

УДК 523.44

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ АСТЕРОИДОВ В ОКРЕСТНОСТИ РЕЗОНАНСА 1:1 С ЗЕМЛЕЙ¹

Галушина Т. Ю.²

THE STUDY OF THE PROBABILISTIC ORBITAL EVOLUTION OF ASTEROIDS IN THE VICINITY OF 1:1 RESONANCE WITH THE EARTH

Galushina T. Yu.

The near-Earth asteroids in the vicinity of 1:1 orbital resonance with our planet have been revealed. The probability orbital evolution of all detected objects has been studied and the conclusion about the stability or instability of the resonance relations has been done. In addition the motion predictability time has been estimated by the MEGNO parameter.

Keywords: near-Earth asteroid, orbital resonance.

Исследование орбитальной эволюции астероидов в окрестности резонансов с Землей является важной задачей, потому что устойчивые резонансы могут служить защитным механизмом от сближений, неустойчивые же — приводить к хаотичности и непредсказуемости движения. Особый интерес с этой точки зрения представляют объекты, движущиеся в резонансе 1:1 с Землей [1–4], т.е. являющиеся «компаньонами» нашей планеты. При неустойчивой геометрической резонансной конфигурации такие астероиды испытывают регулярные сближения с Землей, устойчивый же резонанс, наоборот, предотвращает сближения.

Целью данной работы является выявление всех астероидов, движущихся в окрестности резонанса 1:1 с Землей на интервале времени несколько тысяч лет, и исследование их вероятностной орбитальной эволюции. Отдельного внимания заслуживает изучение характеристик хаотичности и оценка времени прогнозируемости движения, для чего нами был использован параметр MEGNO [5, 6].

1. Перечень АСЗ, движущихся в окрестности резонанса 1:1 с Землей

Для того чтобы выявить астероиды в окрестности резонанса 1:1 с Землей,

были проинтегрированы уравнения движения всех известных АСЗ на интервале времени (1000, 3000) гг. Начальные данные взяты из каталога Э. Боуэлла (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.dat>) на июнь 2013 года, который содержит элементы орбит 9281 АСЗ. Уравнения движения интегрировались численно методом Эверхарта [7]. Движение рассматривалось в рамках возмущенной задачи двух тел в прямоугольной гелиоцентрической системе координат, отнесенной к эклиптике и равноденствию 2000,0.

В качестве резонансных характеристик использовались критический аргумент

$$\beta = \lambda_a - \lambda_{\oplus}$$

и его производная по времени, называемая резонансной щелью [8]

$$\alpha = n_a - n_{\oplus},$$

где λ_a , λ_{\oplus} , n_a , n_{\oplus} — средние долготы и средние движения астероида и Земли соответственно. Будем считать, что астероид движется в окрестности резонанса, если на рассматриваемом интервале времени критический аргумент либрирует, а резонансная щель колеблется около нуля, регулярно проходя через значение точной соизмеримости $\alpha = 0$.

¹Работа выполнена по заданию 2.4024.2011 Министерства образования и науки Российской Федерации.

²Галушина Татьяна Юрьевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета; e-mail: volna@sibmail.com.

Таблица 1. Сведения о наблюдениях и результатах улучшения орбит

Объект	N	Δt , сут.	t_0	σ , ''	Δr , а.е.
164207 2004 GU9	169	4295 (2001–2013)	10.04.2005	0,514	$5,7 \cdot 10^{-7}$
277810 2006 FV35	93	6578 (1995–2013)	26.03.2007	0,550	$5,4 \cdot 10^{-6}$
2001 GO2	23	5 (2001)	15.04.2001	0,718	$6,4 \cdot 10^{-5}$
2002 AA29	66	736 (2002–2004)	11.01.2002	0,749	$1,8 \cdot 10^{-7}$
2010 SO16	147	1009 (2010–2013)	08.05.2012	0,423	$2,3 \cdot 10^{-7}$
2010 TK7	42	768 (2010–2012)	6.10.2010	0,457	$8,7 \cdot 10^{-7}$

В результате проведенного исследования выявлено 6 АСЗ, которые на интервале времени (1000, 3000) гг движутся в окрестности резонанса 1:1 с Землей, — 164207 2004 GU9, 277810 2006 FV35, 2001 GO2, 2002 AA29, 2010 SO16 и 2010 TK7. Далее описаны результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции для выявленных объектов.

