

УДК 523.68

Е. Н. Крамер, И. С. Шестака

## Применение метода вековых возмущений для исследования структуры, происхождения и эволюции метеорных роев

На примерах численного моделирования выбросов фрагментов с поверхности родительского тела Геминид и кометы Галлея рассмотрено влияние случайных начальных условий на результаты вычислений вековых возмущений элементов орбит метеорных роев. Показано, что по элементам орбит, отягощенным случайными погрешностями измерений, методом вековых возмущений нельзя восстановить первоначальную структуру роя, его происхождение и эволюцию.

*APPLICATION OF THE SECULAR PERTURBATION METHOD TO THE INVESTIGATION OF STRUCTURE, ORIGIN AND EVOLUTION OF METEOR SWARMS, by Kramer E. N., Shestaka I. S.—Based upon the numerical modelling of fragment ejection from the surface of parent body of Geminids and Halley comet the influence of occasional initial conditions upon computations of secular perturbations of swarms orbital elements is considered. It is shown that from the orbital elements distorted by occasional measurement errors one fails to obtain the initial structure of the swarm, its origin and evolution using the method of secular perturbations.*

Общепринято представление о том, что ежегодно наблюдаемые метеорные потоки — Геминиды, Персеиды, Ориониды, Квадрантиды, Тауриды и др. — произошли в результате разрушения крупных тел (кометных ядер или астероидов). При этом возраст соответствующих роев предполагается достаточно большим, поскольку их частицы распределены приблизительно равномерно вдоль орбиты.

Одной из главных причин рассеяния частиц в роях считают вековые возмущения. Поэтому при исследованиях их структуры и происхождения обычно пытаются восстановить элементы орбит роев с учетом в первую очередь вековых возмущений от больших планет. Процедура такого учета сводится к использованию в дифференциальных уравнениях для вековых возмущений оскулирующих элементов орбит роя в целом [1, 3—17, 20, 25] или отдельных его частей [1, 2, 14—23, 25, 27] в эпоху наблюдения и нахождению методом численного интегрирования элементов орбит в произвольную более раннюю эпоху [1—23, 25, 27].

Эта процедура обычно применялась при исследовании метеорных роев, порождающих достаточно обильные метеорные потоки. В таких случаях в качестве исходных элементов орбиты можно использовать данные, полученные по наиболее точным фотографическим наблюдениям. Казалось, что ретроспективное интегрирование уравнений для вековых возмущений элементов орбит формально позволит восстановить структуру роя в прошлом и выявить время его наибольшей компактности, т. е. определить возраст роя и его связь с другими телами Солнечной системы.

Изложенные выше идеи использованы при изучении таких известных метеорных роев, как Геминиды [4, 6, 7, 12, 15—17, 19—21]. Ориониды и  $\eta$ -Аквариды [3, 8, 17, 25], Тауриды [15—17, 27], Персеиды [22, 25] и др. [9—11, 13, 14]. Результаты вычислений часто оказывались противоречивыми. Так, анализ применения  $D$ -критерия к метеорным роям Геминид, Таурид, Орионид и др. [17, 18] приводил к неожиданному результату: среднее фазовое расстояние  $D$  между орбитами частиц роя и его средней орбитой или орбитой соответствующего

родительского тела (если таковое предполагалось) оказывалось минимальным для момента начала интегрирования, т. е. в эпоху наблюдения потока.

При более тщательном анализе результатов вычисления вековых возмущений следовало иметь в виду, что они зависят от начальных условий и прежде всего от начального значения большой полуоси исследуемой орбиты. К тому же необходимо учитывать особенность метода вычислений вековых возмущений: последние практически не изменяют большую полуось орбиты и, следовательно, погрешность определения скорости (от которой в основном зависит точность вычисления полуоси орбиты) входит в каждый шаг интегрирования, что, естественно, приводит к кумуляции ошибок вычислений.

