

УДК 521.1,523.4

## О ВЛИЯНИИ СБЛИЖЕНИЙ С ПЛАНЕТАМИ НА ВЕЛИЧИНУ ЭФФЕКТА ЯРКОВСКОГО В ДИНАМИКЕ АСТЕРОИДОВ

© 2023 г. А. А. Мартюшева<sup>а</sup>, А. В. Мельников<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: melnikov@gaoran.ru

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.

После доработки 03.04.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Для ряда астероидов, испытывающих последовательные сближения с планетами, получены оценки влияния светового давления Солнца и эффекта Ярковского на долговременную орбитальную динамику. Рассмотрено влияние изменения величины периода собственного вращения астероида из-за сближения с планетой на его дальнейшую орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского. Показано, что тесные сближения с планетами малых астероидов (десятки метров в диаметре) с быстрым вращением (период вращения менее 10 ч), приводящие к изменению периода собственного вращения астероида на несколько часов, существенно влияют на величину эффекта Ярковского для него.

**Ключевые слова:** астероиды, сближения с планетами, световое давление, эффект Ярковского, вращательная динамика, орбитальная динамика

**DOI:** 10.31857/S0320930X23050055, **EDN:** NZNDZW

### 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, Yeomans, 1996; Емельяненко и др., 2013), либо распадом астероида на более мелкие тела (Richardson и др., 1998; Sharma и др., 2006; Tóth и др., 2011; Zhang, Michel, 2020; Воропаев и др., 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 (Батраков, Медведев, 1992; Devyatkin и др., 2016; Scheeres и др., 2000; 2004; 2005; Souchaу и др., 2018; Benson и др., 2020; 2023; Boldrin и др., 2020; Мельников, 2022); это влияние вносит определенный вклад в его дальнейшую орбитальную ди-

намику. Для малых астероидов (диаметром сотни метров и менее) драйвером такого процесса может являться эффект Ярковского (Ярковский, 1901; Радзиевский, 1952; 2003; Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000; 2015a). Характер и величина возмущений орбиты астероида вследствие действия этого эффекта зависит от вращательного состояния (скорости вращения, ориентации оси вращения относительно направления на Солнце), свойств поверхности астероида, его формы и ряда других факторов. Наиболее заметен данный эффект в вековом изменении величины большой полуоси орбиты астероида, которое можно выявить посредством наблюдений изменения величины среднего движения астероида. Эффект Ярковского может существенным образом влиять на оценку вероятности столкновения астероида с планетой. Что подтверждают, например, детальные исследования влияния эффекта Ярковского на динамику астероида, сближающегося с Землей (АСЗ), (99942) Apophis, проведенные в работах (Chesley и др., 2009; Шор и др., 2012; Farnocchia и др., 2013; Vokrouhlický и др., 2015b; Benson и др., 2023). Во вращательной динамике малых астероидов неправильной формы существенную роль играет эффект анизотропного переизлучения — YORP-эффект (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack), приводящий к изменению скорости вращения астероида и ориентации его оси враще-

**Таблица 1.** Орбитальные параметры и диаметры фигур ( $D$ ) исследуемых астероидов

Астероид	$a$ , а. е.	$e$	$i$ , град	$\omega$ , град	$\Omega$ , град	$M$ , град	$D$ , 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

Примечание:  $a$  – большая полуось,  $e$  – эксцентриситет орбиты,  $i$  – наклонение,  $\omega$  – аргумент перицентра,  $\Omega$  – долгота восходящего узла,  $M$  – средняя аномалия. Данные взяты из работ (Девяткин и др., 2022; Мельников, 2022) и <https://ssd.jpl.nasa.gov/>.

ния в пространстве (Rubincam, 2000; Ershkov, Shamin, 2018; Lowgu и др., 2007; Vokrouhlický и др., 2015a; Greenberg и др., 2020). Изменение вращательного состояния астероида из-за сближения с планетой должно оказывать влияние как на величину эффекта Ярковского, так и на величину YORP-эффекта.

В работе (Мельников, 2022) для ряда малых астероидов были получены оценки изменений величины периода собственного вращения астероида из-за его последовательных сближений с планетами земной группы. В настоящей работе для выборки астероидов из работы (Мельников, 2022) 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 дальнейшую орбитальную динамику посредством действия эффекта Ярковского.

### ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДА ИЗ-ЗА СБЛИЖЕНИЯ С ПЛАНЕТОЙ

В работе (Девяткин и др., 2022) была установлена группа астероидов, испытывающих на промежутке времени 1500–2500 гг. сближения на расстоянии менее 0.05 а. е. с Меркурием, Венерой, Землей и Марсом. Мельников (2022) из перечня астероидов, приведенного в работе Девяткина и др. (2022), отобрал объекты, сближающиеся с перечисленными выше планетами на расстоянии 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 и др., 1998; Boldrin и др., 2020). В табл. 1 приведены список астероидов из работы (Мельников, 2022), их орбитальные параметры и размеры. Для всех астероидов в (Мельников, 2022) были найдены максимальные значения

изменений периодов вращений малых астероидов при сближениях с планетами, а именно, в табл. 2 указаны значения  $|\Delta P|$  – абсолютной величины изменения периода вращения астероида. В численных экспериментах по моделированию сближения астероида с планетой наблюдалось как замедление, так и ускорение вращения астероида. Для определения возможности идентификации таких изменений вращательного состояния астероида из анализа наблюдений достаточно знания именно величины  $|\Delta P|$ .

