



О величине эффекта Ярковского в динамике потенциально опасных астероидов

А.А. Мартюшева, А.В. Мельников*

ГАО РАН

Аннотация

Для ряда астероидов, испытывающих последовательные сближения с планетами, получены оценки влияния светового давления Солнца и эффекта Ярковского на долговременную орбитальную динамику. На основе полученных в (Melnikov, 2022) оценок изменения величины периода собственного вращения астероида из-за сближений с планетами, рассмотрено влияние таких событий на его дальнейшую орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского. Показано, что тесные сближения с планетами малых астероидов (диаметр десятки метров) с быстрым вращением (период собственного вращения менее 10 ч), приводящие к изменению периода вращения астероида на несколько часов, могут изменить величину эффекта Ярковского на 30–50%.

Введение

Астероиды представляют собой наиболее многочисленное семейство малых тел Солнечной системы. В ходе долговременной орбитальной эволюции астероиды могут испытывать многочисленные сближения с планетами, некоторые из таких событий заканчиваются катастрофическим образом — разрушительным столкновением (Chodas и Yeomans, 1996; Popova и др., 2013; Emel'yanenko и др., 2013), либо распадом астероида на более мелкие тела (Richardson, Bottke и Love, 1998; Sharma, Jenkins и Burns, 2006; Tóth, Vereš и Kornoš, 2011; Zhang и Michel, 2020; Voropaev, Jianguo и Barriot, 2020; Zeng и др., 2022). Исследование динамики астероидов, испытывающих тесные сближения с планетами, имеет непосредственное отношение к проблеме астероидно-кометной опасности, что определяет его актуальность и важность.

В динамике астероидов имеет место синергетический эффект — сближения астероида с планетами приводят к изменению его орбиты, что влияет и на вращение астероида относительно своего центра масс, в свою очередь гравитационное воздействие со стороны планеты непосредственно оказывает влияние на вращение астероида (Melnikov, 2022; Devyatkin, Gorshapov и др., 2016; Benson, Scheeres и Moskovitz, 2020; Boldrin, Araujo и Winter, 2020); это влияние вносит определенный вклад в его дальнейшую орбитальную динамику. Для небольших астероидов (диаметром сотни метров) драйвером такого процесса может являться эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Radzievskii, 1952; Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický, Milani и Chesley, 2000; Shor и др., 2012). Характер возмущений орбиты астероида вследствие действия этого эффекта зависит от вращательного состояния (скорости вращения, ориентации оси вращения относительно направления на Солнце), свойств поверхности астероида и других факторов. Отметим, что в динамике малых астероидов неправильной формы существенную роль также играет эффект анизотропного переизлучения — YORP-эффект (Yarkovsky–O'Keefe–Radzievskii–Paddack), приводящий к изменению скорости вращения астероида и ориентации его оси вращения в пространстве (Rubincam, 2000; Ershkov и Shamin, 2018; Lowry и др., 2007; Greenberg и др., 2020).

*e-mail: melnikov@gaoran.ru

Посредством проведения численных экспериментов Melnikov (2022) для ряда малых астероидов, испытывающих последовательные сближения с планетами земной группы, получил оценки изменения периода собственного вращения астероида из-за сближения с планетой. В настоящей работе для выборки астероидов из работы (там же) мы получили оценки воздействия светового давления Солнца и эффекта Ярковского на орбитальную динамику астероидов и оценили влияние изменения их вращательных состояний из-за сближений с планетами на орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского.

1 Изменение скорости вращения астероида из-за сближения с планетой

В работе (Devyatkin, Lvov и Tsekmeister, 2022) установлена группа астероидов, испытывающих на промежутке времени 1500–2500 гг. сближения на расстояния менее 0.05 а. е. с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. Melnikov (2022) из перечня астероидов, приведенного в (Devyatkin, Lvov и Tsekmeister, 2022), отобрал объекты, сближающиеся с планетами на расстояния менее 100 радиусов Земли. При сближении на данное расстояние астероид попадает в сферу действия планеты (за исключением случая Меркурия). Схожий критерий для отбора исследуемых астероидов используется различными исследователями (Richardson, Bottke и Love, 1998; Boldrin, Araujo и Winter, 2020). В Табл. 1 приведен список астероидов из работы (Melnikov, 2022), их орбитальные параметры и размеры.

