

УДК 523.68

МЕТЕОРНЫЙ КОМПЛЕКС ВБЛИЗИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ: СПОРАДИЧЕСКИЙ ФОН, ПОТОКИ, АССОЦИАЦИИ.

3. ИСТОЧНИКИ ПОТОКОВЫХ И СПОРАДИЧЕСКИХ МЕТЕОРНЫХ ТЕЛ

© 1997 г. Ю. И. Волощук, А. В. Воргуль, Б. Л. Кашеев

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники, Украина

Поступила в редакцию 23.04.96 г.

После исправления 26.12.96 г.

На основе анализа элементов и квазипостоянных параметров орбит метеороидов оценивается вклад астероидов групп Аполлона, Амура, Атона (ААА-астероиды), пояса астероидов, коротко- и долгопериодических комет в комплекс потоковых и спорадических метеорных тел. Используются как известные формальные критерии, так и методы многомерной классификации при наличии обучающих выборок – дискриминантный анализ и классификация в случае, когда распределение по классам известно, базирующаяся на критерии отношения правдоподобия. Показано, что среди потоковых метеороидов с массами больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е., 72% являются продуктом дезинтеграции ААА-астероидов, 3% произошли от астероидов пояса, 19% являются продуктом дезинтеграции ядер короткопериодических и 6% – долгопериодических комет. Для спорадических метеороидов соответствующие оценки составляют 32, 4, 7 и 57%. Таким образом, среди потоковых метеороидов 75% имеют астероидное происхождение (72% ААА-астероиды), среди спорадических 37% астероидного происхождения (32% ААА-астероиды). Приведены исправленные четырехмерные (a, e, q, i) распределения элементов орбит метеороидов для всех четырех классов, обсуждаются особенности распределений.

ВВЕДЕНИЕ

В работе Волощука и др. (1995) описана процедура выделения потоков из выборки большого объема, приведены распределения скоростей, элементов орбит и координат радиантов всех метеоров выборки, потоковых и спорадических метеоров. В работе Волощука и Кашеева (1996) анализируются распределения характеристик потоковых и спорадических радиометеоров, исправленные за геометрический, аппаратный, физический и астрономический факторы замечательности, т.е. распределения метеороидов с массами больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е. вокруг Солнца. Показано, что распределения радиантов, одномерные, двумерные и трехмерные распределения элементов орбит потоковых и спорадических метеороидов резко отличаются друг от друга. Очевидно, что такие различия связаны с происхождением тех и других метеороидов, с особенностями орбит родительских тел.

В настоящее время выделены три источника метеороидов: кометы, астероиды главного пояса астероидов (далее – пояса астероидов) и тела групп Аполлона, Амура, Атона (ААА-астероиды), которые также могут иметь либо кометное, либо астероидное происхождение (см. Заключение). Вклад этих источников по оценкам различных исследователей различен, но присутствие в

метеорном комплексе Солнечной системы метеороидов всех этих типов не вызывает сомнений (Хьюз, 1993). В настоящей работе анализируются выборки потоковых и спорадических метеороидов с точки зрения их вероятного происхождения. Поскольку радиолокационный метод не позволяет надежно оценивать физические характеристики метеороидов, ограничимся анализом только элементов орбит.

АНАЛИЗ С ПОМОЩЬЮ ФОРМАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ

Обзор критериев разделения двух классов малых тел Солнечной системы – астероидов и комет – по их орбитальным характеристикам проведен Кресаком (1969а). Следует отметить, что все рассмотренные им критерии являются формальными, не имеющими каких-либо физических обоснований, и не учитывают эффекты наблюдательной селекции. В настоящее время такого критерия, который обеспечивал бы однозначность классификации орбит малых тел и позволял надежно судить об их происхождении, нет. Критерии позволяют лишь утверждать, что какая-то группа метеороидов из общей выборки движется по орбитам кометного или астероидного типа, возможно, последние являются их родительскими телами. В частности, в подробном

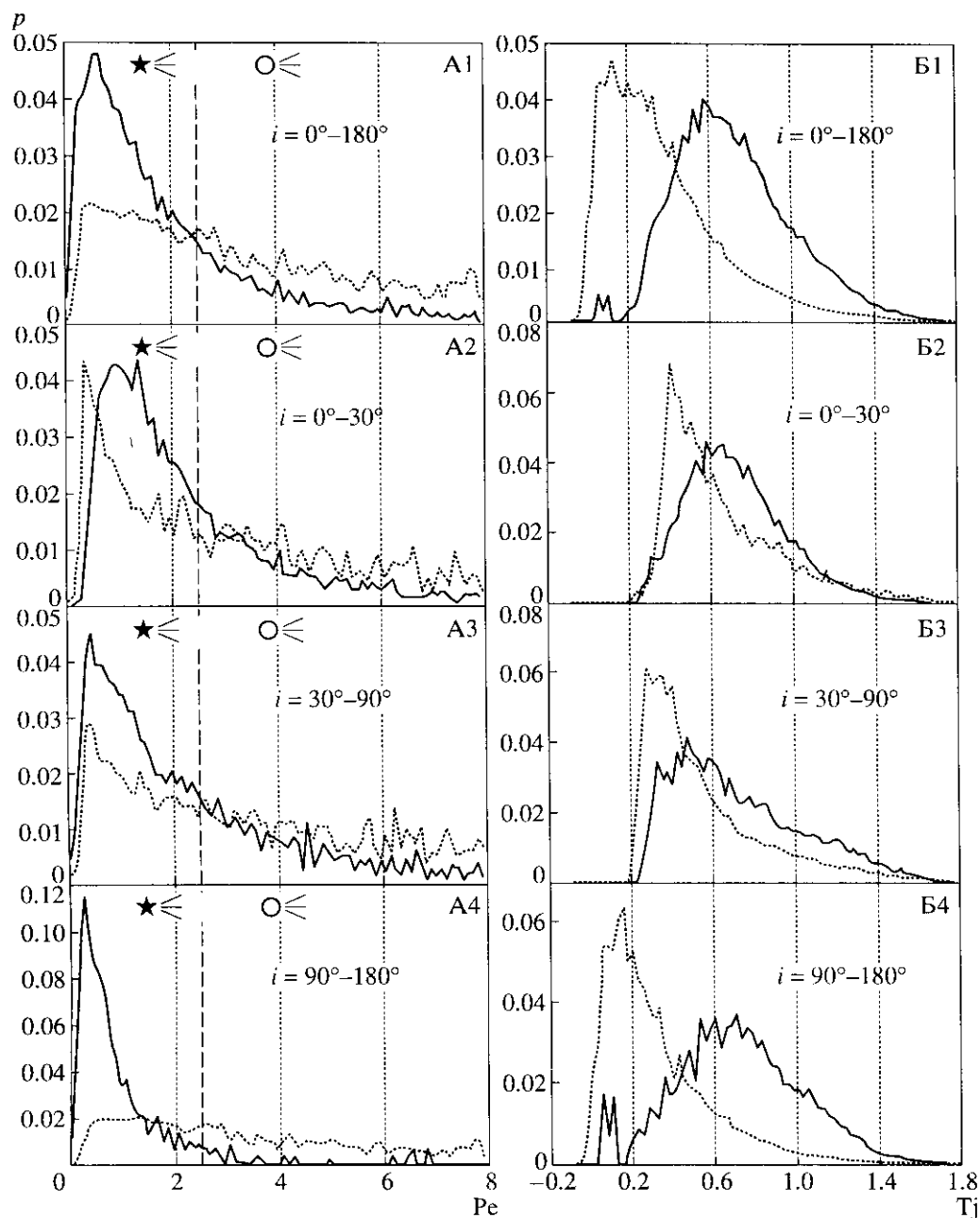


Рис. 1. Распределения орбит метеороидов по величине Pe (А) и по величине T_j (Б) в различных диапазонах наклонений. Сплошная линия – потоковые метеороиды; пунктирная линия – спорадические метеороиды; штриховая линия – граничное значение критерия (1), разделяющее орбиты астероидного и кометного типов.

обзоре (Стиил, 1996) результатов измерения орбит индивидуальных метеоров банка данных Международного астрономического союза (Лунд, Швеция) в качестве такого критерия использован известный критерий Уиппла (1954). Вполне вероятно, что такого критерия и не существует. Формальные критерии позволяют лишь утверждать, что какая-то группа метеороидов из общей выборки движется по орбитам кометного или астероидного типа и, возможно, последние являются их родительскими телами.

Сравнивая известный критерий Уиппла (1954) с критерием

$$Pe = a^{3/2}e \begin{cases} > 2.5 & \text{для комет,} \\ < 2.5 & \text{для астероидов,} \end{cases} \quad (1)$$

Кресак пришел к выводу о том, что критерий (1) обеспечивает наилучшее разделение орбит комет и астероидов. Проверка временем (возросший объем наблюдений комет и астероидов) подтвердила, что эмпирический критерий (1) является на-

Таблица 1. Оценки некоторых статистик распределений орбит кометного и астероидного типов среди потоковых и спорадических метеороидов (критерии [1] и [2])

№ выборки, рисунок	Класс метеороидов	N	$\frac{N_{sh}}{N_{sp}}$	$\frac{P_{sh}}{P_{sp}}$	$\overline{Pe}$	$Pr\{Pe < 2.5\}$	$\overline{T_j}$	$Pr\{T_j > 0.58\}$
1	Потоковые	49831	1.52	0.32	1.96	0.74	0.72	0.68
1.A1, 1.B1	Спорадические	32787			3.54	0.43	0.38	0.20
2	Потоковые	21546	4.96	2.35	2.31	0.68	0.73	0.72
1.A2, 1.B2	Спорадические	4348			3.12	0.50	0.66	0.50
3	Потоковые	16184	1.27	0.55	2.30	0.66	0.73	0.61
1.A3, 1.B3	Спорадические	12729			3.56	0.41	0.57	0.35
4	Потоковые	12098	0.77	0.11	1.08	0.92	0.72	0.68
1.A4, 1.B4	Спорадические	15702			3.57	0.42	0.32	0.15

ибо более надежным из всех известных орбитальных критериев.

Для определения природы метеороидов, орбиты которых проходят вблизи Юпитера, Кресак предложил использовать значение постоянной Тиссерана

$$T_j = a^{-1} + 0.1686a^{1/2}(1 - e^2)^{1/2} \cos i_0. \quad (2)$$

Здесь i_0 – наклонение орбиты метеороида к орбитальной плоскости Юпитера.

Границей, разделяющей стабильные орбиты астероидов и нестабильные кометные орбиты при $i_0 = 0^\circ$, служит значение $T_j = 0.58$. Для астероидов характерно $T_j > 0.58$, для кометы $T_j < 0.58$.

Подчеркнем, что критерии (1) и (2), как и другие критерии, рассмотренные Кресак, получены по наблюдениям комет и астероидов и использовать их для классификации метеороидов можно с определенными оговорками. Во-первых, выборки орбит комет и астероидов искажены наблюдательной селекцией (см. Заключение), во-вторых, в этих выборках практически отсутствуют орбиты малых размеров с наклонениями больше 30° – 40° , тогда как у мелких метеороидов такие орбиты преобладают. Наконец, орбиты мелких метеороидов быстро трансформируются в процессе эволюции под действием гравитационных и негравитационных сил, что приводит к тому, что они быстро “забывают” свое происхождение (см. Заключение). Однако для орбит с малыми наклонениями, особенно потоковых (молодых) метеороидов эти критерии дают полезную информацию. Поэтому начнем анализ, используя формальные критерии (1) и (2).

На рис. 1А приведены распределения по Pe потоковых и спорадических метеороидов массой больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е. вокруг Солнца, с наклонениями орбит в различных диапазонах значений при афелийном расстоянии $Q < 10$ а. е. Методика учета факторов селек-

тивности радиолокационных наблюдений метеороидов и их оценки приведены в работе Волощука и Кашеева (1996). Объемы выборок, по которым построены распределения и оценки некоторых статистик, приведены в табл. 1. Анализ данных табл. 1 показывает, что среднее значение Pe у потоковых метеороидов меньше порогового значения 2.5, у спорадических – больше. Вероятность того, что $Pe < 2.5$ (орбиты астероидного типа) у потоковых метеороидов существенно выше, чем у спорадических, причем во всем диапазоне изменения наклонений. Для орбит с прямым движением (рис. 1, A2, A3) граница, слева от которой преобладают потоковые метеороиды, а справа – спорадические, лежит вблизи значения $Pe = 2.5$, т.е. является границей между орбитами астероидного и кометного типов согласно критерию (1). Для орбит с обратным движением такая граница смещается в область $Pe \approx 1$ и, очевидно, не имеет физического смысла из-за практически полного отсутствия короткопериодических (КП) комет и астероидов на орбитах такого типа.

Анализ распределений, приведенных на рис. 1А и других, построенных для более узких диапазонов наклонений орбит i , показывает, что с ростом i от 0° до 90° различие распределений по Pe потоковых и спорадических метеороидов уменьшается, причем в основном за счет изменений распределений спорадических тел. Распределения потоковых тел с ростом наклонения меняются только в мелкомасштабных деталях.

Подчеркнем, что отмеченные закономерности сохраняются и у распределений радиометеороидов.

Для метеороидов, движущихся по орбитам с наклонениями меньше 30° (рис. 1, A2), резкое преобладание потоковых метеороидов над спорадическими имеет место в диапазоне Pe 0.5–2.0, где располагаются в аналогичном распределении большинство известных ААА-астероидов со средними значениями $Pe = 1.41$ и $i = 17^\circ$. Отметим, что в эту же область распределения попадает и

большинство астероидов пояса ($Pe = 0.66$ и $i = 9^\circ$), поэтому какие-либо выводы делать преждевременно. Пока можно только заключить, что, согласно критерию (1), по орбитам кометного типа с наклонениями меньше 30° движется приблизительно половина спорадических метеорных тел и только треть потоковых.

Для орбит метеороидов, афелийные расстояния которых больше 4.6 а. е., распределения постоянной Тиссерана в различных диапазонах наклонения i отличаются для выборок потоковых и спорадических метеорных тел незначительно.

Для астероидов, орбиты которых, за редким исключением, не сближаются с орбитой Юпитера, постоянная Тиссерана теряет физический смысл. Тем не менее, как отмечает Кресак (1969а), она может служить удобным параметром сравнения кометных и астероидных орбит. На рис. 1Б приведены распределения по T_j орбит потоковых и спорадических метеороидов, афелийные расстояния которых не превышают 10 а. е., а в табл. 1 – некоторые оценки этих распределений. Сравнивая оценки вероятностей принадлежности метеороидов к астероидному типу по критериям (1) и (2), можно отметить, что для орбит с прямым движением они близки, тогда как для орбит с обратным движением отличаются у спорадических метеороидов почти в 3 раза.