2. Построение начальной области возможных параметров

Для построения начальной области возможных параметров произведено улучшение орбит методом наименьших квадратов по оптическим наблюдениям, взятым с сайта центра малых планет (<http://www.minorplanetcenter.org/>). Модель сил включала влияние больших планет, Плутона, Луны, Цереры, Паллады, Весты и релятивистских эффектов от Солнца. В качестве начальной эпохи выбран момент наилучшей обусловленности t_0 . Результаты улучшения орбит представлены в табл. 1. Здесь N — число использованных наблюдений, Δt — интервал наблюдений, σ — среднеквадратическая ошибка представления наблюдений, Δr — среднеквадратическая ошибка МНК-оценок вектора положения. Из таблицы видно, что почти все объекты наблюдались на длительных интервалах времени и их орбиты хорошо определены. Исключением является астероид 2002 GO2 — он наблюдался в течение всего 5 сут., что не позволяет надежно определить орбиту.

На основании полученных в результате улучшения параметров номинальной орбиты и ковариационной матрицы линейным методом были построены начальные области возможных параметров, в рамках которых с по-

мощью датчика случайных чисел выбраны 10 тыс. тестовых частиц, распределенных по нормальному закону.

3. Исследование вероятностной орбитальной эволюции и оценка времени прогнозируемости

Исследование вероятностной орбитальной эволюции проводилось путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения каждой тестовой частицы методом Эверхарта. Интервал времени выбирался для каждого астероида индивидуально с точки зрения сохранения приемлемой точности. Для оценки времени прогнозируемости использовался усредненный параметр MEGNO (Mean Exponential Growth of Nearby Orbit) $\bar{Y}(t)$ [5,6]. При экспоненциальном расхождении близких орбит $\bar{Y}(t)$ линейно растет, переходит значение 2, и движение становится непрогнозируемым.

Результаты исследования представлены в табл. 2–3 и на рис. 1–6. В табл. 2 показаны интервал исследования и расстояние d до планеты в момент самого тесного сближения (планеты обозначены их порядковым номером). В табл. 3 даны максимальные и минимальные значения резонансной щели α , большой полуоси a , эксцентриситета e и наклона плоскости орбиты к эклиптике i для номинальных орбит (верхняя строка) и ансамблей частиц (нижняя строка). На рис. 1–6 представлены сближения с планетами, эволюция усредненного параметра MEGNO, резонансной щели и критического аргумента. На графиках номинальная орбита выделена черным цветом, эволюция для ансамбля частиц показана серым фоном.

Среди астероидов, движущихся в резонансе 1:1 с планетами, можно выделить три

Таблица 2. Данные о тесных сближениях

Объект	Интервал времени	d , а.е.	
		Номинальная орбита	Ансамбль частиц
164207 2004 GU9	(1, 3000) гг	$d_3 = 0,0874$ а.е.	$d_3 = 0,0747$ а.е.
277810 2006 FV35	(-1000, 3000) гг	$d_2 = 0,0375$ а.е.	$d_2 = 0,0375$ а.е. $d_3 = 0,0945$ а.е.
2001 GO2	(1, 3000) гг	$d_3 = 0,0109$ а.е.	$d_2 = 0,0010$ а.е. $d_3 = 0,0001$ а.е. $d_4 = 0,0425$ а.е.
2002 AA29	(-3000, 3000) гг	$d_3 = 0,0145$ а.е.	$d_3 = 0,0163$ а.е.
2010 SO16	(-3000, 3000) гг	-	-
2010 TK7	(-1000, 3000) гг	$d_2 = 0,0971$ а.е.	$d_2 = 0,0898$ а.е.