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что в большинстве случаев установленное изменение периода вращения астероида после его сближения с планетой является весьма малым (менее 0.3 ч). Современные методы и инструменты позволяют определять периоды вращения малых астероидов с точностью больше чем  $10^{-4}$  ч (см., например, Lee и др., 2021; Podlewska-Gaca и др., 2021; Zegmott и др., 2021). Поэтому указанные в табл. 2 изменения периода вращения астероида могут быть выявлены из анализа наблюдательных данных. Отметим, что в случае весьма тесного (на расстояние  $\approx 27700$  км) сближения с Землей в 2013 г. астероида (367943) Duende период его вращения существенно изменился (Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2020; Мельников, 2022) – по разным оценкам на 2–3 ч (примерно на 20%). Вероятно, такое изменение вращательного состояния астероида должно оказать влияние как на его дальнейшую орбитальную динамику, посредством изменения величины эффекта Ярковского, так и на величину YORP-эффекта, оказывающего влияние на вращательную динамику астероида. Рассмотрим далее вопрос об изменении величины эффекта Ярковского для сближающихся с планетами астероидов подробно.

### СВЕТОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

Для всех астероидов, перечисленных в табл. 1, было вычислено влияние на их долговременную

**Таблица 2.** Максимальное изменение величины периода собственного вращения астероида из-за его сближения с планетой (прочерк означает отсутствие сближений)

Астероид	ΔP , ч			
	Меркурий	Венера	Земля	Марс
2008 FP	—	0.002	0.007	—
2009 WP6	0.0003	0.003	0.002	0.003
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	—

Примечание: данные взяты из (Мельников, 2022).

орбитальную динамику давления солнечной радиации. Сила светового давления определяется формулой (см., например, Радзиевский, 2003)

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

где  $E(r) = L/(4\pi r^2)$  – освещенность на расстоянии  $r$  от Солнца,  $L$  – светимость Солнца,  $A = \pi R^2$  – площадь миделева сечения астероида,  $R$  – радиус астероида,  $c$  – скорость света,  $k$  – оптический коэффициент астероида,  $\mathbf{e}$  – единичный вектор радиального гелиоцентрического направления. В общем случае оптическая модель поверхности астероида исходит из предположения о преобладании диффузного характера переизлучения света, при котором для сферического тела оптический коэффициент имеет вид (Поляхова, Шмыров, 1994):  $k = \alpha + \beta + (13/9) \delta$ , где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\beta$  и  $\delta$  – коэффициенты зеркального и диффузного отражения, соответственно. Для астероида принимаем  $\beta = 0$ , а  $\delta$  представляет собой геометрическое альbedo астероида. Тогда, из условия непрерывности потока световой энергии  $\alpha + \beta + \delta = 1$ , следует:  $\alpha = 1 - \delta$ ,  $k = 1 + (4/9) \delta$ .

Для вычисления влияния светового давления проводилось интегрирование уравнений движения системы тел (Солнце–Юпитер–астероид) методом Эверхарта 19-го порядка (Бордовицына, 1984). Относительная точность интегрирования была положена равной  $10^{-10}$ , шаг интегрирования – 0.1 года. Методика интегрирования и вычисления сил светового давления подробно описаны в работе (Мартюшева и др., 2015).

Начальные данные для расчетов приведены в табл. 1 и 3. В табл. 3 указаны:  $H_v$  – видимая звездная величина астероида (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>),  $\delta$  – альbedo астероида, полученное по формуле (Виноградова и др., 2003)

$$\lg D = 3.122 - 0.5 \lg \delta - 0.2 H_v, \quad (1)$$

и  $k$  – оптический коэффициент, вычисленный по формуле (см. выше):  $k = 1 + (4/9) \delta$ .

Поскольку плотность астероида  $\rho$ , необходимая для оценки его массы, неизвестна, вычисления влияния светового давления выполнялись для трех различных значений средней плотности основных спектральных классов астероидов (Krasinsky и др., 2002): углеродистых астероидов класса C ( $\rho = 1380 \text{ кг/м}^3$ ), кремниевых астероидов класса S ( $2710 \text{ кг/м}^3$ ) и металлических астероидов класса M ( $5320 \text{ кг/м}^3$ ); а также для их среднего арифметического значения ( $3137 \text{ кг/м}^3$ ). За исключением астероида (367943) Duende, принадлежащего к группе атонцев, все остальные из рассмотренных астероидов принадлежат к группе аполлонцев. Согласно различным исследованиям (Caḡу и др., 2016; Perna и др., 2018; Binzel и др., 2019; Hromakina и др., 2023) значительная часть (40–70%) AC3 представляют собой астероиды класса S, астероидов класса C существенно меньше (10–20%), астероиды класса M встречаются редко. Из всех рассмотренных нами астероидов принадлежность к классу S установлена (Moskovitz и др., 2020) только у (367943) Duende. Оценки, полученные для среднего значения плотности, позволяют дополнительно грубо охарактеризовать величину исследуемого эффекта для остальных

