

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ОРБИТ 25 КОРОТКОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ И ИХ СБЛИЖЕНИЙ С БОЛЬШИМИ ПЛАНЕТАМИ

Проведено исследование эволюции орбит короткопериодических комет, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Определены минимальные сближения комет с большими планетами. Предполагается появление новых ранее неизвестных метеорных потоков, связанных с короткопериодическими кометами.

Короткопериодические кометы примечательны тем, что они относятся к объектам, которые возникли на последней стадии формирования Солнечной системы. Вследствие того, что большинство из них имеют тесные сближения с большими планетами, элементы их орбит заметно изменяются даже на коротких интервалах времени. Кроме того, действие солнечного излучения приводит к быстрому распаду ядер комет и окончательному их затуханию, а также образованию метеорных потоков. Как физические, так и динамические особенности короткопериодических комет приводят к тому, что исследование их движения небесномеханическими методами является достаточно трудной задачей.

Начиная с XVIII в. по настоящее время, много труда и усилий учеными разных стран было вложено в разработку точных теорий движения короткопериодических комет. Первая периодическая комета была обнаружена Галлеем (комета Галлея) в процессе работы над каталогом 24-х параболических комет. В настоящее время число периодических комет с надежными орбитами приближается к 100.

Известные кометные каталоги, включающие в себя как физические, так и кинематические параметры [1-3], сконцентрировали и обобщили труды многих ученых, являясь при этом основным справочным пособием для большинства исследователей. Сведения об элементах орбит короткопериодических комет, полученные путем численного интегрирования уравнений движения, приведены в каталогах [2,3]. Однако в силу ограниченности интервала интегрирования и дискретности данных элементов орбит эти каталоги не могут быть в полной мере использованы при решении таких задач, как выявление связи комет с метеорными потоками, прогнозирования активности последних, а также при вычислении вероятности столкновения короткопериодических комет с Землей.

Наибольший интерес для нас представляли кометы, которые во время эволюции могут пересекать орбиту Земли. Условию пересечения, которое имеет место в результате действия планетных возмущений, удовлетворяют те кометы, перигелийные расстояния которых $q < 1a.e.$ Предварительный анализ показал, что из 100 короткопериодических комет лишь у 25 из них величина перигелийного расстояния под действием планетных возмущений может стать меньше $1a.e.$

Эволюция орбит короткопериодических комет исследовалась авторами путем решения задачи n тел. Решалась система дифференциальных уравнений движения в прямоугольных координатах с началом в центре Солнца, которая в матричной форме имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 X}{dt^2} = -k^2(1+m) \frac{X}{r^3} + \sum_{i=1}^n k^2 m_i \left(\frac{X_i - X}{\Delta_i^3} - \frac{X_i}{r_i^3} \right), \quad (1)$$

где X - матрица-столбец с элементами x, y, z ; X_i - матрица-столбец с элементами x_i, y_i, z_i ; m, x, y, z - масса и гелиоцентрические координаты возмущаемой планеты и кометы; m_i, x_i, y_i, z_i - массы и гелиоцентрические координаты возмущаемых планет; r, Δ_i, r_i - расстояния, вычисляемые по формулам

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2; \quad \Delta_i^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2; \quad r_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2.$$

Эволюция орбит 25 короткопериодических комет исследована на 1000 лет вперед, начиная от эпохи последнего появления кометы. Численное интегрирование уравнений движения проводилось методом Эверхарта [4] с учетом возмущений 9 планет (Меркурий-Плутон).

Результаты вычислений приведены в табл. 1 и 2, где приняты следующие обозначения: T - время; w, Ω, i, e, q, a - элементы орбит; r_1, r_2 - величины радиус-векторов в восходящем и нис-

ходящем узлах орбиты кометы; Δ - минимальное расстояние кометы от планеты во время сближения.

