УДК 523. 68

Ю. И. ВОЛОЩУК, д-р. техн. наук, Б. Л. КАЩЕЕВ, д-р. техн. наук

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ В ЛАБОРАТОРИИ РАДИОТЕХНИКИ ХНУРЭ

Введение

В Харькове регулярные измерения численности метеоров начались в 1957 г., а с 1959 г. проводились измерения индивидуальных орбит метеорных тел – метеороидов. Если для измерений численности и скорости метеороида достаточно зарегистрировать метеорное явление в одном приемном пункте, то для оценки элементов орбиты метеороида необходимо иметь не менее 3-х приемных пунктов, расположенных на расстоянии от 5 до 50 км друг от друга, то есть необходимо иметь фактически многостанционный радиолокационный комплекс. Создание такого комплекса и проведение измерений на нем – это сложная и в инженерном, и в организационном плане задача. Однако главное даже не в этом. Радиолокационный метод наблюдения метеоров основан на регистрации метеорного радиоэха – радиоволн, отраженных от ионизированного метеорного следа в верхних слоях атмосферы Земли. Поскольку при этом регистрируются не сами метеороиды, а явления, которые они вызывают в атмосфере Земли, такие наблюдения являются косвенными. Астрономическая интерпретация косвенных измерений сводится фактически к решению некорректной обратной задачи радиолокации метеоров. Известные методы решения таких задач (например, метод регуляризации Тихонова [1]) пригодны в рассматриваемом случае только в методическом плане, но алгоритмы их решения требуют учета большого количества факторов, связанных как с конкретной измерительной аппаратурой, так и чисто астрономических особенностей задачи. Потребовалось провести специальные исследования погрешностей аппаратуры, причем не только случайных, но, что значительно сложнее – систематических, зависящих от времени суток и года, эффективной чувствительности разнесенных приемных устройств, от формы диаграмм направленности антенн, вектора скорости метеороида, от принятой модели образования метеорного следа и отражения радиоволн от него и др. Эти вопросы освещены в монографиях [2, 3].

С 1972 г. в Харькове начались уникальные наблюдения метеорных явлений на многофункциональной радиолокационной системе МАРС [4], созданной в ПНИЛ Радиотехники кафедры Основ радиотехники сначала Харьковского политехнического, а с 1972 г. – Харьковского института радиоэлектроники. На этой, самой чувствительной в мире (такой она остается и по сей день) радиолокационной системе с 1972 по 1978 гг. получены данные, позволившие решить многие задачи метеорной астрономии. Здесь остановимся только на двух фундаментальных, наиболее важных из этих задач.

1. Плотность потока метеорных тел вблизи орбиты Земли

Проблема оценки плотности потока метеорных тел в функции их массы вблизи орбиты Земли была первой, вставшей перед исследователями метеоров, и к началу регулярных наблюдений в Харькове методические вопросы оценки этого параметра по результатам наблюдений метеоров на РЛС средней эффективной чувствительности в основном были решены. Сформировалось два подхода к решению этой проблемы: статистический, базирующийся на результатах измерения численности метеоров [5], и весовой, исходными данными для которого являются результаты измерений индивидуальных орбит радиометеоров [2]. Многолетние регулярные круглосуточные измерения на системе МАРС позволили получить как распределения численности и амплитуд сигналов, отраженных от метеоров, за 15-ти минутные интервалы времени, так и распределений радиантов и орбит метеоров. В [6] приведены результаты измерений численности и оценки плотности потока метеороидов с предельно регистрируемой массой 10^{-6} г. Использован статистический алгоритм, адаптированный к результатам измерений численности на аппаратуре с высокой эффективной чувствительностью. Соответствующие оценки плотности потока метеороидов с предельно регистрируемой массой 10^{-5} г. были получены методом нелинейного преобразования распределений параметров метеоров – модернизация весового метода обработки [3]. При такой обработке каждому зарегистрированному метеору приписывается вес, равный произведению геометрического, физического, аппаратурного и астрономического факторов замечаемости радиометеоров. При вычислении, например, физического фактора необходимо выбрать одну из большого количества существенно отличающихся одна от другой (см. [2, 7]) моделей начального радиуса метеорного следа, коэффициента ионизации, атмосферы на высотах метеорной зоны. В Харькове были разработаны методы, позволяющие получить оценки физического фактора замечаемости и его зависимости от скорости метеороида непосредственно по резуль-

татам наблюдений, без привлечения каких-либо физических моделей образования метеорного следа и отражения радиоволн от него [3].. Существенным достоинством такого подхода к проблеме замечаемости радиометеоров является то, что при этом автоматически учитывается и аппаратурный фактор, оценить который теоретически практически невозможно.,

На рис. 1 приведены графики зависимости интегральной плотности потока метеороидов в широком диапазоне масс, полученные разными методами и разными исследователями. На рисунке обозначено:

1. Сводные кривые максимальной и минимальной оценок зависимости интегральной плотности потока метеороидов $Q(M)$, полученных на основе анализа результатов исследования микрометеоритных кратеров на стекловидных породах, на стеклянных фильтрах, а также записей сейсмографов, установленных на Луне.