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

Астероид	$D$ , м	$H_v$	$\delta$	$k$
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	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Delta r$ , км		$\Delta l$ , км		$\Delta d$ , км	
		$t = 10$ лет	$t = 100$ лет	$t = 10$ лет	$t = 100$ лет	$t = 10$ лет	$t = 100$ лет
2008 FP	1380	155	11050	126	14920	201	18570
	2710	79	5626	64	7601	102	9457
	3137	69	4860	55	6566	88	8169
	5320	40	2866	33	3872	52	4817
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	961	49	2614	78	2621
2010 JJ41	1380	29	355	27	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	818
	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	450	8	544
	3137	5	263	4	389	6	470
	5320	3	155	2	229	4	277
2015 XG55	1380	313	2645	428	7255	530	7256
	2710	159	1347	218	3694	270	3695
	3137	137	1164	188	3191	233	3192
	5320	81	686	111	1882	137	1882

ных астероидов, спектральный класс которых пока не определен.

Расчеты влияния светового давления на орбитальную динамику астероидов проводились на двух интервалах времени:  $t = 10$  и 100 лет. В результате были получены следующие величины: смещение астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора  $\Delta r$ , смещение астероида по долготе  $\Delta l$ , а также полное смещение астероида  $\Delta d$ . Результаты вычислений представлены в табл. 4. Результаты исследования влияния светового давления на динамику астероида (367943) Duende приведены в работе (Devyatkin и др., 2016), где указано, что для  $t = 10$  лет и разных значений параметров задачи имеем:  $\Delta d = 250\text{--}280$  км.

Согласно полученным результатам, отклонения  $\Delta r$ ,  $\Delta l$  и  $\Delta d$  носят нелинейный характер по времени и убывают с увеличением значений плотности для всех рассмотренных астероидов (см. также Мартюшева и др., 2015). Очевидно, что наибольшие отклонения соответствуют астерои-

дам с наименьшим диаметром: 2008 FP, 2009 WP6, 2015 XG55 и (367943) Duende. 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 0.4 до 50 км за год (на основе вычислений, проведенных для  $t = 10$  лет), т.е. являются весьма существенными и на два–три порядка превышают размеры астероида. Поэтому действие силы светового давления, безусловно, необходимо учитывать при оценке астероидно-кометной опасности и планировании космических миссий к малым астероидам. Например, если рассматривать долговременную динамику астероидов с точки зрения их сближений с планетами, то найденное (см. табл. 4) смещение орбиты астероида 2008 FP из-за действия силы светового давления на промежутке времени  $t = 100$  лет почти на 20 000 км ( $\approx 3R_E$ , где  $R_E$  – радиус Земли) может увеличить вероятность его ката-

строфического сближения с планетой. Отметим, что в 2008 г. астероид 2008 FP сближался с Землей на расстояние около  $27R_E$  (согласно данным <https://ssd.jpl.nasa.gov/>).

### ЭФФЕКТ ЯРКОВСКОГО

Помимо силы светового давления солнечной радиации для всех астероидов, перечисленных в табл. 1, была вычислена величина эффекта Ярковского (Ярковский, 1901; Радзиевский, 1952; 2003), представляющего 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 и др., 2000). Средняя скорость векового изменения большой полуоси орбиты астероида  $a$  складывается под влиянием двух эффектов: суточного

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

и сезонного

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_s = \frac{4\alpha}{9n} \frac{F(r)\pi R^2}{Mc(1+\lambda)} G \sin \delta \sin^2 \gamma, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – 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 ( $F(r) = 1370r^2$  Вт/м<sup>2</sup>),  $\gamma$  – угол наклона оси вращения астероида к плоскости орбиты,  $G$  – амплитуда эффекта,  $\delta$  – фаза эффекта. Для безразмерного параметра  $\lambda$  имеем

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

где  $K$  – теплопроводность вещества астероида,  $C$  – теплоемкость вещества астероида,  $\varepsilon$  – коэффициент эмиссии астероида,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $\rho_s$  – плотность поверхностных слоев астероида,  $T$  – температура астероида, связанная соотношением  $\alpha F(r) = \varepsilon\sigma T^4$ ,  $\omega$  – частота вращения астероида,  $l = (K/(\rho_s C\omega))^{1/2}$  – глубина проникновения тепловых волн.

