# Об эффекте Ярковского в динамике астероида (99942) Апофис

К.С. Лобанова<sup>1,2</sup>, А.В. Мельников<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ГАО РАН, <sup>2</sup>СПбГУ

#### Аннотация

Исследовано влияние возмущений, имеющих место во вращательном состоянии астероида (99942) Апофис при его очередном сближении с Землей в 2029 году, на величину эффекта Ярковского, действующего в орбитальной динамике астероида. Показано, что изменения скорости собственного вращения и ориентации оси вращения астероида, вызванные тесным сближением с Землей, могут привести к вариациям величины эффекта Ярковского более чем в два раза. Средняя скорость изменения большой полуоси орбиты Апофиса, вызванного действием эффекта Ярковского, после сближения может составить от -235 до -20 м/год.

## Введение

В долговременной динамике малых астероидов заметную роль играют негравитационные эффекты: давление солнечного излучения, эффект Ярковского и YORP-эффект (Yarkovsky–O'Keefe– Radzievskii–Paddack). Особенно важен учет этих эффектов при изучении динамики астероидов, сближающихся с Землей. В частности, вековое изменение орбиты астероида, вызванное действием эффекта Ярковского (ЭЯ), может увеличить риск катастрофического столкновения астероида с нашей планетой (Steven R. Chesley, 2006; Giorgini и др., 2008; Sokolov, Bashakov, Borisova и др., 2012; Shor и др., 2012; Farnocchia и др., 2013). В ходе орбитальной эволюции ряд астероидов испытывает регулярные тесные сближения с планетами, что существенным образом влияет на вращательную динамику астероидов (Scheeres, Ostro и др., 2000; Scheeres, Marzari и Rossi, 2004; Boldrin, Araujo и Winter, 2020; Melnikov, 2022) и, соответственно, на величины негравитационных эффектов для них (Мартюшева и Мельников, 2023; Martyusheva и Melnikov, 2023).

Одним из наиболее опасных с точки зрения возможного катастрофического столкновения с Землей является астероид (99942) Апофис (Steven R. Chesley, 2006; Giorgini и др., 2008; Sokolov, Bashakov, Borisova и др., 2012; Shor и др., 2012; Sokolov, Bashakov и Pitjev, 2008). Ранее Лобанова и Мельников (2023) посредством численного моделирования динамики Апофиса изучили возмущения, которые будут иметь место в его вращательном движении при очередном сближении с Землей в 2029 году. Было установлено, что период вращения Апофиса может значительно измениться, существенные возмущения возможны и в ориентации оси вращения. В настоящей работе мы детально рассмотрели изменение ориентации оси вращения Апофиса в ходе предстоящего сближения и оценили влияние возмущений во вращательном состоянии Апофиса на величину ЭЯ, действующего в его орбитальной динамике.

Работа имеет следующую структуру. В первом разделе кратко описана методика оценки теоретической величины ЭЯ. Во втором разделе приведены численные оценки возмущений во вращательном движении Апофиса при его сближении с Землей в 2029 году. Третий раздел содержит оценки влияния возмущений во вращательном движении на величину ЭЯ для Апофиса. В последнем разделе представлены основные результаты работы.

<sup>\*</sup>e-mail:melnikov@gaoran.ru

## 1 Оценка величины эффекта Ярковского

Как отмечалось выше, в вековой орбитальной динамике малых астероидов существенную роль играет эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Radzievskii, 1952; D. P. Rubincam, 1995; D. P. Rubincam, 1998; D. P. Rubincam, 2000; D. Vokrouhlický, 1999; D. Vokrouhlický, Milani и S. R. Chesley, 2000; D. Vokrouhlický, Bottke и др., 2015; Ershkov и Shamin, 2018), представляющий собой негравитационное ускорение в орбитальном движении, вызываемое анизотропным переизлучением солнечной радиации поверхностью вращающегося астероида. Одним из проявлений действия ЭЯ является вековое изменение большой полуоси астероида, которое можно выявить путем обнаружения изменений в величине среднего движения астероида.