Из анализа распределений, приведенных на рис. 1, Б2, следует, что значение $T_j = 0.58$ служит границей, справа от которой преобладают потоковые метеороиды, что согласуется с выводами, сделанными при анализе распределений рис. 1, А2. Для других значений наклонений орбит граница $T_j \approx 0.58$ имеет тот же смысл, в том числе и для орбит с обратным движением. В соответствующем распределении таких орбит в диапазоне значений $T_j = 0-0.3$ имеется острый максимум у спорадических метеороидов, а потоковые тела практически отсутствуют. Родительскими телами этих метеороидов могут быть долгопериодические (ДП) кометы, которые распределяются по T_j как раз в этом диапазоне (среднее значение постоянной Тиссерана для них 0.04, нижняя квартиль равна -0.11, верхняя – +0.17). Это объясняет и отсутствие на таких орбитах потоковых метеорных тел. Так, в отмеченном диапазоне сосредоточено 34% спорадических метеороидов на орбитах с обратным движением и только 2% потоковых тел.

Среднее значение T_j для ААА-астероидов равно 0.78, нижняя квартиль – 0.63, верхняя – 0.88. Аналогичные статистики у астероидов пояса составляют соответственно 0.64, 0.61 и 0.67, у КП-комет – 0.53, 0.51 и 0.56. Из анализа распределений рис. 1, Б2 следует, что в отмеченных диапазонах в распределениях потоковых и спорадических метеороидов четко выраженных особенностей не выявляется.

Известно, что родительскими телами метеорных тел с афелийными расстояниями более 4.6 а. е. являются кометы; метеороиды, движущиеся по орбитам с меньшими афелийными расстояниями, могли произойти как от комет, так и от астероидов. Если принять за единицу плотность потока метеорных тел с массами больше 10^{-5} г, движущихся по орбитам с афелийным расстоянием больше 4.6 а. е. и принадлежащих к выявленным потокам, то соответствующая оценка для метеороидов с $Q < 4.6$ а. е. (метеороиды и кометного, и астероидного происхождения) будет 3.2; вклад спорадических метеороидов только кометного происхождения – 0.8; вклад спорадических метеороидов кометного и астероидного происхождения – 0.6. Из всех потоковых метеорных тел с наклонениями орбит меньше 30° заведомо кометного происхождения 3% произошли в результате дезинтеграции ядер ДП-комет. Аналогичная оценка для спорадических метеорных тел равна 2%. Во всем диапазоне значений наклонений орбит соответствующие значения равны 1.4 и 15%.

Для выявления возможных генетических связей метеороидов с другими малыми телами Солнечной системы – кометами и астероидами – полезными могут оказаться орбитальные характеристики, которые слабо подвержены влиянию возмущающих факторов. Кроме уже упоминавшейся выше постоянной Тиссерана к таким квазипостоянным параметрам относятся следующие два интеграла, полученные Лидовым (1961) и Моисеевым (1945):

$$v = e^2(0.4 - \sin^2 i \sin^2 \omega), \quad (3)$$

$$\mu = [a(1 - e^2)]^{1/2} \cos i. \quad (4)$$

Эффекты влияния негравитационных сил на элементы орбит мелких метеороидов имеют свою постоянную, полученную Ваттом и Уипплом (1950):

$$C = a(1 - e^2)e^{-4/5}. \quad (5)$$

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Для оценки вклада комет и астероидов в комплекс потоковых и спорадических метеорных тел Солнечной системы был применен метод автоматической классификации при наличии обучающих выборок – пошаговый дискриминантный анализ (Айвазян и др., 1989). Последовательность обработки данных для этой процедуры в сжатом виде описана Афифи и Эйзенем (1982): определяется переменная, для которой средние значения в каждом из k классов наиболее различаются. Для каждой переменной различие измеряется с помощью F – статистики однофакторного дисперсионного анализа, и включается в последующий ана-

лиз та переменная, которой соответствует наибольшее значение F . На каждом шаге процедуры рассматривается условное распределение каждой переменной, не включенной в подмножество, при заданных переменных. Из числа не включенных переменных определяется следующая, для которой средние значения условных распределений в k классах наиболее различаются, и т.д. Процесс завершается, когда ни одна из оставшихся переменных не вносит значимого вклада в разделение k классов.

В качестве обучающих выборок использовались выборки ААА-астероидов (группа 1), астероидов пояса (группа 2; из этой выборки были исключены Троянцы, поскольку условия их движения в окрестностях лагранжевых точек практически исключают возможность того, что они могут быть родительскими телами метеороидов), КП-комет, орбиты которых расположены в пределах орбиты Сатурна (группа 3), и ДП-комет с афелийными расстояниями, превосходящими среднее значение большой полуоси орбиты Сатурна (группа 4), т.е. количество классов k выбрано равным четырем. В табл. 2 приведены объемы выборок и оценки средних (M) и стандартных отклонений (S) некоторых орбитальных характеристик по обучающим выборкам, а на рис. 2 – диаграммы, отражающие положение выборок по величинам i , e , q и $Q^{-1/2}$ для каждой из групп. Можно отметить, что группы 1, 2 и 3 практически не различаются по наклонениям, но четко разделяются по оценкам q , e и $Q^{-1/2}$, тогда как группа 4 далеко отстоит от всех остальных по i , e и $Q^{-1/2}$, но перекрываются с группой 1 по q и т.д.

Анализировались три модели классификации.

Модель 1. В качестве переменных для классификации были выбраны наклонение орбиты i , эксцентриситет e , перигелийное расстояние q , величина, обратная корню квадратному из афелийного расстояния $Q^{-1/2}$, и аргумент перигелия ω . Из них первые четыре прошли проверку на значимость и включены в модель. Наиболее существенный вклад в разделение классов по обучающим выборкам вносит переменная $Q^{-1/2}$, статистика F для нее равна 1416, далее следует эксцентриситет (973), затем идут перигелийное расстояние (341) и наклонение (142). Для сравнения переменная ω имеет $F = 0.5$. Количественной оценкой качества классификации может служить коэффициент λ , равный отношению детерминанта матрицы корреляций относительно среднего каждой из групп (классов) к детерминанту корреляционной матрицы суммарной выборки. Для модели 1 $\lambda = 0.030$ ($\lambda = 0$ соответствует случаю идеальной классификации, $\lambda = 1$ – классы статистически неразличимы). В предположении, что априорные вероятности классов одинаковы и

Таблица 2. Некоторые статистики обучающих выборок вероятных родительских тел метеороидов

Параметр	Статистика	ААА-астероиды	Астероиды пояса	КП-кометы	ДП-кометы
	Объем выборки	134	2699	83	178
i_1^0	M	16.93	8.65	12.46	84.40
	S	18.66	6.07	8.19	47.55
e	M	0.49	0.14	0.57	0.99
	S	0.167	0.071	0.138	0.032
q	M	0.89	2.34	1.64	1.04
	S	0.255	0.398	0.737	0.678
$Q^{-1/2}$	M	0.63	0.57	0.42	0.06
	S	0.133	0.041	0.037	0.061
Pe	M	1.41	0.66	4.19	786.5
	S	1.080	0.340	1.648	347.2
T_j	M	0.78	0.64	0.53	0.04
	S	0.201	0.034	0.037	0.172
v	M	0.09	0.01	0.13	0.14
	S	0.067	0.009	0.059	0.254
μ	M	1.04	1.60	1.51	0.15
	S	0.260	0.121	0.277	0.974
C	M	2.36	16.25	4.59	2.09
	S	1.063	13.00	4.282	1.362

равны 0.25, были рассчитаны оценки дискриминантных функций для каждого из классов:

$$d_1 = -808.82 + 1526.68Q^{-1/2} + 176.49q + 982.32e + 0.340i, \quad (6)$$

$$d_2 = -642.36 + 1364.25Q^{-1/2} + 163.09q + 645.45e + 0.293i, \quad (7)$$

$$d_3 = -700.99 + 1384.34Q^{-1/2} + 169.19q + 938.30e + 0.275i, \quad (8)$$

$$d_4 = -564.00 + 1120.78Q^{-1/2} + 145.96q + 864.85e + 0.567i. \quad (9)$$

Объект, заданный вектором $\mathbf{X} = \{Q^{-1/2}, q, e, i\}$, классифицируется как принадлежащий к i -му классу, если величина d_i имеет наибольшее значение. Оценка апостериорной вероятности при этом будет

$$Pr\{i|\mathbf{X}\} = \frac{e^{d_i}}{\sum_1 e^{d_j}}. \quad (10)$$

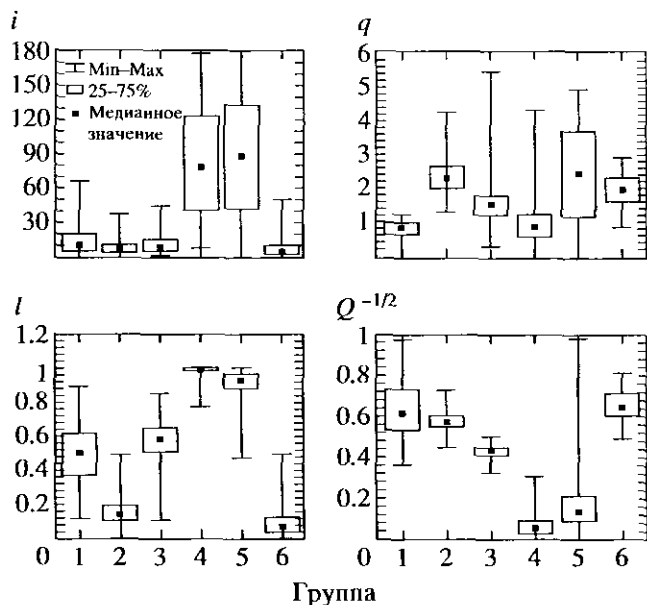


Рис. 2. Диаграммы, отображающие положение выборок по величинам i , q и $Q^{-1/2}$ в группах 1 – ААА-астероиды, 2 – астероиды пояса астероидов, 3 – КП-кометы, 4 – ДП-кометы, 5 и 6 – кометная и астероидная модели Крамера, Шестаки (1983) соответственно.

Очевидно, что, решая уравнение вида $d_i - d_j = 0$, можно получить формальный критерий типа (1), устанавливающий границу между метеороидами i -го и j -го классов в пространстве элементов орбит $\{a, e, i\}$.

В табл. 3 приведена классификационная матрица для обучающих выборок. Из анализа оценок, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что каждая из четырех выборок с высокой достоверностью составляет отдельный класс в четырехмерном пространстве переменных – элементов орбит. Как и следовало ожидать, хуже других разделяются ААА-астероиды и КП-кометы (из 134 ААА-астероидов 26, т.е. приблизительно 20%, отнесены к классу КП-комет).

Модель 2. В качестве переменных для классификации были выбраны квазипостоянные параметры орбит: T_j , μ , v и C . Все они прошли проверку на значимость и включены в модель. Наиболее существенный вклад в разделение классов по обучающим выборкам вносит переменная T_j , статистика F для нее равна 2211, за ней следует μ (446), затем v (178) и C (33). Для модели 2 $\lambda = 0.093$, т.е. тоже величина достаточно малая, что свидетельствует о высоком качестве классификации и для модели 2.

Вводя в качестве переменных для дискриминантного анализа квазипостоянные параметры, мы исходили из следующего.

Мелкие метеороиды в процессе эволюции орбит под воздействием гравитационных и негравитационных сил перемещаются в пространстве элементов орбит и, если рассматривать элементы орбит в чистом виде, быстро “забывают” свое происхождение и теряют связь с родительскими телами. Квазипостоянные параметры гораздо медленнее изменяются со временем и, следовательно, дольше сохраняют эту связь. Если проводить классификацию метеороидов, порождающих метеорные явления в атмосфере Земли, по элементам орбит, как в модели 1, то, например, астероиды пояса не могут быть их родительскими телами. Однако продукты их дезинтеграции могут достичь орбиты Земли под влиянием, например, негравитационных сил по траекториям в фазовом пространстве, определяемым инвариантом C (5). Аналогично и продукты дезинтеграции других классов родительских тел могут существенно перемещаться в пространстве элементов орбит, сохраняя в квазипостоянных параметрах память о породивших их телах. Траектории перемещения орбит метеороидов в пространстве элементов орбит, сохраняющие постоянными инварианты (2)–(5), приведены в работе Волощук и др., 1989, рис. 7.9 и 7.10).

Таблица 3. Классификационная матрица для моделей 1 (переменные $Q^{-1/2}$, e , q , i) и 2 (переменные T_j , μ , v , C)

Группа (класс)	Количество правильно классифицированных орбит, %		Группа 1		Группа 2		Группа 3		Группа 4	
	Модель 1	Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 1	Модель 2
1	78.4	71.6	106	97	2	12	26	25	0	0
2	99.9	98.8	0	29	2695	2668	4	2	0	0
3	91.6	96.4	1	0	6	3	76	80	0	0
4	95.5	84.3	0	0	0	0	8	28	170	150
Итого:	98.4	96.8	107	126	2703	2683	114	135	170	150

В предположении, что априорные вероятности классов одинаковы, были рассчитаны оценки дискриминантных функций для каждого из классов:

$$d_1 = -72.490 + 177.967T_j - 2.332\mu + 23.713v + 0.122C, \quad (11)$$

$$d_2 = -51.141 + 131.213T_j + 9.630\mu + 1.483v + 0.141C, \quad (12)$$

$$d_3 = -41.269 + 102.297T_j + 11.113\mu + 31.294v + 0.055C, \quad (13)$$

$$d_4 = -5.504 + 7.968T_j + 0.741\mu + 34.649v + 0.029C, \quad (14)$$

Решая уравнение вида $d_i - d_j = 0$, можно получить формальный критерий, определяющий границу между метеороидами i -го и j -го классов в пространстве квазипостоянных параметров орбит $\{T_j, \mu, v, C\}$ или элементов орбит $\{a, e, i\}$.

Из сравнения оценок, приведенных в табл. 3, следует, что обучающие выборки классифицируются по модели 2 несколько хуже, чем по модели 1, причем в основном за счет астероидов пояса: если в первой модели 2695 из 2699 астероидов пояса вошли в группу 2, то во второй 29 из них оказались в группе ААА-астероидов.

Убедившись в том, что рассчитанные дискриминантные функции (6)–(9) и (11)–(14) надежно и правильно классифицируют подавляющее большинство объектов обучающих выборок, можно, используя их, классифицировать и другие объекты, не входящие в обучающие выборки. В качестве таковых были использованы множества потоковых и спорадических метеоров, распределения радиантов и элементов орбит которых анализировались Волощуком и др. (1995) и Волощуком и Кашеевым (1996).

Для каждого метеора вычислялись оценки апостериорных вероятностей принадлежности его к каждому из четырех классов, ассоциированных с соответствующей группой (класс 1 с группой 1 и т.д.). Затем вес его, равный произведению геометрического, физического, аппаратного и астрономического факторов замечаемости (Волощук, Кашеев, 1996), домножался на значения апостериорных вероятностей и уже с этим новым весом метеор включался в выборки метеороидов, родительскими телами которых предположительно являются ААА-астероиды, астероиды пояса, КП- и ДП-кометы. После этого можно рассчитать статистические характеристики этих распределений, относительный вклад родительских тел, принадлежащих к различным классам, в метеороидный комплекс и др.

