



Влияние скорости вращения и фигуры астероида на величину возмущений в его вращательной динамике при тесном сближении с Землей

К.С. Лобанова^{1,2}, А.В. Мельников^{1*}

¹ ГАО РАН, ²СПбГУ

Поступила в редакцию 22 апреля 2024 / Принята к публикации 1 мая 2024

Аннотация

Путем численных экспериментов изучено влияние скорости собственного вращения, ориентации оси вращения и параметров фигуры астероида на величину возмущений в его вращательной динамике, возникающих при тесном сближении с Землей. Рассмотрено два случая: 1) астероид (99942) Апофис с относительно медленным вращением (период ≈ 30 ч) и 2) астероид 2012 ТС4, обладающий быстрым вращением (период ≈ 12 мин). Установлено, что в случае астероидов с медленным вращением возмущения могут быть велики: в случае Апофиса при сближении с Землей в 2029 году изменения периода вращения ΔP могут достичь десятков часов, а отклонения в ориентации оси вращения $\Delta\gamma$ — десятков градусов. Для астероидов с быстрым вращением возмущения весьма малы: в случае астероида 2012 ТС4 при его сближении с Землей в 2017 году $|\Delta P| < 10^{-5}$ мин, $|\Delta\gamma| < 0.01^\circ$. Показано, что для астероидов с медленным вращением погрешность в определении параметров фигуры астероида (моментов инерции) может приводить к заметным неточностям в оценке величин возмущений. Неопределенность знания параметров фигуры астероида с быстрым вращением практически не влияет на оценку возмущений в его вращательной динамике. В случае Апофиса, изменение скорости вращения и ориентации оси вращения в ходе предстоящего в 2029 году сближения с Землей может привести к уменьшению величины параметра A_2 , характеризующего эффект Ярковского, до $-1.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², либо к увеличению до $-3.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Возмущения во вращательной динамике астероида 2012 ТС4 при его сближении с Землей в 2017 году не оказали влияния на величину параметра A_2 .

ключевые слова: астероиды, сближающиеся с планетами; вращательная динамика; эффект Ярковского; (99942) Апофис; 2012 ТС4

Введение

В настоящей работе мы исследовали зависимость величин возмущений, возникающих во вращательной динамике астероидов при тесных сближениях с Землей, от скорости вращения, ориентации оси вращения и параметров, характеризующих фигуру астероида. Эмпирическая зависимость скорости собственного вращения астероида от его размера (диаметра D), представленная, например в (Hestroffer и др., 2019; Ни и др., 2021), показывает, что с уменьшением размера наблюдается увеличение скорости. Периоды вращения P астероидов диаметром $D < 100$ м обычно имеют значения от нескольких часов до десятков минут. Минутные периоды имеют астероиды $D \sim 10$ м, вероятно представляющие собой монолитные тела. Поскольку большую часть астероидов, сближающихся с Землей, (АСЗ) представляют собой тела малых размеров, важно исследовать то, как сближение влияет на их вращательную динамику.

В наших предыдущих работах (Лобанова и Мельников, 2023a; Лобанова и Мельников, 2023b) путем численного моделирования динамики астероида (99942) Апофис изучались возмущения,

*e-mail: melnikov@gaoran.ru

которые будут иметь место в его вращательном движении при очередном сближении с Землей в 2029 году. Было установлено, что период вращения Апофиса и ориентация оси вращения могут претерпеть существенные изменения, которые приведут к изменению величины эффекта Ярковского, действующего в орбитальной динамике астероида. Негравитационные эффекты: давление солнечного излучения, эффект Ярковского (ЭЯ) и YORP-эффект (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack) играют заметную роль в долговременной динамике малых астероидов. Причем с уменьшением размера астероида значимость этих эффектов возрастает. Влияние сближений с планетами для ряда астероидов (в том числе и с $D < 100$ м) на их вращательную динамику и величину ЭЯ было рассмотрено ранее в (Мартюшева и Мельников, 2023; Martyusheva и Melnikov, 2023; Melnikov, 2022).

Одной из целей данной работы было выявление отличий во влиянии тесного сближения с Землей на вращательную динамику и величину ЭЯ медленно вращающихся астероидов ($D = 100–1000$ м, $P = 10–100$ ч) и весьма малых астероидов с быстрым вращением ($D \sim 10$ м, $P < 1$ ч). Мы рассмотрели два АСЗ: 1) относительно крупный ($D \approx 340$ м) астероид (99942) Апофис с медленным вращением ($P \approx 30$ ч) и 2) небольшой ($D \approx 10$ м) астероид 2012 ТС4, обладающий быстрым вращением ($P \approx 12$ мин). В случае Апофиса проводилось моделирование его сближения с Землей в 2029 году, для 2012 ТС4 — сближения, имевшего место в 2017 году. Отметим, что геоцентрические орбиты, которыми можно аппроксимировать движения астероидов в окрестности точки сближения с Землей, в рассматриваемых событиях имели близкие параметры. Существенно отличались лишь параметры, характеризующие вращения АСЗ и их фигуры. Вращательная динамика Апофиса ранее рассматривалась различными исследователями (Лобанова и Мельников, 2023а; Лобанова и Мельников, 2023b; Scheeres, Marzari и Rossi, 2004; Pravec, Scheirich и др., 2014; Souchay, Souami и др., 2014; Souchay, Lhotka и др., 2018; Scheeres, 2022; Benson, Scheeres и Moskovitz, 2020; Benson, Scheeres, M. Brozović и др., 2023). Динамика астероида 2012 ТС4 детально изучалась в работе (Lee и др., 2021).

Работа имеет следующую структуру. Сначала дано описание ЭЯ и определение характеризующего его параметра A_2 . Далее приводятся постановка задачи и методы исследования, даны характеристики исследуемых астероидов. Затем идет основная часть работы, где получены оценки возмущений во вращательном движении астероидов при их сближении с Землей и рассмотрено влияние возмущений на величину A_2 . В конце работы приведены основные результаты.

Возмущения во вращательной динамике астероидов Апофис и 2012 ТС4

Эффект Ярковского и параметр A_2

Эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Radzievskii, 1952; Rubincam, 1995; Rubincam, 1998; Rubincam, 2000; Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický, Milani и Chesley, 2000; Vokrouhlický, Bottke и др., 2015) играет существенную роль в вековой орбитальной динамике малых астероидов. Суть ЭЯ состоит в возникновении негравитационного ускорения в орбитальном движении, вызываемого анизотропным переизлучением солнечной радиации поверхностью вращающегося астероида. Одно из проявлений действия ЭЯ — вековое изменение большой полуоси астероида, соответствующее изменению величины среднего движения астероида. Краткая теория для оценки величины ЭЯ приведена нами в (Лобанова и Мельников, 2023b). Там же для астероида Апофис даны графики теоретических зависимостей величины da/dt , характеризующей скорость изменения большой полуоси, от P и γ , где γ — угол между осью вращения и нормалью к плоскости орбиты. Для построения зависимостей использовалась теория, подробно изложенная в работе (Farinella, Vokrouhlický и Hartmann, 1998). В частности, величина da/dt рассчитывалась по формуле

$$\frac{da}{dt} = \frac{2f_Y}{n}, \quad (1)$$

где f_Y — касательная компонента возмущающей силы, n — среднее движение астероида. Орбита астероида полагалась круговой.