Интегрирование уравнений движения методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности с шагом  $10^{-5}$  орбитального периода астероида позволило получить величину изменения его большой полуоси из-за эффекта Ярковского за один оборот вокруг Солнца. Методика вычисления величины эффекта Ярковского была взята из (Панасенко, Чернетенко, 2014). Следующие характеристики были приняты для всех астероидов:  $\rho_s = \rho = 3137$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon = 0.9$ ,  $K = 10^{-2}$  Вт/(м К),  $C = 500$  Дж/(кг К). Ис-

пользование средней величины плотности астероида позволило оценить величину эффекта Ярковского без разделения АСЗ на спектральные классы (см. предыдущий раздел). Отметим, что величины эффекта Ярковского, вычисленные для одного и того же астероида при разных значениях плотности, соответствующих возможным спектральным классам, отличались на 5–10%. Для величины светового давления, различия существенно выше (см. табл. 4).

Поскольку реальные вращательные состояния астероидов неизвестны, вычисления выполнялись для трех различных значений периода вращения астероида,  $P = 5, 10$  и  $15$  ч. Выбор этих значений обусловлен тем, что согласно данным наблюдений  $P < 10$  ч для большей части астероидов с  $D < 100$  м (см. рис. 8 в (Pravec и др., 2014) и рис. 6 в (Zhang, Michel, 2021)). Для всех астероидов ось вращения предполагалась ортогональной плоскости орбиты,  $\gamma = 0^\circ$  (в случае  $\gamma > 180^\circ$  величина эффекта Ярковского имеет противоположный знак). При такой ориентации оси вращения влияние суточной компоненты  $(da/dt)_d$  эффекта Ярковского на большую полуось будет максимальным, а влияние сезонной составляющей  $(da/dt)_s$  обращается в ноль. Суммарный результат действия обеих компонент  $(da/dt)_{d+s}$  и представляет собой эффект Ярковского. Отметим, что для малых астероидов суточный эффект Ярковского существенно выше сезонного (Vokrouhlický и др., 2015a). 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.

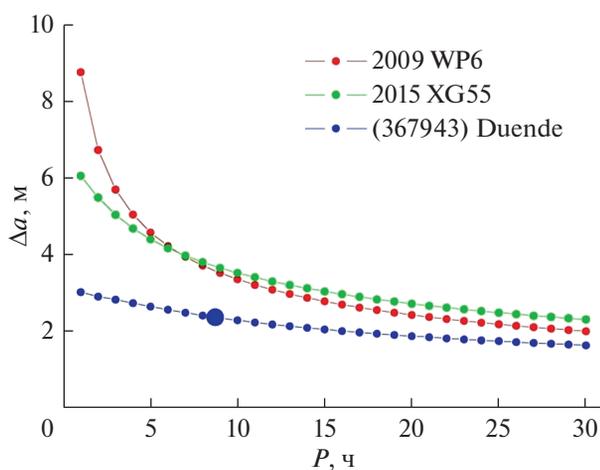
Расчеты показали, что наибольшая величина  $(da/dt)_{d+s}$  соответствует астероидам 2009 WP6, и 2015 XG55 и (367943) Duende. Этим астероидам из рассмотренной нами выборки соответствуют наименьшие видимые звездные величины, что может быть объяснено весьма малыми размерами астероидов, либо их низким альбедо (см. уравнение (1) и табл. 2). Отметим, что в случае астероида (367943) Duende его размер определен из радарных наблюдений (Benner и др., 2013). Относительно малая величина эффекта Ярковского для 2008 FP, также имеющего небольшой размер, может быть объяснена его более удаленной по сравнению с тремя указанными выше астероидами от Солнца орбитой (см. табл. 1).

Для всех исследуемых астероидов была изучена зависимость величины эффекта Ярковского от  $P$  и  $\gamma$  (периода и угла наклона оси вращения астероида, соответственно). В первом случае величи-

**Таблица 5.** Величина эффекта Ярковского  $(da/dt)_{d+s} \times 10^{-4}$  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
(367943) Duende	1.7620	1.5320	1.3630

на  $(da/dt)_{d+s}$  вычислялась за один орбитальный период астероида, в предположении, что  $\gamma = 45^\circ$  (произвольное значение для учета действия сезонной и суточной компонент), на множестве значений  $P$  от 1 до 30 ч с шагом 1 ч. Во втором случае, для трех фиксированных значений  $P = 5, 10$  и 15 ч эффект Ярковского вычислялся за один орбитальный период астероида на множестве значений  $\gamma$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . Для удобства анализа полученных результатов мы получили оценки  $\Delta a$  — величины изменения большой полуоси астероида за год из-за действия эффекта Ярковского.