Следует отметить, что обучающие выборки сформированы по результатам наблюдений астероидов и комет, приведенных в соответствующих

каталогах (Марсден, 1986) для комет и “Эфемериды малых планет на 1984 год” (1983) для астероидов). Очевидно, что каждая из выборок искажена соответствующей селективностью наблюдений (см. Заключение), учесть которую сложно. Весовой метод, который применялся для учета факторов селективности наблюдений метеоров, позволяет “исправить” распределения, но не параметры орбиты каждого элемента выборки.

Модель 3. В качестве метода, не требующего обучающих выборок, использовался метод, базирующийся на критерии отношения правдоподобия, подробно описанный Айвазяном и др. (1989). Задача построения классификационного правила решается в предположении, что распределения в классах заданы аналитически соответствующими математическими моделями. Очевидно, что здесь уже можно использовать исправленные или полученные теоретически распределения. В данном случае задача сводится к проверке трех гипотез: H_5 – орбита метеороида принадлежит к кометному типу (класс 5), H_6 – орбита относится к орбитам астероидного типа (класс 6), H_7 – орбита метеороида надежно не отождествляется ни с кометным, ни с астероидным типом (класс 7). Необходимость введения седьмого класса орбит вытекает из следующего: если даже родительскими телами метеороидов являются кометы и астероиды, первоначальные распределения элементов орбит которых согласуются с принятой математической моделью, то в процессе эволюции орбит метеороидов они могли так трансформироваться, что уже не укладываются в эту модель. Плотности вероятности для объектов класса 7 были выбраны равномерными в соответствующих диапазонах.

Задача выбора одного класса из трех решается как две задачи выбора одного класса из двух: для каждого метеороида определяется, принадлежит ли его орбита к классу кометных или нет; параллельно та же операция проводится относительно астероидной модели. Если и в первом, и во втором случаях получен отрицательный ответ, то верна гипотеза H_7 и метеороид относится к классу 7, если оказалось, что верна гипотеза H_5 или H_6 (ситуация, когда верны обе эти гипотезы, в анализированных выборках не встретилась ни разу), то метеороид относится к классам 5 или 6 соответственно. Среди всех возможных критериев с ошибкой первого рода α (в нашем случае принята гипотеза H_7 , когда истинной является гипотеза H_5 или H_6) наиболее мощным (имеющим наименьшую ошибку второго рода β , т.е. отвергнута истинная гипотеза H_7), является критерий отношения правдоподобия, основанный на статистиках

$$\gamma_5(X) = \frac{L(X|H_5)}{L(X|H_7)} = \frac{f_5(X)}{f_7(X)}, \quad (15)$$

или

$$\gamma_6(\mathbf{X}) = \frac{L(\mathbf{X}|H_6)}{L(\mathbf{X}|H_7)} = \frac{f_6(\mathbf{X})}{f_7(\mathbf{X})}, \quad (16)$$

где L – функция правдоподобия, $\mathbf{X}$ – вектор элементов орбиты.

Каждый класс орбит задается плотностями вероятностей элементов орбит $f_k(q), f_k(e), f_k(i), f_k(a)$ ($k = 5$ – кометы, $k = 6$ – астероиды). Если первоначальное распределение орбит k -го класса обозначить $f_k(q, e, i)$ или $f_k(a, e, i)$, тогда вследствие взаимной независимости элементов орбит

$$f_5(q, e, i) = f_5(q)f_5(e)f_5(i), \quad (17)$$

$$f_6(a, e, i) = f_6(a)f_6(e)f_6(i), \quad (18)$$

и поскольку случайные значения элементов q (или a), e , i ограничены конечными интервалами, частные плотности вероятностей удобно задавать бета-распределением:

$$f(x, \zeta, \eta) = \frac{1}{B(\zeta, \eta)} x^{\zeta-1} (1-x)^{\eta-1} \quad (19)$$

при $0 \leq x \leq 1$, $\zeta > 0$, $\eta > 0$,

$f(x, \zeta, \eta) = 0$ в остальных случаях. Здесь $B(\zeta, \eta)$ – бета-функция с параметрами ζ, η , которые для кометной и астероидной моделей рассчитаны Крамером и Шестакой (1983). Отметим, что в кометной модели распределение перигелийных расстояний принято равномерным в диапазоне значений 0–5 а. е., а в астероидной модели равномерно распределены большие полуоси орбит в диапазоне 1.5–3 а. е. На рис. 2 приведены диаграммы, отражающие положение выборок, смоделированных в соответствии с распределениями для кометной и астероидной моделей Крамера и Шестаки (1983), по величинам i , e , q и $Q^{-1/2}$. Сравнение этих диаграмм и диаграмм для групп 1–4 показывает, что астероидная модель заметно отличается от группы ААА-астероидов и в меньшей степени от группы астероидов пояса, а кометная перекрывается по некоторым параметрам с группой 4, и в меньшей степени с группой 3. Поэтому следует ожидать, что значительную часть метеороидов, отнесенных по модели 3 к классу 7, будут составлять те метеороиды, которые, согласно моделям 1 и 2, отнесены к ААА-астероидам и КП-кометам.

Таким образом, по формулам (15) и (16) для каждого метеороида можно получить оценку отношения правдоподобия. Если она превосходит некоторое пороговое значение, принимается решение, что данный метеороид движется по орбите кометного (астероидного) типа и вероятным родительским телом его была комета (астероид). В противном случае эта гипотеза отвергается.

Было проведено обучение алгоритма отдельно при выборе порога для комет (γ_5) и для астероидов (γ_6). Так, для оценки порогового значения γ_5 проводился расчет объемов классов при различных значениях вероятности ошибки первого рода $Pr\{\alpha\}_5$. Значение порога для решающего правила γ_6 при этом оставалось постоянным, соответствующим вероятности ошибки первого рода для классификатора астероидных орбит 0.3, т.е. достаточно низким. В качестве обучающей выборки использовалась выборка КП- и ДП-комет (группы 3 и 4) объемом 261 орбита.

Расчет порогового уровня при заданном значении вероятности ошибки первого рода выполнялся по методике, описанной Левиным (1975).

Аналогичный расчет был проведен и для выбора порога γ_6 . Здесь в качестве обучающей выборки использовалась выборка астероидов пояса (группа 2) объемом 2699 орбит.

Анализ полученных зависимостей показал, что с ростом вероятности ошибки первого рода (понижением порогового значения) объемы классов 5 и 6 возрастают, объемы выборок неклассифицированных объектов уменьшаются, но даже при вероятностях ошибок первого рода 0.3 отличные от нуля значения имеют 923 астероида, из них 919 с большой полуосью орбит больше 3 а. е., 69 комет, все короткопериодические. Объясняется это тем, что, как отмечалось выше, кометная и астероидная модели Крамера и Шестаки (1983) не охватывают орбиты КП-комет и орбиты астероидов с большими полуосями вне интервала (1.5–3) а. е. (известно, что более 30% астероидов пояса движутся по орбитам с большими полуосями больше 3 а. е.). Ни одна из комет не была классифицирована как астероид и ни один астероид не был отнесен к классу комет. Это подтверждает эффективность предложенного метода классификации.

Быстрое улучшение качества классификации имеет место при увеличении $Pr\{\alpha\}$ до значения приблизительно 0.1. С дальнейшим ростом вероятности ошибок первого рода количество верно классифицированных объектов растет относительно медленно, по закону, близкому к линейному. Так, при увеличении вероятности ошибки от 0.1 до 0.3 количество неклассифицированных комет уменьшилось на 20 (8% объема обучающей выборки), а астероидов на 84 (3%). В этой ситуации, очевидно, при классификации комет и астероидов следовало бы вероятность ошибки для астероидов принять около 0.1, а для комет 0.2–0.25. Однако при классификации метеороидов ситуация меняется. Априори известно, что большинство орбит радиометеоров относятся к кометной модели. При этом изменение порога не приводит к существенным изменениям представительности кометной группы. Что касается метеороидов,

предположительно произошедших от астероидов пояса, то вероятность их наблюдения с Земли мала. Это приводит к необходимости понизить пороговое значение при выделении группы метеороидов предположительно астероидного происхождения. Значения $Pr(\alpha)$ для орбит кометного и астероидного типов были выбраны путем компромисса между статистической значимостью результатов классификации и представительностью получаемых групп.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ

В табл. 4 приведены оценки вклада комет и астероидов в метеорный комплекс вблизи орбиты Земли, полученные по трем описанным выше моделям классификации. Для моделей 1 и 2 в колонке N указаны приведенные оценки количества метеоров в различных классах, полученные как произведение средней вероятности в классе (колонка p в таблице) на количество метеоров, включенных в данный класс с вероятностью больше 0. Как и следовало ожидать, по модели 1 ни один из метеоров не был классифицирован как метеор, происхождение которого связано с астероидами пояса. Более 92% потоковых и 88% спорадических метеоров отнесены к классу ААА-астероидов, относительно мало метеоров включено в класс КП-комет (8 и 11% для потоковых и спорадических метеоров соответственно) и только 0.02% потоковых и 1.3% спорадических – в класс ДП-комет. Учет факторов замечаемости и переход к плотности потока метеороидов с массой больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е. вокруг Солнца, существенно перераспределил вклад каждого класса. Уменьшился вклад метеороидов, родительскими телами которых пред-

положительно являются ААА-астероиды (до 80% среди потоковых и до 57% среди спорадических). В 2.5 раза возрос вклад потоковых и в 1.8 раза спорадических метеороидов, отнесенных к классу КП-комет. Наиболее существенно изменился вклад ДП-комет – более 23% спорадических метеороидов отнесены к этому классу. Среди спорадических метеороидов около половины имеют кометное происхождение, а среди потоковых только пятая часть, причем вклад КП-комет и в том, и в другом случаях одинаков.

Результаты дискриминантного анализа при использовании квазистационарных параметров орбит (модель 2) отличаются от полученных при использовании элементов орбит непосредственно. Прежде всего класс астероидов пояса уже не является пустым, т.е. какое-то, пусть незначительное, число метеоров, зарегистрированных с Земли, сохранили память о своем происхождении от астероидов пояса. Вклад их в численность потоковых радиометеоров составляет 1.2%, в численность спорадических – в 3 раза больше. Оценки вклада в плотность потока метеороидов 3 и 4% соответственно.

Вклад ААА-астероидов и в численность потоковых радиометеоров и в плотность потока их метеороидов близок к полученному по модели 1. Однако для плотности потока спорадических метеороидов этот вклад уменьшился почти вдвое. То же самое можно сказать и относительно КП-комет: у потоковых метеоров и метеороидов оценки вклада практически не изменились, но у спорадических метеороидов вклад КП-комет уменьшился в 2.8 раза. Обратная картина наблюдается для метеоров, произошедших от распада ДП-комет. Здесь вклад в комплекс потоковых метеороидов достигает 6%, а в комплекс

Таблица 4. Оценки вклада комет и астероидов в метеорный комплекс вблизи орбиты Земли

Модель	Класс	Потоковые метеоры (метеороиды)				Спорадические метеоры (метеороиды)			
		p	N	$\frac{N}{N_{\Sigma}} \cdot \%$	$\frac{W}{W_{\Sigma}} \cdot \%$	p	N	$\frac{N}{N_{\Sigma}} \cdot \%$	$\frac{W}{W_{\Sigma}} \cdot \%$
1	1	0.924	46037	92.38	79.61	0.878	28768	87.75	57.11
	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0.076	3789	7.60	19.25	0.111	3583	10.93	19.39
	4	0.001	6	0.02	1.14	0.046	433	1.32	23.50
2	1	0.921	44664	89.6	72.3	0.900	26402	80.5	32.4
	2	0.061	604	1.2	2.9	0.163	1117	3.4	4.1
	3	0.422	4326	8.7	18.8	0.418	2687	8.2	7.0
	4	0.234	238	0.5	6.0	0.631	2578	7.9	56.5
3	5	1.0	15886	31.9	38.6	1.0	8663	26.4	47.2
	6	1.0	32	0.1	0.1	1.0	49	0.2	0.1
	7	1.0	33914	68.0	61.3	1.0	24072	73.4	52.7

Таблица 5. Оценки средних значений параметров орбит в классах, полученных из выборок потоковых (П) и спорадических (С) метеоров

Модель	Класс	Выборка	$i, ^\circ$	e	$q, \text{ а. е.}$	$a, \text{ а. е.}$	T_j	v	μ	C
1	1	П	57.3	0.59	0.48	1.30	0.96	0.13	0.32	1.74
		С	89.9	0.58	0.52	1.37	0.92	0.07	0.00	1.62
	3	П	24.1	0.76	0.57	2.45	0.56	0.18	0.78	1.29
		С	63.3	0.76	0.67	2.95	0.43	0.07	0.36	1.52
	4	П	116.8	0.86	0.62	4.41	0.20	0.16	-0.22	1.31
		С	134.6	0.83	0.67	3.96	0.15	0.08	-0.66	1.44
2	1	П	57.5	0.59	0.47	1.27	0.97	0.13	0.31	1.75
		С	88.4	0.57	0.51	1.25	0.96	0.07	0.02	1.63
	2	П	27.9	0.71	0.63	2.25	0.60	0.14	0.81	1.48
		С	53.3	0.71	0.66	2.49	0.53	0.01	0.55	1.55
	3	П	24.7	0.77	0.55	2.42	0.57	0.19	0.76	1.25
		С	53.8	0.76	0.63	2.78	0.48	0.07	0.52	1.44
	4	П	54.9	0.83	0.55	3.55	0.36	0.20	0.36	1.22
		С	112.7	0.76	0.68	3.11	0.30	0.06	-0.35	1.54
	5	П	25.2	0.86	0.22	1.60	0.87	0.26	0.52	0.48
		С	75.9	0.86	0.28	2.01	0.83	0.16	0.16	0.60
3	6	П	3.3	0.53	0.76	1.62	0.80	0.11	1.07	1.94
		С	10.6	0.47	0.87	1.65	0.80	0.08	1.10	2.38
	7	П	71.7	0.47	0.59	1.21	0.99	0.08	0.23	2.32
		С	93.4	0.50	0.61	1.31	0.92	0.04	-0.04	1.98

спорадических – 57%. Если объединить классы 1, 2 и 3, 4, получаем, что среди потоковых метеороидов 75% имеют астероидное происхождение (72% – ААА-астероиды), среди спорадических 37% произошли от распада астероидов (32% – ААА-астероиды).