Таблица 1. Элементы орбит родительского тела Геминид и его фрагментов

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$	$V_B$ , м/с
РТ	0.1269	0.9002	285.17	301.66	226.83	14.66	—	—
1	0.1269	0.9001	285.13	301.70	226.82	14.66	0.0002	20
2	0.1269	0.9004	285.17	301.67	226.83	14.66	0.0002	10
3	0.1269	0.8992	285.14	301.59	226.83	14.67	0.0009	40
4	0.1269	0.9005	285.24	301.59	226.83	14.67	0.0005	50
5	0.1269	0.9003	285.13	301.75	226.88	14.65	0.0009	70
6	0.1269	0.8975	285.14	301.68	226.82	14.66	0.0003	80
7	0.1269	0.8980	285.16	301.60	226.75	14.67	0.0002	100

Примечание. Здесь и в других таблицах величины  $\omega$ ,  $\Omega$ ,  $\pi$ ,  $i$  даны в градусах (1950.0).

Влияние погрешностей измерения исходных элементов орбит на результаты применения метода вычислений вековых возмущений можно оценить с помощью численного эксперимента, суть которого заключается в моделировании выброса из родительского тела (РТ) какого-то числа фрагментов со случайными скоростями и направлениями выброса. В дальнейшем элементы орбит частиц в продолжение некоторого времени подвергаются вековым возмущениям.

Возмущенные элементы орбит в конечный момент времени можно принимать в качестве начальных условий для интегрирования системы дифференциальных уравнений Гаусса назад. Вычисления показывают, что к моменту начала эксперимента элементы орбит всех фрагментов, вычисленные методом численного интегрирования, совпадают с теми элементами орбит, которые каждая частица имела после выброса. Это свидетельствует о внутренней точности вычислений.

На следующем этапе эксперимента моделируем погрешности больших полуосей, изменяя последние на величины  $\Delta a$ , не превышающие погрешностей измерения больших полуосей [24]. Для простоты оставляем угловые элементы и перигелийные расстояния всех орбит неизменными. Используем новые элементы орбит при интегрировании назад к эпохе выброса, надеясь восстановить момент образования роя с помощью какого-либо критерия (по совпадению элементов орбит фрагментов и РТ, по  $D$ -критерию и т. п.).

В качестве конкретного примера мы провели численное моделирование метеорных роев Геминид, Орионид и  $\eta$ -Акварид. В табл. 1 приведены исходные данные — элементы орбит гипотетического РТ метеорного роя Геминид и его случайных фрагментов, фазовые расстояния  $D$  между орбитами фрагментов и РТ, а также скорость выброса  $V_B$ .

При решении задачи о влиянии неточности начальных условий на результаты интегрирования системы дифференциальных уравнений Гаусса мы выбрали два момента, отстоящие от момента выброса на 1600

и 15 000 лет. В таблицах 2 и 3 приведены соответствующие возмущенные элементы орбит исследуемых объектов, полученные при интегрировании вперед от момента выброса. В обеих таблицах даны принятые нами погрешности измерения больших полуосей  $\Delta a$  орбит фрагментов. С учетом этих погрешностей получаем «измеренные» значения полуосей и эксцентриситетов орбит фрагментов (угловые элементы и перигелийные расстояния, как уже отмечалось, оставляем неизменными). Эти элементы орбит используем далее для интегрирования назад к моменту выброса.

Элементы РТ Гемнид и его фрагментов, вычисленные интегрированием дифференциальных уравнений Гаусса от моментов 1600 и