В настоящей работе перейдем от величины da/dt к параметру A_2 , связь которого с da/dt дается следующей формулой (Farnocchia, Chesley, Vokrouhlický и др., 2013):

$$\frac{da}{dt} = \frac{2a\sqrt{1-e^2}}{nr} A_2 g(r), \quad (2)$$

где $g(r)$ — некоторая функция гелиоцентрического расстояния r . Авторы (Farnocchia, Chesley, Vokrouhlický и др., 2013) полагают $g(r) = (r_0/r)^d$, где $r_0 = 1$ а.е. — нормализующий параметр, а значение показателя d для большинства АСЗ заключено в пределах от 2 до 3 и слабо влияет на величину da/dt (см. там же). Обычно (см., например, Farnocchia, Chesley, Chodas и др., 2013) принимают $d = 2$. Мы поступим так же.

В случае круговой орбиты имеем $e = 0$ и $r = a$. Тогда формула (2) принимает вид

$$\frac{da}{dt} = \frac{2}{n} A_2 g(r), \quad (3)$$

а с учетом (1) получаем

$$A_2 = \frac{f_Y}{g(r)} = f_Y \cdot \left(\frac{a}{1 \text{ а.е.}} \right)^2. \quad (4)$$

Заметим, что параметр A_2 является функцией физических параметров астероида (см. Farnocchia, Chesley, Chodas и др., 2013) и не зависит от степени эксцентricности орбиты. Значение величины A_2 для астероида, если она определена, приводится на сайте NASA JPL. Далее мы рассмотрим влияние возмущений во вращательной динамике астероида при его тесном сближении с Землей на величину параметра A_2 .

Методика и основные предположения

Подробное описание методики моделирования и уравнения движения приведены в наших предыдущих работах (Лобанова и Мельников, 2023a; Лобанова и Мельников, 2023b). Далее даны основные предположения и краткое описание алгоритма моделирования. Численные эксперименты по моделированию динамики АСЗ проводились при помощи разработанного нами программного комплекса на основе интегратора DOP853, реализующего явный метод Рунге–Кутты 8-го порядка. Детальная информация об интеграторе приведена в (Hairer, Norsett и Wanner, 1993).

Мы предполагали, что астероид представляет собой твердое тело, его фигура аппроксимируется трехосным эллипсоидом с большими полуосями $a > b > c$. Земля рассматривалась как гравитирующая точка. Вращательная динамика астероида моделировалась в пределах геоцентрической сферы радиусом $100 R_E$, где $R_E = 6371$ км — средний радиус Земли. Выбранный нами размер области, в которой исследуется динамика астероида при его сближении с планетой, типичен для рассматриваемой задачи (Melnikov, 2022; Araujo и Winter, 2014; Richardson, Bottke и Love, 1998; Boldrin, Araujo и Winter, 2020). В начальный момент времени (при достижении внешней границы сферы) вращение астероида происходит относительно оси, совпадающей с осью максимального момента инерции (вокруг оси c), с периодом вращения P . Ориентация оси вращения относительно нормали к плоскости орбиты в начальный момент времени задавалась углом $\gamma \in [0^\circ, 180^\circ]$. При этом значения $\gamma < 90^\circ$ соответствуют проградному (совпадающему с направлением орбитального движения) вращению астероида, $\gamma > 90^\circ$ — ретроградному.

Как отмечалось выше, в настоящей работе мы моделировали сближение с Землей астероида 2012 TC4, произошедшее в 2017 году. В случае Апофиса рассматривалось его очередное сближение с Землей в 2029 году. Проведенный в (Лобанова и Мельников, 2023a) анализ показал, что орбитальное движение Апофиса в окрестности точки сближения с Землей можно хорошо аппроксимировать невозмущенной гиперболической геоцентрической орбитой. В работе (Лобанова и Мельников, 2023a) дана методика построения такой орбиты на основе эфемерид NASA JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>). Для астероида 2012 TC4 предположение о возможности использования при моделировании фиксированной орбиты оказалось также справедливо. Принятые при моделировании параметры орбит, инерционные параметры астероидов и параметры

Таблица 1: Принятые при моделировании орбитальные и физические параметры астероидов (99942) Апофис и 2012 ТС4. Данные о величинах моментов инерции и периоде вращения (99942) Апофиса взяты из (Pravec, Scheirich и др., 2014), астероида 2012 ТС4 — из (Lee и др., 2021). Значения d и e получены (см. подробнее Лобанова и Мельников (2023a)) на основе эфемерид NASA JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>).

Астероид	d/R_E	e	A/C	B/C	P , ч	γ , °
(99942) Апофис	4.26	5.96	0.73	0.95	30.6	140
2012 ТС4	6.36	7.86	0.42	0.81	0.20 (≈ 12 мин)	105 (160)

вращения до сближения указаны в Табл. 1. А именно: величина эксцентриситета e и минимальное расстояние $d = a(e - 1)$ (перицентрическое расстояние), выраженное в средних радиусах Земли R_E ; отношения главных центральных моментов инерции — A/C и B/C ($A < B < C$); период вращения астероида P и γ — угол между нормалью к плоскости орбиты и осью вращения. Отметим, что в случае Апофиса указанные параметры орбиты отличаются от приведенных в (Лобанова и Мельников, 2023a; Лобанова и Мельников, 2023b), поскольку в настоящей работе мы использовали обновленные данные эфемериды NASA JPL. В случае астероида 2012 ТС4 мы рассматривали два возможных значения γ , а для Апофиса — одну величину γ . Объясним далее причины такого выбора.

Угол наклона оси вращения γ в случае Апофиса и 2012 ТС4

На основе радарных (Marina Brozović и др., 2018) и фотометрических (Pravec, Scheirich и др., 2014) наблюдений астероида Апофис были получены оценки эклиптической долготы λ и широты β углового момента вращения Апофиса на эпоху J2000. С помощью этих оценок нами был рассчитан угол наклона γ оси вращения Апофиса относительно нормали к плоскости его орбиты, определенной на основе методики, представленной в работе (Лобанова и Мельников, 2023a). Результаты приведены в Табл. 2. В случае астероида 2012 ТС4 в (Lee и др., 2021) на основе фотометрических наблюдений установлено: $\lambda = 103^\circ$ и $\beta = -88.5^\circ$, что соответствует $\gamma = 160^\circ$, согласно нашим расчетам.