Классификация по модели 3, как и следовало ожидать, отнесла в группу неклассифицированных объектов 61% потоковых и 63% спорадических метеороидов. Вклад потоковых и спорадических метеороидов астероидного происхождения (напомним, что в модели 3 астероидная модель охватывает только астероиды пояса в ограниченном диапазоне значений больших полуосей орбит) приблизительно одинаков, тогда как потоковые метеороиды кометного происхождения составляют 39%, а спорадические – 47%. Этот результат не противоречит оценкам, полученным по модели 2.

В табл. 5 и 6 приведены оценки средних значений некоторых параметров выборок потоко-

Таблица 6. Оценки средних исправленных за избирательность значений параметров орбит в классах, полученных из выборок потоковых (П) и спорадических (С) метеоров

Модель	Класс	Выборка	$i, ^\circ$	e	$q, \text{ а. е.}$	$a, \text{ а. е.}$	T_j	v	μ	C
1	1	П	67.3	0.66	0.45	1.45	0.81	0.13	0.19	1.26
		С	121.4	0.68	0.56	1.90	0.53	0.05	-0.46	1.40
	3	П	27.5	0.84	0.51	3.32	0.44	0.19	0.74	1.12
		С	79.6	0.82	0.63	3.64	0.30	0.00	0.09	1.36
	4	П	165.2	0.88	0.51	4.14	0.09	0.26	-0.95	1.05
		С	144.8	0.85	0.63	4.36	0.09	0.10	-0.83	1.34
2	1	П	66.5	0.65	0.45	1.36	0.84	0.13	0.20	1.28
		С	110.8	0.63	0.51	1.44	0.71	0.05	-0.29	1.37
	2	П	50.2	0.76	0.62	2.66	0.50	-0.07	0.64	1.39
		С	70.7	0.80	0.54	2.86	0.42	-0.20	0.31	1.17
	3	П	24.2	0.83	0.50	3.06	0.47	0.21	0.77	1.10
		С	35.2	0.83	0.59	3.46	0.43	0.13	0.77	1.28
	4	П	111.1	0.85	0.44	3.41	0.26	0.20	-0.37	0.97
		С	137.3	0.80	0.64	3.52	0.19	0.06	-0.73	1.41
	5	П	42.6	0.88	0.27	2.28	0.63	0.22	0.41	0.58
		С	116.2	0.86	0.47	3.48	0.29	0.06	-0.37	0.99
3	6	П	6.0	0.52	0.78	1.62	0.80	0.10	1.08	2.00
		С	10.9	0.46	0.89	1.67	0.79	0.08	1.12	2.43
	7	П	74.6	0.56	0.61	1.50	0.80	0.08	0.19	1.72
		С	122.0	0.62	0.72	2.10	0.48	0.05	-0.51	1.79

вых (П) и спорадических (С) метеоров и метеороидов (после учета факторов замечаемости). Можно отметить, что для класса ААА-астероидов и КП-комет модели 1 и 2 приводят к практически одинаковым результатам (для выборки спорадических метеоров различия несколько больше, чем для потоковых, что и следовало ожидать). Существенно различаются оценки средних в классах ДП-комет, полученных по моделям 1 и 2, причем здесь различия средних по выборке потоковых метеоров часто превосходят различия средних соответствующих параметров спорадических метеоров. Объясняется это тем, что, как следует из диаграмм, приведенных на рис. 2, и оценок из табл. 2 и табл. 5 и 6, средние значения элементов орбит по обучающей выборке и по выборкам метеоров, наблюдаемых с Земли, в этом случае существенно различаются. Переход же к квазипостоянным параметрам в модели 2 резко уменьшает это различие, что приводит к изменению оценок вклада продуктов распада ДП-комет в метеорный комплекс (табл. 4) и оце-

нок средних. Аналогичные выводы можно сделать и из анализа оценок, приведенных в табл. 6. Что касается оценок, полученных по модели 3, то здесь класс 6 орбит астероидного типа, как уже отмечалось выше, не перекрывается ни астероидами пояса, ни ААА-астероидами. Поэтому оценки средних значений элементов орбит отличаются и от средних класса 2, и от средних класса 1. Напомним, что в модели 3 в качестве эталонных использованы "истинные" распределения. Из диаграмм рис. 2 следует, что и орбиты кометного типа в модели 3 по одним параметрам близки к ха-

рактеристикам выборки КП-комет, по другим – к характеристикам ДП-комет и т.д.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ОРБИТ МЕТЕОРОИДОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены распределения по a , e , i , потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов массой больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е. вокруг Солнца, классифицированных методом дискриминантного анализа, выполненного по модели 2, как продукты дезинтеграции

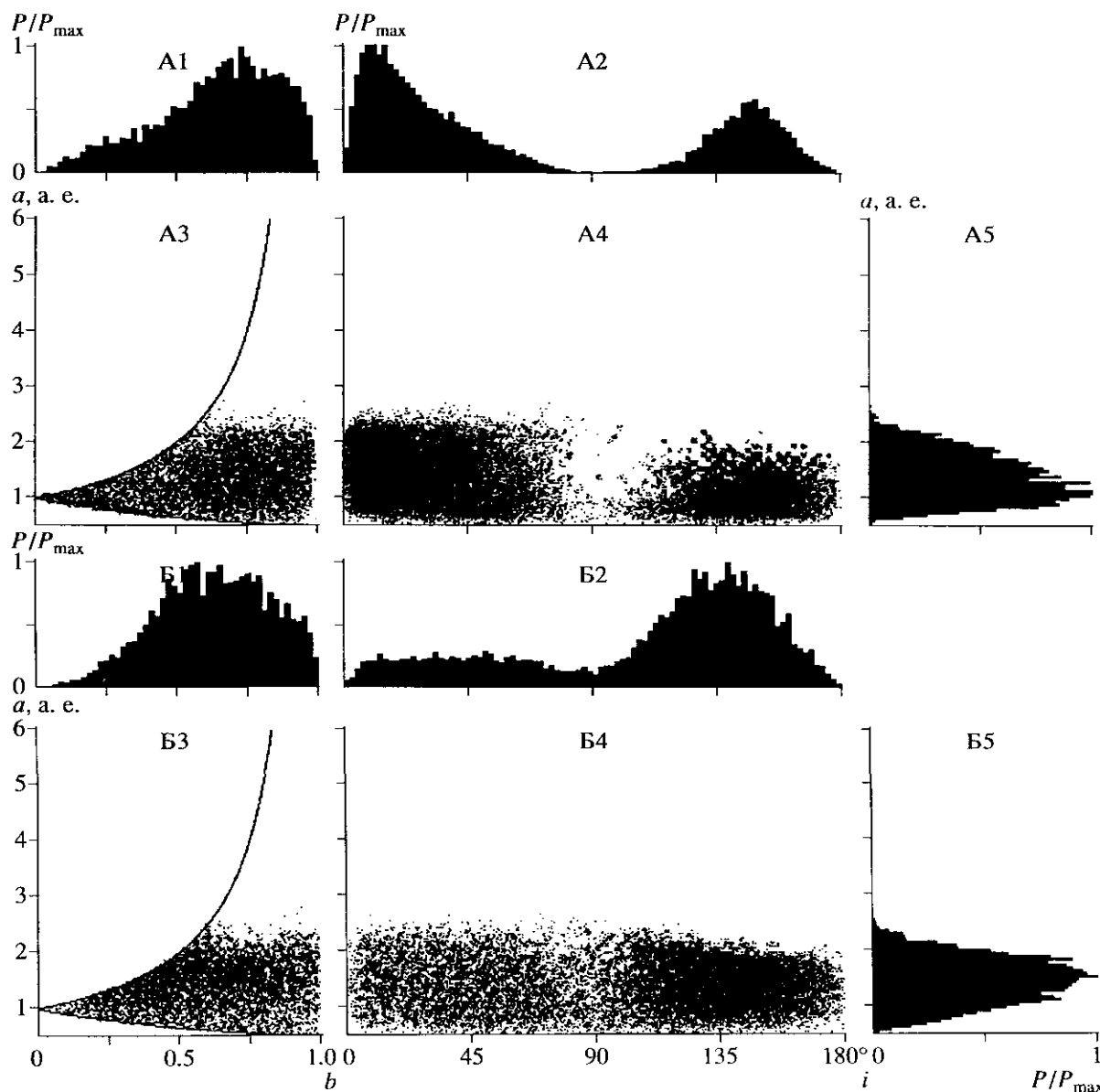


Рис. 3. Трехмерные распределения орбит по большой полуоси (a), эксцентриситету (e) и наклону (i) потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются ААА-астероиды (модель 2). Одномерные распределения: 1 – по e , 2 – по i , 5 – по a , двумерные распределения: 3 – по a , e , 4 – по a , i . Кривые $a = (1 - e)^{-1}$ и $a = (1 + e)^{-1}$ определяют граничные условия пересечения орбиты метеороида с орбитой Земли.

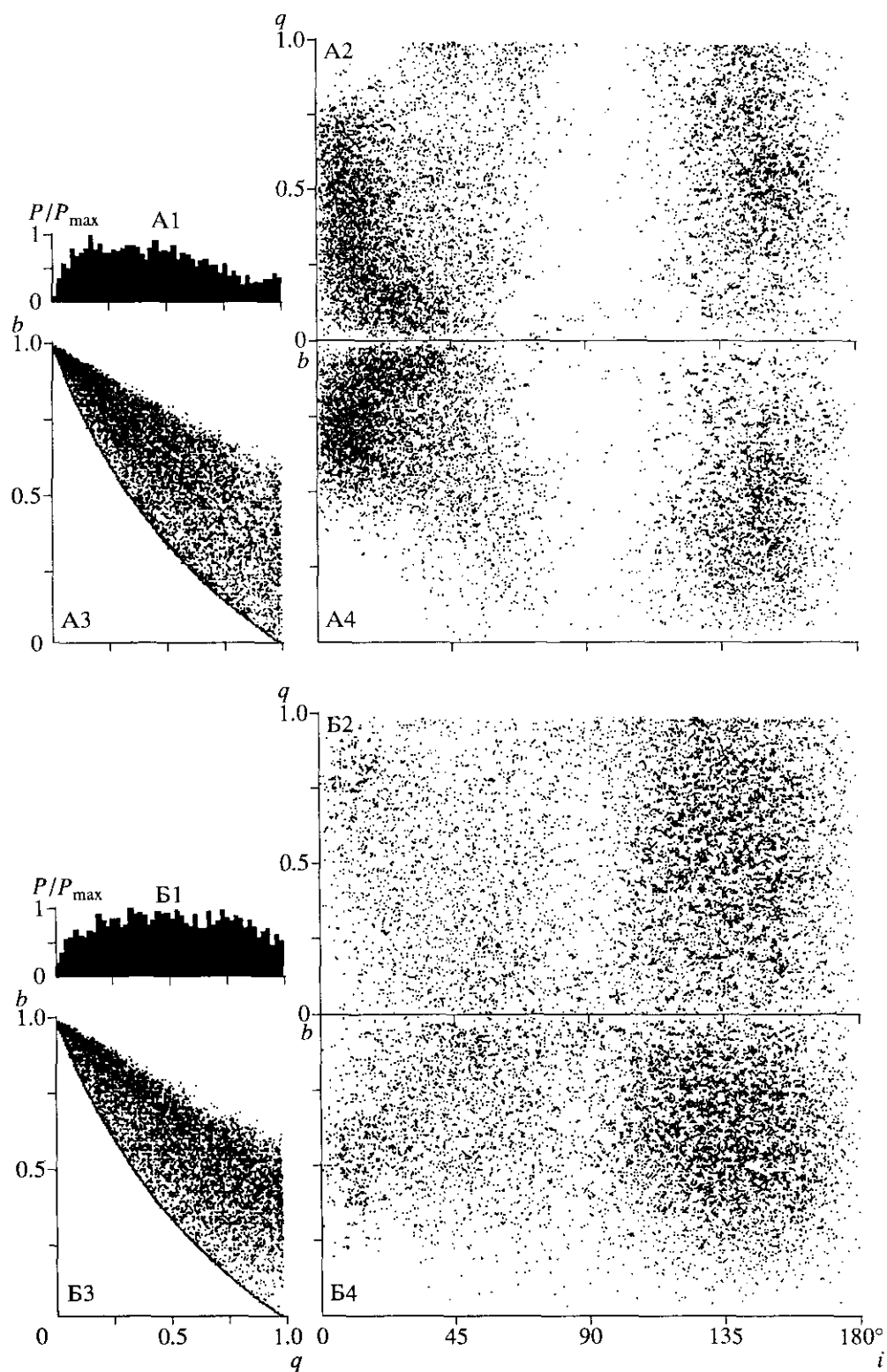


Рис. 4. Трехмерные распределения орбит по перигелийному расстоянию (q), эксцентриситету (e) и наклонению (i) потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются ААА-астероиды (модель 2). 1 – одномерное распределение по q ; двумерные распределения: 2 – по q, i , 3 – по q, e , 4 – по e, i . Кривая $e = (1 - q)/(1 + q)$ определяет условие пересечения орбиты метеороида с орбитой Земли.