Таблица 2. Элементы орбит родительского тела Гемнид и его фрагментов через 1600 лет после выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$	$\Delta a$ , а. е.
РТ	0.1420	0.8883	323.97	262.03	226.00	23.10	—	—
1	0.1419	0.8881	323.86	262.14	226.00	23.04	0.001	-0.047
2	0.1420	0.8882	324.01	262.00	226.01	23.11	0.004	+0.050
3	0.1414	0.8875	323.44	262.57	226.01	22.83	0.006	+0.054
4	0.1421	0.8883	324.13	261.13	226.00	23.17	0.002	0.000
5	0.1420	0.8882	323.98	262.08	226.06	23.09	0.0009	-0.051
6	0.1405	0.8863	322.53	263.49	226.02	22.40	0.016	+0.049
7	0.1407	0.8866	322.74	263.21	225.95	22.51	0.013	+0.051
4 <sup>a</sup>	0.1421	0.8883	324.13	261.87	226.00	23.17	0.002	-0.053
7 <sup>a</sup>	0.1407	0.8866	322.74	263.21	225.95	22.51	0.013	-0.051

Таблица 3. Возмущенные элементы орбит родительского тела Гемнид и его фрагментов через 15 000 лет после выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$	$\Delta a$ , а. е.
РТ	0.1479	0.8837	32.32	211.46	243.78	28.08	—	—
1	0.1521	0.8785	30.33	213.37	243.70	29.39	0.029	+0.008
2	0.1509	0.8798	30.89	212.85	243.74	29.04	0.021	+0.005
3	0.1562	0.8742	28.57	215.00	243.57	30.49	0.054	+0.048
4	0.1500	0.8808	31.33	212.43	243.76	27.78	0.015	-0.058
5	0.1511	0.8796	30.81	212.97	243.78	29.09	0.022	+0.045
6	0.1640	0.8656	25.65	217.59	243.24	32.39	0.098	+0.049
7	0.1623	0.8676	26.29	216.97	243.26	31.98	0.088	+0.024

Таблица 4. Элементы орбит родительского тела Гемнид и его фрагментов, вычисленные интегрированием системы дифференциальных уравнений Гаусса от момента  $t=1600$  лет до момента выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$
РТ	0.1269	0.9002	285.17	301.66	226.83	14.66	—
1	0.1275	0.8958	290.43	296.74	226.74	15.12	0.257
2	0.1265	0.9044	278.65	308.31	226.96	14.28	0.301
3	0.1265	0.9037	278.35	308.60	226.95	14.27	0.312
4	0.1269	0.9005	285.24	301.59	226.83	14.67	0.005
5	0.1275	0.8957	291.15	295.58	226.73	15.20	0.293
6	0.1275	0.8958	290.73	296.06	226.79	15.15	0.270
7	0.1266	0.9018	279.09	307.83	226.92	14.31	0.277
4 <sup>a</sup>	0.1266	0.9022	279.04	307.82	226.86	14.31	0.278
7 <sup>a</sup>	0.1275	0.8932	290.51	296.17	226.68	15.31	0.269

15 000 лет до нулевого момента (момента выброса) приведены в таблицах 4 и 5 соответственно. Видно, что, во-первых, элементы РТ в таблицах 1, 4 и 5 совпадают (это свидетельствует о внутренней точности метода интегрирования) и, во-вторых, фазовые расстояния  $D$  между орбитами РТ и фрагментов (таблицы 4 и 5) значительно отличаются от