Таблица 3. Экстремальные значения резонансной щели и элементов орбиты

Объект	α , "/сут.	a , а.е.	e	i , град.
164207 2004 GU9	(-28, 29)	(0,995, 1,004)	(0,134, 0,161)	(13,2, 13,9)
	(-33, 32)	(0,995, 1,005)	(0,134, 0,168)	(13,2, 14,3)
277810 2006 FV35	(-21, 16)	(0,998, 1,003)	(0,374, 0,387)	(6,77, 7,22)
	(-24, 23)	(0,997, 1,004)	(0,374, 0,388)	(6,76, 7,38)
2001 GO2	(-42, 43)	(0,993, 1,007)	(0,155, 0,171)	(4,34, 5,17)
	(-100, 988)	(0,849, 1,465)	(0,131, 0,335)	(0,22, 6,99)
2002 AA29	(-45, 45)	(0,992, 1,008)	(0,006, 0,055)	(9,57, 10,8)
	(-46, 46)	(0,992, 1,008)	(0,006, 0,071)	(9,06, 10,8)
2010 SO16	(-28, 28)	(0,996, 1,004)	(0,074, 0,099)	(14,4, 14,8)
	(-28, 28)	(0,996, 1,004)	(0,074, 0,099)	(14,4, 14,8)
2010 TK7	(-20, 20)	(0,997, 1,003)	(0,190, 0,193)	(20,8, 20,9)
	(-22, 22)	(0,997, 1,003)	(0,190, 0,198)	(20,7, 20,9)

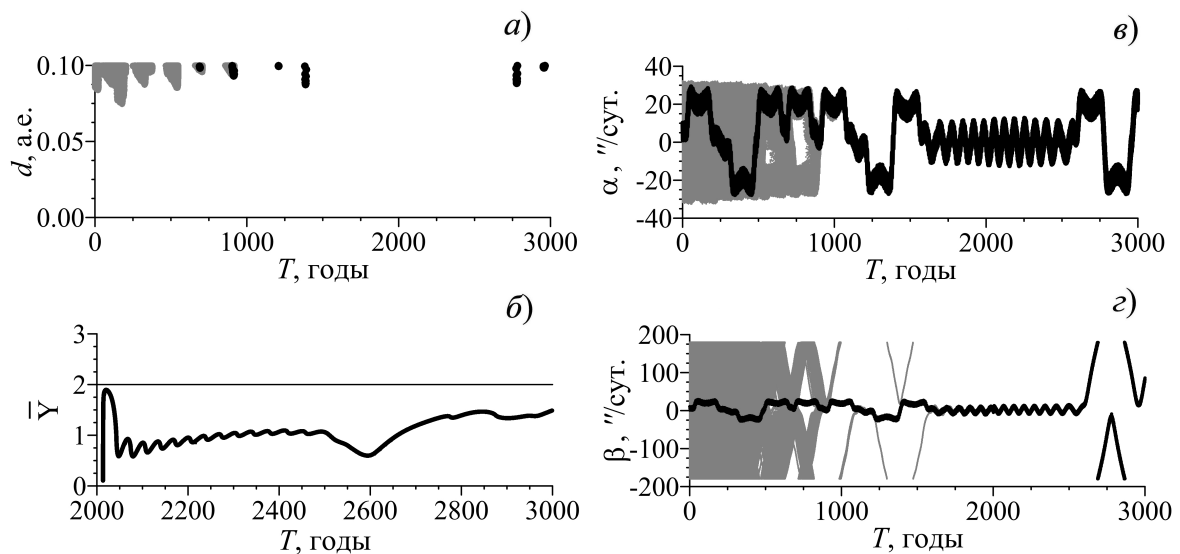


Рис. 1. 164207 2004 GU9: сближения с Землей (а), эволюция параметра MEGNO (б), резонансной щели (в) и критического аргумента (г)