Таблица 1: Орбитальные параметры и диаметры фигур (D) исследуемых астероидов. Данные взяты из (Melnikov, 2022; Devyatkin, Lvov и Tsekmeister, 2022) и <https://ssd.jpl.nasa.gov/>.

Астероид	a , а. е.	e	i , °	ω , °	Ω , °	M , °	D , м
2008 FP	2.5820417	0.897618	3.6053	152.3963	158.4591	314.7334	20
2009 WP6	1.1300877	0.740954	2.7620	228.0252	54.4203	316.4803	20
2010 JJ41	1.0726108	0.672689	3.2819	29.3474	50.1456	85.7767	150
2015 EO61	1.4551681	0.734409	1.9785	261.3447	43.6538	300.4765	170
2015 TX24	2.2660105	0.872083	6.0426	127.0568	32.9362	112.6511	250
2015 XG55	1.0294541	0.557679	2.3634	237.4629	70.3029	164.8940	10
(367943) Duende	0.910140	0.089319	11.6090	195.5777	146.9281	262.7014	50

В работе (Melnikov, 2022) были получены характерные оценки изменения периода собственного вращения избранных малых астероидов из-за сближений с планетами. В Табл. 2 указаны найденные максимальные значения изменений периодов вращений астероидов при сближениях с планетами. Согласно данным Melnikov (там же) приведены значения $|\Delta P|$ — абсолютной величины изменения периода вращения астероида. Отметим, что в численных экспериментах по моделированию сближения астероида с планетой наблюдалось как замедление, так и ускорение вращения астероида. С точки зрения возможности идентификации таких изменений вращательного состояния астероида из анализа наблюдений достаточно знания именно величины $|\Delta P|$.

Из Табл. 2 видно, что в большинстве случаев установленное изменение периода вращения астероида было весьма малым (менее 0.3 ч). Современные методы и инструменты позволяют определять периоды вращения малых астероидов с точностью 10^{-4} – 10^{-6} ч (см., например, Zegmott и др. (2021)). Поэтому имеющее место изменение периода вращения из-за сближения астероида с планетой может быть выявлено из анализа наблюдательных данных (например посредством радарных наблюдений).

Отметим, что в случае весьма тесного (на расстояние $\approx 27\,700$ км) сближения с Землей в 2013 г. астероида (367943) Duende период его вращения существенно изменился (Melnikov, 2022; Devyatkin, Gorshanov и др., 2016; Benson, Scheeres и Moskovitz, 2020) — на 2–3 ч (примерно на 20%). Такое изменение вращательного состояния астероида должно оказать заметное влияние

Таблица 2: Максимальное изменение ΔP периода собственного вращения астероида после его сближения с планетой. Данные взяты из Melnikov (2022).

Астероид	$ \Delta P $, ч			
	Меркурий	Венера	Земля	Марс
2008 FP	–	0.002	0.007	–
2009 WP6	0.0003	0.003	0.002	0.0009
2010 JJ41	0.0002	0.006	0.004	0.001
2015 EO61	0.002	0.005	0.008	0.003
2015 TX24	0.004	0.02	0.09	0.1
2015 XG55	0.008	0.08	0.2	0.009
(367943) Duende	–	–	2.4	–

на его дальнейшую орбитальную динамику, посредством действия эффекта Ярковского, и на величину YORP-эффекта.

2 Световое давление

Для всех астероидов, перечисленных в Табл. 1, было вычислено влияние на их долговременную орбитальную динамику давления солнечной радиации. Сила светового давления определяется формулой (см., например, Мартюшева, Петров и Поляхова (2015))

$$\mathbf{F} = k \frac{E(r)A}{c} \mathbf{e}, \quad (1)$$

где $E(r) = L/(4\pi r^2)$ — освещенность на расстоянии r от Солнца, L — светимость Солнца, $A = \pi R^2$ — площадь миделева сечения, R — радиус астероида, c — скорость света, k — оптический коэффициент астероида, \mathbf{e} — единичный вектор радиального гелиоцентрического направления.

