

УДК 523.6, 615.851

Динамическая эволюция 93-х Дамоклоидов

Н.С. Коваленко¹, Р.А. Гулиев², К.И. Чурюмов¹, В.А. Пономаренко¹, В.В. Клещонок¹

¹Астрономическая обсерватория Киевского национального университета

²Шемахинская астрофизическая обсерватория (Азербайджан)

В данной работе рассматривается орбитальная эволюция Дамоклоидов, промоделированная на 1 млрд. лет в будущее и в прошлое средствами интеграционного пакета SWIFTER. Эти астероиды имеют большие наклоны орбит (некоторые из них движутся по ретроградным орбитам), и параметр Тиссерана относительно Юпитера $T_{\text{Юпитера}} \leq 2$ (в отличие от комет семейства Юпитера, имеющих $T_{\text{Юпитера}} > 2$). Дамоклоиды считаются переходной популяцией между кометными ядрами из облака Оорта и кометами галлеевского типа (также имеющих $T_{\text{Юпитера}} \leq 2$), или неактивными ядрами комет галлеевского типа. Показано, что динамическое время жизни популяции составляет порядка $10^6 - 10^7$ лет. Обсуждаются результаты моделирования для разных орбитальных параметров Дамоклоидов.

ДИНАМІЧНА ЕВОЛЮЦІЯ 93-Х ДАМОКЛОЇДІВ, Коваленко Н.С., Гулієв Р.А., Чурюмов К.І., Пономаренко В.О., Клещонок В.В. — В даній роботі розглядається орбітальна еволюція Дамоклоїдів, промодельована на 1 млрд. років в майбутнє та в минуле засобами інтеграційного пакету SWIFTER. Ці астероїди мають великі нахили орбіт (деякі з них рухаються по ретроградних орбітах), та параметр Тіссєрана відносно Юпітера $T_{\text{Юпітера}} \leq 2$ (на відміну від комет сімейства Юпітера, що мають $T_{\text{Юпітера}} > 2$). Дамоклоїди вважаються перехідною популяцією між кометними ядрами з хмари Оорта та кометами галлейського типу (що також мають $T_{\text{Юпітера}} \leq 2$), або неактивними ядрами комет галлейського типу. Показано, що динамічний час життя популяції становить порядку $10^6 - 10^7$ років. Обговорюються результати моделювання для різних орбітальних параметрів Дамоклоїдів.

DYNAMICAL EVOLUTION OF 93 DAMOCLOIDS, by Kovalenko N.S., Guliyev R.A., Churyumov K.I., Ponomarenko V.A., Kleshchenok V.V. Orbital evolution of Damocloides was integrated for 1 Gyr forward and backward in time, by using SWIFTER package. These asteroids move along highly inclined orbits (some of them are on retrograde orbits), and have Tisserand invariant $T_j \leq 2$ (while Jupiter family comets have $T_j > 2$). Damocloides are believed to be transitional population between Oort cloud cometary nuclei and Halley type comets (those also have Tisserand parameter $T_j \leq 2$), or inactive nuclei of Halley type comets. It is shown, the dynamical lifetime of the population is about $10^6 - 10^7$ years. Results of the simulation for different orbital parameters are discussed.

Ключевые слова: орбитальная эволюция; Дамоклоиды; ретроградное движение.

Key words: orbital evolution; Damocloides; retrograde motion.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, периодические кометы в зависимости от их периода обращения вокруг Солнца относятся к короткопериодическим (меньше 200 лет) либо долгопериодическим (больше 200 лет) [1]. Короткопериодические кометы имеют в основном малое наклонение орбиты к эклиптике (порядка 10 градусов) и период обращения порядка 10 лет.

Комета Галлея обращается по сильно вытянутой эллиптической орбите с эксцентриситетом 0,967. В её последнем возвращении в перигелии она была на расстоянии от Солнца 0,587 а.е., а в афелии удалится на 35 а.е. Орбита кометы наклонена к плоскости эклиптики на $162,5^\circ$ (то есть комета движется по ретроградной орбите). И хотя по периоду обращения она относится к короткопериодическим кометам, ее орбита выглядит довольно нетипичной.

Поэтому, согласно уточняющей классификации, короткопериодические кометы с орбитальным периодом обращения менее 20 лет и наклонением орбиты $20^\circ - 30^\circ$ или менее называются кометами семейства Юпитера. А кометы, орбитальный период обращения которых составляет от 20 до 200 лет, а наклонение орбиты — от 0° до более 90° , относят к кометам галлеевского типа (примерно десятая доля всех короткопериодических комет). Известно только 70 комет галлеевского типа, в то время как число идентифицированных комет семейства Юпитера составляет 567 [3].