В табл.1 элементы орбит получены на начальный, средний и конечный моменты интегрирования. Как видно из табл.1, элементы орбит короткопериодических комет на исследуемом интервале изменяются значительно. Причиной столь значительного изменения элементов орбит являются частые сближения комет с большими планетами. Наиболее сильное возмущающее воздействие оказывает Юпитер.

В табл.2 приведены наиболее тесные сближения комет с Венерой ($\Delta < 0.05a.e.$), Землей ($\Delta < 0.05a.e.$) и Юпитером ($\Delta < 0.2a.e.$).

Наибольший интерес представляют те кометы, которые имеют сближения с Землей, так как эти кометы могут породить метеорные потоки. Рой частиц, выброшенных из кометного ядра, движется почти по орбите кометы, если полагать, что образование роя происходит в результате дезинтеграции кометного ядра, согласно теории Ф. Уиппла [5] со скоростями отделения частиц порядка десятков или сотен метров в секунду. Вследствие дисперсии скоростей выброшенных частиц и под действием планетных возмущений рой метеорных частиц рассеивается вдоль всей орбиты. При пересечении орбиты Земли с орбитой кометы может происходить явление метеорного потока. Зная величину радиус-вектора в узлах кометной орбиты, можно прогнозировать условия наблюдаемости метеорного потока. Нами полагалось, что если абсолютная величина разности радиус-векторов Земли и кометы в одном из узлов меньше 0.05 а.е., то эта комета может породить метеорный поток.

На основании приведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Метеорные потоки Леонид, Персеид, Драконид, Понс-Винекид, Урсид, *h*- Акварид и Орионид, связанные с кометами Tempel-Tuttle, Swift-Tuttle, Giacobini-Zinner, Pons-Winnecke, Tuttle, Halley могут ежегодно наблюдаться и пополняться метеорным веществом в результате распада кометных ядер на протяжении нескольких столетий. В 2006 г. следует ожидать существенное повышение активности метеорного потока Леонид, связанного с кометой Tempel-Tuttle. В будущем возможно появление новых ранее неизвестных метеорных потоков, связанных с кометами Finlay, Wirtanen, Blanpain.

В заключение следует отметить, что полученные результаты носят предварительный характер и будут уточняться по мере уточнения элементов орбит комет, а также усовершенствования теории движения каждой кометы.

Т а б л и ц а 1

Элементы орбит комет

T	w	Ω	i	e	q	r_1	r_2
Helfenzrieder							
1776	178.65	75.61	7.86	0.848	0.406	4.916	0.406
2266	183.27	77.85	35.56	0.481	1.794	5.109	1.795
2766	206.56	66.63	36.07	0.276	2.997	5.075	3.067
Blanpain							
1820	330.22	79.15	9.11	0.699	0.892	0.898	4.868
2320	179.04	270.47	6.24	0.658	1.033	5.037	1.057
2820	22.57	93.88	7.21	0.672	0.947	0.977	4.167
Pons-Gambart							
1828	19.20	319.33	136.45	0.946	0.807	0.829	14.702
2328	19.70	320.44	136.49	0.945	0.815	0.839	14.377
2728	20.67	321.17	136.39	0.946	0.804	0.830	13.574
De-Vico							
1846	12.90	79.01	85.11	0.963	0.664	0.672	21.290
2346	12.94	78.74	84.85	0.963	0.671	0.680	21.430
2828	20.77	321.75	137.00	0.944	0.818	0.845	13.577
Biela							
1858	223.22	247.28	12.55	0.756	0.861	3.364	0.974
2353	331.34	129.65	19.25	0.746	0.920	0.971	4.645
2853	338.17	109.79	19.60	0.720	1.095	1.129	5.677
Swift-Tuttle							
1863	152.77	138.68	113.56	0.960	0.962	12.922	1.018
2363	152.96	138.96	113.11	0.962	0.948	12.956	1.002
2863	152.51	138.50	113.90	0.958	0.976	12.759	1.033