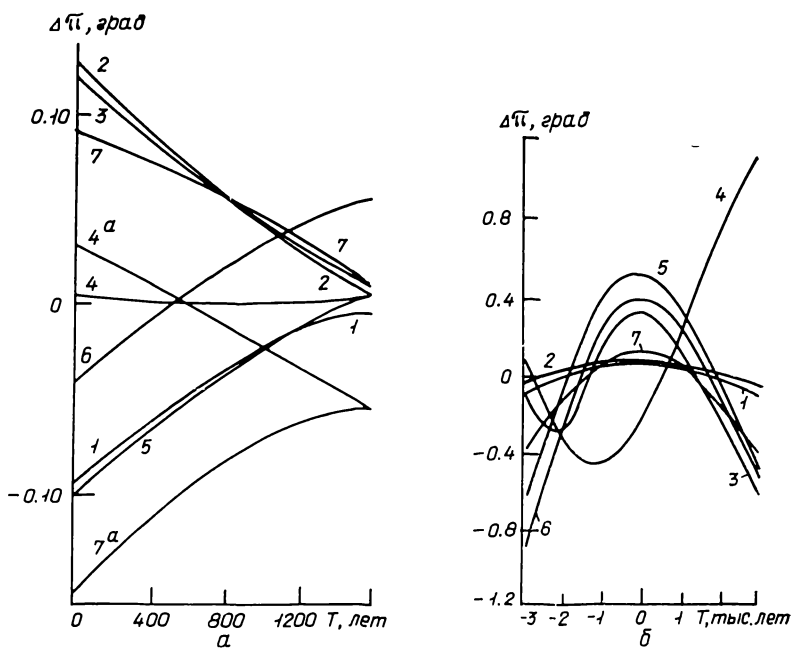


Рис. 1. Зависимости разностей долгот перигелиев родительского тела Геминид и его фрагментов (1—7) от времени при интегрировании назад от моментов 1600 лет (а) и 15 000 лет (б) до момента выброса

соответствующих данных табл. 1. Существенно отличаются также аргументы перигелиев  $\omega$  и долготы восходящих узлов  $\Omega$ , в связи с чем мы сравнили долготы перигелиев  $\pi = \omega + \Omega$ . Как и следовало ожидать, величины  $\pi$  оказались очень близкими между собой во всех трех случаях. Однако изменения со временем разностей долгот перигелиев фрагментов и родительского тела  $\Delta\pi = \pi_{фр} - \pi_{РТ}$  (рис. 1, а, б) свидетельствуют о том, что их минимумы не совпадают с точкой выброса. Следовательно, так называемый  $\pi$ -критерий нельзя использовать для установления момента выброса в численном эксперименте и тем более

Таблица 5. Элементы орбит родительского тела Геминид и его фрагментов, вычисленные интегрированием системы дифференциальных уравнений Гаусса от момента  $t = 15\ 000$  лет до момента выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$
РТ	0.1269	0.9002	285.17	301.66	226.83	14.66	—
1	0.1265	0.9010	274.68	308.21	226.89	14.31	0.029
2	0.1267	0.9009	281.38	305.49	226.87	14.43	0.017
3	0.1310	0.8999	244.35	342.80	227.15	15.64	0.185
4	0.1360	0.8882	317.26	269.35	226.61	20.51	0.196
5	0.1279	0.9030	245.19	342.16	227.35	15.50	0.181
6	0.1281	0.9006	243.90	343.31	227.19	15.61	0.187
7	0.1263	0.9004	264.60	322.34	226.94	14.17	0.090

для установления момента образования реальных метеорных роев, элементы орбит которых всегда определены с погрешностями.

При использовании  $D$ -критерия [26] для выявления генетических связей обычно исходят из предположения, что в момент выброса метеорных частиц из РТ фазовые расстояния  $D$  между орбитами фрагментов и РТ минимальны. Действительно, у молодых метеорных роев  $D$  достаточно малы. Со временем вековые возмущения увеличивают фазовые расстояния между орбитами образующих рой частиц.