Эти семейства комет можно различить и по параметру Тиссерана относительно Юпитера T_j (характеристике орбиты малого тела, идентифицирующей его и не меняющейся со временем), задаваемому формулой:

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2\sqrt{\left(1 + \frac{m_j}{M_\odot}\right) \frac{a}{a_j} (1 - e^2) \cos i} \quad (1)$$

где a_j , m_j — масса и большая полуось орбиты Юпитера, M_\odot — масса Солнца, a , e , i — большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты кометы. Для комет семейства Юпитера $T_j > 2$, а для комет галлеевского типа $T_j < 2$.

Предполагается, что кометы галлеевского типа изначально были долгопериодическими кометами, орбиты которых изменились под влиянием гравитационного притяжения планет-гигантов [1]. Если комета Галлея прежде была долгопериодической кометой, то она, вероятно, происходит из облака Оорта. Эта гипотетическая сфера состоит из кометных ядер и окружает Солнце на расстоянии 20 000–50 000 а.е. (на сегодняшний день точные границы облака неизвестны, предполагается, что внутренний край находится на расстоянии примерно 2000–5000 а.е., внешний — 120 000 а.е.). В то же время другие короткопериодические кометы, предположительно, приходят из пояса Койпера — плоского диска малых тел на расстоянии 30–50 а.е. от Солнца.

Связь короткопериодических комет с облаком Оорта может быть представлена популяцией так называемых Дамоклоидов — астероидов на сильно наклоненных орбитах, некоторые из которых движутся по ретроградным орбитам. Дамоклоиды можно выделить из общей массы малых тел по двум критериям — это астероиды, и они имеют параметр Тиссерана $T_j \leq 2$ [2]. На сегодняшний день известно 93 объекта группы Дамоклоидов [3]. Их орбитальные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1. Список известных на сегодня Дамоклоидов и их орбитальные параметры

Обозначение объекта	q , а.е.	Q , а.е.	a , а.е.	e	i , °	набл.	T_j
(2011 AF3)	0.378	78.67	39.52	0.9904	6.18		0.887
(2012 US136)	0.380	8.22	4.299	0.9117	51.82	73	1.67
(2005 MW9)	0.404	6.76	3.58	0.8871	55.29	19	1.89
343158 (2009 HC82)	0.486	4.57	2.528	0.8075	154.50	3325	1.32
(2010 CA55)	0.668	9.89	5.28	0.8735	58.85	4	1.49
(1999 XS35)	0.946	34.75	17.85	0.9470	19.53	88	1.41
(2013 UQ4)	1.084	125.44	63.26	0.9829	145.25	17	-0.974
(2009 WN25)	1.102	5.41	3.254	0.6612	71.98	25	1.97
(2007 VA85)	1.117	7.34	4.227	0.7357	131.88	231	0.416
(2010 LG61)	1.367	12.79	7.079	0.8070	123.73	55	-0.03
(2010 OA101)	1.386	7.60	4.492	0.6915	84.35	54	1.29
(1998 WU24)	1.413	28.90	15.16	0.9068	42.64	87	1.4
(2010 EB46)	1.512	55.35	28.43	0.9468	156.48	30	-1.2
(1997 MD10)	1.542	51.60	26.57	0.9420	58.99	137	0.977
(2013 BN27) 5335 Damocles	1.562	124.98	63.27	0.9753	101.78	25	-0.232
(1991 DA)	1.577	22.09	11.83	0.8668	62.05	551	1.15
(2013 JD4)	1.616	22.42	12.02	0.8655	73.01	32	0.878
(2009 YS6)	1.616	39.14	20.38	0.9207	147.79	1271	-1.05
(2009 FW23)	1.646	21.33	11.49	0.8567	86.63	55	0.543
(2008 WA95)	1.720	26.39	14.05	0.8776	60.30	27	1.15
(2003 WG166)	1.845	8.44	5.143	0.6413	55.63	26	1.87
(2013 PE67)	1.847	109.76	55.8	0.9669	116.72	91	-0.658
(2005 HL3)	1.886	20.64	11.26	0.8325	35.62	157	1.79
(2006 BZ8)	1.914	17.31	9.61	0.8008	165.31	623	-1.03
(2009 AU16)	1.933	45.38	23.66	0.9183	70.11	125	0.794
(2006 RG1)	2.013	49.16	25.59	0.9213	133.20	25	-0.977
(2010 OR1)	2.050	52.64	27.34	0.9250	143.86	233	-1.22
(2009 QY6)	2.072	23.01	12.54	0.8348	137.72	264	-0.85
(2011 WS41)	2.082	74.54	38.31	0.9456	141.65	6	-1.25
(2008 SB85)	2.110	4.67	3.39	0.3776	74.24	38	1.94
(2010 OM101)	2.127	50.59	26.36	0.9193	118.69	101	-0.653
(2010 EJ104)	2.129	40.78	21.46	0.9008	41.59	87	1.56
15504 (1999 RG33)	2.150	16.64	9.395	0.7712	34.91	1685	1.96
(2003 WN188)	2.185	26.50	14.34	0.8476	27.04	583	1.93
(2009 DD47)	2.211	88.23	45.22	0.9511	107.42	22	-0.43
(2000 DG8)	2.239	19.30	10.77	0.7921	129.50	342	-0.634
(2011 SP25)	2.277	37.38	19.83	0.8852	109.01	58	-0.329
(2000 AB229)	2.283	101.93	52.11	0.9562	68.81	64	0.77
(2004 NN8)	2.314	197.51	99.91	0.9768	165.49	292	-1.76
(2006 RJ2)	2.322	17.10	9.709	0.7608	164.62	37	-1.17