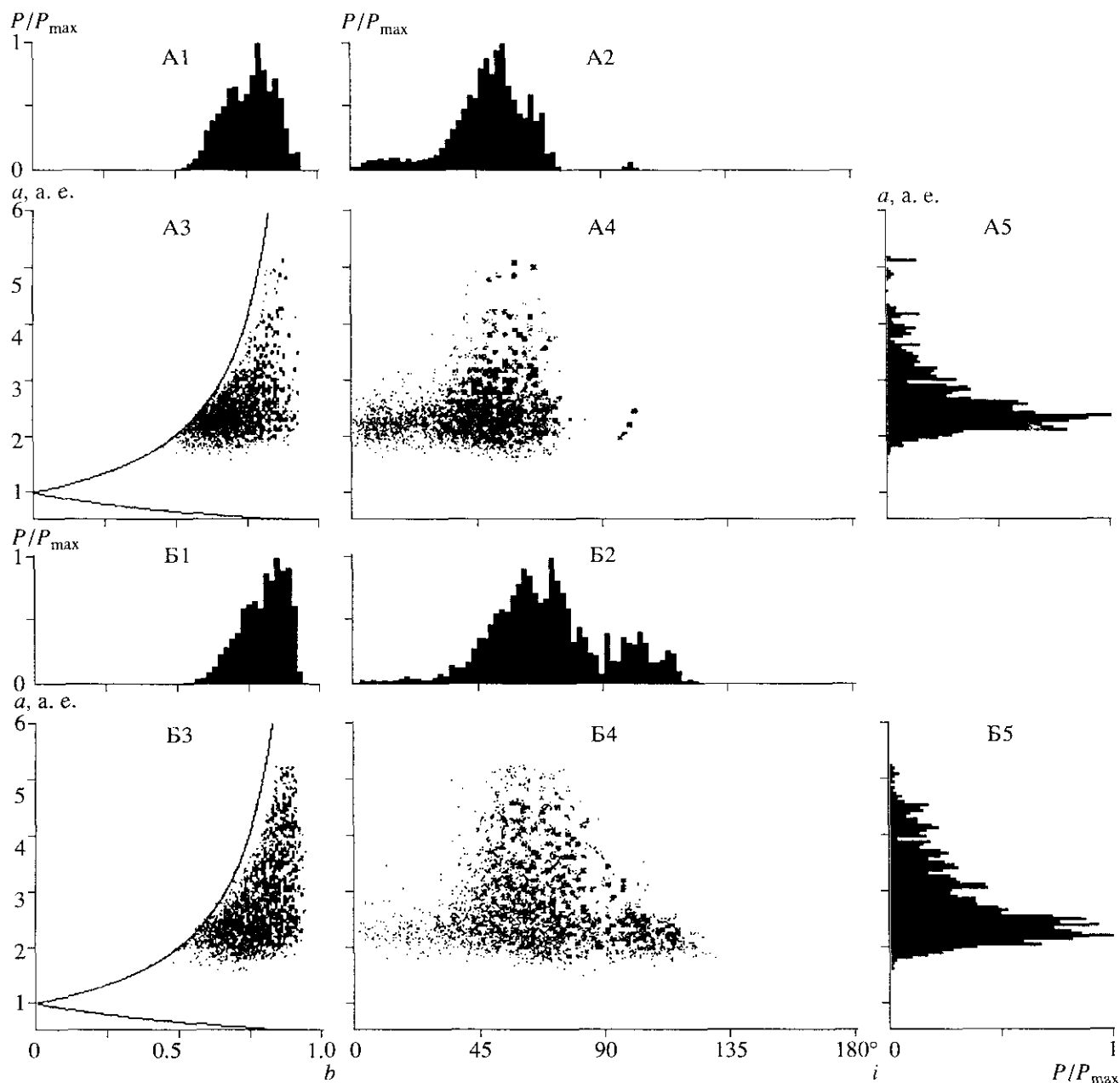


Рис. 5. Трехмерные распределения орбит по a , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются астероиды пояса (модель 2). Обозначения, как на рис. 3.

ААА-астероидов (класс 1), а на рис. 4 – по распределению q , e , i . Точечные диаграммы были получены по исправленным весовым методом одномерным распределениям методом имитационного моделирования (Волощук, Кашеев, 1996). Отметим, что аналогичные распределения, полученные по модели 1, практически не отличаются от приведенных, что согласуется с оценками табл. 6 и выводами, сделанными выше при их анализе.

На рис. 5 и 6 приведены такие же распределения для класса 2 (метеороиды, вероятными родительскими телами которых являются астероиды

пояса), на рис. 7 и 8 – для класса 3 (метеороиды, произошедшие от распада ядер КП-комет), а на рис. 9 и 10 – для класса 4 (метеороиды, связанные происхождением с ДП-кометами). На рис. 11 приведены распределения по a , e , i , а на рис. 12 – по q , e , i для класса 6 (метеороиды астероидного происхождения), полученные по модели 3.

Анализ распределений потоковых и спорадических метеороидов, родительскими телами которых являются ААА-астероиды (рис. 3 и 4), позволяет сделать следующие выводы.

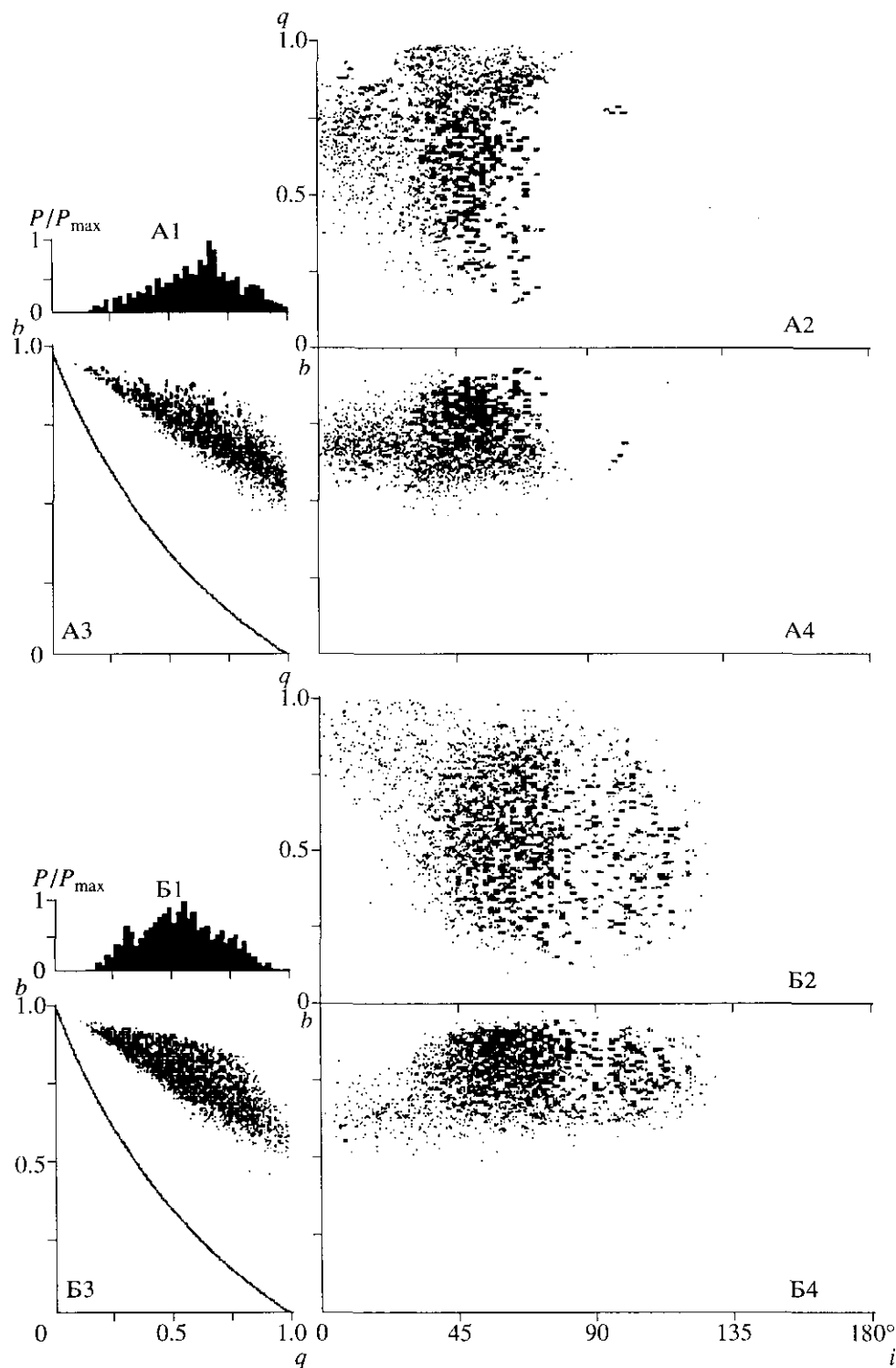


Рис. 6. Трехмерные распределения орбит по q , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются астероиды пояса (модель 2). Обозначения, как на рис. 4.

1. Одномерные распределения потоковых и спорадических метеороидов с массой больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а. е. вокруг Солнца (рис. 3, А1 и Б1, А2 и Б2, А5 и Б5, рис. 4, А1 и Б1), значительно отличаются друг от друга.

2. Наиболее существенные различия проявляются в распределениях по наклонениям орбит: орбиты обоих типов метеороидов сконцентрированы вблизи плоскости эклиптики, однако, если 2/3 потоковых метеороидов имеют прямое дви-

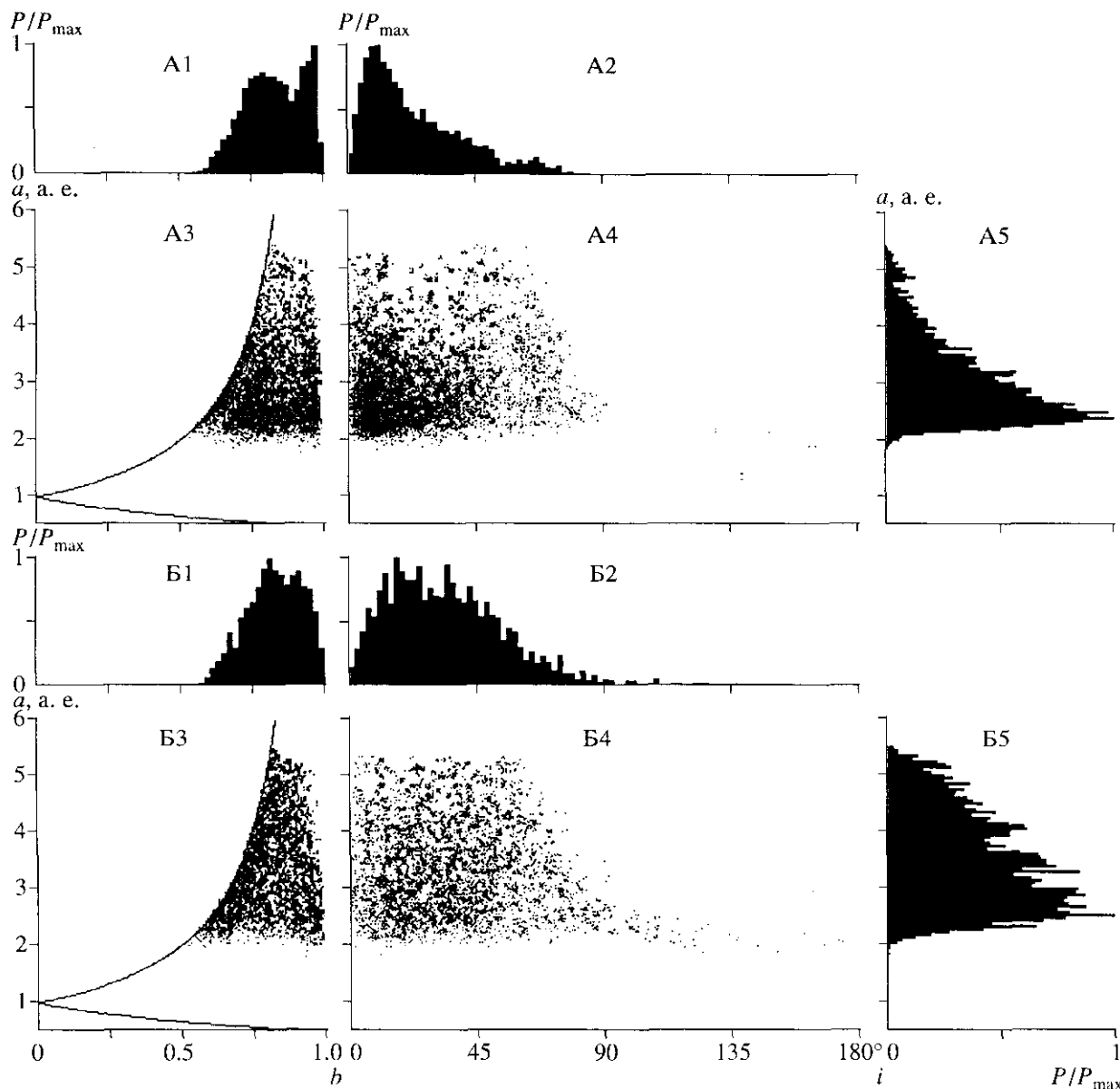


Рис. 7. Трехмерные распределения орбит по a , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются КП-кометы (модель 2). Обозначения, как на рис. 3.

жение, то 3/4 спорадических обратное. Таким образом, процедура дискриминантного анализа отнесла значительную часть метеороидов с обратным движением к группе тех, родительскими телами которых предположительно являются ААА-астероиды, хотя в соответствующей обучающей выборке такие орбиты отсутствуют. Это указывает только на то, что по размерам и форме эти орбиты ближе всего именно к группе 1. Если отбросить орбиты с обратным движением, вклад ААА-астероидов в комплекс метеорных тел уменьшится до 43% (вместо 72%, табл. 4) у потоковых и до 8% (вместо 32%) у спорадических. Возникает вопрос, к какому классу относятся метеороиды,

орбиты которых по размерам и форме соответствуют группе ААА-астероидов, но $i > 90^\circ$?

Единственная из обучающих выборок, где присутствуют объекты с обратным движением, – это выборка ДП-комет, следовательно, родительскими телами метеороидов с обратным движением, включенных в класс 1, могут быть ДП-кометы.

Гипотеза 1. Проникнуть в соответствующую область (a , e)-распределения (рис. 3, А3 и Б3) мелкие метеороиды могут под влиянием негравитационных сил по траекториям, определяемым инвариантом (5). Если это так, то и в распределениях рис. 5–8 должно присутствовать какое-то

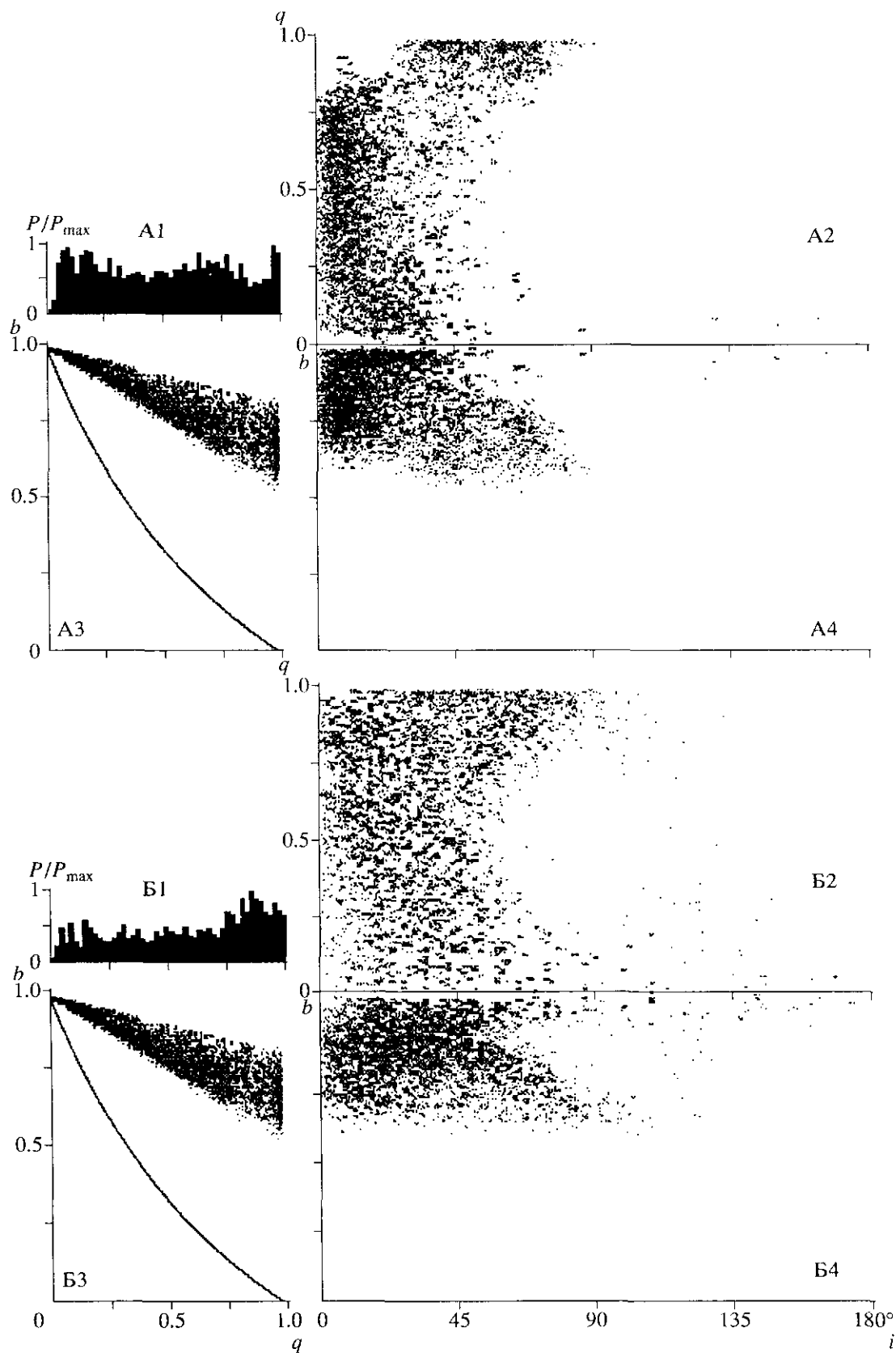


Рис. 8. Трехмерные распределения орбит по q , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются КП-кометы (модель 2). Обозначения, как на рис. 4.