В работах (Мартюшева и Мельников, 2023; Martyusheva и Melnikov, 2023) показано, что тесные сближения малых астероидов (средний диаметр десятки–сотни метров) с планетами и возникающие возмущения во вращательном движении астероидов могут привести к заметному изменению величины ЭЯ. Скорость изменения величины большой полуоси орбиты астероида da/dt, вызываемого действием ЭЯ, может увеличиться/уменьшиться на 30–50%. Отметим, что для малых астероидов величина ежегодного смещения орбиты, вызванного действием ЭЯ, обычно сопоставима с размерами астероида. В работе (D. Vokrouhlický, Farnocchia и др., 2015) был подробно рассмотрен механизм действия ЭЯ в динамике Апофиса (средний диаметр около 340 м (Marina Brozović и др., 2018)) и получены теоретические оценки его величины. Величина ЭЯ  $da/dt \sim 200$  м/год для Апофиса на основе анализа данных наблюдений, проведенных 2021 году, была определена в работе (Pérez-Hernández и Benet, 2022).

Далее на основе работы (Farinella, David Vokrouhlický и Hartmann, 1998) приведем краткую теорию для оценки величины ЭЯ. Для вычисления скорости изменения величины большой полуоси астероида под влиянием ЭЯ нам необходима касательная компонента возмущающей силы  $f_Y$ . В предположении об околокруговой орбите общая формула для средней скорости будет иметь вид

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} = \frac{2f_Y}{n},\tag{1}$$

где n — среднее движение астероида.

Суммарная величина ЭЯ складывается из суточной и сезонной компонент. Рассмотрим, как вычисляется  $f_Y$  для сезонного и суточного ЭЯ. В обоих случаях мы будем иметь дело с выражением вида (Burns, Lamy и Soter, 1979)

$$f_Y = \frac{2}{\rho R} \frac{\varepsilon \sigma T^4}{c} \frac{\Delta T_\nu}{T} \tilde{f}(\gamma), \qquad (2)$$

где  $\rho$  — плотность астероида, R — радиус однородного шара с объемом, равным объему астероида,  $\varepsilon$  — излучательная способность поверхности астероида,  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана, c — скорость света,  $\Delta T$  — разность температур между наиболее и наименее нагретой частями поверхности астероида,  $\tilde{f}(\gamma)$  — некоторая функция угла  $\gamma$  между осью вращения астероида и перпендикуляром к плоскости его орбиты, T — средняя температура астероида, вычисляемая по формуле

$$T^4 = \frac{\alpha S}{4\varepsilon\sigma},$$

где  $\alpha$  — коэффициент поглощения на поверхности астероида,  $S = 1370 \frac{\text{BT}}{\text{M}^2} \left(\frac{a_{\oplus}}{a}\right)^2$  — поток солнечной энергии для астероида с большой полуосью  $a, a_{\oplus}$  — большая полуось земной орбиты.

### Суточный эффект Ярковского

Следуя Peterson (1976), в работе (Farinella, David Vokrouhlický и Hartmann, 1998) положено  $\tilde{f}(\gamma) = \cos \gamma$  и дана следующая формула для температурного множителя:

$$\frac{\Delta T_{\omega}}{T} = 0.667 \frac{\Theta_{\omega}}{1 + 2.03 \,\Theta_{\omega} + 2.04 \,\Theta_{\omega}^2},\tag{3}$$

где параметр

$$\Theta_{\omega} = \frac{\sqrt{\rho C K \omega}}{2\pi \varepsilon \sigma T^3} \tag{4}$$

характеризует отношение времени температурной релаксации к рассматриваемому периоду времени (в случае суточного ЭЯ берется период вращения астероида P); C — удельная теплоемкость астероида, K — коэффициент теплопроводности,  $\omega = 2\pi/P$  — частота вращения астероида.