Обозначение объекта	q , а.е.	Q , а.е.	a , а.е.	e	i , °	набл.	T_j
(2000 HE46) 20461 Dioretsa	2.341	44.79	23.57	0.9007	158.46	220	-1.5
(1999 LD31)	2.376	45.15	23.76	0.9000	160.40	927	-1.54
65407 (2002 RP120)	2.488	107.15	54.82	0.9546	119.21	1225	-0.849
(2013 LD16)	2.544	145.87	74.21	0.9657	154.74	20	-1.7
(2012 HD2)	2.553	121.73	62.14	0.9589	146.90	302	-1.56
(1996 PW)	2.557	540.39	271.5	0.9906	29.72	506	1.74
(2006 EX52)	2.597	82.47	42.53	0.9390	150.26	310	-1.59
(2008 BN18)	2.603	59.17	30.89	0.9157	28.71	25	1.89
(2010 JH124)	2.613	135.09	68.85	0.9620	53.43	474	1.26
(2007 DA61)	2.647	872.73	437.7	0.9940	76.84	29	0.471
(2002 RN109)	2.700	1475.97	739.3	0.9963	58.05	80	1.08
(2013 NS11)	2.712	22.37	12.54	0.7837	130.37	23	-0.834
(2005 SB223)	2.757	56.44	29.6	0.9068	91.49	244	0.124
(2013 HS150)	2.775	49.19	25.98	0.8932	96.45	10	-0.025
(2010 PO58)	2.872	20.86	11.87	0.7580	121.47	7	-0.59
(2010 CG55)	2.891	60.44	31.67	0.9087	146.22	1076	-1.55
(2013 LA2)	3.049	11.97	7.511	0.5941	175.19	25	-1.23
(2005 NP82)	3.057	8.69	5.875	0.4797	130.55	79	-0.327
(2005 OE)	3.067	123.16	63.11	0.9514	67.57	84	0.901
(2011 OR17)	3.099	571.20	287.1	0.9892	110.34	748	-0.738
(2000 KP65)	3.274	173.12	88.2	0.9629	45.58	58	1.61
(2012 YO6)	3.300	9.34	6.321	0.4779	106.91	142	0.26
(2007 VW266)	3.329	7.58	5.454	0.3896	108.36	38	0.36
(2010 CR140)	3.331	7.92	5.626	0.4079	74.64	50	1.43
(2010 JC147)	3.445	25.63	14.54	0.7630	41.82	123	1.97
(2012 TL139)	3.530	56.02	29.77	0.8815	160.03	25	-1.95
144908 (2004 YH32)	3.542	12.78	8.159	0.5658	79.15	758	1.03
330759 (2008 SO218)	3.547	12.73	8.14	0.5643	170.35	1685	-1.4
(2006 LM1)	3.711	70.66	37.18	0.9002	172.14	2	-2.17
(2010 GW64)	3.713	121.20	62.46	0.9406	105.27	252	-0.537
(2005 TJ50)	3.801	14.74	9.269	0.5899	110.41	31	-0.19
(2012 YE8)	3.833	14.82	9.327	0.5891	136.12	41	-1
(2004 DA62)	4.109	11.25	7.68	0.4649	52.23	7802	2
(2005 VX3)	4.132	2412.65	1208	0.9966	112.50	81	-0.96
(1999 LE31)	4.319	11.93	8.123	0.4682	151.81	409	-1.3
(2006 JG57)	4.733	14.51	9.622	0.5081	56.88	813	1.82
(2012 KA51)	4.910	443.99	224.5	0.9781	70.66	6	0.928
(2005 VD)	4.994	8.34	6.667	0.2508	172.87	2787	-1.39
(2010 GW147)	5.382	362.99	184.2	0.9708	99.63	1064	-0.449
(2010 FH92)	5.780	42.91	24.34	0.7626	61.88	831	1.53
(2010 BK118)	6.106	962.69	484.4	0.9874	143.90	1319	-2.46
342842 (2008 YB3)	6.492	16.76	11.63	0.4416	105.03	1750	-0.248
(2013 LU28)	7.146	31.36	19.25	0.6288	117.00	7	-1.09
(2013 BL76)	8.374	2458.04	1233	0.9932	98.59	379	-0.531
336756 (2010 NV1)	9.419	616.48	313	0.9699	140.81	1455	-2.91
(2009 MS9)	11.003	706.16	358.6	0.9693	68.01	1566	1.54
(2011 MM4)	11.151	31.27	21.21	0.4743	100.45	396	-0.399
(2012 DR30)	14.540	2304.35	1159	0.9875	77.97	4745	0.987
(2011 KT19)	15.374	21.98	18.68	0.1768	66.50	8	1.77
(2007 BP102)	17.720	30.19	23.95	0.2602	64.79	83	1.98
(2010 WG9)	18.771	88.10	53.43	0.6487	70.20	1148	1.75
127546 (2002 XU93)	20.992	113.67	67.33	0.6882	77.88	2957	1.17
(2008 KV42)	21.149	61.85	41.5	0.4904	103.51	387	-1.02