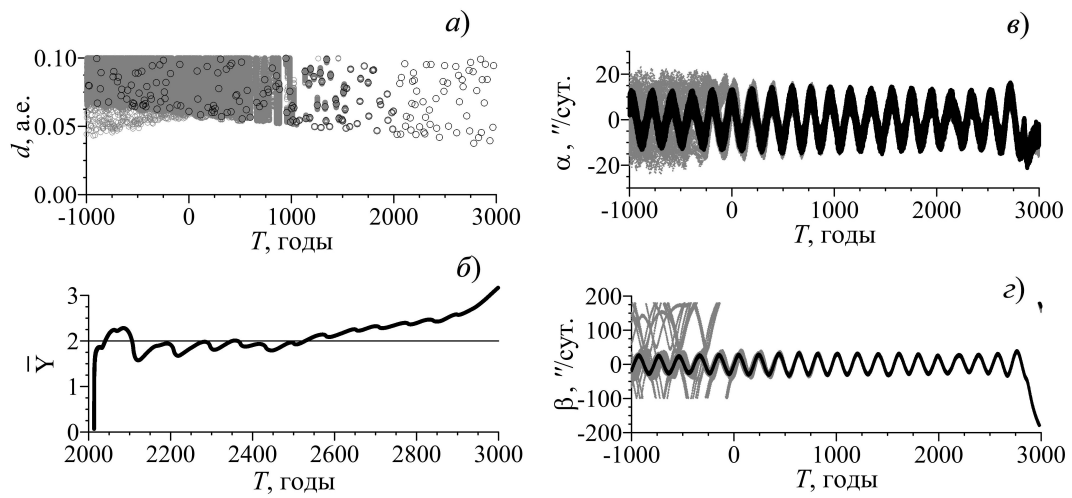


Рис. 2. 277810 2006 FV35: сближения с Венерой (а), эволюция параметра MEGNO (б), резонансной щели (в) и критического аргумента (г)

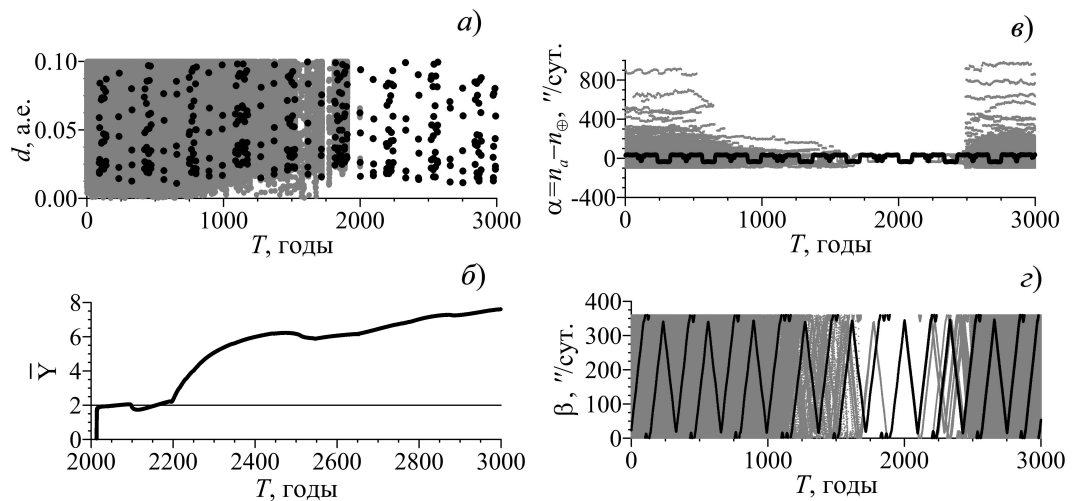


Рис. 3. 2001 GO2: сближения с Землей (а), эволюция параметра MEGNO (б), резонансной щели (в) и критического аргумента (г)

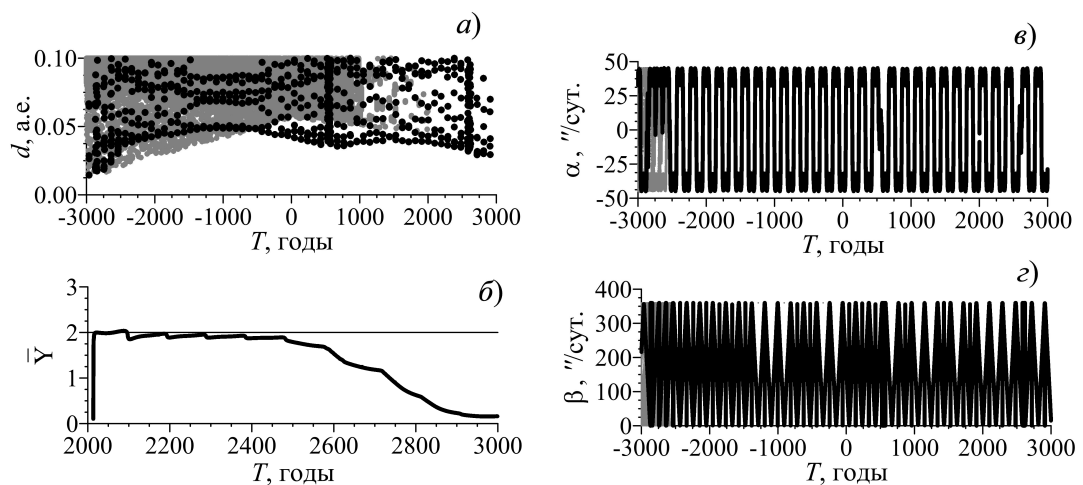


Рис. 4. 2002 AA29: сближения с Землей (а), эволюция параметра MEGNO (б), резонансной щели (в) и критического аргумента (г)