Таким образом, суточный ЭЯ будет приводить к da/dt > 0 для наклонов оси вращения  $0 < \gamma < \pi/2$  (проградное движение: направления вращения и орбитального движения астероида совпадают) и da/dt < 0 для  $\pi/2 < \gamma < \pi$  (ретроградное движение).

Для больших значений параметра  $\Theta_{\omega} \gg 1$  (малых значений P) справедливо соотношение

$$\frac{\Delta T_{\omega}}{T} \sim \Theta_{\omega}^{-1} \sim \sqrt{P},$$

и возмущающая сила стремится к нулю.

### Сезонный эффект Ярковского

Согласно (D. P. Rubincam, 1995),  $\tilde{f}(\gamma) = -\sin^2 \gamma$  и для сезонного эффекта  $da/dt \leq 0$  при любом угле наклона оси вращения астероида.

Температурный множитель Farinella, David Vokrouhlický и Hartmann (1998) выводят на основе работ (D. P. Rubincam, 1998; David Parry Rubincam, 1987; Afonso, Gomes и Florczak, 1995). Он имеет вид

$$\frac{\Delta T_n}{T} = \frac{1}{3} \frac{1}{1 - \tau} A_n \sin \delta_n \,, \tag{5}$$

где  $\tau = \frac{\pi l_s}{2R} \Theta_n$ , параметр  $\Theta_n$  вычисляется аналогично суточному случаю (см. (4)) с заменой частоты  $\omega$  на среднее движение астероида n, а величина  $l_s = \sqrt{K/\rho Cn}$  представляет собой характерную глубину проникновения тепловой волны. Множитель  $A_n \sin \delta_n$ , где  $A_n$  — амплитуда,  $\delta_n$  — фаза гармоники, соответствующей частоте  $\nu = n$  из разложения в ряд Фурье решения уравнения теплопроводности, может быть найден по формуле

$$A_n e^{i\delta_n} = \left(1 + \frac{\tau}{1+\tau}\psi(z)\right)^{-1}$$

где

$$\psi(z) = \frac{(z^2 - 3)\sin z + 3z\cos z}{\sin z - z\cos z} \,.$$

Комплексный аргумент  $z = \frac{R}{l_{\star}}\sqrt{i}$ .

Суммарная величина ЭЯ вычисляется по формуле

$$\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t} = \frac{2}{n} \left( f_Y^{(d)} + f_Y^{(s)} \right),\tag{6}$$

где  $f_Y^{(d)}$  и  $f_Y^{(s)}$  вычисляются при помощи уравнения (2) с учетом выражений (3) и (5) для температурного множителя в случаях суточного и сезонного ЭЯ соответственно.

# 2 Вращательная динамика астероида Апофис в ходе сближения

Астероид (99942) Апофис был обнаружен 19 июня 2004 г. и некоторое время считался наиболее опасным с точки зрения столкновения с Землей объектом (см. подробности, например, в Steven R. Chesley (2006), Sokolov, Bashakov, Borisova и др. (2012), Farnocchia и др. (2013) и Sokolov, Bashakov и Pitjev (2008)). В 2029 году произойдет очередное тесное сближение Апофиса с Землей

на расстояние около 6 земных радиусов от геоцентра, что вызовет значительные возмущения в движении астероида.