Считается, что Дамоклоиды являются ядрами комет типа Галлея, зародившихся в облаке Оорта и потерявших свои летучие вещества [2]. Эта гипотеза может быть верной потому, что у достаточно многих объектов, считавшимися Дамоклоидами, впоследствии обнаруживали кому и причисляли к классу комет. Дамоклоиды имеют сравнительно небольшие размеры средний диаметр составляет около 8 км.

Измерения альbedo четырёх из них (0,02–0,04) показали, что Дамоклоиды являются одними из самых тёмных тел солнечной системы, обладая, тем не менее, красноватым оттенком [2].

Кроме того, орбиты большинства Дамоклоидов сильно наклонены к плоскости эклиптики (от 6° до 175°), причем 52 из известных на сегодня 93-х Дамоклоидов движутся по ретроградным орбитам. Первое из таких тел, обнаруженное в 1999 году, было названо Диоретса (20461) — «астероид» наоборот. Движение Дамоклоидов по ретроградным орбитам — еще один аргумент в пользу связи Дамоклоидов с облаком Оорта и кометами типа Галлея. Орбиты этих астероидов весьма вытянуты (эксцентриситеты варьируются от 0.177 до 0.997). Их афелии от 4.57 а.е. вплоть до 2459.66 а. е. у (2013 BL76), а их перигелии - от 0.378 а.е. до 21.149 а.е..

Как видно из табл. 1, в число Дамоклоидов попадают объекты на различных удалениях от Солнца. Так, 6 из них имеют перигелии внутри орбиты Земли, еще 72 имеют перигелии внутри орбиты Юпитера (из них перигелии в главном поясе астероидов — у 66 Дамоклоидов), 5 Дамоклоидов относятся к семейству Кентавров (имеют перигелии и афелии, заключенные между орбитами Юпитера и Нептуна), у оставшихся 10 Дамоклоидов перигелии размещены за орбитой Юпитера и афелии вне области больших планет (за орбитой Нептуна, вплоть до 2458 а.е.). Афелии в пределах орбиты Нептуна имеют 41 Дамоклоид. На сегодняшний день более-менее точно (арка наблюдений свыше 30 суток) определены орбиты 70 Дамоклоидов, и требуются дальнейшие наблюдения этих слабых объектов.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДАМОКЛОИДОВ

Вопрос происхождения комет до сих пор остается открытым и актуальным, и требует дополнительного изучения. В частности, путем моделирования орбитальной эволюции комет и популяций, которые могут представлять их первоисточники.

В настоящей работе была поставлена задача промоделировать орбитальную эволюцию известных на сегодня Дамоклоидов на больших промежутках времени (1 млрд. лет) в будущее и в прошлое, с целью оценить динамическое время жизни этой популяции, а также динамическую связь Дамоклоидов с гипотетическим облаком Оорта и кометами типа Галлея. В данном контексте особый интерес представляла орбитальная эволюция Дамоклоидов по i (наклонению орбит) — как долго могут сохраняться большие наклонения их орбит, могли ли Дамоклоиды прийти из Облака Оорта в прошлом и вернуться в него в будущем? Могут ли далекие Дамоклоиды переходить на более близкие к Солнцу орбиты, и таким образом, пополнять популяцию комет типа Галлея? И были ли такие случаи замечены в прошлом, согласно результатам моделирования?

Интегрирование проводилось на 1 млрд. лет вперед и назад по времени от нынешней эпохи, с использованием интегратора SWIFTER [4]. Этот программный пакет включает 7 методик интегрирования. В данной работе был использован интегратор SyMBA (Symplectic Massive Body Algorithm). Он позволяет учитывать тесные сближения между планетами и модельными тестовыми частицами. Данный алгоритм описан в [5, 6].

Интегрирование проводилось для 93-х тестовых частиц с орбитами, аналогичными орбитам известных на сегодня Дамоклоидов, с учетом Солнца, 8 больших планет и Плутона, и с шагом интегрирования 7,305 суток. Интегрирование движения частицы прекращалось на расстоянии 5000 а.е. от Солнца.

