Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Ф. Х. Алтынбаев, Исследование устойчивости резонансного характера движения астероидов групп Аполлона, Амура, Атона, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 26, 71–77

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu180>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 35.173.219.149

26 апреля 2023 г., 12:14:28

Астрометрия

УДК 521.1

Ф.Х. Алтынбаев

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ ГРУПП АПОЛЛОНА, АМУРА, АТОНА

Выявлены астероиды групп Аполлона, Амура, Атона, имеющие резонансный характер движения с большими планетами. Проведено исследование устойчивости резонансного движения этих астероидов со временем на интервале 5000 лет

При изучении движения астероидов особое место занимают группы астероидов, имеющие характер движения, соизмеримый с движением больших планет. Астероиды таких групп могут близко подходить к орбите планеты (на расстояния до нескольких десятых а.е.), но благодаря соизмеримости их движения с планетой им всегда удается избежать слишком тесных сближений, так как планета не оказывается на том участке орбиты, к которому приближается астероид. Поэтому данные астероиды не испытывают сильных возмущений со стороны планеты и сохраняют размеры своих орбит почти неизменными.

Следует подчеркнуть, что подобные соизмеримости не являются точными, и речь идет только о том, что астероид движется вблизи соизмеримости, редко – вблизи острой соизмеримости. Такая соизмеримость сама по себе еще не означает, что движение астероида по отношению к планете является резонансным. Резонанс с планетой – это соизмеримость в движении особого вида. При резонансе с планетой энергия астероида в системе Солнце-планета испытывает только колебания (иногда значительные), не ведущие к прогрессивному изменению энергии и размеров орбиты на протяжении всего времени, пока сохраняется резонанс. Причиной таких колебаний энергии астероида является ускорение его движения планетой, строго периодически сменяющиеся замедлением движения. При этом энергия добавляется астероиду, а затем отбирается у него в одинаковых количествах. Ситуация аналогична той, которая наблюдалась бы у качающегося маятника при отсутствии сил сопротивления.

Своеобразие небесно-механического резонанса заключается в том, что частота вынуждающей силы (определяемая движением планеты) остается постоянной (поскольку постоянной остается на рассматриваемом интервале времени его орбита), тогда как собственная частота «резонирующей системы» (определяемая движением астероида) меняется с течением времени под действием вынуждающей силы. При этом энергия, поглощаемая (или теряемая) резонирующей системой в течении одного цикла воздействий вынуждающей силы (одного оборота планеты) оказывается тем меньше, чем больше изменилась собственная частота резонирующей системы. Процесс передачи энергии затухает, а затем сменяется процессом противоположного направления. Поэтому небесно-механический резонанс проявляется в колебании энергии резонирующей системы около значения, соответствующего точной соизмеримости движения планеты. Амплитуда колебаний энергии оказывается, как правило, тем больше, чем больше эксцентриситет и угол наклона орбиты астероида [1].

Кратные резонансы замедляют прогрессивную эволюцию астероидов и уменьшают вероятность столкновения с большими планетами, тем самым продлевают срок их существования. Однако устойчивость кратных резонансов на интервалах времени порядка нескольких тысячелетий остаётся не вполне изученной. Кроме того, выявление астероидов, имеющих резонансы низших порядков, определяет группу астероидов, для которых применение аналитических методов затруднительно.

Анализ эволюции орбит резонансных астероидов позволяет предполагать, что особый характер их движения является временным явлением и постепенно расстраивается под действием планетных возмущений. Длительность пребывания в резонансной зоне при прочих равных условиях зависит от ширины резонансной зоны. Дело в том, что резонансный характер движения

может осуществляться не только при точной соизмеримости движения астероида с планетой. Отклонений от точной соизмеримости (в обе стороны), при котором еще сохраняется резонансный характер движения, как раз и определяет ширину резонансной зоны. Если простые числа, входящие в резонансное соотношение, обозначить через n и n_1 , то ширина резонансной зоны окажется пропорциональной величине $1/(n + n_1)$. Очевидно, что резонансная зона оказывается наиболее широкой при $n = n_1 = 1$ [1].

При исследовании проблемы астероидной опасности особый интерес представляют астероиды групп Аполлона, Амура, Атона, так как орбиты астероидов этих групп могут касаться орбиты Земли или проникать внутрь ее и, в случае тесных сближений с Землей, могут представлять опасность столкновения. В дальнейшем этим астероидам уделено основное внимание.