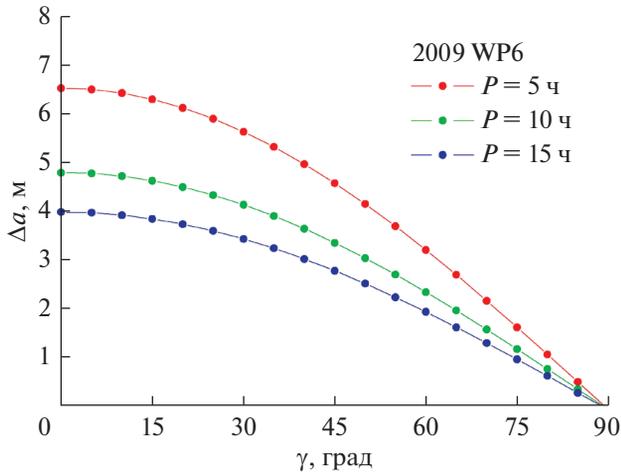


**Рис. 1.** Зависимость величины изменения большой полуоси орбиты астероида за год из-за действия эффекта Ярковского от периода собственного вращения астероида. Синим кружком указан реальный период вращения астероида (367943) Duende, согласно (Venson и др., 2020).

На рис. 1 представлены зависимости  $\Delta a$  от  $P$ , полученные для астероидов 2009 WP6, 2015 XG55 и (367943) Duende. Для остальных астероидов вычисленные величины эффекта Ярковского оказались на 2–3 порядка меньше (см. также табл. 5) и не играют существенной роли в их орбитальной динамике, поэтому мы не привели полученные для них зависимости. Видно, что все зависимости, представленные на рис. 1, являются нелинейными, и в случае малых астероидов ( $D \sim 20$  м) с быстрым вращением ( $P \leq 10$  ч) величина  $\Delta a$  может быть сопоставима с размерами астероида. Отметим, что, согласно Vokrouhlický и др. (2015b), для AC3 (99942) Apophis ( $D = 325$  м) имеем  $\Delta a \approx 200$  м, т.е. тоже сравнимую с размерами астероида величину.

Из рис. 1 видно, что в области  $P \leq 5$  ч величина эффекта Ярковского (величина  $\Delta a$ ) для астероидов 2009 WP6 и 2015 XG55 существенно зависит от  $P$ . Поскольку рассмотренные нами астероиды весьма малы, то, согласно (Pravec и др., 2014; Zhang, Michel, 2021), они, вероятно, обладают весьма быстрым вращением. Для астероидов 2009 WP6 и 2015 XG55 стоит ожидать существенного изменения величины эффекта Ярковского после их сближений с планетами, даже если в результате таких событий вращательные состояния астероидов будут изменяться незначительно.

Для астероида (367943) Duende из зависимости, представленной на рис. 1, видно, что имевшее место изменение периода вращения астероида при его весьма тесном сближении с Землей в 2013 г. существенным образом не повлияло на величину эффекта Ярковского. При установленном из анализа наблюдений (Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2020) изменении периода вращения астероида (367943) Duende на 2–3 ч величина эф-



**Рис. 2.** Зависимость величины изменения большой полуоси орбиты астероида 2009 WP6 за год из-за действия эффекта Ярковского от угла наклона оси вращения для разных возможных значений периода собственного вращения астероида.

фекта Ярковского могла измениться на  $\approx 10\%$ . Отметим, что (367943) Duende примерно в два раза крупнее, чем астероиды 2009 WP6 и 2015 XG55 (см. табл. 2).

На рис. 2 представлены полученные при различных значениях  $P$  зависимости  $\Delta a$  от  $\gamma$  для астероида 2009 WP6. Для 2015 XG55 и (367943) Duende зависимости имеют схожий характер, поэтому мы их не приводим. Видно, что величина  $\Delta a$  при изменении угла  $\gamma$  меняется примерно в тех же пределах, как и при изменении  $P$  (см. рис. 1).

При сближениях с планетой имеет место изменение как  $P$ , так и  $\gamma$  (см., например, Devyatkin и др., 2016; Venson и др., 2023), поэтому стоит ожидать, что тесное сближение с планетой малого астероида ( $D = 10\text{--}50$  м) с быстрым вращением ( $P < 10$  ч) окажет существенное влияние на величину эффекта Ярковского для него. Сближение с планетой может привести к тому, что вращение астероида перейдет в режим “кувыркания” (tumbling) (см. Pravec и др., 2005), либо в режим хаотического (непредсказуемого) вращения, имеющий место во вращательной эволюции малых спутников планет (Wisdom, 1987; Melnikov, Shevchenko, 2010; Shevchenko, 2020; Мельников, Шевченко, 2022). В последнем случае, вероятно, эффект Ярковского не будет влиять на вековую эволюцию орбиты астероида. Данный вопрос требует дополнительного исследования.

## ВЫВОДЫ

Итак, в настоящей работе для ряда малых астероидов, испытывающих сближения с планетами земной группы, получены оценки влияния на ор-

битальную 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 может быть сопоставима с размерами астероида.