Таблица 2: Оценка угла наклона γ оси вращения астероида Апофис относительно нормали к плоскости его орбиты по результатам наблюдений (Pravec, Scheirich и др., 2014; Marina Brozović и др., 2018).

Наблюдения	λ , °	β , °	γ , °
фотометрические	250	-75	148
радарные	247	-59	132

Значение γ можно оценить на основе величины A_2 , построив теоретическую зависимость $A_2(\gamma)$ и определив при помощи нее значение γ , соответствующее величине A_2 , известной на основе анализа наблюдательных данных. На Рис. 1 представлены построенные нами зависимости $A_2(\gamma)$ и $A_2(P)$ для Апофиса и астероида 2012 ТС4. В случае Апофиса аналогичные зависимости для величины da/dt от P и γ представлены в работе (Лобанова и Мельников, 2023b). Величина A_2 определялась по формуле (4), где f_Y вычислялась при помощи теории, приведенной в (Лобанова и Мельников, 2023b).

Как видно из Рис. 1, величине A_2 , полученной на основе наблюдательных данных, и представленной на сайте NASA JPL, соответствует значение $\gamma \approx 140^\circ$. Указанное значение γ попадает в интервал между точечными оценками, приведенными в Табл. 2. Из-за большой неопределенно-

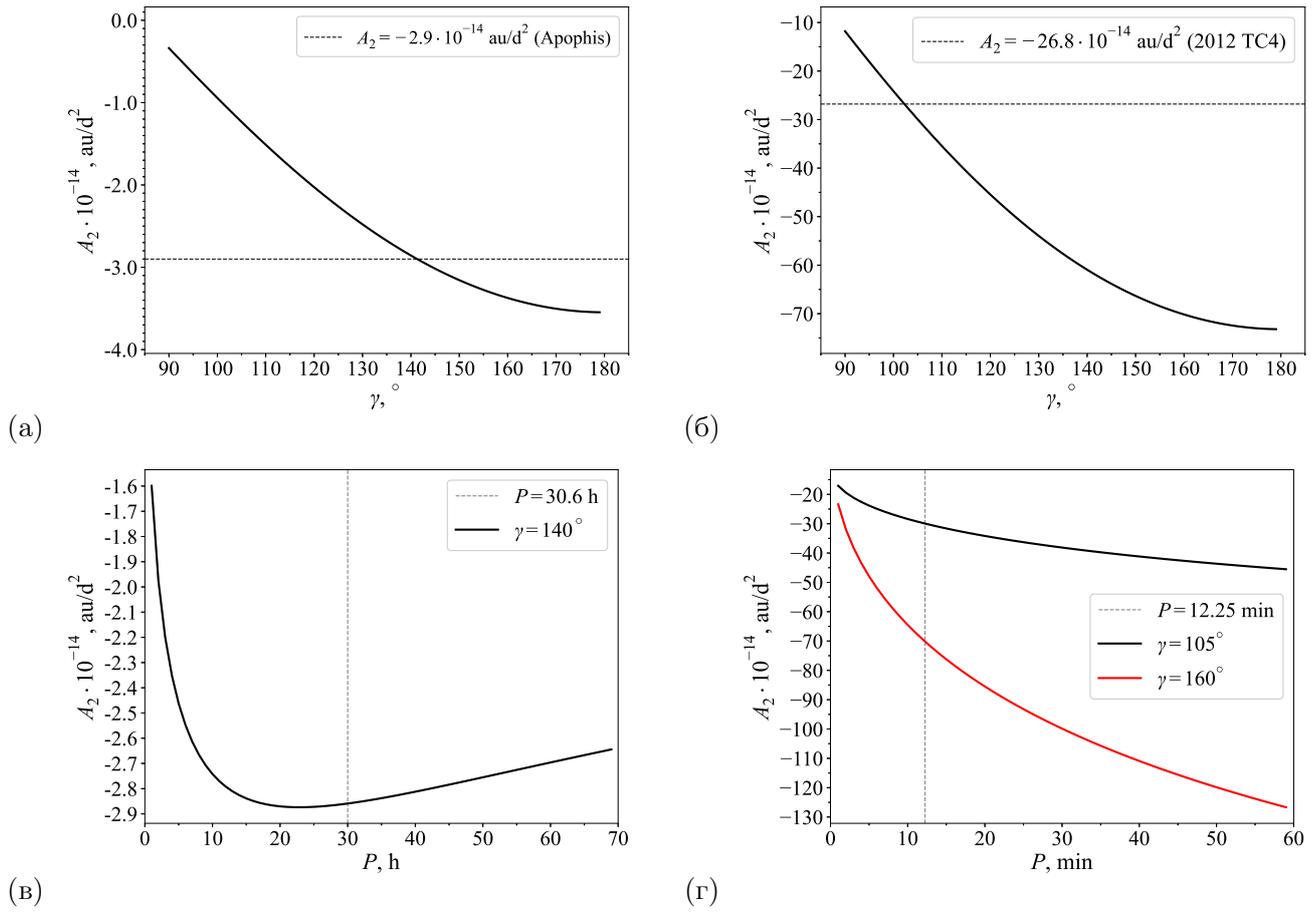


Рис. 1: (а) Зависимость величины A_2 от угла наклона оси вращения астероида γ в случае Апофиса. (б) То же для астероида 2012 ТС4. (в) Зависимость величины A_2 от периода вращения астероида P в случае Апофиса для $\gamma = 140^\circ$. (г) То же для астероида 2012 ТС4 для $\gamma = 105^\circ$ и 160° . Штриховые горизонтальные (панели (а) и (б)) и вертикальные (панели (в) и (г)) линии соответствуют данным (Pravec, Scheirich и др., 2014; Lee и др., 2021).

сти в ориентации оси вращения мы далее полагали для Апофиса $\gamma = 140^\circ$. В случае астероида 2012 ТС4 принятая для него величина $A_2 = -26.8 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² соответствует $\gamma = 105^\circ$. Для значения $\gamma = 160^\circ$, определенного на основе фотометрических наблюдений, $A_2 = -70 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Из-за такого существенного отличия оценок γ мы использовали для астероида 2012 ТС4 оба возможных варианта.

Влияние параметров вращения на ΔP и $\Delta \gamma$

Как и в (Лобанова и Мельников, 2023а; Лобанова и Мельников, 2023б), путем численного интегрирования уравнений вращательного движения на множестве (P_0, γ_0) возможных начальных (до сближения) значений P и γ были определены величины: $\Delta P = P_{\text{final}} - P_0$ и $\Delta \gamma = \gamma_{\text{final}} - \gamma_0$, где нижний индекс «final» соответствует величинам после момента сближения (при удалении астероида от геоцентра на расстояние $100 R_E$). Значения P_0 и γ_0 задавались на равномерной сетке, определенной следующим образом: 1) для Апофиса $P_0 \in [1, 70]$ ч с шагом в 15 мин, $\gamma_0 \in [0^\circ, 180^\circ]$ с шагом 0.5° ; 2) для 2012 ТС4 — $P_0 \in [0, 60]$ мин с шагом в 30 секунд, $\gamma_0 \in [0^\circ, 180^\circ]$ с шагом в один градус.