Существование кратных соизмеримостей и резонансов у астероидов групп Аполлона, Амура, Атона по отношению к нескольким планетам были выявлены ранее рядом авторов [2-6]. При этом было установлено, что улучшение соизмеримости с одной из планет приводит к ухудшению соизмеримости с другой планетой.

На выявление резонансного движения было проведено исследование 2146 астероидов указанных выше групп.

Резонансные соотношения можно строить по различным параметрам движения, как по периоду обращения (T), так и по среднесуточному движению (n). Как известно эти параметры связаны соотношением

$$T = \frac{2p}{n}. \quad (1)$$

В свою очередь, среднесуточное движение небесного тела можно рассчитать по формуле [7]:

$$n = \sqrt{\frac{f(1+m)}{a^3}}, \quad (2)$$

где f – постоянная Гаусса в квадрате, m – масса тела, a – большая полуось орбиты.

На основе вычисленных среднесуточных движений астероидов и планет Меркурий – Юпитер, были вычислены точные соизмеримости среднесуточных движений.

Отношение любых двух действительных чисел можно представить в виде следующей подходящей дроби [8]:

$$\frac{a}{b} \approx q_1 + \frac{1}{q_2 + \frac{1}{q_3 + \frac{1}{\ddots + \frac{1}{q_n}}}}, \quad (3)$$

где a и b – действительные числа, $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ – неполные частные. По (3) были получены резонансные последовательности, которые сопоставлялись с точной соизмеримостью.

Критерием резонансного характера движения астероида по отношению к отдельно взятой планете может быть выполнение следующего отношения [2]:

$$|k_1 \cdot n_1 - k_2 \cdot n_2| = O(1)\sqrt{M}, \quad (4)$$

где n_1 и n_2 – среднесуточные движения астероида и планеты, M – масса планеты, k_1 и k_2 – целые числа соответствующей соизмеримости резонансного соотношения. Тогда, согласно (4), для выполнения требования, отвечающего резонансам первого порядка, величина d – отличие резонансного соотношения среднесуточных движений планеты и астероида от точной соизмеримости – не должна превосходить следующих значений: 0.0004 для Меркурия; 0.0016 – Венеры; 0.0017 – Земли; 0.0006 – Марса и 0.0309 – Юпитера [3].

Таким образом, полагая в условии (4) $k_1 \leq 5$ и $k_2 \leq 5$, при выполнении которых обеспечивается малый период возмущения, удалось выделить 93 объекта, движущихся в резонансе с большими планетами. Полный перечень этих астероидов, а также большая полуось, резонансные соотношения среднесуточных движений планеты и астероида ($n_1 : n_2$) и отличие (d) их от точной соизмеримости с Венерой, Землей, Марсом и Юпитером приведены в таблице.