Для вычисления влияния светового давления проводилось интегрирование уравнения движений системы тел (Солнце – Юпитер – астероид) методом Эверхарта (Бордовицина, 1984). Относительная точность интегрирования была положена равной 10^{-10} , шаг интегрирования — 0.1 года. Методика интегрирования и вычисления сил светового давления подробно описана в работе (Мартюшева, Петров и Поляхова, 2015).

Начальные данные для расчетов приведены в Табл. 1 и 3. В Табл. 3 приведены: H_v — видимая звездная величина (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>), δ — альbedo, полученное по формуле (Виноградова и др., 2003):

$$\lg D = 3.122 - 0.5 \lg \delta - 0.2 H_v, \quad (2)$$

k — оптический коэффициент, вычисленный по формуле (Поляхова и Шмыров, 1994)

$$k = 1 + \frac{4}{9} \delta.$$

Поскольку плотность астероидов (необходимая для оценки его массы) неизвестна, вычисления выполнялись для трех различных значений средней плотности основных спектральных классов астероидов (Krasinsky и др., 2002): углеродистых астероидов класса C (1380 кг/м^3), кремниевых астероидов класса S (2710 кг/м^3) и металлических астероидов класса M (5320 кг/м^3); а также для их среднего арифметического значения (3137 кг/м^3).

Расчеты проводились на двух интервалах времени: 10 и 100 лет. В результате были получены следующие величины: смещение астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора Δr , смещение астероида по долготе Δl , а также полное смещение астероида Δd . Результаты вычислений представлены в Табл. 4.

Таблица 3: Принятые для вычисления светового давления Солнца параметры астероидов.

Астероид	D , м	H_v	δ	k
2008 FP	20	26.3	0.13	1.06
2009 WP6	20	26.8	0.08	1.04
2010 JJ41	150	21.8	0.15	1.07
2015 EO61	170	21.4	0.17	1.08
2015 TX24	250	21.6	0.07	1.03
2015 XG55	10	27.7	0.15	1.07
(367943) Duende	50	24.2	0.15	1.07

Таблица 4: Смещения орбиты астероида из-за действия светового давления Солнца.

Астероид	ρ , кг/м ³	$ \Delta r $, км		$ \Delta l $, км		$ \Delta d $, км	
		10 лет	100 лет	10 лет	100 лет	10 лет	100 лет
2008 FP	1380	155	11050	126	14920	201	18570
	2710	80	5630	64	7601	102	9460
	3137	70	4860	55	6566	88	8170
	5320	40	2870	32	3872	52	4820
2009 WP6	1380	235	3707	190	10075	302	10104
	2710	120	1888	97	5131	154	5145
	3137	103	1631	84	4432	133	4445
	5320	61	962	49	2614	78	2621
2010 JJ41	1380	29	355	28	626	40	693
	2710	15	181	14	319	20	353
	3137	13	156	12	275	17	305
	5320	7	92	7	162	10	180
2015 EO61	1380	16	406	15	784	22	819
	2710	8	207	8	381	11	417
	3137	7	178	7	329	10	360
	5320	4	105	4	194	6	212
2015 TX24	1380	11	598	10	885	15	1068
	2710	6	304	5	451	8	544
	3137	5	263	4	389	7	470
	5320	3	155	2	230	4	277
2015 XG55	1380	312	2645	428	7255	530	7256
	2710	159	1347	218	3694	270	3695
	3137	138	1164	188	3194	233	3192
	5320	81	686	111	1882	138	1882

Согласно полученным результатам, отклонения Δr , Δl и Δd носят нелинейный характер по времени и убывают с увеличением значений плотности для всех представленных астероидов. Очевидно, что наибольшие отклонения соответствуют астероидам с наименьшим диаметром: 2008 FP, 2009 WP6 и 2015 XG55. Наименьшие отклонения, напротив, соответствуют астероидам наибольшего диаметра: 2010 JJ41, 2015 EO61 и 2015 TX24. Средние смещения орбит рассмотренных астероидов из-за действия сил светового давления составляют от 0.3 до 30 км за год, т. е. являются весьма существенными и на два–три порядка превышают размеры астероида. Поэтому действие силы светового давления необходимо учитывать при оценке астероидно-кометной опасности и