На Рис. 2 и 3 представлены найденные изменения периода и ориентации оси вращения Апофиса и 2012 ТС4 из-за их сближений с Землей. Схожие зависимости $\Delta P(P_0, \gamma_0)$ и $\Delta \gamma(P_0, \gamma_0)$ для случая сближения Апофиса с Землей в 2029 году были получены ранее в работах Лобанова и

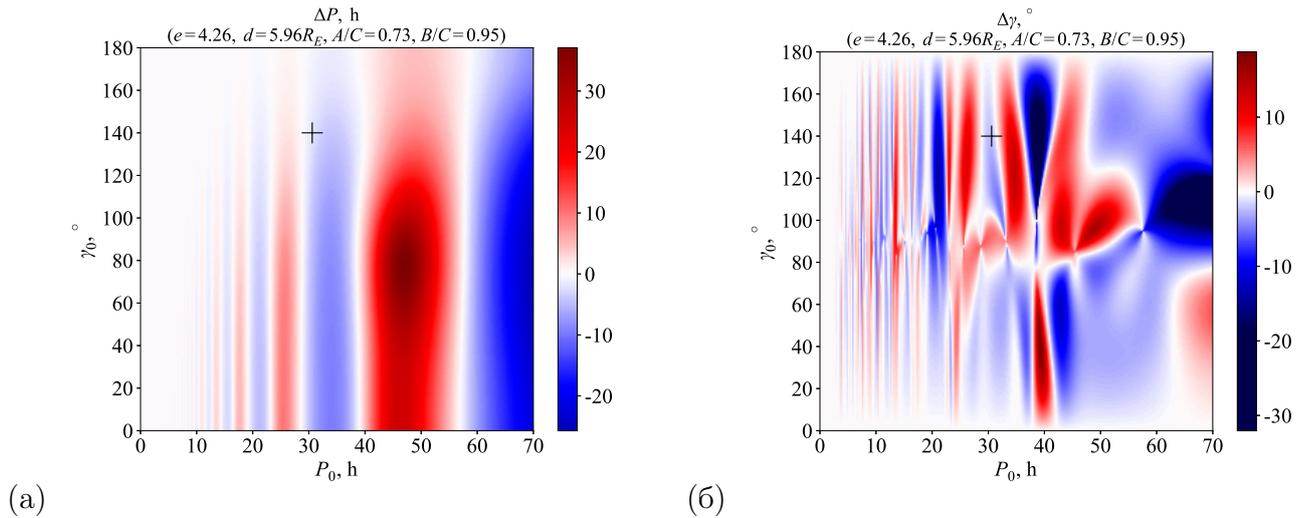


Рис. 2: (а) Зависимость величины ΔP изменения периода вращения Апофиса из-за сближения с Землей в 2029 году от возможных начальных (до момента сближения) значений периода вращения P_0 и отклонения оси вращения астероида от нормали к плоскости орбиты γ_0 . (б) Зависимость величины $\Delta\gamma$ изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения Апофиса от нормали к плоскости орбиты, от P_0 и γ_0 . Крестиком указано положение Апофиса, согласно данным из Табл. 1.

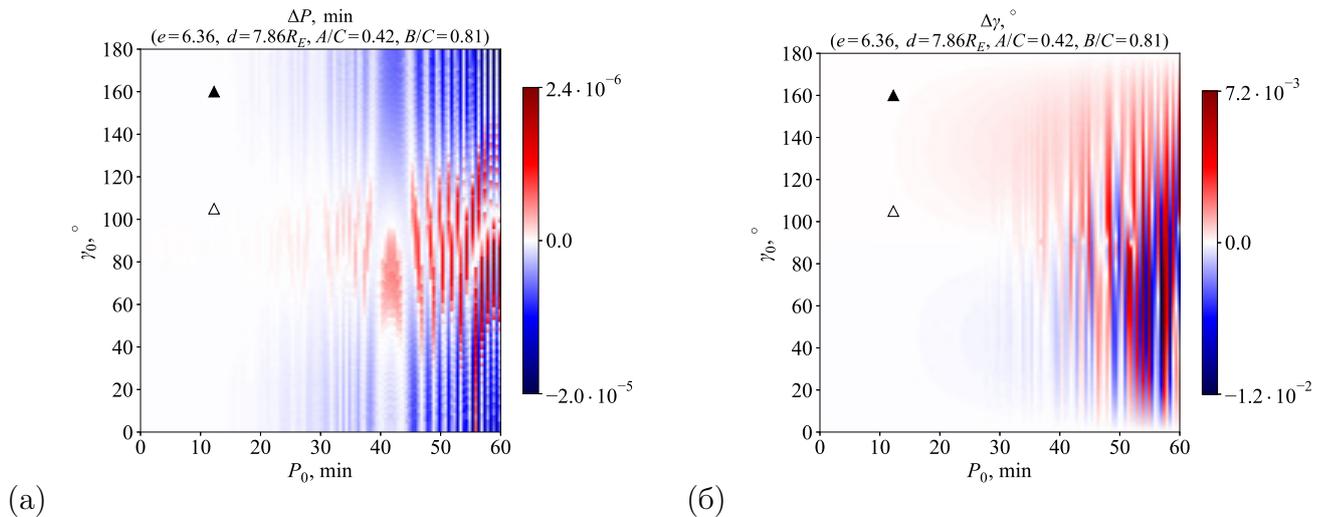


Рис. 3: (а) Зависимость величины ΔP изменения периода вращения астероида 2012 TC4 из-за сближения с Землей в 2017 году от возможных начальных (до момента сближения) значений периода вращения P_0 и отклонения оси вращения астероида от нормали к плоскости орбиты γ_0 до момента сближения. (б) Зависимость величины $\Delta\gamma$ изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения астероида 2012 TC4 от нормали к плоскости орбиты, от P_0 и γ_0 . Треугольниками указаны возможные положения астероида, согласно данным из Табл. 1.

Мельников (2023a) и Лобанова и Мельников (2023b). В настоящей работе указанные зависимости построены с более высоким разрешением и для орбиты, основанной на современных данных с сайта NASA JPL.