Сближение астероида с планетой приводит к изменению его вращательного состояния — величины периода собственного вращения астероида и ориентации оси вращения в пространстве. Изменение вращательного состояния астероида приведет к изменениям величин эффекта Ярковского и YORP-эффекта. 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, что оказывает несущественное влияние на величину эффекта Ярковского. Однако при весьма тесных сближениях (менее пяти радиусов Земли) период вращения астероида может измениться на несколько часов, что способно изменить величину эффекта Ярковского в 1.5–2 раза и будет заметным в дальнейшей орбитальной динамике астероида. Отметим, что в недавно опубликованной работе (Venson и др., 2023) при исследовании динамики AC3 (99942) Apophis было высказано предположение о незначительном влиянии изменения периода вращения астероида из-за сближения с Землей на величину эффекта Ярковского. Как видно из полученных нами результатов, в ряде случаев для малых астероидов влияние сближений с планетами на эффект Ярковского все же надо учитывать.

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 во времени, и на больших интервалах времени изменение орбиты астероида может быть весьма существенным, например, действие светового давления приводит к смещению орбиты на несколько десятков тысяч километров на промежутке времени в 100 лет. Таким образом, при планировании космических миссий к малым астероидам и оценке астероидно-кометной опасности необходимо учитывать как давление солнечной радиации и эффект Ярковского, так и влияние изменения вращательного состоя-

ния астероида при сближениях с планетами на его дальнейшую орбитальную динамику.

Авторы благодарят И.И. Шевченко за весьма ценные замечания, а также А.В. Девяткина и М.Ю. Ховричева за полезные обсуждения.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батраков Ю.В., Медведев Ю.Д.* О вращении астероида при его прохождении вблизи Земли // Тр. Всесоюзн. совещания “Астероидная опасность”. СПб.: ИТА РАН, 1992. С. 129–133.
- Бордовицына Т.В.* Современные численные методы в задачах небесной механики. М.: Наука, 1984. С. 67–70.
- Виноградова Т.А., Железнов Н.В., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А., Шор В.А.* Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Тр. ИПА РАН. 2003. Вып. 9. С. 43–46.
- Воропаев С.А., Джианго Я., Барриот Ж.П.* Разрыв вытянутого малого тела приливными силами Земли при подлете: возможные сценарии // Астрон. вестн. 2020. Т. 54. № 2. С. 171–182. (*Voropaev S.A., Jianguo Y., Barriot J.P.* Prolate body disruption by Earth at near flyby: Possible scenarios // Sol. Syst. Res. 2020. V. 54. № 2. P. 155–166.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X20020097> <https://doi.org/10.1134/S0038094620020082>
- Девяткин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.* Особые группы потенциально опасных астероидов // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 68–72. (*Devyatkin A.V., Lvov V.N., Tsekmeister S.D.* Special groups of potentially hazardous asteroids // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 1. P. 62–65.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22010029> <https://doi.org/10.1134/S0038094622010026>
- Емельяненко В.В., Попова О.П., Чугай Н.Н., Шеляков М.А., Пахомов Ю.В., Шустов Б.М., Шувалов В.В., Бирюков Е.Е., Рыбнов Ю.С., Маров М.Я., Рыхлова Л.В., Нароенков С.А., Карташова А.П., Харламов В.А., Трубецкая И.А.* Астрономические и физические аспекты Челябинского события 15 февраля 2013 г. // Астрон. вестн. 2013. Т. 47. № 4. С. 262–277. (*Emel'yanenko V.V., Chugai N.N., Shelyakov M.A. et al.* Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event // Sol. Syst. Res. 2013. V. 47. № 4. P. 240–254.) <https://doi.org/10.7868/S0320930X13040130> <https://doi.org/10.1134/S0038094613040114>
- Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н.* Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей // Вестн. СПб ун-та. Сер. 1. 2015. Т. 2. Вып. 60. № 1. С. 135–147
- Мельников А.В.* Вращательная динамика сближающихся с планетами астероидов // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 4. С. 254–265. (*Melnikov A.V.* Rotational dynamics of asteroids approaching planets // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 4. P. 241–251.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22040065> <https://doi.org/10.1134/S0038094622040062>
- Мельников А.В., Шевченко И.И.* Вращательная динамика и эволюция спутников планет Солнечной и экзопланетных систем // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 3–26. (*Melnikov A.V., Shevchenko I.I.* Rotational dynamics and evolution of planetary satellites in the Solar and exoplanetary systems // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 1. P. 1–22.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22010042> <https://doi.org/10.1134/S003809462201004X>
- Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А.* Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Тр. ИПА РАН. 2014. Т. 31. С. 59–65.
- Поляхова Е.Н., Шмыров А.С.* Физическая модель сил давления световой радиации на плоскость и сферу // Вестн. СПб ун-та. Сер. 1. 1994. Вып. 2. № 8. С. 87–104.
- Радзиевский В.В.* Механизм разрушения астероидов и метеоритов // Астрон. журн. 1952. Т. 29. С. 162–170.
- Радзиевский В.В.* Фотогравитационная небесная механика. Н. Новгород: Изд. Николаев Ю.А., 2003. 196 с.
- Шор В.А., Чернетенко Ю.А., Кочетова О.М., Железнов Н.Б.* О влиянии эффекта Ярковского на орбиту Апофиса // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 131–142. (*Shor V.A., Chernetenko Yu.A., Kochetova O.M., Zheleznov N.B.* On the impact on the Yarkovsky effect on Apophis' orbit // Sol. Syst. Res. 2012. V. 46. № 2. P. 119–129.)
- Ярковский И.О.* Плотность светового эфира и оказываемое им сопротивление движению. Брянск: Тип. Юдина, 1901. 17 с.
- Benner L., Brozovic M., Giorgini J.D., Jao J.S., Lee C.G., Busch M.W., Slade M.A.* Goldstone radar images of near-Earth asteroid 2012 DA 14 (101.02) // Am. Astron. Soc. DPS meeting. № 45. 2013. id. 101.02.
- Benson C.J., Scheeres D.J., Moskovitz N.A.* Spin state evolution of asteroid (367943) Duende during its 2013 Earth flyby // Icarus. 2020. V. 340. id. 113518.
- Benson C.J., Scheeres D.J., Brozović M., Chesley S.R., Pravec P., Scheirich P.* Spin state evolution of (99942) Apophis during its 2029 Earth encounter // Icarus. 2023. V. 390. id. 115324.
- Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., Birlan M., Vernazza P., Burt B.J., Moskovitz N., Slivan S.M., Thomas C.A., Rivkin A.S., Hicks M.D., Dunn T., Reddy V., Sanchez J.A., Granvik M., Kohout T.* Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // Icarus. 2019. V. 324. P. 41–76.
- Boldrin L.A.G., Araujo R.A.N., Winter O.C.* On the rotational motion of NEAs during close encounters with the