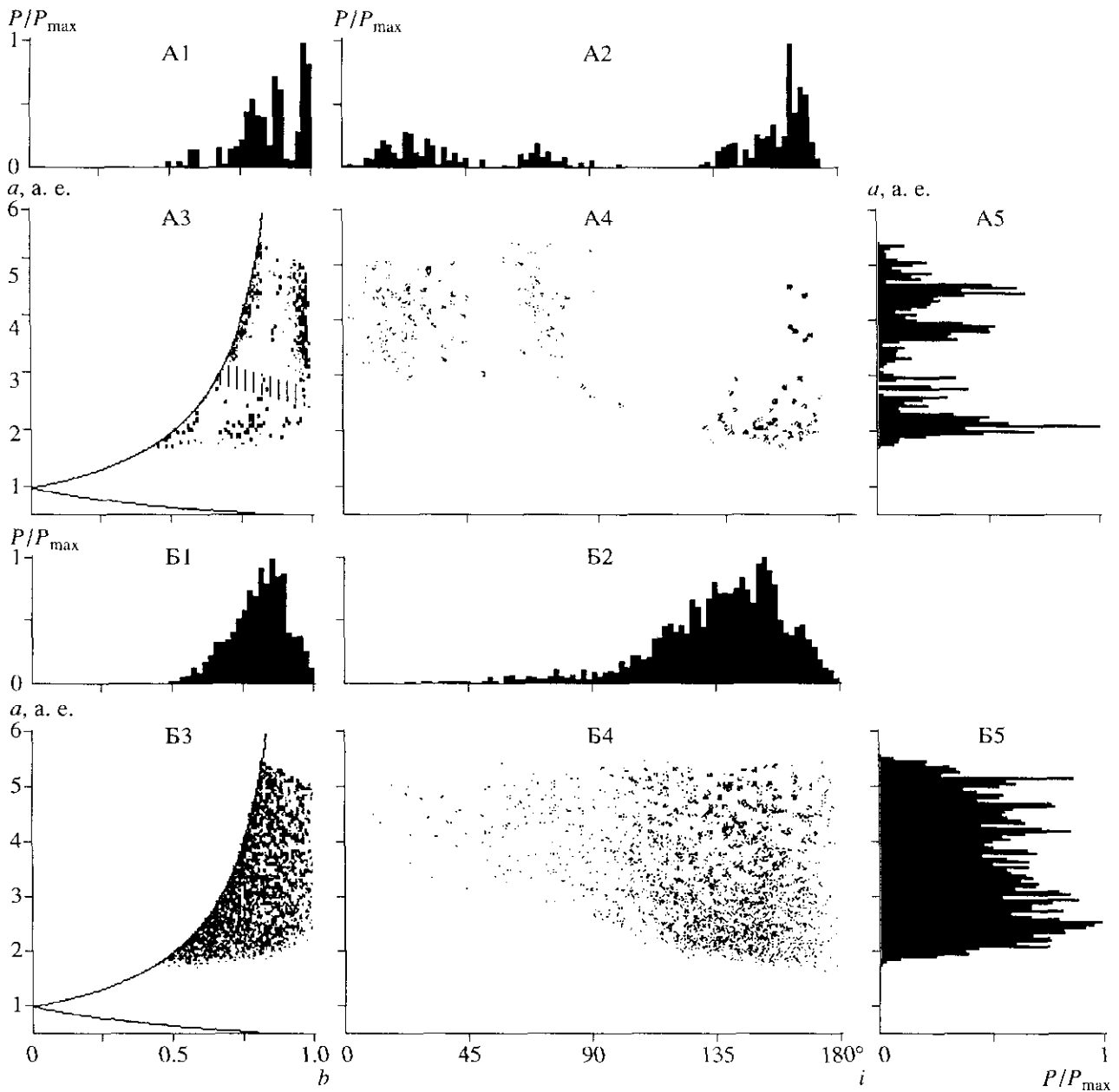


Рис. 9. Трехмерные распределения орбит по a , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются ДП-кометы (модель 2). Обозначения, как на рис. 3. Вертикальной штриховкой на графике А3 отмечена зона влияния Юпитера.

количество метеороидов, родительскими телами которых являются ДП-кометы.

С этим объяснением можно согласиться, если речь идет о спорадических метеороидах. Присутствие значительного количества потоковых метеороидов на орбитах с обратным движением в анализируемой выборке заставляет искать другое объяснение этому факту. Проще всего принять, что существует источник метеороидов в рассматриваемой области пространства элементов орбит, например, пока не обнаруженная попу-

ляция объектов, орбиты которых по форме и размерам подобны орбитам ААА-астероидов, но имеют обратное движение.

Гипотеза 2. Здесь следует вспомнить, что количество обнаруженных к настоящему времени астероидов, орбиты которых приближаются или пересекают орбиту Земли, составляет десятые или даже тысячные доли процента от их общего числа (см., например, Лупишко, Бельская, 1993). В Заключение приведены примеры популяций ненаблюдаемых малых тел Солнечной системы,

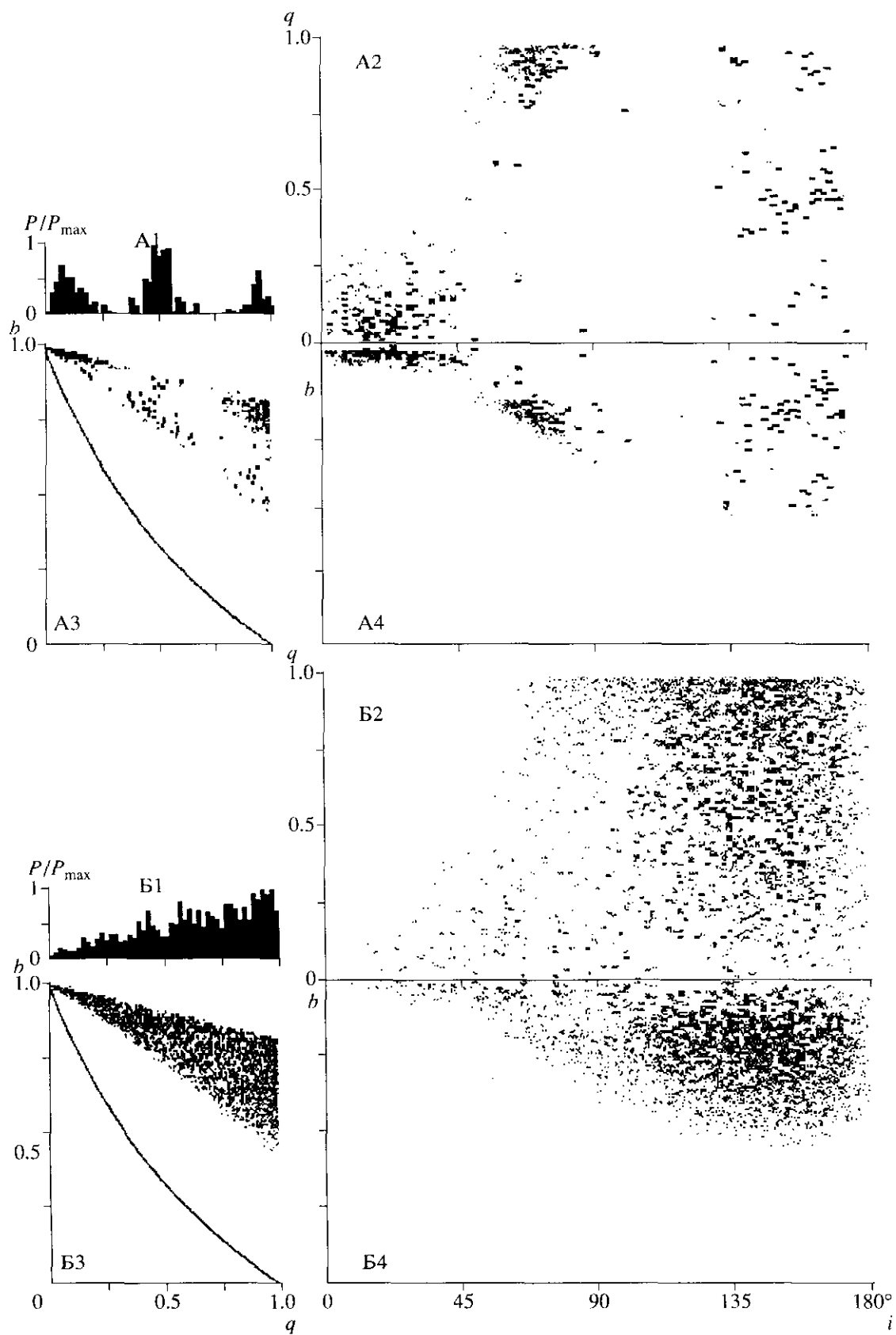


Рис. 10. Трёхмерные распределения орбит по q , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов, родительскими телами которых являются ДП-кометы (модели 2). Обозначения, как на рис. 4.

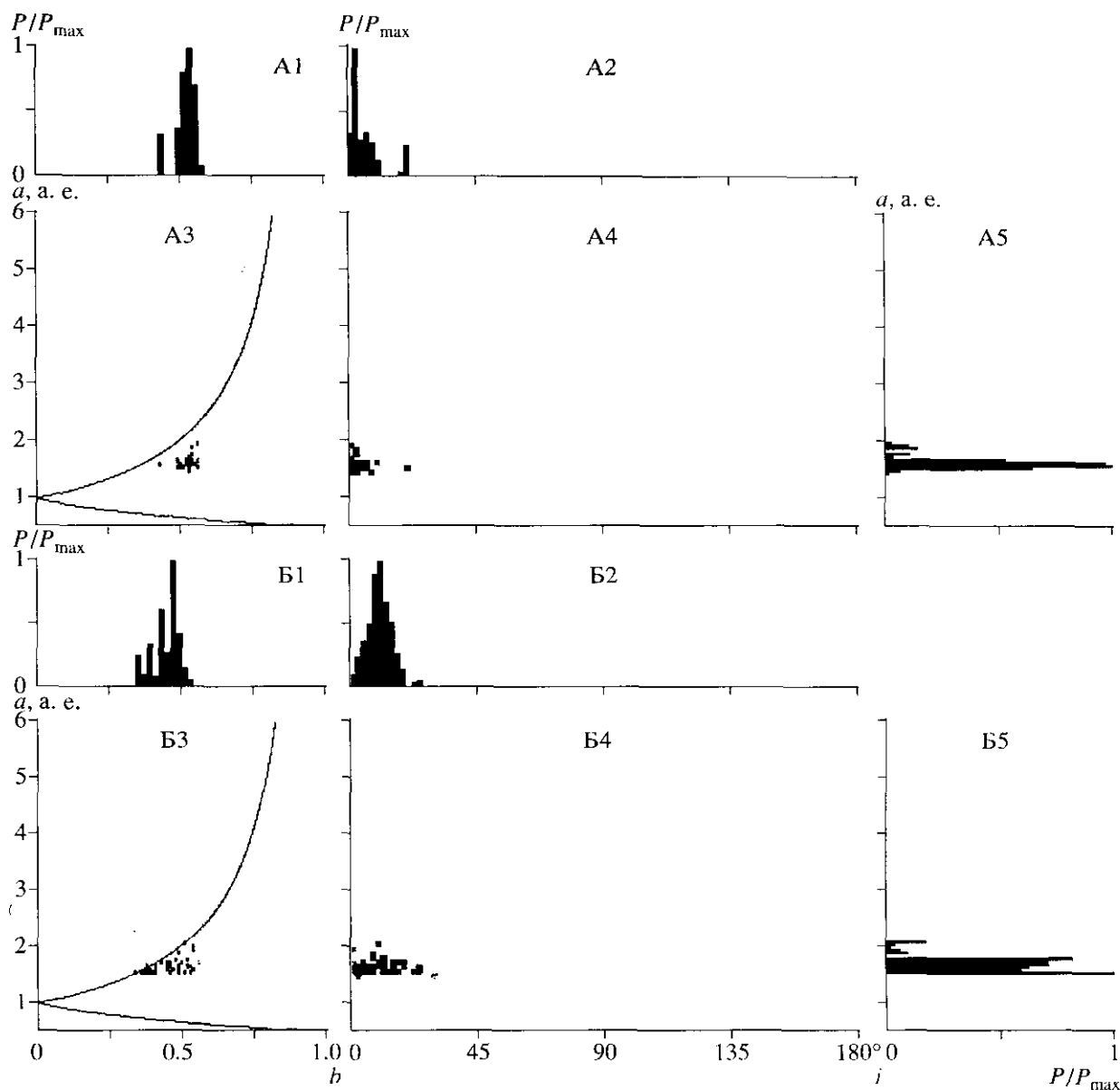


Рис. 11. Трехмерные распределения орбит по a , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов астероидного происхождения (модель 3). Обозначения, как на рис. 3.

которые, возможно, являются родительскими телами метеороидов на орбитах, по размерам и форме близких к орбитам ААА-астероидов, но с наклонениями больше 90° .

Если эта гипотеза верна, то распределение всей популяции таких объектов по наклонению их орбит должно быть близким к распределению, приведенному на рис. 3, А2.