Как в случае Апофиса, так и для 2012 TC4 на диаграммах присутствуют чередующиеся при изменении P_0 области, где происходит замедление ($\Delta P > 0$) либо ускорение ($\Delta P < 0$) вращения астероида, и имеют место изменения в ориентации оси вращения. Обсуждение выявленных на

диаграммах деталей проводилось в Лобанова и Мельников (2023a), где указано, что положения локальных максимумов и минимумов значений ΔP и $\Delta\gamma$ в основном определяются параметрами орбиты.

Согласно (Лобанова и Мельников, 2023b), период вращения Апофиса из-за сближения в 2029 году может как уменьшиться на 20 ч, так и увеличиться на 40 ч относительно текущей величины $P = 30.6$ ч. Наиболее вероятным является изменение P на 10–15 ч. Амплитуда возмущений в ориентации оси вращения Апофиса может достигать 30° . Представленные на Рис. 2 результаты моделирования вращательной динамики Апофиса для других значений параметров орбиты и с большим разрешением по начальным данным согласуются с указанными выводами. Отметим, что изменение параметров орбиты (величины e) привело к уменьшению максимальной величины ΔP до 35 ч.

В случае астероида 2012 TC4 при его сближении с Землей в 2017 году возмущения во вращательном движении были весьма малы. Согласно Рис. 3 для астероида 2012 TC4 имеем: $|\Delta P| < 10^{-5}$ мин, $|\Delta\gamma| < 0.01^\circ$. Таким образом, тесное сближение с Землей практически не оказало влияния на вращательную динамику астероида. Отметим, что в работе Lee и др. (2021) указано, что периоды вращения 2012 TC4, определенные во время сближений в 2012 году и 2017 году, отличались почти на 0.4 мин. Ускорение вращения астероида могло быть вызвано действием YORP-эффекта (см. обсуждение там же).

Влияние параметров фигуры на ΔP и $\Delta\gamma$

Фигуры астероидов обычно известны с большими погрешностями, а для малых астероидов часто имеются лишь оценки диаметра, полученные на основе абсолютной звездной величины астероида при определенных упрощениях. Для изучаемых в настоящей работе астероидов имеются радарные наблюдения и построены аппроксимации их фигур (Pravec, Scheirich и др., 2014; Lee и др., 2021). Однако моменты инерции (значения A/C и B/C), знание которых необходимо для точного моделирования гравитационного взаимодействия астероида и планеты при тесном сближении, определены на основе построенных моделей фигур в предположении однородной плотности астероида. Поэтому погрешность в оценке A/C и B/C может быть существенной. Мы изучили влияние фигуры астероида, предполагая ее трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$, на ΔP и $\Delta\gamma$. А именно, для астероидов Апофис и 2012 TC4 были построены и проанализированы диаграммы $\Delta P(c/b, b/a)$ и $\Delta\gamma(c/b, b/a)$ для всех возможных значений $0 < c/b, b/a \leq 1$.

Для случая трехосного эллипсоида однородной плотности имеем (Kourgianov и Shevchenko, 2006):

$$\frac{c}{b} = \sqrt{\frac{-1 + A/C + B/C}{1 + A/C - B/C}}, \quad \frac{b}{a} = \sqrt{\frac{1 + A/C - B/C}{1 - A/C + B/C}}. \quad (5)$$

Варьируя параметры c/b и b/a , мы рассмотрим все возможные значения A/C и B/C .

На Рис. 4 и 5 представлены диаграммы, построенные для Апофиса и 2012 TC4. Видно, что в случае Апофиса неопределенности в знании величин моментов инерции могут приводить к погрешностям в оценке ΔP , составляющим несколько часов. Отметим, что на диаграмме для ΔP нет явных максимумов и минимумов, зависимость $\Delta P(c/b, b/a)$ гладкая. На диаграмме для $\Delta\gamma$ присутствуют хорошо выраженные максимумы и минимумы. Погрешность оценки $\Delta\gamma$ при численном моделировании сближения Апофиса с Землей, если его реальные моменты инерции заметно отличаются от определенных в (Pravec, Scheirich и др., 2014), может составлять десятки градусов. Например, при $c/b = 0.7$, $b/a = 0.2$, согласно Рис. 4 имеем $\Delta\gamma \approx -40^\circ$, в то время как данным (Pravec, Scheirich и др., 2014) соответствует $\Delta\gamma \approx -5^\circ$.

Стоит ожидать, что поведение, аналогичное представленному на Рис. 4, присуще и другим астероидам с медленным вращением. Для астероидов с быстрым вращением, примером которых является 2012 TC4, неопределенность в знании фигуры астероида не оказывает существенного влияния на оценки величин возмущений, возникающих во вращательной динамике. Согласно Рис. 5, в случае 2012 TC4 допустимым (из-за погрешностей их определения) вариациям c/b и

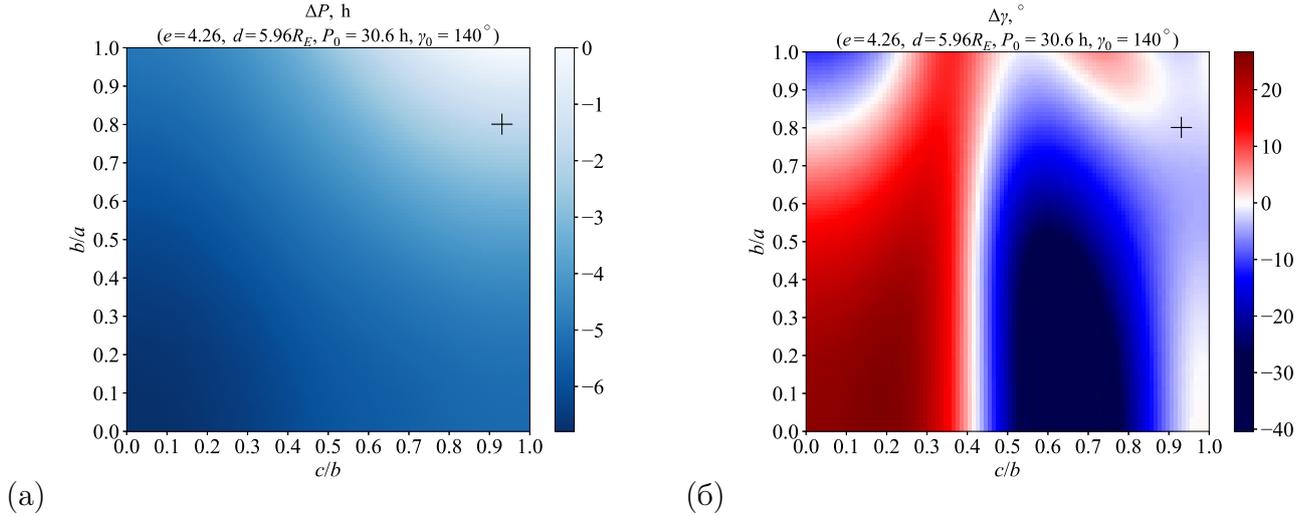


Рис. 4: (а) Зависимость величины ΔP изменения периода вращения Апофиса из-за сближения с Землей в 2029 году от параметров c/b и b/a , характеризующих фигуру астероида. (б) Зависимость величины $\Delta\gamma$ изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения Апофиса от нормали к плоскости орбиты, от c/b и b/a . Принятые параметры орбиты (e, d) и начальные параметры вращения астероида (P_0, γ_0) указаны на рисунке. Крестиком отмечено положение Апофиса, согласно (Pravec, Scheirich и др., 2014).