- Earth // *European Phys. J. — Spec. Topics.* 2020. V. 229. № 8. P. 1391–1403.
- Carry B., Solano E., Ettl S., DeMeo F.E. Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry // *Icarus.* 2016. V. 268. P. 340–354.
- Chesley S.R., Milani A., Tholen D., Bernardi F., Chodas P., Micheli M. An updated assessment of the impact threat from 99942 Apophis // *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting* № 41. 2009. V. 41. id. 43.06.
- Chodas P.W., Yeomans D.K. The orbital motion and impact circumstances of Comet Shoemaker–Levy 9 // *IAU Colloq. 156: The Collision of Comet Shoemaker–Levy 9 and Jupiter* / Eds: Noll K.S., Weaver H.A., Feldman P.D. 1996. P. 1–30.
- Devyatkin A.V., Gorshakov D.L., Yershov V.N., Melnikov A.V., Martysheva A.A., Petrova S.N., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Naumov K.N. A study of the asteroid (367943) Duende at Pulkovo Observatory // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. V. 459. № 4. P. 3986–3997.
- Ershkov S.V., Shamin R.V. The dynamics of asteroid rotation, governed by YORP effect: The kinematic ansatz // *Acta Astronautica.* 2018. V. 149. P. 47–54.
- Farnocchia D., Chesley S.R., Chodas P.W., Micheli M., Tholen D.J., Milani A., Elliott G.T., Bernardi F. Yarkovsky driven impact risk analysis for asteroid (99942) Apophis // *Icarus.* 2013. V. 224. № 1. P. 192–200.
- Greenberg A.H., Margot J.-L., Verma A.K., Taylor P.A., Hodge S.E. Yarkovsky drift detections for 247 Near-Earth Asteroids // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 3. id. 92.
- Hromakina T., Birlan M., Barucci M.A., Fulchignoni M., Colas F., Fornasier S., Merlin F., Sonka A., Anghel S., Poggiali G., Belskaya I., Perna D., Dotto E., NEOROCKS Team. NEOROCKS project: surface properties of small near-Earth asteroids // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2023. V. 520. P. 3143–3150.
- Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Vasilyev M.V., Yagudina E.I. Hidden mass in the Asteroid Belt // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 98–105.
- Lee H.-J., Ďurech J., Vokrouhlický D., Pravec P., Moon H.-K., Ryan W., Kim M.-J., Kim C.-H., Choi Y.-J., Bacci P., Pollock J., Apitzsch R. Spin change of asteroid 2012 TC4 probably by radiation torques // *Astron. J.* 2021. V. 161. № 3. id. 112.
- Lowry S.C., Fitzsimmons A., Pravec P., Vokrouhlický D., Boehnhardt H., Taylor P.A., Margot J.-L., Galád A., Irwin M., Irwin J., Kusnirák P. Direct detection of the asteroidal YORP effect // *Science.* 2007. V. 316 (5822). P. 272–274.
- Melnikov A.V., Shevchenko I.I. The rotation states predominant among the planetary satellites // *Icarus.* 2010. V. 209. P. 786–794.
- Moskovitz N.A., Benson C.J., Scheeres D., Endicott T., Polshook D., Binzel R., DeMeo F., Ryan W., Ryan E., Willman M., Hergenrother C., Verveer A., Lister T., Birtwhistle P., Sicksafoose A., Nagayama T., Gilmore A., Kilmartin P., Benechhi S., Sheppard S., Marchis F., Augusteijn T., Smirnova O. Observational investigation of the 2013 near-Earth encounter by asteroid (367943) Duende // *Icarus.* 2020. V. 340. id. 113519.
- Perna D., Barucci M.A., Fulchignoni M., Popescu M., Belskaya I., Fornasier S., Doressoundiram A., Lantz C., Merlin F. A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening // *Planet. and Space Sci.* 2018. V. 157. P. 82–95.
- Podlowska-Gaca E., Poleski R., Bartczak P., McDonald I., Pál A. Determination of rotation periods for a large sample of asteroids from the K2 Campaign 9 // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2021. V. 255. № 1. id. 4.
- Pravec P., Harris A.W., Scheirich P., Kušnirák P., Šarounová L., Hergenrother C.W., Mottola S., Hicks M.D., Masi G., Krugly Yu.N., Shevchenko V.G., Nolan M.C., Howell E.S., Kaasalainen M., Galád A., Brown P., DeGraff D.R., Lambert J.V., Cooney W.R., Foglia S. Tumbling asteroids // *Icarus.* 2005. V. 173 (1). P. 108–131.
- Pravec P., Scheirich P., Ďurech J., Pollock J., Kušnirák P., Hornoch K., Galád A., Vokrouhlický D., Harris A.W., Jehin E., Manfroid J., Opitom C., Gillon M., Colas F., Oey J., Vraštil J., Reichart D., Ivarsen K., Haislip J., LaCluyze A. The tumbling spin state of (99942) Apophis // *Icarus.* 2014. V. 233. P. 48–60.
- Richardson D.C., Bottke W.F., Love S.G. Tidal distortion and disruption of Earth-crossing asteroids // *Icarus.* 1998. V. 134. P. 47–76.
- Rubincam D.P. Radiative spin-up and spin-down of small asteroids // *Icarus.* 2000. V. 148. P. 2–11.
- Scheeres D.J., Ostro S.J., Werner R.A., Asphaug E., Hudson R.S. Effects of gravitational interactions on asteroid spin states // *Icarus.* 2000. V. 147. P. 106–118.
- Scheeres D.J., Marzari F., Rossi A. Evolution of NEO rotation rates due to close encounters with Earth and Venus // *Icarus.* 2004. V. 170. P. 312–323.
- Scheeres D.J., Benner L.A.M., Ostro S.J., Rossi A., Marzari F., Washabaugh P. Abrupt alteration of Asteroid 2004 MN4's spin state during its 2029 Earth flyby // *Icarus.* 2005. V. 178. № 1. P. 281–283.
- Sharma I., Jenkins J.T., Burns J.A. Tidal encounters of ellipsoidal granular asteroids with planets // *Icarus.* 2006. V. 183. № 2. P. 312–330.
- Shevchenko I.I. *Dynamical Chaos in Planetary Systems.* Springer, 2020. 401 p.
- Souchay J., Lhotka C., Heron G., Hervé Y., Puente V., Folgueira Lopez M. Changes of spin axis and rate of the asteroid (99942) Apophis during the 2029 close encounter with Earth: A constrained model // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 617. id. A74.
- Tóth J., Vereš P., Kornoš L. Tidal disruption of NEAs — a case of Příbram meteorite // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 415. № 2. P. 1527–1533.
- Vokrouhlický D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 344. P. 362–366.