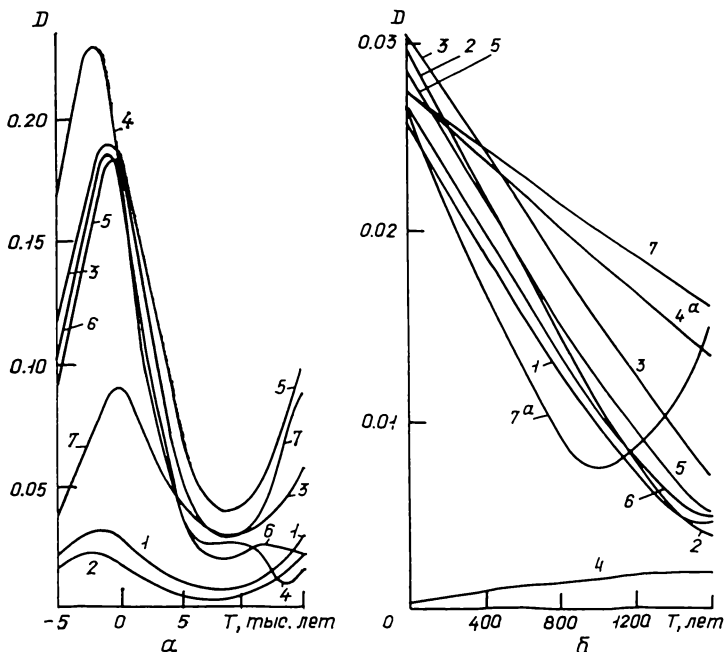


Рис. 2. Зависимости фазовых расстояний между орбитами родительского тела Геминид и его фрагментов (1—7) при интегрировании назад от моментов 15 000 лет (а) и 1600 лет (б) до момента выброса

На рис. 2, а представлен характер изменения фазовых расстояний  $D(t)$  между орбитами фрагментов и РТ, вычисленных при интегрировании назад от момента  $t=15\,000$  лет с «искаженными» элементами орбит. Как видно из рисунка, почти для всех орбит исследуемых фрагментов первый после начала интегрирования назад минимум  $D$  достигается при  $t=9000$  лет, откуда можно было бы сделать вывод о том, что «возраст» смоделированного роя составляет около 6000 лет. Однако это не соответствует действительности, поскольку в нашем эксперименте частицы были выброшены в момент  $t=0$ , а не в момент  $t=9000$  лет.

Рис. 2, б, где представлена зависимость  $D(t)$  для второго эксперимента, показывает, что только у частицы 4, полуось орбиты которой в момент  $t=1600$  не искажалась, имеется, как и должно быть, тенденция к уменьшению  $D$  от начала интегрирования к моменту выброса. Для остальных — налицо возрастание  $D$ . Такой характер изменения фазовых расстояний со временем исключает возможность использования  $D$ -критерия для определения момента образования роя.

Следующий численный эксперимент — моделирование выброса частиц с поверхности кометы Галлея (КГ). Элементы орбит «выброшенных» частиц (табл. 6) подвергались вековым возмущениям от всех девяти планет на 5800 лет вперед, где в значения больших полуосей орбит фрагментов внесены поправки  $\Delta a$ , имитирующие погрешности из-

мерений (табл. 7). При этом полуось четвертой орбиты не изменялась, а в значения полуосей шестой и седьмой орбит внесены поправки  $\Delta a$  в ту и другую сторону:  $\pm 8$  и  $\pm 10$  а. е. соответственно. Поэтому в табл. 7 не семь орбит, как в исходной табл. 6, а девять.

Интегрирование системы дифференциальных уравнений Гаусса с использованием этих «искаженных» элементов орбит на 5800 лет назад, т. е. к моменту модельного выброса, показывает (табл. 8), что все орбиты, за исключением орбит кометы и четвертой частицы, полуоси которых не изменялись, не приходят в точку «разрыва» РТ. Элементы их орбит значительно отличаются от приведенных в табл. 6.

На рис. 3, а представлен характер изменения величины  $\Delta \pi = \pi_{\text{фр}} - \pi_{\text{кг}}$  при интегрировании уравнений вековых возмущений назад на 5800 лет, если в качестве начальных условий использовать «точные»

Таблица 6. Элементы орбит кометы Галлея и ее фрагментов в момент выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$
КГ	0.6007	0.9665	87.41	26.34	113.75	162.92	—
1	0.5998	0.9616	87.96	26.86	114.82	162.91	0.006
2	0.6000	0.9642	87.62	26.66	114.28	162.92	0.003
3	0.6008	0.9667	87.33	26.25	113.58	162.92	0.0005
4	0.6013	0.9679	87.58	26.45	114.03	162.92	0.002
5	0.6001	0.9648	87.66	26.61	114.27	162.92	0.002
6	0.6020	0.9696	87.13	26.10	113.23	162.92	0.004
7	0.6007	0.9664	87.28	26.22	113.50	162.92	0.007