В нашей предыдущей работе (Лобанова и Мельников, 2023) была детально рассмотрена вращательная динамика Апофиса в ходе его предстоящего сближения с Землей 13 апреля 2029 г. Для проведения численных экспериментов по моделированию динамики АСЗ нами был разработан программный комплекс на основе интегратора DOP853, реализующего метод Рунге-Кутты 8-го порядка. Концепция и возможности интегратора подробно описаны в (Hairer, Norsett и Wanner, 1993). Мы предполагали, что астероид представляет собой твердое тело, его фигура аппроксимируется трехосным эллипсоидом. В начальный момент времени вращение астероида происходит относительно оси, совпадающей с осью максимального момента инерции. Ориентация оси вращения относительно нормали к плоскости орбиты в начальный момент времени задавалась углом  $\gamma$ , принимающим значения от 0° до 180°. При этом значения  $\gamma < 90^{\circ}$  соответствуют проградному (совпадающему с направлением орбитального движения) вращению астероида,  $\gamma > 90^\circ$  — ретроградному. Проведенный в (Лобанова и Мельников, 2023) анализ показал, что орбитальное движение Апофиса в окрестности точки сближения с Землей можно хорошо аппроксимировать невозмущенной гиперболической геоцентрической орбитой. В настоящей работе мы продолжили исследование вращательной динамики Апофиса, уделив внимание возмущениям в ориентации его оси вращения. Принятые при моделировании параметры орбиты, инерционные параметры Апофиса и период его вращения указаны в Табл. 1, а именно: параметры гиперболической геоцентрической орбиты — величина эксцентриситета e и минимальное расстояние d = a(e-1)(перицентрическое расстояние), выраженное в средних радиусах Земли –  $R_{\rm E} = 6371$  км; отношения главных центральных моментов инерции -A/C и B/C ( $A \le B \le C$ ); период вращения астероида *P*.

Таблица 1: Принятые при моделировании орбитальные и физические параметры астероида (99942) Апофис. Данные о величинах моментов инерции и периоде вращения взяты из (Pravec и др., 2014; Benson, Scheeres, M. Brozović и др., 2023). Значения *d* и *e* получены (см. Лобанова и Мельников (2023)) на основе эфемериды NASA JPL (https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/).

$d/R_{\rm E}$	e	A/C	B/C	Р, ч
5.97	3.99	0.7294	0.9479	30.6

На Рис. 1 и 2 представлены результаты численных экспериментов — изменения величины периода и ориентации оси вращения Апофиса из-за его сближения с Землей. Посредством численного интегрирования уравнений движения (см. детали Лобанова и Мельников (2023)) исследовалась эволюция величины периода собственного вращения астероида P и угла  $\gamma$ , характеризующего отклонение оси вращения астероида от нормали к плоскости орбиты. Динамика астероида рассматривалась на участке его орбиты, ограниченном геоцентрической сферой радиусом  $100R_{\rm E}$ . На множестве ( $P_0$ ,  $\gamma_0$ ) возможных начальных (до сближения) значений P и  $\gamma$  были определены величины:  $\Delta P = P_{\rm final} - P_0$  и  $\Delta \gamma = \gamma_{\rm final} - \gamma_0$ , где нижний индекс «final» соответствует величинам после момента сближения (при удалении астероида от геоцентра на расстояние  $100R_{\rm E}$ ). Значения  $P_0$  и  $\gamma_0$  задавались на равномерной сетке, определенной следующим образом:  $P_0 \in [1, 70]$  ч с шагом в один час,  $\gamma_0 \in [0^\circ, 180^\circ]$  с шагом в один градус. Значение  $\gamma = 0$  соответствует случаю, когда ось вращения астероида ортогональна плоскости его орбиты и направление вращения совпадает с направлением орбитального движения (проградное вращение).

На полученных диаграммах отчетливо выделяются чередующиеся при изменении  $P_0$  области, где происходит замедление либо ускорение вращения астероида и имеют место существенные изменения в ориентации оси вращения. Отметим, что на Рис. 1 выделяется отдельный максимум, положение которого зависит от параметров орбиты астероида (см. обсуждение в Лобанова и Мельников (2023)). На Рис. 2 присутствует несколько локальных максимумов и минимумов значений  $\Delta \gamma$ , положение которых тоже определяется параметрами орбиты.



Рис. 1: Зависимость величины изменения периода вращения Апофиса  $\Delta P = P_{\text{final}} - P_0$ из-за сближения с Землей в 2029 году от возможных начальных значений периода вращения  $P_0$ и отклонения оси вращения астероида от нормали к плоскости орбиты  $\gamma_0$  до момента сближения.



Рис. 2: Зависимость величины изменения угла, характеризующего отклонение оси вращения Апофиса от нормали к плоскости орбиты,  $\Delta \gamma = \gamma_{\text{final}} - \gamma_0$ из-за сближения с Землей в 2029 году от  $P_0$ и  $\gamma_0$ .