Астероиды, движущиеся в резонансе с большими планетами

№	Обозначение	a(a.e.)	Венера		Земля		Марс		Юпитер	
			$n_1:n_2$	d	$n_1:n_2$	d	$n_1:n_2$	d	$n_1:n_2$	d
1	1985 WA	2.8323					5:2	50.78652	2:5	3.98504
2	1990 SM	2.1145	5:1	2.34111					1:4	40.19482
3	1994 XM1	2.0681			3:1	30.96654			1:4	1.13239
4	1995 SA4	2.4978			4:1	46.96237			1:3	3.14966
5	1996 DH	1.5870			2:1	1.42323				
6	1998 FW4	2.4946			4:1	53.99188			1:3	4.90704
7	1998 HT31	2.5065			4:1	28.28303			1:3	1.52017
8	1998 ML14	2.4172					2:1	2.01108	1:3	48.52998
9	1998 MQ	1.7831							1:5	2.48137
10	1998 MT24	2.4202					2:1	1.53667	1:3	46.75611
11	1998 QA62	2.0649			3:1	39.10987			1:4	1.58205
12	1998 QB28	2.0789			3:1	3.08985			1:4	10.42462
13	1998 UP1	0.9991			1:1	4.66158				
14	1998 UT18	1.4055			5:3	2.45455				
15	1998 WD31	2.0686			3:1	29.54331			1:4	1.60680
16	1998 YB8	2.4181					2:1	0.84775	1:3	47.94832
17	1999 AF4	2.8272					5:2	40.58673	2:5	0.09488
18	1999 DK3	2.1153	5:1	0.96944					1:4	40.85693
19	1999 KK1	2.1157	5:1	2.56800					1:4	41.17664
20	1999 LN28	2.1415					5:3	2.07709		
21	1999 NB5	2.0794			3:1	1.83369			1:4	10.84334
22	1999 VT25	1.1604			5:4	0.88694	2:3	17.77384		
23	1999 YT	1.7766					5:4	53.30708	1:5	5.66816
24	2000 AE205	1.1630			5:4	47.50278	2:3	0.87250		
25	2000 EC104	1.7816							1:5	0.63530
26	2000 EF104	1.1476	2:1	4.39344						
27	2000 GV127	2.8220					5:2	30.34568	2:5	4.19130
28	2000 HD74	2.9247			5:1	1.27884				
29	2000 JF5	2.0611			3:1	49.19003			1:4	4.94210
30	2000 PG3	2.8265					5:2	39.28726	2:5	0.61467
31	2000 PH5	0.9996			1:1	1.91826				
32	2000 SN10	2.4955			4:1	52.12724			1:3	4.44088
33	2000 TV28	2.5053			4:1	30.84896			1:3	0.87869
34	2000 WJ10	2.0699			3:1	26.09044			1:4	2.75776
35	2000 WJ63	2.8216					5:2	29.55156	2:5	4.50895
36	2000 WQ19	1.4058			5:3	1.36135				
37	2000 XG47	2.1421					5:3	0.09901		
38	2000 YJ11	1.3109			3:2	4.47595	4:5	24.24643		
39	2001 BK16	2.0714			3:1	22.21059			1:4	4.05104
40	2001 CB32	1.7817							1:5	0.81268
41	2001 DU8	1.7768					5:4	54.95719	1:5	5.33813
42	2001 FE7	2.0798			3:1	0.78174			1:4	11.19399
43	2001 GS2	1.7799							1:5	1.51398
44	2001 HB	1.3133			3:2	23.78233	4:5	1.49542		
45	2001 HJ31	2.0784			3:1	4.29031			1:4	10.02447
46	2001 KO2	2.5086			4:1	23.87721			1:3	2.62163
47	2001 MG1	2.5098			4:1	21.33603			1:3	3.25692
48	2001 MY7	2.9266			5:1	4.71315				
49	2001 PK9	1.7800							1:5	1.36341
50	2001 QE96	1.3105			3:2	1.07258	4:5	28.78425		
51	2001 RO3	2.5026			4:1	36.82239			1:3	0.61467
52	2001 SA170	2.1151	5:1	0.07219					1:4	40.67748
53	2001 SN289	1.7838							1:5	3.40749
54	2001 UY16	2.0818			3:1	4.27999			1:4	12.88124
55	2001 VF75	2.0611			3:1	49.08484			1:4	4.90704
56	2001 VM5	2.4196					2:1	0.90550	1:3	47.07169
57	2001 XO88	2.4993			4:1	43.83540			1:3	2.36792
58	2002 AA	1.1479	2:1	2.28954						

59	2002 AA29	1.0007			1:1	3.69214				
60	2002 BA1	2.0640			3:1	41.51079			1:4	2.38236
61	2002 CD14	1.7776					5:4	59.88692	1:5	4.35219
62	2002 CT11	1.2581					3:4	1.67900		
63	2002 EA3	2.1140	5:1	4.22843					1:4	39.81736
64	2002 FC	2.8321					5:2	50.40493	2:5	3.83240
65	2002 FU5	2.5062			4:1	29.07509			1:3	1.32216
66	2002 GF1	2.0676			3:1	32.08655			1:4	0.75905
67	2002 GJ1	1.9960					3:2	2.09978		
68	2002 HP11	2.0683			3:1	30.44675			1:4	1.30566
69	2002 LS32	1.7828							1:5	2.15547
70	2002 LW	1.0167	5:3	2.49580						
71	2002 LX	2.5032			4:1	35.48580			1:3	0.28052
72	2002 MT3	2.8072					5:2	0.61261	2:5	16.08453
73	2002 MX	2.5022			4:1	37.65570			1:3	0.82300
74	2002 PO75	1.7681					5:4	0.71368	1:5	16.47231
75	2002 PR1	2.4946			4:1	53.95062			1:3	4.89673
76	2002 RP137	1.1605			5:4	2.74332	2:3	17.03129		
77	2002 RX211	2.0649			3:1	39.32026			1:4	1.65218
78	2002 TA58	2.5073			4:1	26.65766			1:3	1.92651
79	2002 TD58	2.4994			4:1	43.59613			1:3	2.30810
80	2002 VE68	0.7236	1:1	2.82583						
81	2002 XA	2.8234					5:2	33.15088	2:5	3.06922
82	2608 Seneca	2.5037			4:1	34.41322			1:3	0.01238
83	3122 Florence	1.7685					5:4	1.84401	1:5	15.96077
84	3838 Epona	1.5049	3:1	1.63155			1:1	35.66731		
85	4179 Toutatis	2.5103			4:1	20.23045			1:3	3.53332
86	5646 1990 TR	2.1422					5:3	0.57342		
87	6489 Golevka	2.5035			4:1	34.77625			1:3	0.10313
88	6491 1991 OA	2.5065			4:1	28.36554			1:3	1.49955
89	7341 1991 VK	1.8426			5:2	3.36212	4:3	15.43892		
90	14827 1986 JK	2.8232					5:2	32.78992	2:5	3.21361
91	34613 2000 UR13	2.0687			3:1	29.41336			1:4	1.65012
92	35432 1998 BG9	2.5180			4:1	3.97679			1:3	7.59673
93	36236 1999 VV	1.3324	5:2	0.63942						