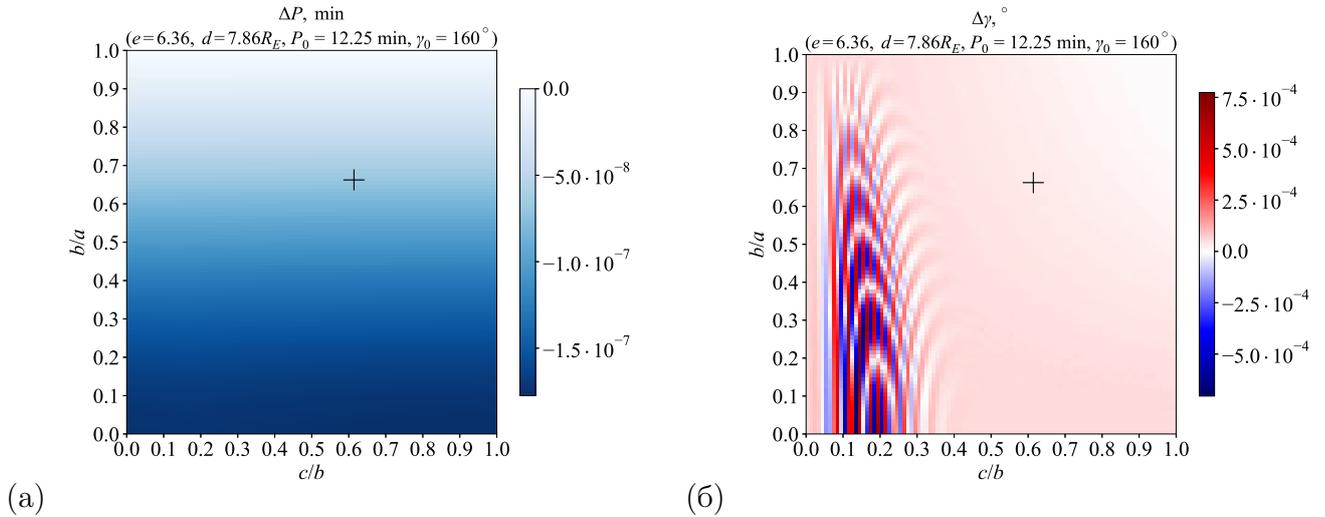


Рис. 5: (а) Зависимость величины ΔP изменения периода вращения астероида 2012 TC4 из-за сближения с Землей в 2017 году от параметров c/b и b/a , характеризующих фигуру астероида. (б) Зависимость величины $\Delta\gamma$ изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения астероида 2012 TC4 от нормали к плоскости орбиты, от c/b и b/a . Принятые параметры орбиты (e, d) и начальные параметры вращения астероида (P_0, γ_0) указаны на рисунке. Крестиком указано положения астероида, согласно (Lee и др., 2021).

b/a соответствуют $|\Delta P| < 10^{-7}$ мин и $|\Delta\gamma| < 0.001^\circ$, т.е. пренебрежимо малым по сравнению с периодом ($P = 12.25$ мин) вращения астероида величинам. Отметим, что в случае 2012 TC4 приведены диаграммы только для $\gamma_0 = 160^\circ$, поскольку диаграммы при $\gamma_0 = 105^\circ$ имеют схожий характер, а амплитуда изменений ΔP и $\Delta\gamma$ имеет тот же порядок.

Зависимость величины A_2 от P и γ

На Рис. 6 для обоих исследуемых астероидов приведены зависимости величины A_2 от P и γ . На рисунке указаны положения астероидов, согласно Табл. 1. В случае Апофиса видно, что величина A_2 слабо зависит от вариации P . Возмущения из-за сближения Апофиса с Землей в 2029 году, которым соответствует $\Delta P = 10\text{--}15$ ч, приведут к изменениям A_2 на несколько процентов (см. также Benson, Scheeres, M. Brozović и др. (2023)). Если предположить, что $\Delta\gamma = 30^\circ$, то изменения A_2 будут существенны — возможно увеличение A_2 до $-3.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², либо уменьшение до $-1.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут².

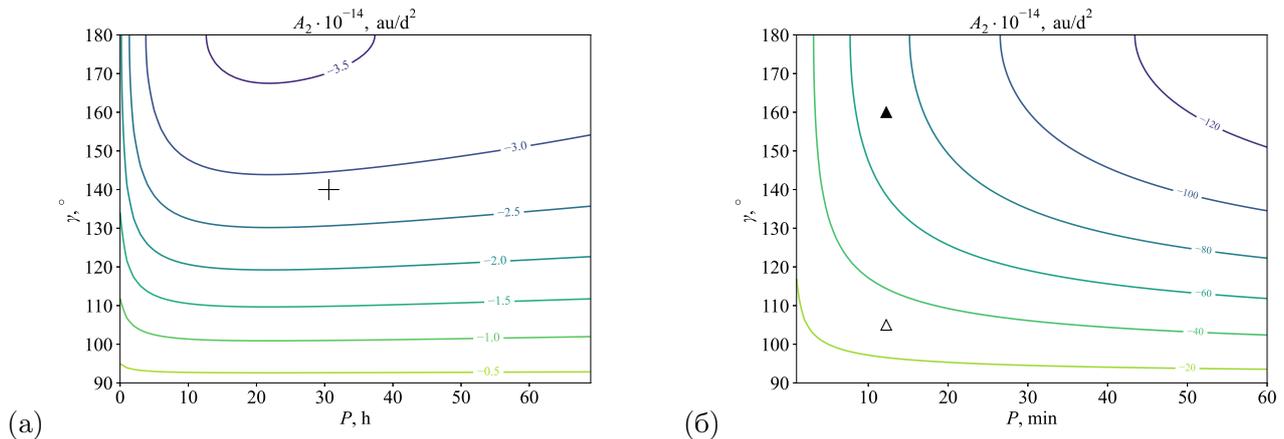


Рис. 6: (а) Зависимость величины A_2 для Апофиса от периода его вращения P и угла наклона оси вращения γ . Крестиком указано текущее положение Апофиса. (б) То же для астероида 2012 ТС4. Треугольниками указаны возможные положения 2012 ТС4 (см. обсуждение в тексте). Линии уровня соответствуют указанным на них значениям A_2 .