Из Рис. 1 видно, что величина периода вращения Апофиса может измениться существенно: возможно как уменьшение периода на 20 ч, так и его увеличение на 40 ч. Наиболее вероятным,

с учетом имеющихся данных о современном вращательном состоянии Апофиса (Pravec и др., 2014; Benson, Scheeres, M. Brozović и др., 2023), является изменение P на 10–15 ч (см. Лобанова и Мельников (2023)), что согласуется с результатами, полученными в (Scheeres, Ostro и др., 2000; Boldrin, Araujo и Winter, 2020; Melnikov, 2022; Benson, Scheeres и Moskovitz, 2020) путем моделирования сближений астероидов с планетами.

Согласно результатам моделирования, представленным на Рис. 2, амплитуда возмущений в ориентации оси вращения Апофиса достигает 30°. В ряде случаев (при значениях  $\gamma_0$ , близких к 90°) наблюдается переход от проградного вращения к ретроградному и наоборот. Отметим, что такой переход может привести к смене знака величины суточного ЭЯ (см. раздел 1) и даже суммарной величины ЭЯ, поскольку сезонная компонента ЭЯ относительно мала.

## 3 Эффект Ярковского в динамике Апофиса: до и после сближения

Выявленные возмущения во вращательном движении Апофиса должны оказывать влияние на величину ЭЯ. В настоящее время скорость изменения величины большой полуоси орбиты Апофиса из-за действия ЭЯ, определенная из анализа наблюдений (Pérez-Hernández и Benet, 2022) и на основе теоретических оценок (D. Vokrouhlický, Farnocchia и др., 2015), составляет около –200 м/год.

На Рис. 3 и 4 приведены теоретические оценки величины ЭЯ для Апофиса, полученные на основе представленной в разделе 1 теории. Приведены зависимости средней скорости da/dt изменения величины большой полуоси орбиты Апофиса за год из-за действия ЭЯ для разных значений P при  $\gamma = 140^{\circ}$ , 160° и 180° (в предположении о ретроградном вращении, см. Ргаvес и др. (2014)) и для различных значений  $\gamma$  при P = 30.6 ч (см. там же), 15 ч и 45 ч (учитывая изменение периода из-за сближения, см. раздел 2). На Рис. 3 выделена область возможных изменений P, вызванных сближением Апофиса с Землей в 2029 году.



Рис. 3: Зависимость скорости изменения большой полуоси орбиты Апофиса, вызванного действием эффекта Ярковского, от периода вращения P для различных значений  $\gamma$  (предполагается ретроградное вращение). Штриховая линия соответствует величине периода вращения Апофиса в настоящее время (Pravec и др., 2014). Серая область соответствует возможным значениям (Лобанова и Мельников, 2023) изменения периода вращения Апофиса из-за его сближения с Землей в 2029 году.



Рис. 4: Зависимость скорости изменения большой полуоси орбиты Апофиса, вызванной действием эффекта Ярковского, от  $\gamma$  — угла между осью вращения и нормалью к плоскости орбиты астероида. Принято, что период вращения Апофиса P = 30.6 ч (Pravec и др., 2014). Дополнительно нанесены кривые для значений периода P = 15 ч и 45 ч.

Из Рис. 3 видно, что вызванное сближением Апофиса с Землей изменение P на 10–15 ч (Лобанова и Мельников, 2023) может приводить при  $\gamma = 180^{\circ}$  к вариациям da/dt от -235 до -225 м/год (около 4%). (При других значениях  $\gamma$  диапазон вариаций da/dt еще меньше.) Если же допустить изменение P в более широких пределах (величина P, согласно Рис. 1, может как уменьшиться на 20 ч, так и увеличиться на 40 ч), то da/dt после сближения может составить от -235 до -180 м/год.