Анализ моделирования орбитальной эволюции Дамоклоидов показал, что динамическое время жизни данной популяции порядка $10^6 - 10^7$ лет, что сравнимо с динамическим временем жизни популяции Кентавров $10^{5,5} - 10^{6,5}$ лет (в среднем 2,7 млн. лет), согласно [7]. Рис. 1–4 демонстрируют скорость покидания/пополнения популяции Дамоклоидов на интервалах времени 1 млрд. лет и, более детально, 10 млн. лет, при интегрировании в будущее и в прошлое.

Большие наклонения орбит сохранялись на протяжении всего времени интегрирования, как в прошлое, так и в будущее, хотя и отличались от сегодняшнего значения в довольно широких пределах. Некоторые эволюционные треки допускают переход от прямого движения к ретроградному и наоборот.

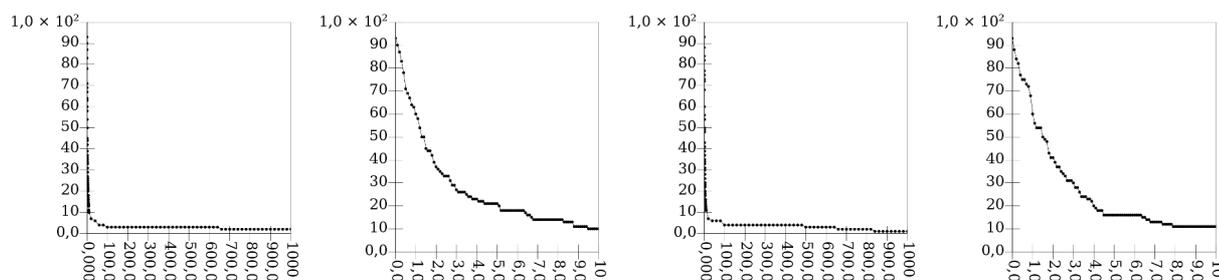


Рис. 1–4. Скорость покидания/пополнения популяции Дамоклоидов на интервалах времени 1 млрд. лет и 10 млн. лет (время по шкале x указано в миллионах лет), при интегрировании в будущее (слева) и в прошлое (справа).

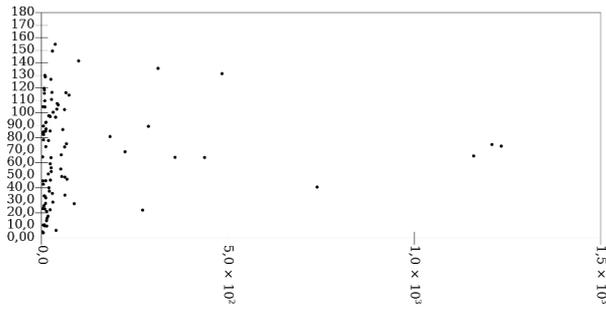


Рис. 5. Минимальные значения, которых достигало i (наклонение орбиты) частиц в течение 10 млн. лет при интегрировании в прошлое

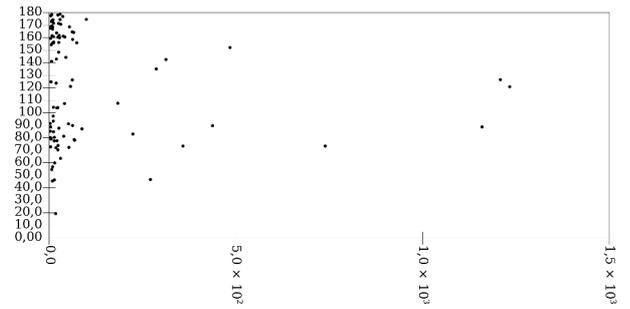


Рис. 6. Максимальные значения, которых достигало i (наклонение орбиты) частиц в течение 10 млн. лет при интегрировании в прошлое

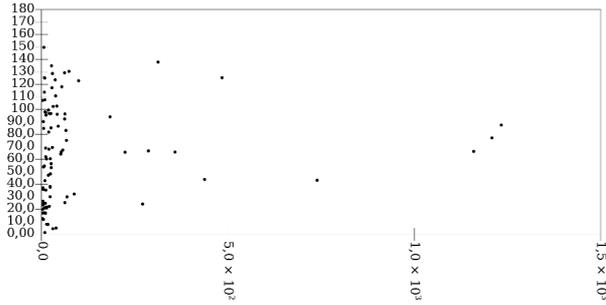


Рис. 7. Минимальные значения, которых достигало i (наклонение орбиты) частиц в течение 10 млн. лет при интегрировании в будущее