Согласно Рис. 6, в случае 2012 ТС4 вариации параметров, характеризующих вращение астероида, существенно влияют на значение A_2 . Поэтому на Рис. 6 мы указали два возможных положения 2012 ТС4 для разных значений γ (см. Табл. 1), которым соответствуют значения $A_2 = -70 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² и $A_2 = -27 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут² (согласно данным NASA JPL). Проведенные нами численные эксперименты по исследованию возмущений во вращательном движении 2012 ТС4 при его сближении с Землей в 2017 году показали пренебрежимо малые изменения P и γ . Поэтому сближение не оказало влияния на величину A_2 . Тем не менее необходимо отметить, что при $\gamma = 160^\circ$ даже небольшие изменения периода и угла наклона оси вращения астероида 2012 ТС4, вызванные, например, внешним воздействием (Daly и др., 2023), могут существенно сказаться на величине A_2 . При $\gamma = 105^\circ$ вариации P , как и в случае Апофиса, влияют на A_2 незначительно. Из Рис. 6 видно, что чем быстрее вращается астероид, тем более существенное влияние на величину ЭЯ и, соответственно, на орбитальную динамику будут оказывать возмущения во вращательной динамике астероида.

Выводы

Путем численных экспериментов изучено влияние величины скорости собственного вращения и параметров фигуры астероида на величину возмущений в его вращательной динамике, возникающих при тесном сближении с Землей, и влияние возмущений на величину ЭЯ (значение параметра A_2). Рассмотрено два случая: 1) астероид (99942) Апофис с относительно медленным вращением (период $P \approx 30$ ч) и 2) астероид 2012 ТС4, обладающий быстрым вращением ($P \approx 12$ мин).

Для уточненных (см. NASA JPL) параметров орбиты Апофиса установлено, что при сближении с Землей в 2029 году изменения периода вращения ΔP могут достигать десятков часов,

а отклонения в ориентации оси вращения $\Delta\gamma$ — десятков градусов. Схожие результаты были получены нами ранее (Лобанова и Мельников, 2023а; Лобанова и Мельников, 2023b) для других орбитальных параметров Апофиса. Указанные значения ΔP и $\Delta\gamma$, вероятно, характерны для астероидов с медленным вращением (период $P > 10$ ч), что согласуется с выводами (Лобанова и Мельников, 2023а; Лобанова и Мельников, 2023b; Melnikov, 2022; Scheeres, Marzari и Rossi, 2004; Boldrin, Araujo и Winter, 2020; Scheeres, Ostro и др., 2000).

Для астероидов с весьма быстрым вращением (период $P < 1$ ч) возмущения будут весьма малы (см. Lee и др., 2021). Например, в случае астероида 2012 TC₄ имеем $|\Delta P| < 10^{-5}$ мин, $|\Delta\gamma| < 0.01^\circ$. Отметим, что астероиды с быстрым вращением представляют собой, очевидно, монолитные тела с $D < 10$ м. Более крупные тела, а также астероиды типа “rubble pile” разрушаются при достижении критической отметки, соответствующей $P \approx 2.2$ ч (см. подробнее Ну и др. (2021), Harris (1996) и Pravec и Harris (2000)).

Рассмотрено влияние погрешностей в оценке моментов инерции астероида на оценки величин возмущений, возникающих во вращательном движении при тесном сближении астероида с Землей. Установлено, что в случае Апофиса неопределенности в знании величин моментов инерции при численном моделировании его сближения с Землей в 2029 году могут приводить к погрешности в оценке ΔP , достигающей нескольких часов. Погрешность оценки $\Delta\gamma$ для Апофиса, если его реальные моменты инерции заметно отличаются от определенных в (Pravec, Scheirich и др., 2014), может составлять десятки градусов. Для астероидов с весьма быстрым вращением, как показано нами в случае 2012 TC₄, неопределенность в знании моментов инерции не оказывает существенного влияния на оценки величин возникающих возмущений во вращательной динамике.

В случае Апофиса, изменение скорости вращения и ориентации оси вращения в ходе предстоящего в 2029 году сближения с Землей может привести к уменьшению A_2 до $-1.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут², либо к его увеличению до $-3.5 \cdot 10^{-14}$ а.е./сут². Предполагаемое изменение величины A_2 окажет заметное влияние на эволюцию орбиты Апофиса после сближения. Имевшие место возмущения во вращательной динамике астероида 2012 TC₄ при его сближении с Землей в 2017 году не оказали влияния на величину параметра A_2 .

Итак, на основе численного моделирования динамики астероидов Апофис и 2012 TC₄ мы рассмотрели возмущения во вращательном движении астероида при его тесном сближении с Землей и их влияние на величину эффекта Ярковского. Посредством дополнительных численных экспериментов по моделированию динамики различных АСЗ, обладающих медленным (период составляет десятки часов) и быстрым (период менее часа) вращением можно обобщить полученные в настоящей работе выводы на указанные два типа астероидов. А именно, для астероидов с медленным вращением характерны значительные возмущения во вращательном движении при тесном сближении с Землей, также при оценке величин возмущений следует учитывать неточность в знании реальных значений моментов инерции астероида. Существенное влияние на величину ЭЯ для астероидов с медленным вращением оказывает изменение ориентации оси вращения из-за сближения. Напротив, для астероидов, обладающих быстрым вращением, возмущения малы и их можно не учитывать при моделировании динамики астероида после сближения. Однако для быстровращающихся астероидов следует учитывать возможность существенного изменения величины ЭЯ из-за возмущений, приводящих как к смещению оси вращения, так и к изменению скорости вращения астероида. Такие изменения могут быть вызваны, например, внешним физическим воздействием на астероид (Daly и др., 2023).