Согласно Рис. 4, существенное влияние на величину ЭЯ оказывает ориентация оси вращения астероида. Она может заметно измениться в ходе тесного сближения с Землей, что повлечет изменения величины ЭЯ. Так, например, при  $\gamma = 135^{\circ}$  и  $\Delta \gamma = 30^{\circ}$  вариации da/dt, согласно Рис. 4, составляют от -220 до -90 м/год, т. е. величина ЭЯ для Апофиса может изменится более чем в два раза. Поскольку точная ориентация оси вращения Апофиса перед сближением неизвестна, можно сделать вывод, что значение величины ЭЯ после сближения будет составлять от -235 до -20 м/год. При изменении периода P на 15 ч в большую и меньшую сторону максимальная по модулю величина ЭЯ изменяется незначительно (см. также Benson, Scheeres, M. Brozović и др. (2023)).

Отметим, что средний диаметр Апофиса составляет около 340 м (Marina Brozović и др., 2018), т. е. вызванные сближением с Землей возмущения в годовом изменении большой полуоси астероида из-за действия ЭЯ сопоставимы с размерами астероида. Изменение большой полуоси орбиты Апофиса может привести к попаданию астероида в различные области соударения, т. н. «щели», соответствующие траекториям столкновения в последующих возвратах. Характерный размер «щелей» в случае Апофиса составляет десятки–сотни метров (см., например, Sokolov, Bashakov, Borisova и др. (2012), Shor и др. (2012), Farnocchia и др. (2013), Sokolov, Bashakov и Pitjev (2008) и Sokolov, Borisova и др. (2013)). Таким образом, возмущения во вращательном движении Апофиса из-за его сближения с Землей в 2029 году могут привести к существенному изменению величины ЭЯ для него и увеличению или уменьшению вероятности катастрофического столкновения с Землей в последующих возвратах.

# 4 Выводы

В настоящей работе рассмотрено влияние изменения вращательного состояния астероида (99942) Апофис при его очередном сближении с Землей в 2029 году на величину эффекта Ярковского (ЭЯ), действующего в орбитальной динамике астероида. Посредством численного моделирования вращательной динамики Апофиса и на основе теоретических оценок величины ЭЯ показано, что возмущения в скорости собственного вращения и ориентации оси вращения астероида могут привести к изменению величины ЭЯ более чем в два раза и увеличению или уменьшению вероятности катастрофического столкновения с Землей в последующих возвратах.

# Благодарности

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

## Список литературы

- Chesley, Steven R. (2006). Potential impact detection for Near-Earth asteroids: the case of 99942 Apophis (2004 MN 4). B: Asteroids, Comets, Meteors. Под ред. Daniela Lazzaro, Sylvio Ferraz-Mello и Julio Angel Fernández. T. 229, c. 215—228.
- Giorgini, Jon D., Lance A. M. Benner, Steven J. Ostro, Michael C. Nolan & Michael W. Busch (2008). Predicting the Earth encounters of (99942) Apophis. Icarus 193.1, c. 1–19.
- Sokolov, L. L., A. A. Bashakov, T. P. Borisova и др. (2012). Impact trajectories of the asteroid Apophis in the 21st century. Solar System Research 46.4, c. 291—300.
- Shor, V. A., Yu. A. Chernetenko, O. M. Kochetova II N. B. Zheleznov (2012). On the impact of the Yarkovsky effect on Apophis' orbit. Solar System Research 46.2, c. 119–129.
- Farnocchia, D. и др. (2013). Yarkovsky-driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis. Icarus 224.1, c. 192—200.
- Scheeres, D. J., S. J. Ostro, R. A. Werner, E. Asphaug & R. S. Hudson (2000). Effects of Gravitational Interactions on Asteroid Spin States. Icarus 147.1, c. 106–118.
- 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, c. 312—323.
- Boldrin, Luiz A. G., Rosana A. N. Araujo II Othon C. Winter (2020). On the rotational motion of NEAs during close encounters with the Earth. European Physical Journal Special Topics 229.8, c. 1391–1403.
- Melnikov, A. V. (2022). Rotational Dynamics of Asteroids Approaching Planets. Solar System Research 56.4, c. 241–251.
- 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.
- 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, c. 486–494.
- Sokolov, L. L., A. A. Bashakov и N. P. Pitjev (2008). Peculiarities of the motion of asteroid 99942 Apophis. Solar System Research 42.1, c. 18—27.
- 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.
- 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, c. 162–170.
- Rubincam, D. P. (1995). Asteroid orbit evolution due to thermal drag. J. Geophys. Res. 100.E1, c. 1585-1594.
- (1998). Yarkovsky thermal drag on small asteroids and Mars-Earth delivery. J. Geophys. Res. 103.E1, c. 1725–1732.
- (2000). Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. Icarus 148.1, c. 2–11.
- Vokrouhlický, D. (1999). A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments. A&A 344, c. 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, c. 118—138.
- Vokrouhlický, D., W. F. Bottke, S. R. Chesley, D. J. Scheeres и T. S. Statler (2015). The Yarkovsky and YORP Effects. B: Asteroids IV, c. 509—531.
- Ershkov, S. V. и R. V. Shamin (2018). The dynamics of asteroid rotation, governed by YORP effect: The kinematic ansatz. Acta Astronautica 149, c. 47—54.
- Vokrouhlický, D., D. Farnocchia и др. (2015). The Yarkovsky effect for 99942 Apophis. Icarus 252, c. 277—283.