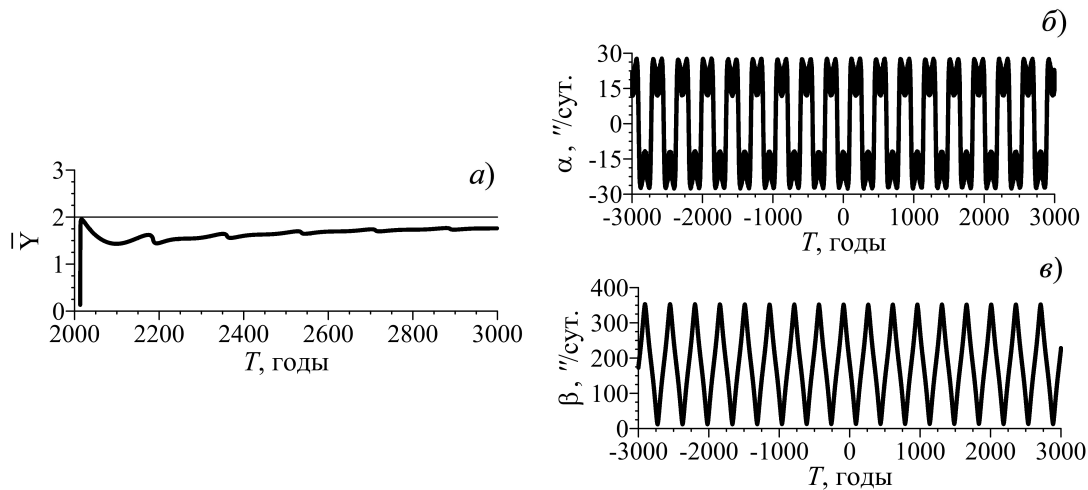


Рис. 5. 2010 SO16: эволюция параметра MEGNO (а), резонансной щели (б) и критического аргумента (в)

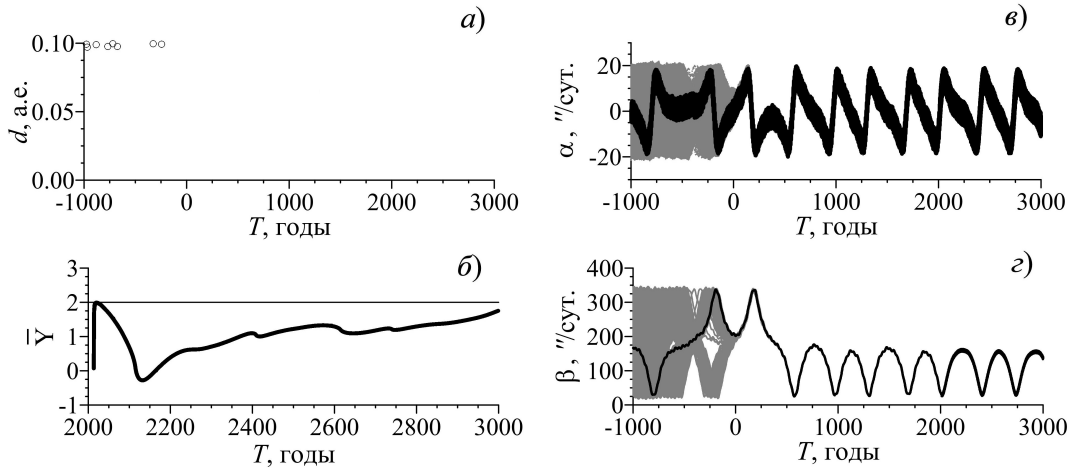


Рис. 6. 2010 ТК7: сближения с Венерой (а), эволюция параметра MEGNO (б), резонансной щели (в) и критического аргумента (г)

различных типа движений: классический «головастик» (tadpole), подкова (horseshoe) и квазиспутник (quasi-satellite) [9], что соответствует колебаниям критического аргумента около значений $\pm 60^\circ$, 180° и 0° .