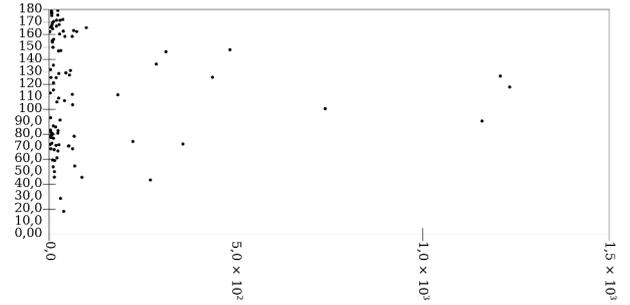


Рис. 8. Максимальные значения, которых достигало i (наклонение орбиты) частиц в течение 10 млн. лет при интегрировании в будущее

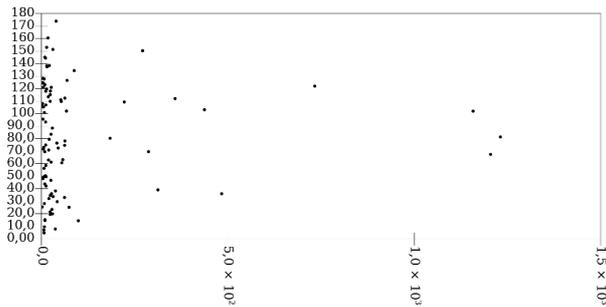


Рис. 9. Распределение орбит Дамоклоидов по $i(a)$

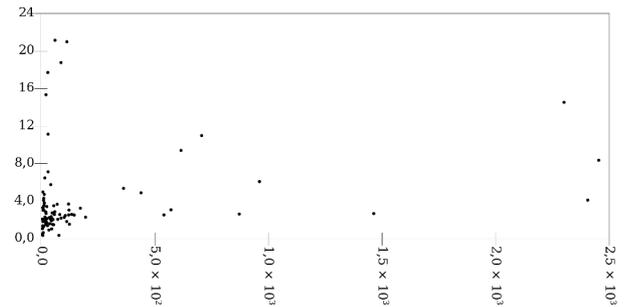


Рис. 10. Распределение орбит Дамоклоидов по $q(Q)$

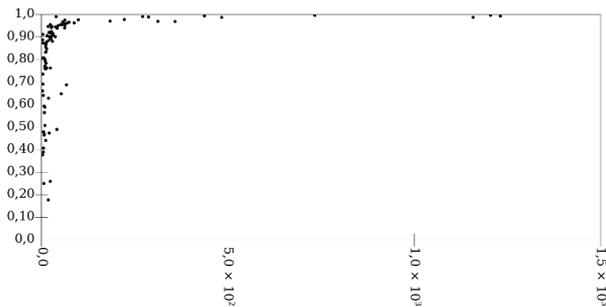


Рис. 11. Распределение орбит Дамоклоидов по $e(a)$

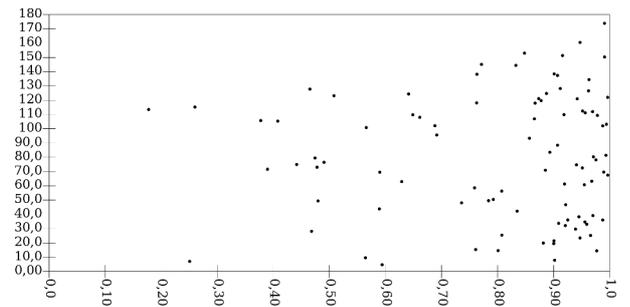


Рис. 12. Распределение орбит Дамоклоидов по $i(e)$

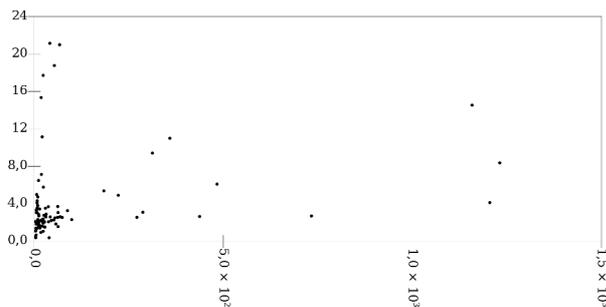


Рис. 13. Распределение орбит Дамоклоидов по $q(a)$

Рисунки 5–8 представляют зависимость i (наклонения орбиты) от a (большой полуоси) для 2-х моментов времени: на 10 млн. лет назад и вперед от настоящей эпохи. Приводятся минимальные (рис. 5, 7) и максимальные (рис. 6, 8) значения i , которых достигала орбита частиц в течение интегрирования на 10 млн. лет в прошлое (рис. 5, 6) и в будущее (рис. 7, 8).

На рис. 9–13 представлено распределение 93-х Дамоклоидов по их табличным орбитальным параметрам $i(a)$, $q(Q)$, $e(a)$, $i(e)$, $q(a)$ на настоящую эпоху.

В ходе орбитальной эволюции изменения параметров орбит имели такой характер через 1 млн. лет в будущее и в прошлое, как показано на рис. 14–21.