планировании космических миссий к малым астероидам. Если рассматривать долговременную динамику астероидов с точки зрения их сближений с планетами, то, например, смещение орбиты астероида 2008 FP из-за действия силы светового давления на промежутке времени в 100 лет почти на 20 000 км ($\approx 3 R_E$, где R_E — радиус Земли) может увеличить вероятность его катастрофического сближения с планетой. Отметим, что в 2008 г. астероид 2008 FP сближался с Землей на расстояние около $27 R_E$ (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

3 Эффект Ярковского

Помимо силы давления солнечной радиации для всех астероидов, перечисленных в Табл. 1, был вычислен эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Radzievskii, 1952), который представляет собой негравитационное ускорение в орбитальном движении, вызываемое анизотропным переизлучением солнечной радиации поверхностью вращающегося астероида. Термодинамическая модель эффекта Ярковского была взята из работ (Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický, Milani и Chesley, 2000). Средняя скорость векового изменения большой полуоси орбиты астероида a складывается под влиянием двух эффектов: суточного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_d = -\frac{8\alpha}{9n} \frac{F(r)\pi R^2}{Mc(1+\lambda)} G \sin \delta \cos \gamma, \quad (3)$$

и сезонного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_s = \frac{4\alpha}{9n} \frac{F(r)\pi R^2}{Mc(1+\lambda)} G \sin \delta \sin^2 \gamma, \quad (4)$$

где α — поглощающая способность поверхности астероида, n — среднее суточное движение астероида, M — масса астероида, c — скорость света, R — радиус астероида, $F(r)$ — поток солнечной радиации на расстоянии r от Солнца, ($F(r) = 1370/r^2$ Вт/м²), γ — угол наклона оси вращения астероида к плоскости орбиты, G — амплитуда эффекта, δ — фаза эффекта. Для безразмерного параметра λ имеем

$$\lambda = \frac{\sqrt{K\rho_s C\omega}}{\epsilon\sigma T^3} \frac{l}{R\sqrt{2}},$$

где K — теплопроводность вещества астероида, C — теплоемкость вещества астероида, ϵ — коэффициент эмиссии астероида, σ — постоянная Стефана–Больцмана, ρ_s — плотность поверхностных слоев астероида, T — температура астероида, связанная соотношением $\alpha F(r) = \epsilon\sigma T^4$, ω — частота вращения астероида, $l = \sqrt{K/(\rho_s C\omega)}$ — глубина проникновения тепловых волн.

Следующие характеристики были приняты средними для всех астероидов: $\rho = 3137$ кг/м³ — плотность (см. предыдущий раздел), $\epsilon = 0.9$ — коэффициент эмиссии, $K = 10^{-2}$ Вт/(мК) — теплопроводность, $C = 500$ Дж/(кгК) — теплоемкость.

Интегрирование уравнений (3) и (4) методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности по времени с шагом 10^{-5} орбитального периода астероида позволяет получить величину изменения его большой полуоси за один оборот вокруг Солнца. Методика вычисления эффекта Ярковского взята из (Панасенко и Чернетенко, 2014).

Вычисления выполнялись для трех различных значений периода вращения астероида $P = 5, 10$ и 15 ч. Ось вращения предполагалась ортогональной плоскости орбиты для всех астероидов, $\gamma = 0^\circ$ (в случае $\gamma = 180^\circ$ величина эффекта имеет противоположный знак). В таком случае влияние суточной компоненты $(da/dt)_d$ эффекта Ярковского на большую полуось a будет максимальным, а влияние сезонной составляющей $(da/dt)_s$ обращается в ноль. Результат действия обоих компонент $(da/dt)_{d+s}$ и представляет собой эффект Ярковского. Отметим, что для малых астероидов суточный эффект Ярковского существенно выше сезонного. В зависимости от направления вращения астероида по отношению к направлению орбитального движения эффект Ярковского может вызывать как замедление орбитального движения, т. е. увеличение a , что соответствует $\gamma < 90^\circ$, так и ускорение, т. е. уменьшение a при $\gamma > 90^\circ$. Результаты вычислений величины эффекта Ярковского для всех астероидов из Табл. 1 представлены в Табл. 5.

Таблица 5: Величина эффекта Ярковского $(da/dt)_{d+s} \times 10^{-5}$, а. е./млн лет для астероидов.