Среди рассматриваемых объектов 164207 2004 GU9 (рис. 1) и 277810 2006 FV35 (рис. 2) на большей части интервала исследования ведут себя как квазиспутники, орбиты 2002 AA29 (рис. 4) и 2010 SO16 (рис. 5) можно отнести к типу подкова, движение астероида 2010 ТК7 (рис. 6) примерно в 500 году меняет вид с подковы на головастик. Объект 2001 GO2 (рис. 3) в настоящее время не поддается классификации вследствие малого числа наблюдений. Более того, согласно исследованию эволюции параметра MEGNO

в 2200 году движение данного астероида начинает проявлять признаки хаотичности и непрогнозируемости.

Движение астероида 277810 2006 FV35 становится непрогнозируемым после 2500 года, для остальных объектов движение устойчиво и прогнозируемо как минимум до 3000 года. Однако, несмотря на признаки хаотичности 277810 2006 FV35 на всем интервале исследования движется в устойчивом резонансе с Землей, и резонанс является защитным механизмом от сближений. Аналогичные функции выполняет резонанс для астероидов 2010 SO16 и 2010 TR7. Остальные рассматриваемые объекты испытывают регулярные сближения с Землей.

Почти для всех рассматриваемых астероидов (за исключением 2001 GO2) орбитальная эволюция тестовых частиц до 3000 года практически не отличается от эволюции номинальной орбиты. При интегрировании в прошлое наблюдается иная ситуация — в начале интервала исследования почти все астероиды (кроме 2010 SO16) испытывают значительное увеличение вероятностной области, что объясняется увеличением ошибок начальных данных под влиянием сближений. 2010 SO16 не имеет сближений на рассматриваемом интервале ни с одной из больших планет.

Заключение

В данной работе выявлены шесть объектов движущихся в окрестности резонанса 1:1 с Землей — 164207 2004 GU9, 277810 2006 FV35, 2001 GO2, 2002 AA29, 2010 SO16 и 2010 TK7. Для всех объектов проведено улучшение орбит по имеющимся оптическим наблюдениям и исследована вероятностная орбитальная эволюция на интервале времени несколько тысяч лет. Проведенное исследование позволило классифицировать все астероиды (за исключением 2001 GO2, орбита которого плохо определена) по типам орбит — подкова, головастика или квазиспутника. Кроме того, было показано, что время прогнозности для 2001 GO2 составляет порядка

200 лет, для 277810 2006 FV35 — около 500 лет, движение остальных объектов прогнозируемо не менее чем до 3000 года.

Литература

1. *Brasser R., Innanen K.A., Connors M., Veillet C., Wiegert P., Mikkola S., Chodas P.W.* Transient co-orbital asteroids // *Icarus*. 2004. Vol. 171. P. 102–109.
2. *Wajer P.* 2002 AA29: Earth's recurrent quasi-satellite? // *Icarus*. 2009. Vol. 200. P. 147–153.
3. *Wajer P.* Dynamical evolution of Earth's quasi-satellites: 2004 GU9 and 2006 FV35 // *Icarus*. 2010. Vol. 209. P. 488–493.
4. *Christou A. A., Asher D.J.* A long-lived horseshoe companion to the Earth // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2011. Vol. 414, P. 2965–2969.
5. *Cincotta P.M., Girdano C.M., Simo C.* Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits // *Physica D*. 2003. Vol. 182. P. 151–178.
6. *Раздымакина О.Н.* Алгоритмическое и программное обеспечение для определения параметра MEGNO для астероидов // *Изв. вузов. Физика*. 2011. Т. 54. № 6/2. С. 31–38.
7. *Авдюшев В.А.* Интегратор Гаусса–Эверхарта // *Вычисл. технологии*. 2010. Т. 15. № 4. С. 31–47.
8. *Гребеников Е.А., Рябов Ю.А.* Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1978. 128 с.
9. *Jackson J.* Retrograde satellite orbits // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1913. Vol. 74, P. 62–82.

Ключевые слова: астероид, сближающийся с Землей, орбитальный резонанс.

Статья поступила 1 октября 2013 г.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск

© Галушина Т. Ю., 2013