Благодарности

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

Список литературы

- Hestroffer, D. и др. (2019). *Small Solar System Bodies as granular media*. *A&A Rev.* 27.1, с. 6.
- Hu, Shoucun, Derek C. Richardson, Yun Zhang и Jianghui Ji (2021). *Critical spin periods of sub-km-sized cohesive rubble-pile asteroids: dependences on material parameters*. *MNRAS* 502.4, с. 5277—5291.
- Лобанова, К. С. и А. В. Мельников (2023а). *О возмущениях во вращательном движении астероида при его тесном сближении с Землей*. *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове* 229, с. 34—46.
- (2023б). *Об эффекте Ярковского в динамике астероида (99942) Апофис*. *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове* 231, с. 21—30.
- Мартыусева, 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.
- Martyusheva, A. A. и A. V. Melnikov (2023). *Influence of Planetary Encounters on the Magnitude of the Yarkovsky Effect in Asteroid Dynamics*. *Solar System Research* 57.5, с. 486—494.
- Melnikov, A. V. (2022). *Rotational Dynamics of Asteroids Approaching Planets*. *Solar System Research* 56.4, с. 241—251.
- Scheeres, D. J., F. Marzari и A. Rossi (2004). *Evolution of NEO rotation rates due to close encounters with Earth and Venus*. *Icarus* 170.2, с. 312—323.
- Pravec, P., P. Scheirich и др. (2014). *The tumbling spin state of (99942) Apophis*. *Icarus* 233, с. 48—60.
- Souchay, J., D. Souami, C. Lhotka, V. Puentes и M. Figueira (2014). *Rotational changes of the asteroid 99942 Apophis during the 2029 close encounter with Earth*. *A&A* 563, A24.
- Souchay, J., C. Lhotka и др. (2018). *Changes of spin axis and rate of the asteroid (99942) Apophis during the 2029 close encounter with Earth: A constrained model*. *A&A* 617, A74.
- Scheeres, D. J. (2022). *Proximity Operations About Apophis Through Its 2029 Earth Flyby*. *Journal of the Astronautical Sciences* 69.6, с. 1514—1536.
- Benson, C. J., D. J. Scheeres и N. A. Moskovitz (2020). *Spin state evolution of asteroid (367943) Duende during its 2013 earth flyby*. *Icarus* 340, с. 113518.
- Benson, C. J., D. J. Scheeres, M. Brozović и др. (2023). *Spin state evolution of (99942) Apophis during its 2029 Earth encounter*. *Icarus* 390, с. 115324.
- Lee, Hee-Jae и др. (2021). *Spin Change of Asteroid 2012 TC4 Probably by Radiation Torques*. *AJ* 161.3, с. 112.
- Ярковский, И. О. (1901). *Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению*. Брянск: Тип. Юдина.
- Radzievskii, V. V. (1952). *A mechanism for the disintegration of asteroids and meteorites*. *AZh* 29, с. 162—170.
- Rubincam, D. P. (1995). *Asteroid orbit evolution due to thermal drag*. *J. Geophys. Res.* 100.E1, с. 1585—1594.
- (1998). *Yarkovsky thermal drag on small asteroids and Mars-Earth delivery*. *J. Geophys. Res.* 103.E1, с. 1725—1732.
- (2000). *Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids*. *Icarus* 148.1, с. 2—11.
- Vokrouhlický, D. (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.
- Vokrouhlický, D., W. F. Bottke, S. R. Chesley, D. J. Scheeres и T. S. Statler (2015). *The Yarkovsky and YORP Effects*. В: *Asteroids IV*, с. 509—531.
- Farinella, P., D. Vokrouhlický и W. K. Hartmann (1998). *Meteorite Delivery via Yarkovsky Orbital Drift*. *Icarus* 132.2, с. 378—387.
- Farnocchia, D., S. R. Chesley, D. Vokrouhlický и др. (2013). *Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect*. *Icarus* 224.1, с. 1—13.

- Farnocchia, D., S. R. Chesley, P. W. Chodas и др. (2013). [Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid \(99942\) Apophis](#). *Icarus* 224.1, с. 192—200.
- Hairer, E., S. P. Norsett и G. Wanner (1993). *Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems*. SpringerVerlag.
- Araujo, R. A. N. и O. C. Winter (2014). [Near-Earth asteroid binaries in close encounters with the Earth](#). *A&A* 566, A23.
- Richardson, D. C., W. F. Bottke и S. G. Love (1998). [Tidal Distortion and Disruption of Earth-Crossing Asteroids](#). *Icarus* 134.1, с. 47—76.
- Boldrin, L. A. G., R. A. N. Araujo и O. C. Winter (2020). [On the rotational motion of NEAs during close encounters with the Earth](#). *European Physical Journal Special Topics* 229.8, с. 1391—1403.
- Brozović, Marina и др. (2018). [Goldstone and Arecibo radar observations of \(99942\) Apophis in 2012-2013](#). *Icarus* 300, с. 115—128.
- Kouprianov, V. V. и I. I. Shevchenko (2006). [The shapes and rotational dynamics of minor planetary satellites](#). *Solar System Research* 40.5, с. 393—399.
- Daly, R. Terik и др. (2023). [Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence](#). *Nature* 616.7957, с. 443—447.
- Scheeres, D. J., S. J. Ostro, R. A. Werner, E. Asphaug и R. S. Hudson (2000). [Effects of Gravitational Interactions on Asteroid Spin States](#). *Icarus* 147.1, с. 106—118.
- Harris, A. W. (1996). [The Rotation Rates of Very Small Asteroids: Evidence for 'Rubble Pile' Structure](#). В: *Lunar and Planetary Science Conference*. Т. 27. Lunar and Planetary Science Conference, с. 493.
- Pravec, P. и A. W. Harris (2000). [Fast and Slow Rotation of Asteroids](#). *Icarus* 148.1, с. 12—20.

The influence of the rotation speed and figure of an asteroid on the magnitude of disturbances in its rotational dynamics during close approach to the Earth

K.S. Lobanova^{1,2}, A.V. Melnikov¹

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

Received 22 April 2024 / Accepted 1 May 2024

Abstract

By means of numerical experiments, the influence of the value of the asteroid's own rotational velocity, orientation of the axis of rotation, and shape parameters on the magnitude of perturbations in its rotational dynamics arising during close approach to the Earth is studied. Two cases are considered: 1) asteroid (99942) Apophis with a relatively slow rotation (period ≈ 30 h) and 2) asteroid 2012 TC4, which has a fast rotation (period ≈ 12 min). It was found that in the case of asteroids with slow rotation, perturbations can be large: in the case of Apophis, when approaching the Earth in 2029, changes in the rotational period ΔP may reach tens of hours, and deviations in the orientation of the axis of rotation $\Delta\gamma$ — tens of degrees. For fast-rotating asteroids, the perturbations are very small: in the case of asteroid 2012 TC4 at its approach to the Earth in 2017, $|\Delta P| < 10^{-5}$ min, $|\Delta\gamma| < 0.01^\circ$. It is shown that for asteroids with slow rotation, the uncertainty in the determination of asteroid shape parameters (moments of inertia) can lead to noticeable inaccuracies in the estimation of perturbation magnitudes. The uncertainty in the knowledge of the figure parameters of a fast-rotating asteroid practically does not affect the estimation of perturbations in its rotational dynamics. In the case of Apophis, changes in the rotational velocity and orientation of the axis of rotation during the upcoming 2029 approach to the Earth may lead to a decrease in the value of the parameter A_2 , which characterizes the Yarkovsky effect, to $-1.5 \cdot 10^{-14}$ a.u./d², or to an increase up to $-3.5 \cdot 10^{-14}$ a.u./d². Perturbations in the rotational dynamics of asteroid 2012 TC4 during its approach to the Earth in 2017 did not affect the value of parameter A_2 .

key words: asteroids approaching planets; rotational dynamics; Yarkovsky effect; (99942) Apophis; 2012 TC4