Brorzen							
1879	14.93	102.28	29.38	0.810	0.590	0.599	4.907
2379	151.56	320.27	15.07	0.853	0.454	3.360	0.480
2879	170.46	295.83	39.59	0.754	0.767	5.259	0.772
Pons-Brooks							
1954	199.03	255.19	74.08	0.954	0.773	15.534	0.795
2454	198.35	255.77	74.15	0.955	0.779	16.286	0.799
2954	197.61	256.33	77.99	0.955	0.782	17.087	0.801
Tempel-Tuttle							
1965	172.58	234.44	162.71	0.904	0.982	18.126	0.986
2465	178.82	242.09	162.54	0.906	0.973	19.645	0.973
2965	186.08	250.90	163.97	0.905	0.975	18.565	0.978
Denning-Fujikawa							
1979	334.05	40.97	8.67	0.820	0.779	0.816	5.397
2479	257.86	113.45	4.04	0.812	0.859	1.076	1.329
2979	312.03	61.74	4.78	0.795	0.934	1.094	3.586
Schwassman-Wachman 3							
1980	198.74	69.29	11.41	0.693	0.941	4.642	0.962
2480	31.83	257.19	25.02	0.366	2.524	2.630	5.000
2980	55.31	237.77	22.75	0.327	2.990	3.346	4.878
Tuttle							
1981	206.89	269.88	54.46	0.823	1.015	6.944	1.067
2481	208.15	266.92	55.05	0.824	1.006	6.710	1.063
2981	210.39	264.28	55.35	0.822	1.038	6.494	1.107
Cromenelin							
1984	195.85	250.19	29.10	0.919	0.734	12.177	0.748
2484	200.04	245.54	25.05	0.919	0.756	10.608	0.779
2984	202.68	242.70	31.56	0.915	0.794	9.743	0.825
Honda-Mrkos-Pajdasakova							
1985	325.65	88.73	4.22	0.822	0.542	0.589	3.072
2485	273.87	132.83	2.96	0.825	0.537	0.928	1.038
2985	201.41	204.57	26.44	0.669	1.172	5.180	1.205
Hartley 2							
1986	174.87	226.13	9.26	0.720	0.951	5.793	0.952
2486	115.15	196.43	29.55	0.255	4.397	6.187	4.978
2986	133.62	186.69	28.99	0.306	4.289	7.096	4.625
Giacobini-Zinner							
1986	172.48	194.71	31.88	0.707	1.028	5.881	1.032
2486	181.90	176.14	25.13	0.721	1.018	6.270	1.019
2986	200.02	155.44	29.36	0.669	1.247	5.604	1.278
Halley							
1986	11.85	58.14	162.24	0.967	0.587	1.805	0.849
2484	119.00	66.44	160.74	0.966	0.604	2.232	0.808
2986	121.88	70.47	160.04	0.964	0.615	2.458	0.800
Machholz							
1986	14.53	93.81	59.99	0.958	0.127	0.129	3.418
2486	125.11	334.72	14.71	0.989	0.034	0.155	3.043
2986	165.45	285.84	64.85	0.939	0.185	3.948	0.188
Grigg-Shjellerup							
1988	359.32	212.63	21.11	0.665	0.993	0.993	4.931
2488	143.07	67.34	10.71	0.687	0.948	3.551	1.032
2988	181.18	29.86	28.44	0.466	1.820	4.992	1.820
Encke							
1988	186.26	334.03	11.93	0.850	0.332	3.954	0.333
2488	210.28	313.71	5.21	0.853	0.324	2.285	0.346
2988	330.09	197.29	5.46	0.852	0.327	0.348	2.316
Finlay							
1989	322.20	41.74	3.65	0.699	1.094	1.198	4.158
2489	207.97	150.93	17.64	0.598	1.621	5.491	1.695
2989	285.77	56.82	7.66	0.637	1.432	1.999	2.835