- Brozović, Marina и др. (2018). Goldstone and Arecibo radar observations of (99942) Apophis in 2012-2013. Icarus 300, с. 115—128.
- Pérez-Hernández, J. A. и L. Benet (2022). Non-zero Yarkovsky acceleration for near-Earth asteroid (99942) Apophis. Communications Earth and Environment 3.1, c. 10.
- Farinella, Paolo, David Vokrouhlický и William K. Hartmann (1998). Meteorite Delivery via Yarkovsky Orbital Drift. Icarus 132.2, c. 378—387.
- Burns, J. A., P. L. Lamy и S. Soter (1979). Radiation forces on small particles in the solar system. Icarus 40.1, c. 1—48.
- Peterson, C. (1976). A Source Mechanism for Meteorites Controlled by the Yarkovsky Effect. Icarus 29.1, c. 91–111.
- Rubincam, David Parry (1987). LAGEOS orbit decay due to infrared radiation from earth. J. Geophys. Res. 92, c. 1287–1294.
- Afonso, G. B., R. S. Gomes и M. A. Florczak (1995). Asteroid fragments in Earth-crossing orbits. Planet. Space Sci. 43.6, c. 787—795.
- Hairer, E., S. P. Norsett и G. Wanner (1993). Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. SpringerVerlag.
- Pravec, Р. и др. (2014). The tumbling spin state of (99942) Apophis. Icarus 233, с. 48-60.
- Benson, C. J., D. J. Scheeres, M. Brozović и др. (2023). Spin state evolution of (99942) Apophis during its 2029 Earth encounter. Icarus 390, c. 115324.
- 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, c. 113518.
- Sokolov, L. L., T. P. Borisova, A. A. Vasil'ev и N. A. Petrov (2013). Properties of collision trajectories of asteroids with the Earth. Solar System Research 47.5, c. 408–413.

About the Yarkovsky effect in the dynamics of asteroid (99942) Apophis

K.S. Lobanova<sup>1,2</sup>, A.V. Melnikov<sup>1</sup>

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

#### Abstract

The influence of disturbances occurring in the rotational state of the asteroid (99942) Apophis during its next approach to the Earth in 2029 on the magnitude of the Yarkovsky effect acting in the orbital dynamics of the asteroid has been studied. It is shown that changes in the speed of its own rotation and the orientation of the asteroid's rotation axis, caused by a close approach to the Earth, can lead to variations in the magnitude of the Yarkovsky effect by more than two times. The average rate of change in the semimajor axis of Apophis's orbit, caused by the Yarkovsky effect, after approach can range from -235 to -20 m/year.