрометрических наблюдений, будет контрастировать с оценкой, ожидаемой исходя из величины диаметра и альbedo астероида. Логично было попробовать поискать такие случаи.

На Рис. 2 представлена зависимость  $|A_2|$  от  $H$  для астероидов из базы данных SBDB<sup>1</sup>. Взяты только астероиды, для которых справедливо неравенство  $|A_2| > 3\sigma$ , то есть астероиды с наиболее надежно определенными значениями  $A_2$ . Видно, что для ряда астероидов (2340 Hathor (1976 UA), 4179 Toutatis (1989 AC), 33342 (1998 WT24), 138175 (2000 EE104), 276033 (2002 AJ129), 363027 (1998 ST27), 437844 (1999 MN), 1995 CR и 2009 UG) имеют место существенные (более  $3\sigma$ ) отклонения  $|A_2|$  от ожидаемой величины. Однако минимальные планетоцентрические расстояния для них превосходят  $100 R_E$ . Это означает, что надо искать другие причины «аномальности» определенных из анализа наблюдений ускорений Ярковского для данных объектов. Большинство этих объектов характеризуется весьма малыми перигелийными расстояниями (вплоть до 0.1 а.е.). Это может приводить к проявлениям сублимационной активности, обеспечивающим значимые изменения  $|A_2|$  помимо явления Ярковского.

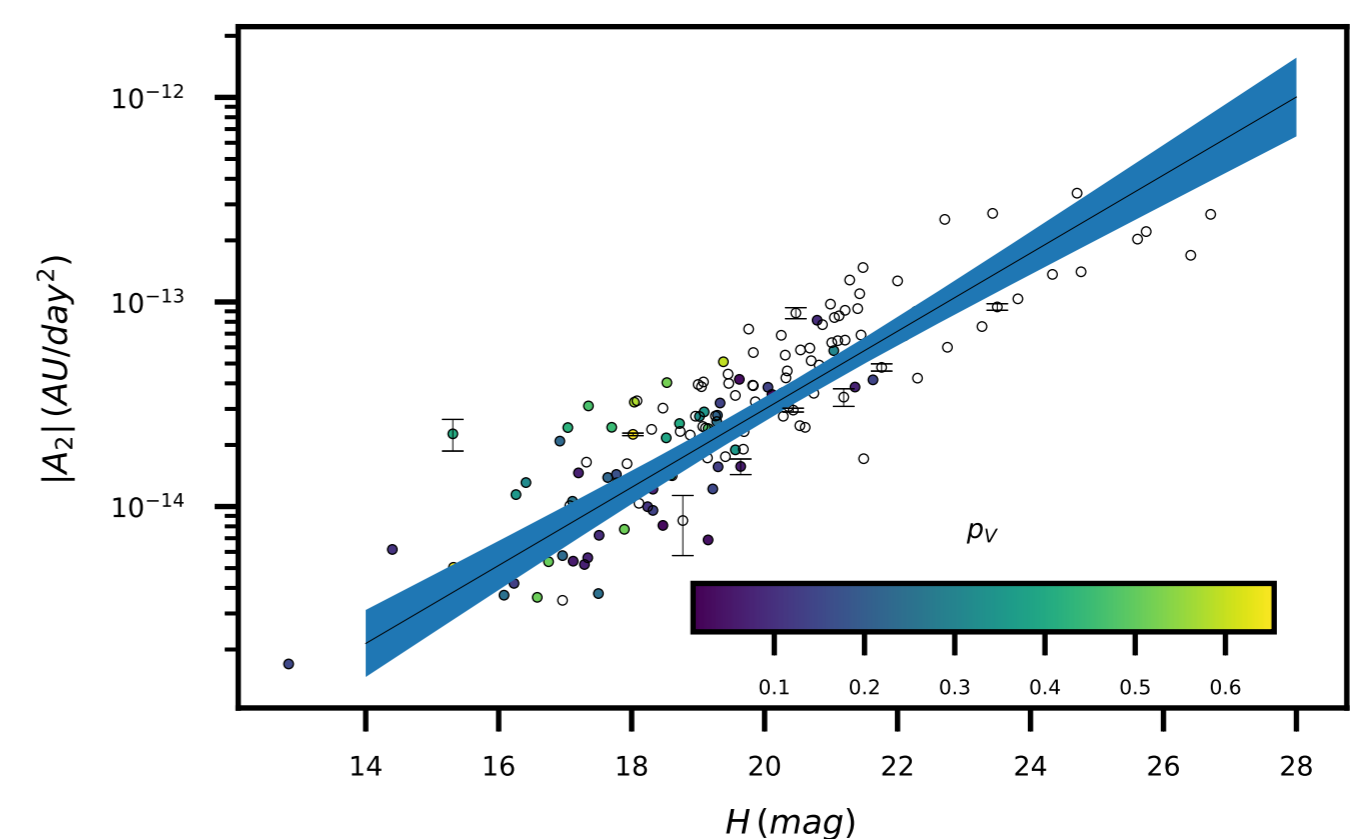


Рис. 2. Зависимость  $|A_2|$  от абсолютной звездной величины для астероидов, для которых надежно оценена величина эффекта Ярковского ( $|A_2| > 3\sigma$ ). Бары ошибок показаны для объектов с «аномальными» значениями  $|A_2|$ .

## Выводы

Мы оценили влияние приливных возмущений на вращательное состояние астероидов при сближении с планетами и соответствующие изменения величин ускорения  $A_2$ , обусловленного явлением Ярковского. Показано, что при сближении до планетоцентрического расстояния порядка 10 радиусов планеты и при относительно медленном вращении астероида (период более 5 часов) эффект будет весьма заметен. Это порождает неопределенности в предвычислении обстоятельств последующих сближений астероидов с планетой, если какое-либо из сближений удовлетворяет вышеуказанным требованиям. Данный вывод справедлив в твердотельном приближении. Деформации фигур астероидов, описываемых моделью «куча щебня», могут дополнительно влиять на вращательные параметры, делая картину еще более размытой. Попытка выделить астероиды с аномальными значениями  $A_2$  показала, что текущие оценки этого параметра для нескольких астероидов действительно сильно отличаются от ожидаемых. Однако геоцентрические расстояния для них оказались слишком большими, чтобы объяснить аномалии приливными эффектами.

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

## Список литературы

1. Ярковский, И.О., 1901, Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. Брянск : Тип. Юдина.
2. Vokrouhlicky, D., Milani, A., Chesley, S.R. 2000, Icarus, v. 148, pp. 118–138.
3. Marsden, B.G., Sekanina, Z., Yeomans, D.K., 1973, Astronomical Journal, v. 78, pp. 211–225.
4. Lobanova, K.S., Melnikov, A.V. 2024, Solar System Research, v. 58, Issue 2, pp.208–219.
5. Chapman, C. 1977, IAU Colloq., v. 39, pp. 265–275.
6. Pravec, P., Scheirich, P., Ďurech, J., et al. 2014, Icarus, v. 233, pp.48–60.
7. Pérez-Hernández, J.A., Benet, L. 2022, Communications Earth and Environment, v. 3, id. 10.

<sup>1</sup>[https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb\\_lookup.html](https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html)