Из данных распределений орбитальных параметров видно, что картина эволюции в будущем и в прошлом не совсем идентична. Сравнение распределений $e(a)$ показывает, что через 1 млн. лет в будущем эксцентриситеты в среднем чуть больше, чем для эволюции на 1 млн. лет назад в прошлое, т.е. в будущем орбиты чуть более вытянуты. Для эволюции в прошлое заметны небольшие «кластеры» при

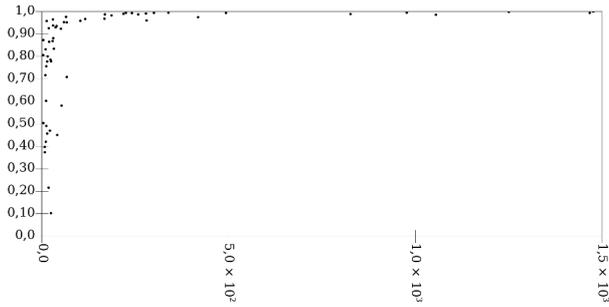


Рис. 14. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн. лет в прошлом по параметрам $e(a)$

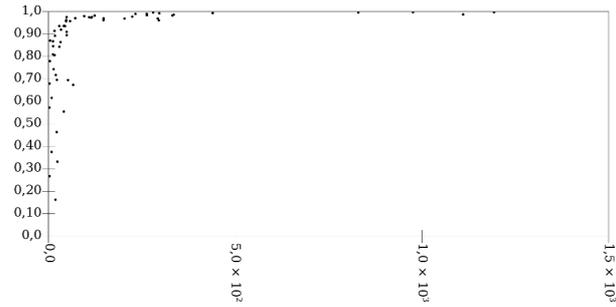


Рис. 15. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн. лет в будущем по параметрам $e(a)$

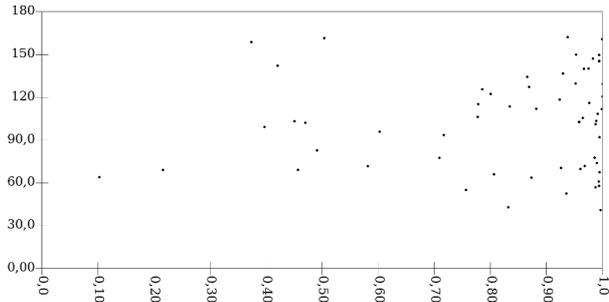


Рис. 16. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн. лет в прошлом по параметрам $i(e)$

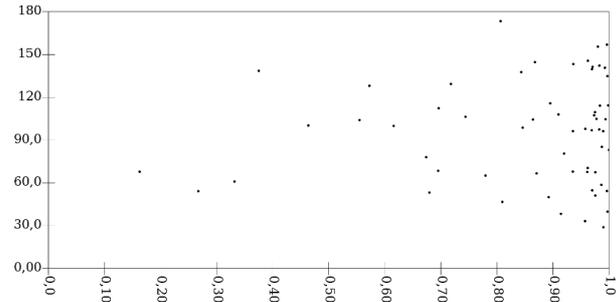


Рис. 17. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн лет. в будущем по параметрам $i(e)$

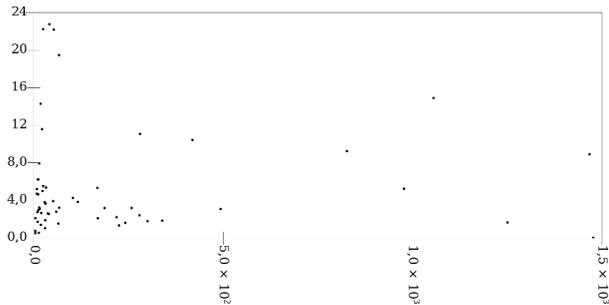


Рис. 18. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн лет. в прошлом по параметрам $q(a)$

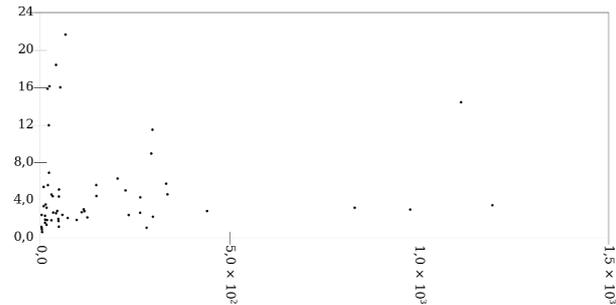


Рис. 19. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн лет. в будущем по параметрам $q(a)$

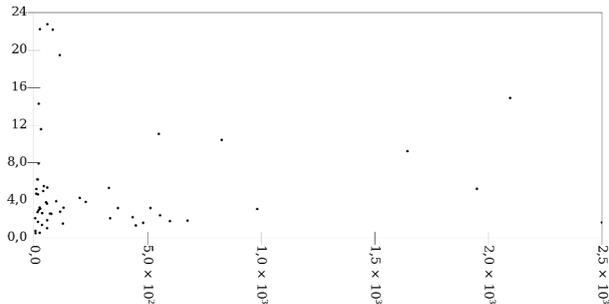


Рис. 20. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн лет. в прошлом по параметрам $q(Q)$