Таблица 7. Возмущенные элементы орбит кометы Галлея и ее фрагментов через 5800 лет после выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$	$\Delta a$ , а. е.
КГ	0.5319	0.9704	129.67	80.70	210.37	155.22	—	—
1	0.6364	0.9592	132.07	85.21	217.28	153.05	0.120	-2
2	0.5673	0.9662	131.34	83.72	215.06	153.50	0.055	-1
3	0.5317	0.9705	129.48	80.43	209.91	155.40	0.004	+2
4	0.5411	0.9711	127.60	77.50	205.10	157.02	0.042	0
5	0.5543	0.9675	131.09	83.13	214.22	153.76	0.041	+6
6	0.5704	0.9711	123.58	72.37	195.95	159.03	0.099	+8
7	0.5327	0.9702	129.80	80.96	210.76	155.08	0.004	+10
6 <sup>a</sup>	0.5704	0.9711	123.58	72.37	195.95	159.03	0.099	-8
7 <sup>a</sup>	0.5327	0.9702	129.80	80.96	210.76	155.08	0.004	-10

Таблица 8. Элементы орбит кометы Галлея и ее фрагментов, вычисленные интегрированием дифференциальных уравнений Гаусса от момента  $t=5800$  лет до момента выброса

Объект	$q$ , а. е.	$e$	$\omega$	$\Omega$	$\pi$	$i$	$D$
КГ	0.6007	0.9665	87.41	26.34	113.75	162.91	—
1	0.5323	0.9609	78.53	13.71	90.24	161.35	0.102
2	0.5445	0.9655	80.19	18.72	98.91	162.48	0.069
3	0.5601	0.9720	100.99	42.49	143.48	161.76	0.101
4	0.6013	0.9679	87.58	26.45	114.03	162.92	0.002
5	0.4953	0.9785	114.84	60.01	174.85	159.07	0.238
6	0.4704	0.9831	103.58	47.29	150.87	162.72	0.182
7	0.4128	0.9852	114.68	60.82	175.50	159.99	0.287
6 <sup>a</sup>	0.6397	0.9457	49.84	338.27	28.81	155.32	0.343
7 <sup>a</sup>	0.8728	0.8892	41.45	315.42	356.87	139.85	0.768

(не «искаженные») оскулирующие элементы орбит эпохи 5800.0. В этом случае все значения  $\Delta\pi$  сходятся в момент выброса, где все они равны нулю.

Совершенно иная картина наблюдается, если в качестве начальных условий использовать оскулирующие элементы орбит эпохи 5800.0 с