2. Результаты радиолокационных и оптических наблюдений метеоров и болидов.

3. Модельная кривая В.Н. Лебединца [8].

4. Результаты радиолокационных наблюдений метеоров на аппаратуре высокої эффективной чувствительности с учетом сезонных вариаций плотности потока – Харьков.

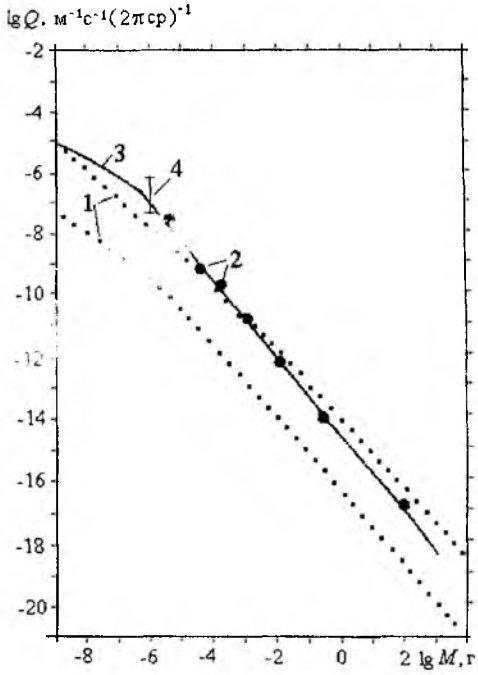

Рис. 1

Для того чтобы получить оценки потока метеороидов на космический аппарат, движущийся по заданной орбите вокруг Земли, скорости и углы падения, пропускной способности метеорного радиоканала связи с заданными характеристиками, численности регистраций на метеорной РЛС, предназначенной для измерения скорости и направления движения воздушных масс в метеорной зоне атмосферы (80 – 100 км) и др., интегральной плотности потока метеороидов недостаточно. Нужно получить оценки распределения плотности потока метеороидов с массой, большей M, по небесной – геоцентрической или гелиоцентрической – сфере, то есть $q(\omega, M)$, где ω – координата радианта метеора – точки на небесной сфере, из которой прилетает метеороид. Очевидно, что при этом должно выполняться такое условие:

$$Q(M) = \int_{\Omega} q(\omega, M) d\omega, \qquad (1)$$

где $Q(M)$ – значения интегральной плотности потока метеорных тел различной массы, приведенные на рис. 1.

Решение уравнения (1) относительно функции $q(\omega, M)$ является некорректной задачей. Согласно теории решения таких задач [1], необходимо найти тот компакт, на котором задача имеет решение. Были проведены соответствующие исследования и найдено решение для трех моделей распределения плотности радиантов по небесной сфере: эллиптическая модель, эллиптическо-экспоненциальная модель, и модель, построенная на базе сферических выборочных функций [3, 6]. Первые две модели являются известными, третья была разработана в Харькове.

Математическое моделирование суточного хода численности зарегистрированных радиометеоров показало, что основные особенности, присутствующие в результатах наблюдений (наличие солнечного, антисолнечного, апексного и антиапексного максимумов, их расположение во времени, соотношения численности метеоров в них и др.) проявляются только при использовании третьей из моделей. Однако, для решения уравнения (1), когда функция $q(\omega, M)$ представлена рядом по сферическим выборочным функциям и нужно найти наивысший порядок функции, еще включаемой в модель, а также коэффициенты ряда, необходимо иметь протяженные ряды непрерывных наблюдений (не менее 10 суток) при неизменных параметрах как передающего, так и приемного трактов РЛС. Такие наблюдения были проведены в Харькове с 1968 по 1972 гг. Распределения плотности радиантов получены в виде таблиц по 1600 равновеликим площадкам, покрывающим всю гелиоцентрическую небесную сферу. При этом принято, что поток метеороидов с северной и южной полусфер приблизительно одинаков. Основанием для такого предположения явились результаты, полученные по резуль-

татам наблюдений метеоров на экваторе в 1968–1970гг., проведенных на РЛС "Тропик", разработанной и изготовленной в Харькове.