Астероид	P , ч		
	5	10	15
2008 FP	0.2645	0.2882	0.2938
2009 WP6	4.3560	3.2006	2.6582
2010 JJ41	0.1981	0.1680	0.1492
2015 EO61	0.0905	0.0854	0.0800
2015 TX24	0.0250	0.0267	0.0269
2015 XG55	4.2036	3.3751	2.9188

Расчеты величины эффекта Ярковского показали, что наибольшая величина $(da/dt)_{d+s}$ соответствует астероидам 2009 WP6 и 2015 XG55. Этим двум астероидам из рассмотренной нами выборки соответствуют наименьшие видимые звездные величины (см. Табл. 3), что может быть объяснено весьма малыми размерами астероидов, либо их низким альбедо (см. уравнение (2)).

Для всех исследуемых астероидов была детально рассмотрена зависимость величины эффекта Ярковского от P — периода вращения астероида. Величина $(da/dt)_{d+s}$ вычислялась, предполагая $\gamma = 45^\circ$ (произвольное значения для учета действия сезонной и суточной компонент), на множестве значений P от 1 до 30 ч с шагом 1 ч. На рис. 1 представлены зависимости средней скорости изменения величины большой полуоси орбиты астероида из-за действия эффекта Ярковского от P для астероидов 2009 WP6 и 2015 XG55. Для остальных астероидов вычисленные величины эффекта Ярковского на 2–3 порядка меньше и не играют существенной роли в их орбитальной динамике, поэтому мы не привели полученные для них зависимости. Видно, что зависимости, представленные на рис. 1, являются нелинейными и в случае малых астероидов ($D \sim 20$ м) с быстрым вращением ($P \leq 10$ ч) изменение a за год сопоставимо с размерами астероида.

На рис. 2 представлена зависимость средней скорости изменения величины большой полуоси орбиты из-за действия эффекта Ярковского для астероида (367943) Duende. Видно, что изменение периода вращения астероида, имевшее место при его весьма тесном сближении с Землей в 2013 г., существенным образом не повлияло на величину эффекта Ярковского. При изменении периода вращения астероида на $\Delta P = 2$ –3 ч средняя скорость изменения величины большой полуоси астероида изменилась на $\approx 10\%$.

Помимо изменения периода собственного вращения астероида из-за его тесного сближения с планетой имеет место изменение γ — угла наклона между осью вращения и плоскостью орбиты. Поскольку величина эффекта Ярковского также определяется углом γ (см. (3) и (4)), изменение ориентации оси вращения будет сказываться на эволюции орбиты астероида. Более того, сближение с планетой может привести к тому, что вращение астероида перейдет в режим «кувыркания» (tumbling) Pravec и др. (2005), либо в режим хаотического (непредсказуемого) вращения, имеющий место во вращательной эволюции малых спутников планет (Wisdom, 1987; Melnikov и Shevchenko, 2010). В последнем случае, вероятно, эффект Ярковского не будет влиять на вековую эволюцию орбиты астероида. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

4 Выводы и обсуждение

Итак, в настоящей работе для ряда малых астероидов ($D = 10$ –250 м), испытывающих последовательные сближения с планетами земной группы, получены оценки влияния на орбитальную динамику давления солнечной радиации и эффекта Ярковского. Установлено, что действие светового давления приводит к смещению орбиты астероида на величину от сотен метров до десятков километров в год. Величина изменения большой полуоси орбиты астероида из-за действия эффекта Ярковского за год сравнима с размерами астероида, и для быстро вращающихся астероидов