3. Распределение орбит спорадических метеороидов по перигелийному расстоянию близко к равномерному, причем во всем диапазоне значений наклонений орбит. Эта закономерность сохраняется и у орбит потоковых метеороидов с обратным движением. Для $i < 30^\circ$ практически от-

сутствуют потоковые метеороиды на орбитах с $q > 0.8$ а. е., и вид распределения в диапазоне значений наклонений орбит 45° – 60° приближается к распределению ААА-астероидов.

4. Анализ двумерных распределений (q, i) и (e, i) позволяет сделать вывод о том, что для спорадических метеороидов распределения близки к равномерным, тогда как для потоковых метеороидов это утверждение справедливо только для орбит с обратным движением. Для орбит с прямым движением основная масса метеороидов в пространстве элементов орбит сосредоточена в объеме $i(0-45^\circ) \times e(0.5-1.0) \times q(0-0.75)$.

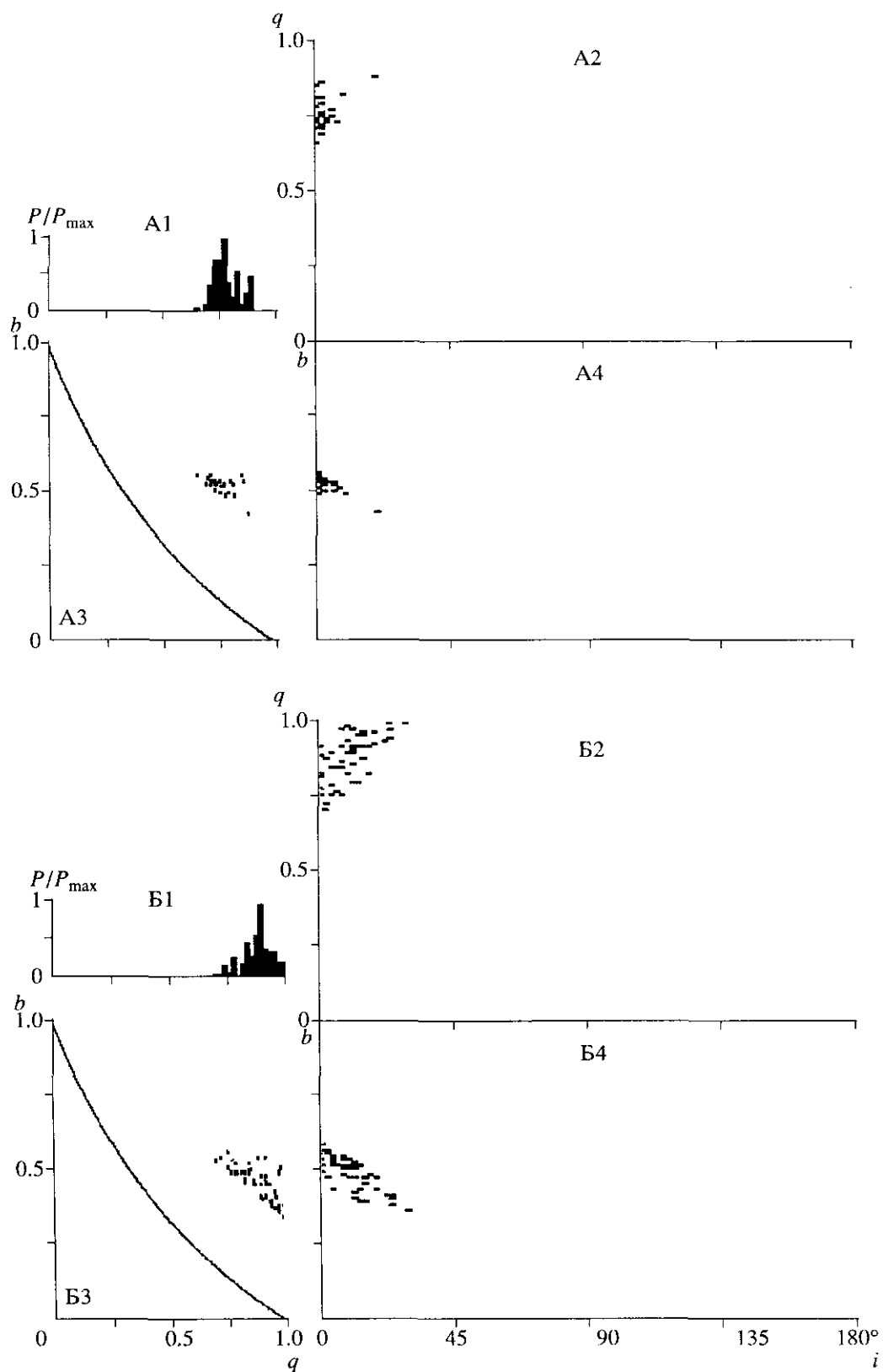


Рис. 12. Трехмерные распределения орбит по q , e , i потоковых (А) и спорадических (Б) метеороидов астероидного происхождения (модель 3). Обозначения, как на рис. 4.

Анализ распределений потоковых и спорадических метеороидов, родительскими телами которых являются астероиды пояса (рис. 5 и 6), позволяет сделать следующие выводы.

1. В отличие от класса ААА-астероидов, астероиды пояса, согласно модели 2, являются родительскими телами потоковых и спорадических метеороидов, одномерные распределения орбит которых по a , e и q различаются в меньшей степени. Так, форма распределений по большой полуоси орбит у потоковых и спорадических метеороидов (рис. 5, А5 и Б5) различается в основном коэффициентом эксцесса — большая часть орбит потоковых метеороидов сосредоточена в узком диапазоне $a = (2-3)$ а. е. с резким обрывом при $a \approx 3$ а. е. У спорадических метеороидов такой четкой границы нет. Отметим, что эта граница соответствует области влияния Юпитера (Волощук и др., 1989).

2. Наиболее существенно различаются распределения орбит по наклонению. У потоковых метеороидов имеется четко выраженная граница $i \approx 60^\circ$, выше которой они практически отсутствуют. У спорадических метеороидов верхняя граница смещена до значения $i \approx 120^\circ$. Если, как при анализе класса ААА-астероидов, отбросить метеороиды с $i > 90^\circ$, то получим, что вклад астероидов пояса в комплекс потоковых метеороидов практически не меняется, для спорадических он уменьшается с 4 до 3%.

Тот факт, что у потоковых метеороидов анализируемого класса и, как следует из распределений рис. 7, 8, для класса метеороидов, родительскими телами которых являются КП-кометы, отсутствуют орбиты с $i > 60^\circ$, может служить косвенным подтверждением справедливости гипотезы 2.

3. Сравнивая распределения метеороидов, родительскими телами которых, согласно модели 2, являются астероиды пояса (рис. 5 и 6) с распределениями метеороидов астероидного происхождения по модели 3 (рис. 11 и 12), можно отметить, что последние по своим параметрам ближе к собственно астероидам пояса. Здесь полностью отсутствуют метеороиды на орбитах с наклонением больше 30° , эксцентриситеты орбит лежат в узком диапазоне вблизи $e \approx 0.5$, а перигелийные расстояния q — около значений 0.8 (потоковые) и 0.9 (спорадические), т.е. классификация по модели 3 к метеороидам астероидного происхождения отнесла те, которые в пространстве элементов орбит расположены как продолжение дисперсной составляющей пояса.

Анализ распределений потоковых и спорадических метеороидов, родительскими телами которых являются КП-кометы (рис. 7 и 8).

1. В отличие от предыдущих классов здесь все потоковые и подавляющее количество споради-

ческих метеороидов имеют прямое движение, но средние значения i отличаются больше, чем на 10° . Спорадические метеороиды с обратным движением, как следует из анализа соответствующих двумерных распределений, движутся по орбитам с большими полуосями $a \approx 2$ а. е., эксцентриситетами $e \approx 1$ и очень малыми перигелийными расстояниями, т.е. на двумерном распределении (q , e) занимают левый верхний угол (рис. 8, Б3).

2. Большие полуоси потоковых метеороидов занимают область (2–5.5) а. е. Обрыв при $a \approx 5.5$ а. е. в аналогичном распределении спорадических метеороидов объясняется тем, что, как отмечено выше, в анализ включены только метеоры с афелийными расстояниями $Q \leq 10$ а. е.

3. В двумерных распределениях (a , e), (q , e) и одномерном распределении по перигелийному расстоянию потоковых метеороидов четко проявляется люк при значениях $q \approx (0.8-0.9)$ а. е. (см. Волощук, Кашеев, 1996).

Анализ распределений потоковых и спорадических метеороидов, родительскими телами которых являются ДП-кометы (рис. 9 и 10).

1. Для этого класса распределения потоковых и спорадических метеороидов резко отличаются друг от друга.

2. Средние значения эксцентриситетов и больших полуосей орбит различаются незначительно, однако у потоковых метеороидов распределения явно структурированы. Так, в распределении больших полуосей потоковых метеороидов четко выделяются три максимума: $a \approx 4.5$ а. е., соизмеримость 5/4 с движением Юпитера и 3/1 Сатурна (Демин и Журавлев, 1979); $a \approx 3.9$ а. е., соизмеримость 3/2 с движением Юпитера, группа Гильды в поясе астероидов; $a \approx 2.2$ а. е., соизмеримость 11/3 с движением Юпитера, максимум в распределении астероидов пояса.

Положение явных минимумов в распределении потоковых метеороидов рис. 9, А5: $a \approx 4.2$ а. е., соизмеримость 11/8 или 7/5 с движением Юпитера, полное отсутствие известных астероидов в поясе; $a \approx (3.2-3.3)$ а. е., соизмеримость 2/1 с движением Юпитера, люк Гекубы в поясе астероидов; $a \approx (2.4-2.5)$ а. е., соизмеримость 3/1 с движением Юпитера, люк Гестии в поясе астероидов.

Статистический тест, предложенный для таких задач Волощуком и др. (1989), показал, что вероятность случайного совпадения положений максимумов и минимумов распределения рис. 9, А5, пересчитанного к среднесуточному движению, с соответствующими соизмеримостями с движением Юпитера не превышает 0.2. Вероятность становится еще меньше, если анализировать не абсолютные значения среднесуточного движения в максимумах и минимумах, а расстояния между ними.

Такая же картина наблюдается и в распределениях орбит потоковых метеороидов по e (рис. 9, A1) и q (рис. 10, A1). Особенно отчетливо выделяются 3 моды распределения по величине перигелийного расстояния. Примечательно то, что положение люков ($q \approx 0.3\text{--}0.4$ а. е. и $q \approx 0.7\text{--}0.8$ а. е.) совпадает со значениями больших полуосей Меркурия (0.387 а. е.) и Венеры (0.723 а. е.).

Сами по себе эти результаты, если рассматривать одномерные распределения, не являются новыми (см., например, Линдблад, 1973; Волощук и др., 1989), однако, анализируя многомерные распределения, приходим к неожиданным выводам, суть которых в том, что эти особенности наиболее четко проявляются для орбит с обратным движением (кластер А, см. ниже). Так, если сравнить распределение рис. 9, A5 в диапазоне значений $a < 3.2$ а. е. с распределением астероидов пояса, приведенным, например, Бронштэном (1990), то выяснится, что они практически идентичны несмотря на то, что все метеороиды в отличие от астероидов движутся по орбитам с наклоном больше 90° . Отметим, что результаты анализа распределений потоковых метеороидов кометного происхождения, полученных по модели 3, приводят к аналогичным выводам.

3. Многомерные распределения потоковых метеороидов позволяют выделить три четких кластера в пространстве элементов орбит:

А. $q = 0\text{--}1$ а. е., $e > 0.5$, $i > 130^\circ$, $a \approx 2\text{--}5$ а. е.,

Б. $q < 0.3$ а. е., $e > 0.9$, $i < 60^\circ$, $a \approx 3\text{--}5$ а. е.,

В. $q > 0.8$ а. е., $e \approx 0.7\text{--}0.8$, $i \approx 50^\circ\text{--}90^\circ$,
 $a \approx 3.3\text{--}5.5$ а. е.

В распределениях спорадических метеороидов нет четко выраженных кластеров. Большинство из них расположены в области А элементов орбит.

Интерпретация выявленных закономерностей — это предмет отдельного исследования. Здесь только отметим, что селективность радиолокационного метода наблюдений, в том числе и аппаратурная, не могла так резко повлиять на распределения, причем только метеороидов, сгруппированных в компактные кластеры. Отметим, что дискриминантный анализ по модели 1, при проведении которого использовались элементы орбит (но не квазипостоянные параметры), также привел к аналогичному результату, но не столь явно выраженному.

4. В отличие от результатов Кресака (1969b), полученных при анализе распределений фотографических метеоров с наклонами меньше 30° и перигелийными расстояниями больше 0.9 а. е., в распределениях рис. 9, A1 и A3 отчетливо проявляется дефицит метеороидов, афелии орбит которых попадают в область возможного тесного сближения с Юпитером.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источниками метеороидов, которые могут быть обнаружены наземными средствами наблюдений, являются объекты Солнечной системы, орбиты которых в пространстве элементов орбит расположены вблизи орбиты Земли (в англоязычной научной литературе для них используется сокращенное наименование NEOs — Near-Earth Objects). В последние годы внимание к NEOs существенно возросло, чему способствовал ряд уникальных небесных явлений, в частности распад и падение обломков кометы Шумейхеров–Леви 9 на Юпитер, сближение с Землей кометы 1996 г. Хякутаке в марте 1996 г., открытой всего за несколько месяцев до этого, и др. Очевидно, что проблема происхождения NEOs имеет непосредственное отношение к вопросу о происхождении и эволюции метеорных роев и связанных с ними метеорных потоков. В настоящей работе использована традиционная классификация NEOs: ААА-астероиды, астероиды пояса, кометы. Однако по мере совершенствования методов и средств наблюдения малых тел Солнечной системы лавинообразно растет количество обнаруженных NEOs. Так, только по программе SPACEWATCH за последние три года было открыто 77 астероидов, орбиты которых тесно сближаются с орбитой Земли, что составляет приблизительно 45% всех таких объектов (Герелс, Джедик, 1996), причем 3 астероида движется по орбитам, наклонение которых превышает 60° . Границы между классами NEOs становятся все менее четкими (Джевит, 1996; Меничелла и др., 1996; Бабаджанов, 1996; Вильямс, 1993; Келлер, 1996 и др.). Особую роль играют работы, в которых анализируется замечательность вероятных родительских тел метеороидов. Емельяненко и Бейли (1996) отмечают, что учет зависимости вероятности обнаружения кометы от ее орбитальных параметров позволяет утверждать, что существует большое количество ненаблюдаемых ДП-комет. К такому же выводу, используя другие динамические характеристики комет, приходит и Салитис (1996).