На рис. 2 в качестве примера приведены графики контуров одинаковой нормированной плотности радиантов $\lg[q(\omega, M)/Q(M)]$ метеороидов с предельными массами 10^{-6} г. на гелиоцентрической небесной сфере. Рис. 2 а) – февраль, б) – май, в) – август и г) – ноябрь; β' и λ' – эклиптикальные гелиоцентричечкие широта и долгота соответственно; λ_a – долгота апекса Земли в момент наблюдения. Можно отметить, что в для метеороидов с предельнорегистрируемой массой 10^{-6} г плотность радиантов в антиапексной области небесной сферы только на 1…2 порядка превосходит плотность радиантов из апексной области. Отметим, что для тел с массой 10^{-3} г этот показатель достигает 2…3 порядков.

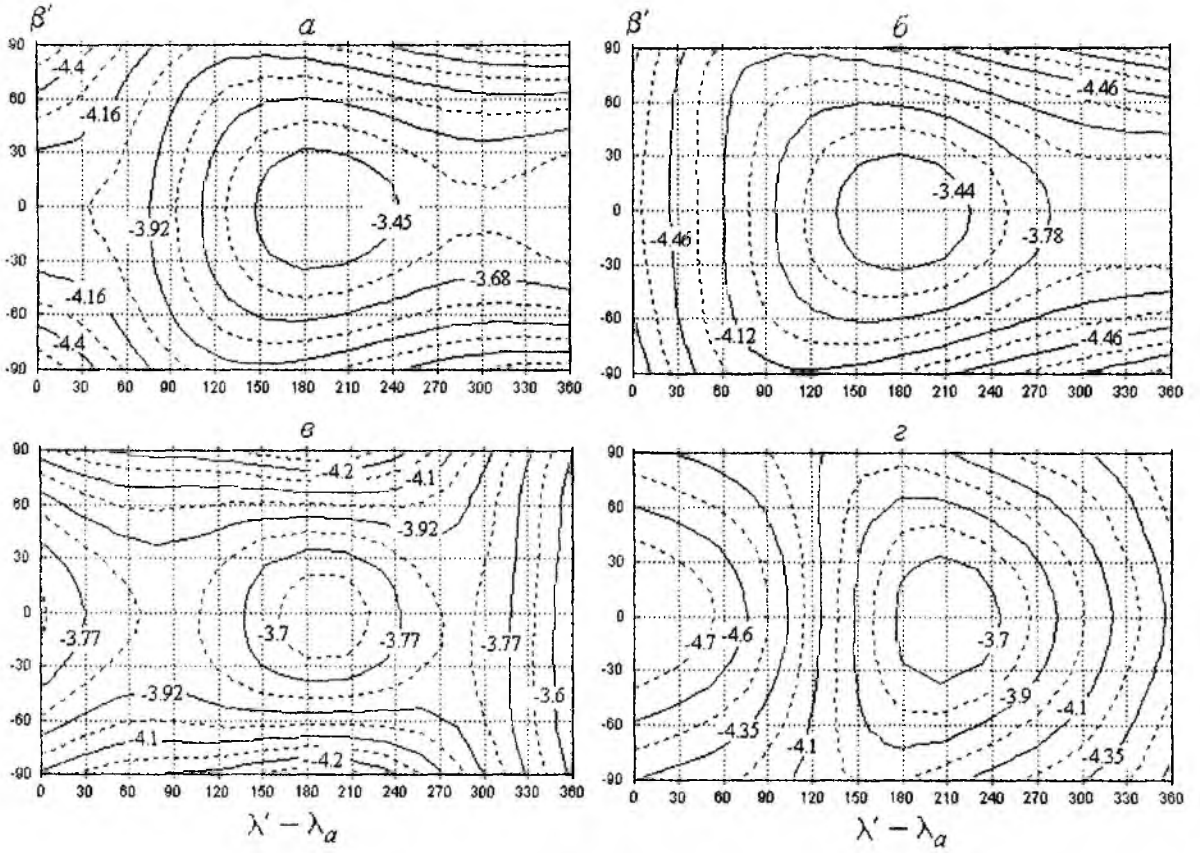

Рис. 2

2. Метеорные потоки

Проблема выявления потоков метеоров, их анализа и интерпретации всегда была и остается одной из важнейших при исследованиях метеоров.

В период с января 1972 по декабрь 1978 в Харькове с помощью метеорной автоматической радиолокационной системы было получено 233543 орбиты индивидуальных метеоров. После специального анализа и отбора [9] в базу данных элементов орбит и радиантов метеоров, зарегистрированных в Харькове, занесено 159787 орбит.