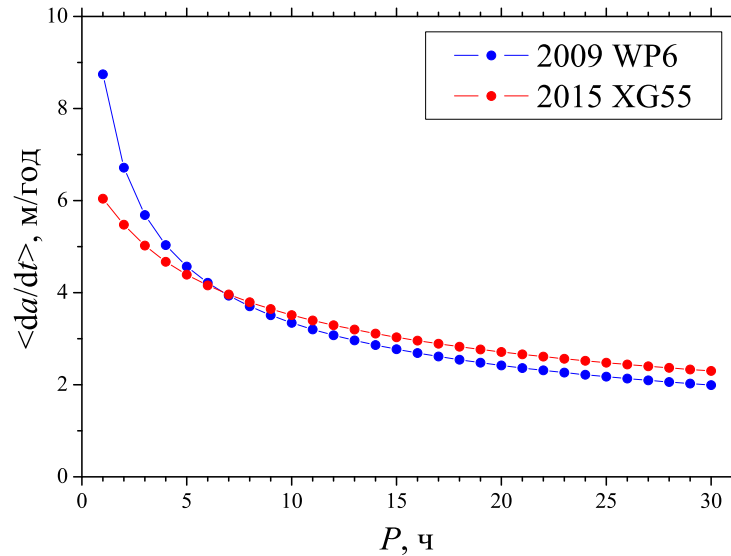


Рис. 1: Зависимость средней скорости изменения величины большой полуоси орбиты астероида из-за действия эффекта Ярковского от периода собственного вращения астероида.

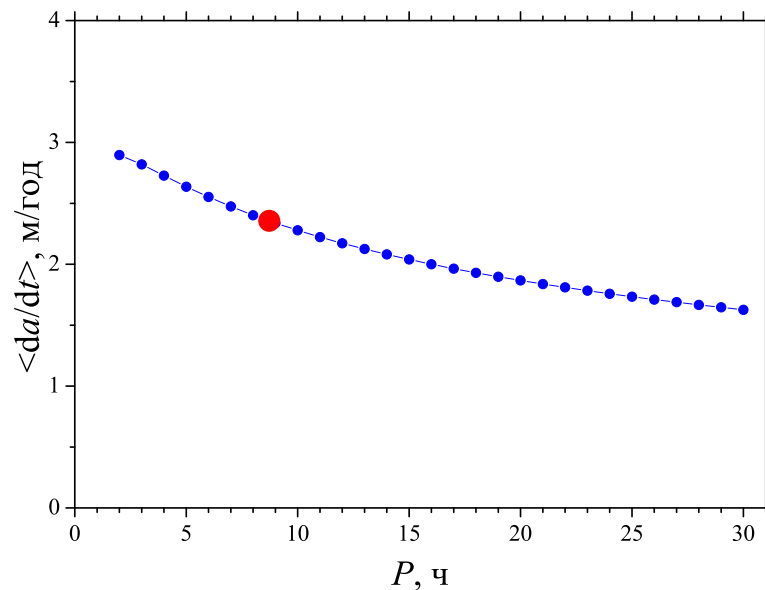


Рис. 2: Зависимость средней скорости изменения величины большой полуоси орбиты астероида (367943) Duende из-за действия эффекта Ярковского от периода собственного вращения астероида. Красным кругом указан реальный период вращения астероида (Benson, Scheeres и Moskovitz, 2020).

($P \leq 10$ ч) может составлять до 10 м.

Сближение астероида с планетой, может привести к существенному изменению его вращательного состояния — величины периода собственного вращения астероида и ориентации оси вращения в пространстве. Изменение вращательного состояния астероида приведет к изменению величины эффекта Ярковского. Полученные нами оценки показали, что влияние сближения с планетой на орбитальную динамику астероида из-за изменения периода его собственного вращения посредством действия эффекта Ярковского хотя обычно мало, может быть существенным. В случае, когда орбита астероида проходит достаточно далеко от планеты (20–100 радиусов Земли) период вращения астероида изменяется менее чем на 0.3 ч. Однако при весьма тесных сближе-

ниях (менее пяти радиусов Земли) период вращения астероида может измениться на несколько часов, что окажет заметное влияние на величину эффекта Ярковского и дальнейшую орбитальную динамику астероида.

При наблюдательной идентификации проявлений эффекта Ярковского и YORP-эффекта в динамике малых астероидов необходимо учитывать наличие сближений с планетами, иначе можно получить ошибочные оценки величин указанных эффектов. Влияние негравитационных эффектов возрастает со временем, и на больших интервалах времени изменение орбиты астероида может быть весьма существенным — несколько десятков тысяч километров на промежутке времени в 100 лет. Таким образом, при планировании космических миссий к малым астероидам необходимо учитывать как световое давление солнечной радиации и эффект Ярковского, так и влияние изменения вращательного состояния астероида при сближениях с планетами на его дальнейшую орбитальную динамику.