Для исследования устойчивости резонансного характера движения этих астероидов со временем был проведён анализ эволюции орбит на интервале 5000 лет. Интегрирование уравнений движения астероидов проводилось численным методом путем разложения в ряды Тейлора с использованием банка данных координат и скоростей больших планет [9]. Интегрирование велось с шагом один день при удержании в разложениях Тейлора двенадцати производных. Проведенные исследования дали следующие результаты.

Астероид 4179 Toutatis в начале интервала исследования (2002 год) двигался в резонансе с двумя планетами – Юпитером и Землёй. В дальнейшем, благодаря возмущающему действию Юпитера, произошло ухудшение соизмеримости с Землёй. При этом образовалась новая соизмеримость с Марсом и значительно улучшился резонанс с Юпитером. В острой соизмеримости с Марсом и Юпитером астероид 4179 Toutatis находился на протяжении почти 4000 лет. Затем вновь улучшилась соизмеримость с Землёй, а с Марсом – разрушилась. Причина такой неустойчивости резонансного характера в движении астероида объясняется изменением его большой полуоси (рис. 1), так как по формуле (2) через большую полуось выражается среднесуточное движение. Аналогичный 4179 Toutatis характер изменения большой полуоси на исследуемом интервале времени наблюдается у астероидов: 1998 ML14, 1998 UP1, 1999 DK3, 2000 JF5, 2001 VF75, 2002 PR1, 2002 VE68, 6489 Golevka.

В классическом случае, когда резонансный характер движения астероида с планетой остается неизменным на протяжении всего интервала интегрирования, большая полуось изменяется почти с постоянным периодом. Например, для астероида 2000 EC104, движущегося в резонансе 5:1 с Юпитером, период изменения большой полуоси составляет порядка 1200 лет (рис. 2). Периодический характер изменения большой полуоси на исследуемом интервале вре-

мени наблюдается у 60 из 93 рассмотренных астероидов: 1985 WA, 1995 SA4, 1996 DH, 1998 FW4, 1998 HT31, 1998 MQ, 1998 MT24, 1998 QB28, 1998 WD31, 1998 YB8, 1999 AF4, 1999 KK1, 1999 LN28, 1999 YT, 2000 EF104, 2000 GV127, 2000 HD74, 2000 PG3, 2000 SN10, 2000 TV28, 2000 WJ10, 2000 WJ63, 2000 WQ19, 2000 XG47, 2000 YJ11, 2001 DU8, 2001 GS2, 2001 KO2, 2001 MG1, 2001 MY7, 2001 PK9, 2001 QE96, 2001 RO3, 2001 SA170, 2001 SN289, 2001 XO88, 2002 AA, 2002 AA29, 2002 BA1, 2002 CT11, 2002 EA3, 2002 FC, 2002 FU5, 2002 GF1, 2002 HP11, 2002 LS32, 2002 LX, 2002 MT3, 2002 RP137, 2002 RX211, 2002 TA58, 2002 XA, 2608 Seneca, 3838 Epona, 5646 1990 TR, 14827 1986 JK, 34613 2000 UR13, 35432 1998 BG9, 36236 1999 VV.

Астероида 2001 BK16, движется в соизмеримости с двумя планетам – Юпитером (1:4) и Землёй (3:1). Колебательный характер изменения большой полуоси орбиты астероида с периодом 1400 лет будет продолжаться до 5800 года (рис. 3). Однако после 5800 года происходит резкое ухудшение резонансного движения с Юпитером, в результате чего его большая полуось становится равной 2.1 а.е. (рис. 3).