- Vokrouhlický D., Milani A., Chesley S.R.* Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: Mathematical formulation and examples // *Icarus*. 2000. V. 148. P. 118–138.
- Vokrouhlický D., Bottke W.F., Chesley S.R., Scheeres D.J., Statler T.S.* The Yarkovsky and YORP effects // *Asteroids IV*. Tucson, AZ: Univ. Arizona Press, 2015a. P. 509–532.
- Vokrouhlický D., Farnocchia D., Čapek D., Chesley S.R., Pravec P., Scheirich P., Müller T.G.* The Yarkovsky effect for 99942 Apophis // *Icarus*. 2015b. V. 252. P. 277–283.
- Wisdom J.* Rotation dynamics of irregularly shaped natural satellites // *Astron. J.* 1987. V. 94. № 5. P. 1350–1360.
- Zegmott T.J., Lowry S.C., Rožek A., Rožitis B., Nolan M.C., Howell E.S., Green S.F., Snodgrass C., Fitzsimmons A., Weissman P.R.* Detection of the YORP effect on the contact binary (68346) 2001 KZ66 from combined radar and optical observations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 507. № 4. P. 4914–4932.
- Zeng X., Feng C., Wen T., Gan Q.* The coupling orbit–attitude–structure evolution of Rubble-Pile asteroid with Earth flyby in the restricted three-body problem // *Aerospace*. 2022. V. 9. № 7. id. 351.
- Zhang Y., Michel P.* Tidal distortion and disruption of rubble-pile bodies revisited. Soft-sphere discrete element analyses // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 640. id. A102.
- Zhang Y., Michel P.* Shapes, structures, and evolution of small bodies // *Astrodynamics*. 2021. V. 5. № 4. P. 293–329.