Благодарности

Настоящее исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00306, <https://rscf.ru/project/23-22-00306/>. Авторы благодарят рецензента за весьма ценные замечания и А.В. Девяткина и М.Ю. Ховричева за полезные замечания и обсуждения.

Список литературы

- Melnikov, A. V. (2022). [Rotational Dynamics of Asteroids Approaching Planets](#). *Solar System Research* 56.4, с. 241–251.
- Chodas, P. W. и D. K. Yeomans (1996). [The orbital motion and impact circumstances of Comet Shoemaker-Levy 9](#). В: IAU Colloq. 156: The Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter. Под ред. K. S. Noll, H. A. Weaver и P. D. Feldman, с. 1–30.
- Popova, O. P., P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova, E. Biryukov, S. Khaibrakhmanov, V. Shuvalov, Y. Rybnov, A. Dudorov, V. I. Grokhovsky, D. D. Badyukov, Q.-Z. Yin, P. S. Gural, J. Albers, M. Granvik, L. G. Evers, J. Kuiper, V. Kharlamov, A. Solovyov, Y. S. Rusakov, S. Korotkiy, I. Serdyuk, A. V. Korochantsev, M. Y. Larionov, D. Glazachev, A. E. Mayer, G. Gisler, S. V. Gladkovsky, J. Wimpenny, M. E. Sanborn, A. Yamakawa, K. L. Verosub, D. J. Rowland, S. Roeske, N. W. Botto, J. M. Friedrich, M. E. Zolensky, L. Le, D. Ross, K. Ziegler, T. Nakamura, I. Ahn, J. I. Lee, Q. Zhou, X.-H. Li, Q.-L. Li, Y. Liu, G.-Q. Tang, T. Hiroi, D. Sears, I. A. Weinstein, A. S. Vokhmintsev, A. V. Ishchenko, P. Schmitt-Kopplin, N. Hertkorn, K. Nagao, M. K. Haba, M. Komatsu, T. Mikouchi и all (2013). [Chelyabinsk Airburst, Damage Assessment, Meteorite Recovery, and Characterization](#). *Science* 342.6162, с. 1069–1073.
- Emel'yanenko, V. V., O. P. Popova, N. N. Chugai, M. A. Shelyakov, Y. V. Pakhomov, B. M. Shustov, V. V. Shuvalov, E. E. Biryukov, Y. S. Rybnov, M. Y. Marov, L. V. Rykhlova, S. A. Naroenkov, A. P. Kartashova, V. A. Kharlamov и I. A. Trubetskaya (2013). [Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event \(February 15, 2013\)](#). *Solar System Research* 47.4, с. 240–254.
- 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.
- Sharma, I., J. T. Jenkins и J. A. Burns (2006). [Tidal encounters of ellipsoidal granular asteroids with planets](#). *Icarus* 183.2, с. 312–330.
- Tóth, J., P. Vereš и L. Kornoš (2011). [Tidal disruption of NEAs - a case of Příbram meteorite](#). *MNRAS* 415.2, с. 1527–1533.
- Zhang, Y. и P. Michel (2020). [Tidal distortion and disruption of rubble-pile bodies revisited. Soft-sphere discrete element analyses](#). *A&A* 640, A102, A102.
- Voropaev, S. A., Y. Jianguo и J.-P. Barriot (2020). [Prolate Body Disruption by Earth at Near Flyby: Possible Scenarios](#). *Solar System Research* 54.2, с. 155–166.
- Zeng, X., C. Feng, T. Wen и Q. Gan (2022). [The Coupling Orbit–Attitude–Structure Evolution of Rubble-Pile Asteroid with Earth Flyby in the Restricted Three-Body Problem](#). *Aerospace* 9.7, с. 351.
- Devyatkin, A. V., D. L. Gorshanov, V. N. Yershov, A. V. Melnikov, A. A. Martyusheva, S. N. Petrova, V. N. L'vov, S. D. Tsekmeister и K. N. Naumov (2016). [A study of the asteroid \(367943\) Duende at Pulkovo Observatory](#). *MNRAS* 459.4, с. 3986–3997.
- 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, 113518, с. 113518.
- 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.
- 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.
- 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.
- Shor, V. A., Y. A. Chernetenko, O. M. Kochetova и N. B. Zheleznov (2012). [On the impact of the Yarkovsky effect on Apophis' orbit](#). *Solar System Research* 46.2, с. 119–129.
- Rubincam, D. P. (2000). [Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids](#). *Icarus* 148.1, с. 2–11.