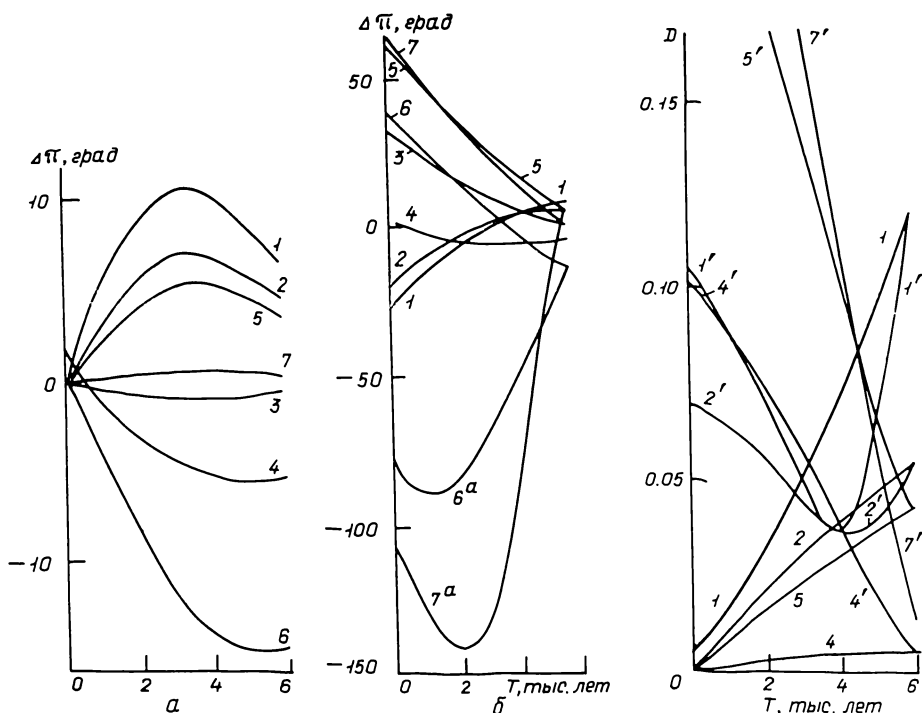


Рис. 3. Зависимости разностей долгот перигелиев фрагментов (1—7) и кометы Галлея при интегрировании назад от момента 5800 лет до момента выброса для случаев неискаженных элементов оскулирующих орбит (а) и в случае учета погрешностей изменения больших полуосей орбит (б)

Рис. 4. Зависимость фазовых расстояний между орбитами кометы Галлея и ее фрагментов при интегрировании назад от момента 5800 лет до момента выброса в случаях использования «точных» (кривые 1, 2, 4, 5) и «искаженных» (кривые 1', 2', 4', 5', 7') элементов орбит

внесенными поправками  $\Delta a$  в значения больших полуосей (рис. 3, б). Лишь четвертая орбита в момент выброса имеет  $\Delta\pi=0$ , все остальные обнаруживают тенденцию к увеличению  $|\Delta\pi|$ .

Рис. 4 показывает, как изменяются фазовые расстояния  $D$  между орбитами кометы Галлея и ее фрагментов при интегрировании назад от момента  $t=5800$  лет к моменту выброса при использовании в качестве начальных условий «точных» и «искаженных» оскулирующих элементов орбит (во втором случае соответствующие кривые на рисунке обозначены цифрами со штрихом). Отчетливо видно, что неточность начальных условий в корне изменяет характер зависимости  $D(t)$ : в первом случае все орбиты фрагментов сближаются с орбитой кометы в момент выброса, во втором — фазовые расстояния  $D$  некоторых орбит достигают минимальных значений за 4000 лет до истинного момента образования роя, у остальных — резко возрастают сразу же после начала интегрирования.

Таким образом, рассмотренные численные модели эволюции метеорных роев (как коротко-, так и долгопериодических) показывают, что использование метода вековых возмущений с начальными условиями, отягощенными погрешностями измерений, не позволяет ни определить

момент образования метеорного роя, ни реконструировать его структуру или прогнозировать на длительных интервалах времени его встречи с Землей, ни выявить возможные генетические связи между отдельными объектами Солнечной системы. Эти замечания о применимости метода вековых возмущений не относятся к изучению движения больших планет, астероидов и комет, для которых обычно известны точные элементы оскулирующих орбит.