Bradfield 2							
1989	194.73	27.74	83.06	0.978	0.420	15.270	0.427
2489	194.99	27.49	83.92	0.977	0.425	14.880	0.432
2989	194.99	27.40	85.04	0.976	0.417	14.477	0.424
Tuttle-Giacobini-Kresak							
1990	61.58	140.88	9.23	0.656	1.068	1.348	2.570
2490	177.98	31.13	29.97	0.384	2.139	4.809	2.140
2990	211.60	6.77	13.20	0.572	1.461	4.480	1.544
Pons-Winnecke							
1990	172.32	92.75	22.27	0.634	1.261	5.535	1.265
2490	357.43	261.43	8.95	0.753	0.738	0.739	5.236
2990	194.63	238.22	26.33	0.435	5.058	1.549	5.109
Brorsen-Metcaff							
1990	129.62	310.88	19.33	0.972	0.479	2.484	0.583
2490	130.81	309.27	19.86	0.972	0.492	2.661	0.593
2990	131.64	307.97	20.38	0.972	0.485	2.701	0.582

Т а б л и ц а 2

Сближение короткопериодических комет с большими планетами

Heffenzrieder	
<i>Венера</i>	
<i>T</i>	Δ
1857 11 11	0.029
1892 09 30	0.024
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
1847 01 11	0.159
1954 01 03	0.068
2013 05 09	0.015
2179 04 15	0.126
2345 03 26	0.130
Brorzen	
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2768 01 30	0.178
Schwassman-Wachman 3	
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2167 11 26	0.066
Pajdasakova	
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2587 11 01	0.185
2646 09 14	0.144
2717 11 30	0.166
2765 03 07	0.029
Hartley 2	
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2088 09 05	0.129
2171 07 27	0.143
2231 04 19	0.092
2278 08 17	0.138
2349 09 07	0.186
2432 08 21	0.029
Encke	
<i>Земля</i>	

Blanpain	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2038 11 11	0.053
2460 01 20	0.050
Biela	
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2839 02 26	0.132
Swift-Tuttle	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2594 08 19	0.021
Denning-Fujikawa	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2932 11 13	0.049
Honda-Mrkos- Pajdasakova	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2471 08 18	0.018
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2030 07 29	0.175
2196 05 24	0.187
2243 11 21	0.196
Giacobini-Zinner	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2838 09 20	0.047
Grigg-Shjellerup	
<i>Земля</i>	
<i>T</i>	Δ
2449 06 07	0.037
<i>Юпитер</i>	
<i>T</i>	Δ
2118 07 10	0.160
2723 07 21	0.113

T	Δ	Finlay	
2631 07 16	0.011	<i>Юпитер</i>	
2763 07 16	0.044	T	Δ
2868 11 25	0.028	2254 04 29	0.167
<i>Венера</i>		2478 03 23	0.148
T	Δ	<i>Земля</i>	
2971 03 23	0.044	T	Δ
Pons-Winnecke		2060 10 25	0.040
<i>Юпитер</i>		Tuttle-Giacobini-Kresak	
T	Δ	<i>Юпитер</i>	
2369 06 03	0.124	T	Δ
2464 03 27	0.086	2486 03 01	0.162
2617 09 28	0.008	2687 08 20	0.168
		<i>Венера</i>	
		T	Δ
		2471 05 27	0.036

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Всехсвятский С.К.* Физические характеристики комет. М.: Наука. 1958. 575с.
2. *Belyev N.A., Kresak I., Pittich E.M., Pushkarev A.N.* Catalogue of Short-Period Comets. Bratislava, 1986. 395 p.
3. *Marsden B.G.* Catalogue of Cometary orbits. IAV, 1986. 102 p.
4. *Everhart E.* Implist single methods for integrating orbits // Central Mechanics. 1974.10. P. 35-55.
5. *Whipple F. L.* Comets. In Cosmic Dust. ed. J A M McDonnell-Willey. Chichester, 1978. P. 1-73.