В большинстве случаев, характер движения астероидов, находящихся в резонансном движении с одной или несколькими планетами, является устойчивым. Планетные возмущения могут деформировать орбиту астероида, но вывести астероид из резонанса сложно. Поэтому орбита, выведенная из устойчивого состояния, через какое-то время либо вновь вернется на свою прежнюю траекторию, как это было показано на примере с 4179 Toutatis, либо просто принимает новое устойчивое положение. Примеры таких движений изображены на рис. 4 и рис. 5. Астероид 2001 HJ31 до 3600 года двигался в резонансе с двумя планетами – Юпитером и Землёй, после чего соизмеримость с Землёй разрушилась, а резонанс с Юпитером слегка ухудшился, но сохранилась стабильность. Эти изменения не могли не повлиять на большую полуось орбиты (рис. 4). Астероид 2001 VM5 в начале интервала исследования движется в резонансе с двумя планетами Марсом (2:1) и Юпитером (1:3). Резонанс с обеими планетами сохранился на протяжении всего интервала исследования, но после 3800 года для Марса острая соизмеримость ухудшится, а с Юпитером резонанс улучшится. Характер поведения большой полуоси изображён на рис. 5. Из всех исследованных астероидов, движущихся в резонансе с двумя планетами, изменение орбиты, связанное с ухудшением резонанса с одной из планет и улучшением с другой, наблюдается у астероидов: 1994 XM1, 1999 NB5, 1999 VT25, 2000 AE205, 2001 BK16, 2001 UY16, 2002 GJ1, 2002 LW, 2002 MX, 2002 TD58, 2001 CB32, 2001 FE7, 2002 CD14, 2002 PO75, 3122 Florence, 6491 1991 OA, 7341 1991 VK.

Особое внимание заслуживает астероид 2002 MX. На начало интервала интегрирования он двигался в остром резонансе с Юпитером (1:3). После сближения в 2785 году с Землей, орбита астероида сильно вытянется и достигнется устойчивый резонанс с Юпитером 1:1 (рис. 6).

Р и с. 1. Изменение большой полуоси 4179 Toutatis со временем

Р и с. 2. Изменение большой полуоси 2000 EC104 со временем

Р и с. 3. Изменение большой полуоси 2001 BK16 со временем

Р и с. 4. Изменение большой полуоси 2001 HJ31 со временем

Р и с. 5. Изменение большой полуоси 2001 VM5 со временем

Р и с. 6. Изменение большой полуоси 2002 MX со временем

Как было изложено выше, при отборе астероидов был наложен довольно жёсткий критерий, к тому же около 70% из отобранных астероидов движутся в резонансе по отношению к двум планетам одновременно. В связи с этим и полученные результаты исследования дали хорошей результат устойчивости орбит отобранных астероидов к внешним планетным возмущениям. Из 93 выделенных объектов всего два объекта, 2001 НВ и 2000 РН5, утратили резонансную устойчивость, а остальные сохранили резонанс на всём интервале исследования.

Стоит подчеркнуть, что наличие кратных резонансов замедляют прогрессивную эволюцию астероидов, уменьшают вероятность столкновения их с большими планетами, и тем самым продлевают срок их существования. Однако когда речь идёт об устойчивости кратных резонансов на интервалах времени порядка нескольких десятков тысячелетий, встаёт вопрос о необходимости проведения дополнительных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Симоненко А.Н. Метеориты – осколки астероидов. М.: Наука, 1979. 224с.
2. Герасимов И.А. Эволюция внешней части кольца астероидов //Автореф. дис....доктора физ.мат. наук. М. 1992. 11с.
3. Заусаев А.Ф. Эволюция орбит малых тел Солнечной системы сближающихся с Землёй //Автореф. дис.... доктора физ.мат. наук. М. 1994, 20с.
4. Гребенников Е.А., Рябов Ю.А. Резонансы и малые знаменатели в небесной механике. М.: Наука, 1971. 443с.
5. Ипатов С.И. Эволюция резонансных астероидных орбит в плоской задаче трех тел: Солнце-Юпитер-астероид //Ин-т прикл. математики им. Келдыша АН СССР (препринт). М. 1980. 32с.

6. *Ипатов С.И.* Эволюция орбит астероидного типа при резонансе 5:2 // Ин-т прикл. математики им. Келдыша АН СССР (препринт). М. 1991. 48с.
7. *Субботин М.Ф.* Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968. 800с.
8. *Виноградов И.М.* Основы теории чисел. М.: Наука, 1965. 172с.
9. *Алтынбаев Ф.Х.* Численное интегрирование уравнений движения небесных объектов методом Тейлора с использованием банка данных координат и скоростей больших планет //Вестн. СамГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. 2003. Вып.19. С.42-47

Поступила 15.12.2003 г.