1. *Бабаджанов П. Б., Заусаев А. Ф.* Эволюция орбит метеорных роев Квадрантид,  $\delta$ -Акварид,  $\alpha$ -Каприкорнид // Бюл. Ин-та астрофиз. АН ТаджССР.— 1975.— № 65.— С. 40—50.
2. *Бабаджанов П. Б., Заусаев А. Ф., Обрубов Ю. В.* Исследование возможной связи метеорных роев с кометами // Там же.— 1980.— № 69/70.— С. 45—55.
3. *Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В.* Эволюция орбит кометы Галлея и метеорных роев Орионид и Эта-Акварид // Докл. АН ТаджССР.— 1979.— 22, № 4.— С. 235—237.
4. *Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В.* Эволюция орбиты метеорного роя Геминид // Там же.— 22, № 8.— С. 466—470.
5. *Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В.* Об условиях встречи роя Квадрантид с Землей // Там же.— 22, № 12.— С. 730—734.
6. *Бабаджанов П. Б., Обрубов Ю. В.* Эволюция орбит и условий встречи с Землей метеорных роев Геминид и Квадрантид // Астрон. и геодезия.— 1984.— № 10.— С. 125—130.
7. *Белькович О. И., Кондратьева Е. Д., Резников Е. А.* Эволюция орбиты метеорного роя Геминид // Кинематика и физика небес. тел.— 1987.— 3, № 2.— С. 34—39.
8. *Ворошилов К. А.* О возможном происхождении метеорных потоков майских Акварид и Орионид и их связи с кометой Галлея // Астрон. журн.— 1943.— 20, вып. 4.— С. 21—28.
9. *Галибина И. В.* Вековые возмущения метеорного роя Леонид // Бюл. Ин-та теорет. астрон. АН СССР.— 1970.— 12, № 6.— С. 470—473.
10. *Галибина И. В.* Вековые возмущения некоторых метеорных роев // Там же.— 1970.— 12, № 10.— С. 870—871.
11. *Галибина И. В.* Вековые возмущения малых метеорных роев // Материалы Мирового центра данных Б.— М.: ВИНТИ, 1979.— С. 187.
12. *Галибина И. В., Терентьева А. К.* Эволюция орбиты роя Геминид на протяжении 100 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 249.— С. 3—4.
13. *Казимирчак-Полонская Е. И., Беляев Н. А., Астапович И. С., Терентьева А. К.* Исследование возмущенного движения метеорного роя Леонид // Астрон. журн.— 1967.— 44, вып. 3.— С. 616—629.
14. *Казимирчак-Полонская Е. И., Терентьева А. К.* Эволюция орбит и радиантов метеорного роя семейства Юпитера // Там же.— 1973.— 50, вып. 3.— С. 576—589.
15. *Крамер Е. Н., Тимченко-Островерхова Е. А.* Вековые возмущения метеорных роев и трансформация метеорных потоков // Астрон. вестн.— 1981.— 15, № 1.— С. 50—54.
16. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Метеорная материя в атмосфере Земли и околосолнечном космическом пространстве.— М.: Наука, 1983.— 184 с.
17. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Возможный механизм формирования короткопериодических метеорных роев // Астрон. вестн.— 1984.— 18, № 2.— С. 137—144.
18. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Эволюция связки орбит в метеорном рое Геминид // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.— 1, № 4.— С. 73—77.
19. *Крамер Е. Н., Шестака И. С.* Возраст, происхождение и эволюция метеорного роя Геминид // Там же.— 1986.— 2, № 4.— С. 81—86.
20. *Обрубов Ю. В., Шербаум Л. М.* Эволюция орбиты роя Геминид на интервале 30 000 лет // Комет. циркуляр.— 1979.— № 244.— С. 4.
21. *Терентьева А. К., Галибина И. В.* Эволюция радианта метеорного потока Геминид под влиянием вековых возмущений // Астрон. циркуляр.— 1983.— № 1256.— С. 5—7.
22. *Hamid S. E.-D.* The formation and evolution of the Perseid meteor stream: Doctoral thesis.— Harvard, 1950.— 96 p.
23. *Hamid S. E., Youseff M. N.* A short note on origin and age of the Quadrantids // Smithsonian Contribs Astrophys.— 1961.— 7.— P. 309—311.
24. *Porubcan V.* Dispersion of orbital elements within the Geminid and Taurid meteor streams // Bull. Astron. Inst. Czech.— 1978.— 29, N 4.— P. 218—224.
25. *Southworth R. B.* Dynamical evolution of the Perseids and Orionids // Smithsonian Contribs Astrophys.— 1963.— 7.— P. 299—300.
26. *Southworth R. B., Hawkins G. S.* Statistics of meteor streams // Ibid.— P. 261—265.
27. *Whipple F. L., Hamid S. E.-D.* On the origin of the Taurid meteor stream // Harvard Repr.— 1952.— N 361.— 30 p.