- Ershkov, S. V. и R. V. Shamin (2018). *The dynamics of asteroid rotation, governed by YORP effect: The kinematic ansatz*. *Acta Astronautica* 149, с. 47–54.
- Lowry, S. C., A. Fitzsimmons, P. Pravec, D. Vokrouhlický, H. Boehnhardt, P. A. Taylor, J.-L. Margot, A. Galád, M. Irwin, J. Irwin и P. Kusnirák (2007). *Direct Detection of the Asteroidal YORP Effect*. *Science* 316.5822, с. 272.
- Greenberg, A. H., J.-L. Margot, A. K. Verma, P. A. Taylor и S. E. Hodge (2020). *Yarkovsky Drift Detections for 247 Near-Earth Asteroids*. *AJ* 159.3, 92, с. 92.
- Devyatkin, A. V., V. N. Lvov и S. D. Tsekmeister (2022). *Special Groups of Potentially Hazardous Asteroids*. *Solar System Research* 56.1, с. 62–65.
- Zegmott, T. J., S. C. Lowry, A. Rožek, B. Rozitis, M. C. Nolan, E. S. Howell, S. F. Green, C. Snodgrass, A. Fitzsimmons и P. R. Weissman (2021). *Detection of the YORP effect on the contact binary (68346) 2001 KZ66 from combined radar and optical observations*. *MNRAS* 507.4, с. 4914–4932.
- Мартюшева, А. А., Н. А. Петров и Е. Н. Поляхова (2015). *Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей*. *Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2 (60).1*, с. 135–147.
- Бордовицина, Т. В. (1984). *Современные численные методы в задачах небесной механики*. М.: Наука, с. 136.
- Виноградова, Т. А., Н. В. Железнов, В. Б. Кузнецов, Ю. А. Чернетенко и В. А. Шор (2003). *Каталог потенциально опасных астероидов и комет*. *Труды ИПА РАН* 9, с. 43.
- Поляхова, Е. Н. и А. С. Шмыров (1994). *Физическая модель сил давления световой радиации на плоскость и сферу*. *Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2 (8).1*, с. 87–104.
- Krasinsky, G. A., E. V. Pitjeva, M. V. Vasilyev и E. I. Yagudina (2002). *Hidden Mass in the Asteroid Belt*. *Icarus* 158.1, с. 98–105.
- Панасенко, А. И. и Ю. А. Чернетенко (2014). *Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов*. *Труды ИПА РАН* 31, с. 59–65.
- Pravec, P., A. W. Harris, P. Scheirich, P. Kušnirák, L. Šarounová, C. W. Hergenrother, S. Mottola, M. D. Hicks, G. Masi, Y. N. Krugly, V. G. Shevchenko, M. C. Nolan, E. S. Howell, M. Kaasalainen, A. Galád, P. Brown, D. R. DeGraff, J. V. Lambert, W. R. Cooney и S. Foglia (2005). *Tumbling asteroids*. *Icarus* 173.1, с. 108–131.
- Wisdom, J. (1987). *Rotational Dynamics of Irregularly Shaped Natural Satellites*. *AJ* 94, с. 1350.
- Melnikov, A. V. и I. I. Shevchenko (2010). *The rotation states predominant among the planetary satellites*. *Icarus* 209.2, с. 786–794.

On the magnitude of the Yarkovsky effect in the dynamics of potentially hazardous asteroids

A.A. Martyusheva, A.V. Melnikov

The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Abstract

Estimates of the influence of the solar radiation pressure and the Yarkovsky effect on the long-term orbital dynamics are obtained for a number of asteroids experiencing successive approaches to planets. Based on the estimates of the change in the value of the asteroid's proper rotation period obtained in (Melnikov, 2022) due to its approaches to the planets, the influence of such events on the further orbital dynamics of an asteroid through the Yarkovsky effect is considered. It is shown that close encounters with the planets of small asteroids (tens of meters in diameter) with fast rotation (proper rotation period less than 10 h), leading to a change in the asteroid rotation period by several hours, can change the magnitude of the Yarkovsky effect by 30–50%.