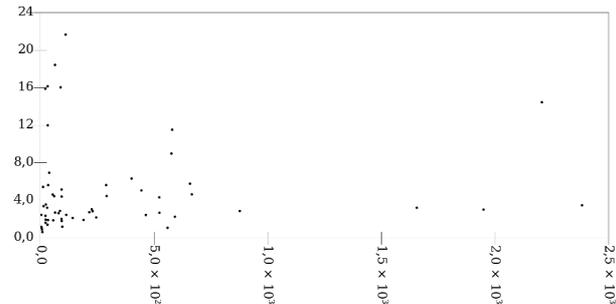


Рис. 21. Распределение орбит 93-х Дамоклоидов через 1 млн лет. в будущем по параметрам $q(Q)$

$0.4 < e < 0.5$ и $0.75 < e < 0.95$, в то время как в будущем орбиты более концентрируются при $0.8 < e < 0.97$, а концентрации при меньших эксцентриситетах уже не наблюдается. Т.е. в прошлом орбиты были чуть менее вытянутые, а в будущем также возможно возвращение части Дамоклоидов в облако Оорта.

По распределениям $i(e)$ можно заметить, что в будущем i немного меньше при тех же e , чем в прошлом. То есть можно предположить, что редкие тесные сближения Дамоклоидов с планетами незначительно уменьшат их наклонения орбит. Так, в будущем для наклонений будут характерны значения $30^\circ < i < 150^\circ$, а в прошлом были характерны $40^\circ < i < 160^\circ$, т.е. наклонения орбит популяции уменьшаются в среднем на 5° за 1 млн. лет. Объекты с менее наклоненными орбитами первыми покидают область интегрирования, и через 1 млн. лет и в прошлое, и в будущее, малые наклонения уже не наблюдаются. Сохранение орбит с большими наклонениями i в ходе эволюции и в прошлое, и в будущее подтверждает связь Дамоклоидов со сферическим гипотетическим Облаком Оорта.

Что касается распределений $q(a)$ и, аналогично, $q(Q)$, то в прошлом перигелии концентрируются в области главного пояса астероидов и его окрестностях, в то время как в будущем часты и перигелии вблизи Юпитера, а несколько объектов с перигелиями в Поясе астероидов имеют очень большие полуоси a (800–1200 а.е.). Таким образом, этот результат подтверждает предположение о том, что Дамоклоиды могут быть истощенными ядрами комет типа Галлея.

3. ВЫВОДЫ

Наши результаты показали, что динамическое время жизни популяции Дамоклоидов составляет порядка $10^6 - 10^7$ лет, причем первыми популяцию покидают объекты на наименее наклоненных орбитах.

Популяция Дамоклоидов сохраняет большие наклонения орбит на протяжении времени интегрирования вплоть до 1 млрд. лет в прошлое и в будущее. Наклонения орбит популяции уменьшаются в среднем на 5° за 1 млн. лет.

Некоторые эволюционные треки допускают переход от ретроградного движения к прямому и наоборот. Однако, на больших промежутках времени, вследствие тесных сближений с планетами-гигантами, результаты моделирования следует рассматривать лишь статистически, в рамках теории динамического хаоса.

Часть Дамоклоидов в прошлом имела меньшие перигелийные расстояния и, таким образом, действительно могут представлять собой истощенные ядра комет типа Галлея.

Таким образом, согласно нашим результатам, популяция Дамоклоидов действительно может представлять собой динамическую связь комет с наклоненными орбитами (комет типа Галлея) с гипотетическим сферическим облаком Оорта.

1. *Morbidelli A.* Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs. — 2008. — arxiv:astro-ph/0512256.
2. *Jewitt D.* A first look at the Damocloids // *The Astronomical Journal*. — 2005. — **129** (1). — P. 730–538.
3. http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi#x
4. <http://www.boulder.swri.edu/swifter/>
5. *Duncan M.J., Levison H.F., Lee M.H.* A Multiple Time Step Symplectic Algorithm for Integrating Close Encounters // *The Astronomical Journal*. — 1998. — **116**, Is. 4. — P. 2067–2077.
6. *Levison H.F., Duncan M.J.* Symplectically Integrating Close Encounters with the Sun // *The Astronomical Journal*. — 2000. — **120**, Is. 4. — P. 2117–2123.
7. *Horner J., Evans N.W., Bailey M. E.* Simulations of the Population of Centaurs I: The Bulk Statistics // *Monthly Notices of the Royal Astron. Soc.* — 2004. — **354**(3). — P. 798–810.

Поступила в редакцию 15.11.2013