Накамура (1996), сравнивая результаты численного интегрирования известных в настоящее время КП-комет с количеством кратеров обнаруженных с помощью космических аппаратов на спутниках Юпитера, нашел, что должны существовать не обнаруженные пока КП-кометы на орбитах с малыми наклонами и количество их в 10–20 раз превышает количество известных КП-комет.

В работе Брандта и др. (1996) предсказано существование еще одного вероятного источника метеороидов — малых комет, которые, по мнению авторов, весьма многочисленны. Авторы отмечают, что оценка распределений элементов орбит малых комет — это задача будущих исследований,

однако те три кометы, которые приводятся в качестве примера малых комет (Туттля–Джакобини–Кресака, Понса–Виннеке, Сугано–Сайгуса–Фудзикавы), имеют существенно разные орбиты. Так, наклонения составляют соответственно 13, 22 и 97°.

Очевидно, тот факт, что какие-то объекты не наблюдаются в настоящее время, не означает, что нет и метеорных потоков, генетически связанных с ними.

Проблема происхождения NEOs не является новой, но в последние годы она вызвала острую дискуссию среди исследователей малых тел Солнечной системы. В наиболее концентрированном виде она нашла отражение в докладах конференции “Малые тела Солнечной системы и их взаимодействие с планетами” (Мариехам, Финляндия, 8–12 августа 1994). Особый интерес представляет работа Стила (1996), в которой кроме прочего развита идея Клюббе и Напье (1984, 1986), согласно которой популяция NEOs, существующих в настоящее время, образовалась в результате распада одной или нескольких гигантских комет. При этом родительскими телами метеорных роев являются дочерние продукты этого распада. Если это так, то, возможно, тела, которые обычно рассматриваются как родительские, во многих или по крайней мере в некоторых случаях таковыми не являются, а являются членами этих потоков. О том, что существуют метеорные потоки, не образующиеся из комет, а имеющие лишь общее происхождение с той или другой кометой, еще 30 лет тому назад писал Всехсвятский (1967). Действительно, мелкая составляющая потоков регистрируется методами метеорных наблюдений (визуальным, фотографическим, радиолокационным, телевизионным и др.). Наиболее крупные члены (кометы и астероиды) обнаружены телескопическим и другими современными методами. Что касается тел промежуточных размеров, то ни первые, ни вторые не позволяют пока их непосредственно регистрировать. Возможно, объекты, о которых шла речь выше, и являются такими промежуточными телами. Такая гипотеза позволяет объяснить происхождение всевозможных семейств, комето-астероидо-метеорных комплексов и т.д., в частности, комплекса Таурид (Ашер и др., 1993; Стил, 1996 и др.). Косвенным подтверждением справедливости гипотезы Клюббе–Напье–Стила могут служить работы Вильямса (1993), Келлера (1996) и др., в которых отмечается, что масса метеороидов в метеороидных роях, связанных с кометами, в некоторых случаях превосходит массу самого кометного ядра.

Из такого сценария образования метеороидных роев и потоков следует еще один важный вывод. Как отмечает Вильямс (1996), поскольку время существования метеороидного роя много меньше возраста Солнечной системы, рой дол-

жен формироваться за счет родительских тел, которые существуют в настоящее время. Тогда в рамках гипотезы Клюббе–Напье–Стила не наблюдаемые тела, о которых речь шла выше, должны все время поставлять в рой метеороиды. Поскольку эти тела обладают большой массой, различного рода негравитационные силы не могут существенно трансформировать их орбиты. Мелкие члены роя быстро теряют связи с родительскими телами и переходят в популяцию спорадических, но на их место приходят новые. Таким образом, время жизни роя и “память” об орбите родительского тела в некоторых случаях (для орбит, которые не подвергаются существенным гравитационным возмущениям планетами) может увеличиться в десятки раз. Это значит, что в средних орбитах потоков содержится информация об орбитах NEOs, которые пока не обнаружены другими средствами наблюдения. Очевидно, что в таком случае актуальность метеорных исследований резко возрастает.

Существует еще одно объяснение факта существования большого количества орбит с обратным движением у метеороидов и метеорных потоков, не связанных с ДП-кометами. Оно, как и обсуждавшееся выше, базируется на концепции катастрофизма.

Вспомним незаслуженно забытую гипотезу происхождения комет и астероидов в результате эруптивных (вулканических) процессов на планетах и их спутниках. В работах Всехсвятского и, в частности, в его монографии (Всехсвятский, 1967) развита гипотеза извержения, сформулированная и обоснованная Лагранжем, Ольберсом, Проктором, Кроммелином и др. Всехсвятский приводит многочисленные факты, подтверждающие достоверность гипотезы извержения. Отметим только один из них, а именно, экспериментальное подтверждение существования вулканической деятельности не только на планетах Солнечной системы, но и на многих спутниках планет. Это сняло главное возражение противников гипотезы извержения – необходимость нереально высоких скоростей выброса. Наверное, нельзя согласиться с крайними утверждениями автора о необоснованности и неподтвержденности наблюдениями гипотезы захвата Лапласа, а истина, как это обычно бывает, лежит посередине: существуют и кометы, проникающие во внутренние области Солнечной системы в результате захвата из облака Оорта, и кометы, выброшенные эруптивными процессами на планетах и спутниках. В частности, автор объясняет существование КП-комет типа кометы Энке, что является камнем преткновения теории захвата, эруптивными процессами на Меркурии и Венере.

В соответствии с теорией извержения для образования комет с обратным движением минимальная скорость продуктов извержения должна

быть больше или равна скорости планеты на орбите, т.е. в 2–3 раза превышать минимальную скорость, необходимую для образования гелиоцентрических комет с прямым движением. Поскольку при прочих равных условиях скорость продуктов извержения тем больше, чем меньше их масса, то в среднем ядра комет с обратным движением должны иметь меньшую, чем кометы с прямым движением, массу и, следовательно, меньшую вероятность обнаружения. Тот факт, что скорости извержения для комет с обратным движением существенно выше, чем для комет с прямым движением, еще не означает, что их количество мало по сравнению с количеством комет с прямым движением. Здесь необходимо учитывать закон распределения продуктов извержения по массе. Для малых тел Солнечной системы от астероидов до метеороидов закон распределения по массе близок к обратностепенному с параметром около двух (см., например, Хьюз, 1993). Таким образом, в результате выброса комет с планет и спутников в популяции вероятных родительских тел метеороидных роев и, следовательно, метеорных потоков должны присутствовать трудно наблюдаемые или вообще пока недоступные наблюдениям объекты на орбитах произвольных размеров с прямым и обратным движением.

В последующих работах настоящего цикла мы еще вернемся к вопросам, затронутым в Заключении.

Настоящая работа выполнена в рамках программы Государственного комитета по науке и технологии Украины (тема “Частка”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.
- Ашер и др. (Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.). The Taurid Complex Asteroids / Eds Stohl J., Williams I.P.: Meteoroids and their Parent Bodies. Astronomical Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava, 1993. P. 93–96.
- Бабаджанов П.Б. (Babadzhanov P.B.). Is 2329 Orthos a Dead Comet? Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 305–310.
- Брандт Д.С., Ахерн М.Ф., Рэндал С.Е. и др. (Brandt J.C., A'hearn M.F., Randall C.E. et al.). On the Existence of Small Comets and their Interactions with Planets. Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 243–249.
- Бронштэн В.А. Сопоставление элементов орбит ярких болидов, астероидов и комет // Астрон. вестн. 1990. Т. 24. № 2. С. 160–172.
- Ватт С., Уиппл Ф. (Wyatt S.P., Whipple F.L.). The Poynting–Robertson effect on Meteor Orbits. Astrophys. Journ. 1950. V. 111. P. 134–141.
- Вильямс И. (Williams I.P.). the Dynamics of Meteoroid Streams / Eds Stohl J., Williams I.P. Meteoroids and their Parent Bodies. Astronomical Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava, 1993. P. 31–40.
- Вильямс И. (Williams I.P.). Meteoroids: Interrelations with their Parent Bodies. Abstracts presented at the International Conference on Asteroids, Comets and Meteors. ACM 96, COSPAR colloquium 10, July 8–12, 1996, Versailles, France. P. 102.
- Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. Киев: Наук. думка, 1989. 296 с.
- Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Подоляка В.А. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 1. Методика выделения потоков и ассоциаций из выборки орбит индивидуальных метеоров большого объема // Астрон. вестн. 1995. Т. 29. № 5. С. 439–449.
- Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л. Метеорный комплекс вблизи орбиты Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 2. Сравнительный анализ некоторых статистических характеристик потоковых и спорадических метеорных тел // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. № 6. С. 541–560.
- Всехсвятский С.К. Природа и происхождение комет и метеорного вещества. М.: Просвещение, 1967. 164 с.
- Герелс, Джедик (Gherels T., Jedicke R.). The Population of Near-Earth Objects Discovered by Spacewatch // Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 233–242.
- Демин В.Г., Журавлев С.Г. Астероиды: происхождение, статистика и эволюция // Итоги науки и техники. Серия Астрономия. 1979. Т. 15. 115 с.
- Джевит (Jewitt D.). From Comets to Asteroids: When Hairy Stars Go Bald // Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 185–201.
- Емельяненко, Бейли (Emel'yanenko V.V., Bailey M.E.). Dynamical Evolution of Comets and the Problem of Cometary Fading // Earth, Moon, and Planets. 1996. V. 72. P. 35–40.
- Келлер (Keller H.U.). On the Decay of Comets and their Relation to Other Solar System Objects. Abstracts presented at the International Conference on Asteroids, Comets and Meteors. ACM 96, COSPAR Colloquium 10, July 8–12, 1996, Versailles, France. P. 102.
- Кларк (Clark R.). Asreroids: Relationship with Other Small Bodies. Abstracts presented at the International Conference on Asteroids, Comets and Meteors. ACM 96, COSPAR Colloquium 10, July 8–12, 1996, Versailles, France. P. 101.
- Клюбе, Нэпье (Clube S.V.M., Napier W.M.). The microstructure of terrestrial catastrophism // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1984. V. 211. P. 953–968.
- Клюбе, Нэпье (Clube S.V.M., Napier W.M.). Glant comets and the galaxy: implications of the terrestrial record. The Galaxy and the Solar System / Eds Smoluchowski R., Bahcall J.N., Natthews M.S. Tucson: Univ. Arisona Press, 1986. P. 260–285.
- Крамер Е.Н., Шестака И.С. Метеорная материя в атмосфере Земли и околосолнечном космическом пространстве. М.: Наука, 1983. 184 с.

- Кресак* (Kresak L.). Relation of Meteor Orbits to the Orbits of Comets and Asteroids. *Smithson. Contribs. Astrophys.* 1967. V. 11. P. 9–34.
- Кресак* (Kresak L.). The Discrimination Between Cometary and Asteroidal Meteors. I. The Orbital Criteria // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. 1969a. V. 20. № 4. P. 177–188.
- Кресак* (Kresak L.). The Discrimination Between Cometary and Asteroidal Meteors. II. The Orbits and Physical Characteristics of Meteors // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. 1969b. V. 20. № 5. P. 231–251.
- Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1975. 392 с.
- Лидов М.Л.* Эволюция орбит искусственных спутников под действием гравитационных возмущений тел // *Искусств. спутники Земли*. 1961. № 8. С. 5–45.
- Ландблад* (Lindblad B.A.). The Distribution of $1/a$ in Photographic Meteor Orbits. evolutionary and Physical Properties of Meteoroids IAU Colloquium 13, State University of N. Y. at Albany / 1971. Eds Hemenway C.L., Millman P.M., Cook A.F. Washington, D. C., NASA, 1973 (NASA SP-319). P. 175–181.
- Лупишко, Бельская* (Lupishko D.F., Belskaya I.N.). Near-Earth Asteroids as Parent Bodies of Meteoroids / Eds Stohl J., Williams I.P. Meteoroids and their Parent Bodies. *Astronomical Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava*, 1993. P. 117–122.
- Меничелла и др.* (Menichella M., Paolicchi P., Farinella P.). the Main Belt as a Source of Near-earth Asteroids. *earth, Moon, and Planets*. 1996. V. 72. P. 133–149.
- Марсден* (Marsden B.G.). Catalogue of conetary orbits. 5th Cent. Bureau Astron. Tel. IAU, SAO, Cambridge, Mass. 1986. 109 p.
- Моисеев Н.Д.* О некоторых основных упрощенных схемах небесной механики, получаемых при помощи осреднения ограниченной круговой задачи трех тел // *Тр. ГАИШ*. 1945. Т. 15. № 1. С. 75–79.
- Накамура* (Nakamura T.). Total Number Estimate of Short-period Comets and Close Encounter with Planets. Abstracts presented at the International Conference on Asteroids, Comets and Meteors. ACM 96, COSPAR Colloquium 10, July 8–12, 1996, Versailles, France. P. 86.
- Салитис* (Salitis A.). Origin and Evolution of the Long-Period Comets // *Earth, Moon, and Planets*. 1996. V. 72. P. 41–44.
- Стил* (Steel D.I.). The Limitations of NEO-Uniformitarianism // *earth, Moon, and Planets*. 1996. V. 72. P. 279–292.
- Уинн* (Whipple F.L.). Photographic Meteor Orbits and their Distribution in Space // *Astron. J.* 1954. V. 59. № 6. P. 201–217.
- Хьюз* (Hughes D.W.). Meteoroids – an Overview. J. Stohl, I.P. Williams. Meteoroids and their Parent Bodies. *Astronomical Inst., Slovak Acad. Sci., Bratislava*, 1993. P. 15–28.
- Эфемериды малых планет на 1984 год. Институт теоретической астрономии АН СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1983. С. 19–89.

The Meteor Complex near the Earth's Orbit: Sporadic Background, Streams, and Associations. III. Sources of Stream and Sporadic Meteoric Bodies

Yu. I. Voloshchuk, A. V. Vorgul', and B. L. Kashcheev

Kharkov State Technical University of Radioelectronics, Kharkov, Ukraine

An analysis of elements and quasi-constant parameters of meteoroid orbits is performed to estimate the contribution of asteroids of Apollo, Amor, and Aten groups (AAA asteroids), main-belt asteroids, short-period (SP) and long-period (LP) comets to the complex of stream and sporadic meteoric bodies. Both formal criteria and the methods of multidimensional classification with learning samples are used, and the discriminant analysis and classification based on the criterion of the likelihood ratio in the case of a known distribution over the classes. Among stream meteoroids with masses greater than 10^{-5} g intercepting the sphere of radius 1 AU, 72% represent the product of disintegration of AAA asteroids; 3% have their origin from main-belt asteroids; and 19 and 6% respectively, represent the product of the disintegration of nuclei of SP and LP comets. The corresponding estimates for sporadic meteoroids give, respectively, 32, 4, 7, and 57%. Thus, 75% of stream meteoroids are of asteroidal origin (72% being AAA asteroids); among sporadic meteoroids, 37% (32% being AAA asteroids). For all four classes, the four-dimensional (a, e, q, i)-distributions of meteoroid orbital elements are given and the characteristic features of these distributions are discussed.