Первый этап анализа и астрономической интерпретации уникального банка орбит, полученного по измерениям в Харькове, заключался в выявлении группировок метеороидов в пространстве кеплеровых элементов их орбит. Для этой цели был разработаны соответствующий метод, алгоритм и программное обеспечение. Метод базируется на самых общих принципах кластер-анализа – случайный выбор центров гипотетических кластеров и многократно повторяемый поиск группировок. Алгоритм кластер-анализа подробно описан в [9]. С помощью этого алгоритма было получено более 6.5 тысяч группировок (кластеров) орбит в шестимерном пространстве кеплеровых элементов. На следующем этапе обработки были тщательно проанализированы все выявленные группировки – гипотетические метеорные потоки. При этом какие-то из них были отброшены, другие разделились на 2, 3 отдельных потока, добавились и новые кластеры–потоки. В результате выполнения этой весьма трудоемкой работы сформирована база орбит

5160 метеорных потоков, каждый из которых включает не менее пяти орбит.

Из выборки 159787 орбит метеоров 44% уверено принадлежат метеорам потоков, 31% – спорадическим и 25% – метеорам, орбиты которых имеют тенденцию к группированию, но объемы полученных кластеров меньше 5-ти орбит. Проведенный статистический анализ распределений основных динамических параметров метеоров из выборок потоковых и спорадических метеоров показал, что они существенно отличаются друг от друга, причем эти отличия не являются случайными и согласуются с общими представлениями об особенностях распределений потоковых и спорадических метеоров ("плоская" и "сферическая" составляющие метеорного комплекса соответственно). Это послужило косвенным подтверждением достоверности результатов проведенного кластер-анализа.

Из всех проанализированных распределений только распределения гелиоцентрических скоростей V_h метеоров отличаются незначительно и по форме, и по оценкам первых двух моментов, что согласуется со сделанным в [3] выводом об устойчивости оценок этого параметра метеороидов. Однако и здесь для группированных метеоров распределение V_h является двумодальным, в отличие от аналогичного распределения для спорадических метеоров.

Существенно различаются суточные вариации численности и распределения геоцентрических скоростей V_g. Так, в суточном ходе численности группированных метеоров четко проявляются соизмеримые по величине "антисолнечный" (с 3 до 5 ч.) и "солнечный" (с 12 до 14 ч.) максимумы, в то время как у спорадических метеоров они полностью отсутствуют, распределение одномодальное, максимум соответствует концентрации видимых радиантов к апексу Земли. Ясно, что такая картина объясняется существенно различными распределениями видимых радиантов для одних и других метеоров. Распределения геоцентрических скоростей отличаются не только средними, но и моментами более высоких порядков.

Заметно различаются распределения эксцентриситетов e и перигелийных расстояний q орбит. Распределения орбит группированных и спорадических метеоров по наклонениям подтверждают гипотезу о том, что облако потоковых метеоров является "плоским", тогда как спорадические распределены почти равномерно относительно плоскости эклиптики (напомним, что пока речь идет о распределениях еще не исправленных на факторы замечаемости).

Аналогичные выводы можно сделать и из анализа распределений по величинам аргумента перигелия орбит ω и долготы восходящего узла Ω – для спорадических метеоров и одно, и другое существенно ближе к равномерному, чем для группированных.

Выше отмечалось, что выборки метеоров искажены селективностью самого радиолокационного метода и аппаратуры, а также астрономической избирательностью. Коротко остановимся на анализе распределений радиантов и элементов орбит потоковых и спорадических метеороидов, исправленных за геометрический, аппаратурный, физический и астрономический факторы замечаемости, т.е. распределения метеороидов с массами больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а.е. вокруг Солнца.

Учет факторов замечаемости проводят обычно весовым методом, суть которого сводится к приписыванию каждому зарегистрированному метеору веса, обратно пропорционального вероятности его наблюдения.

Замечаемость радиометеоров можно представить в виде произведения геометрического фактора $1/P_1$, характеризующего относительную замечаемость метеоров с различными координатами радиантов, физического $1/P_2$ и аппаратурного $1/P_A$ факторов, которые выражают относительную замечаемость метеоров с различными скоростями, и астрономического фактора $1/P_3$, зависящего от вероятности встречи с Землей метеорных тел, движущихся по различным орбитам.

На рис. 3, а приведен график геометрического фактора замечаемости [4] метеорной автоматической системы МАРС при круглосуточных наблюдениях метеоров с различными склонениями радиантов δ. Методика расчета геометрического фактора подробно изложена в [2], где, в частности, показано, что величина $1/P_1$ практически не зависит от скорости метеора V_0.

Методика расчета физического фактора замечаемости также приведена в [2], однако для того, чтобы ею воспользоваться, необходимо задаться рядом параметров и моделей, которые до настоящего времени достоверно не определены. Это в первую очередь начальный радиус метеорного следа как функция скорости метеорного тела и высоты, зависимость коэффициента амбиполярной диффузии от высоты, коэффициента ионизации от скорости, значений высот и формы кривых ионизации и др.

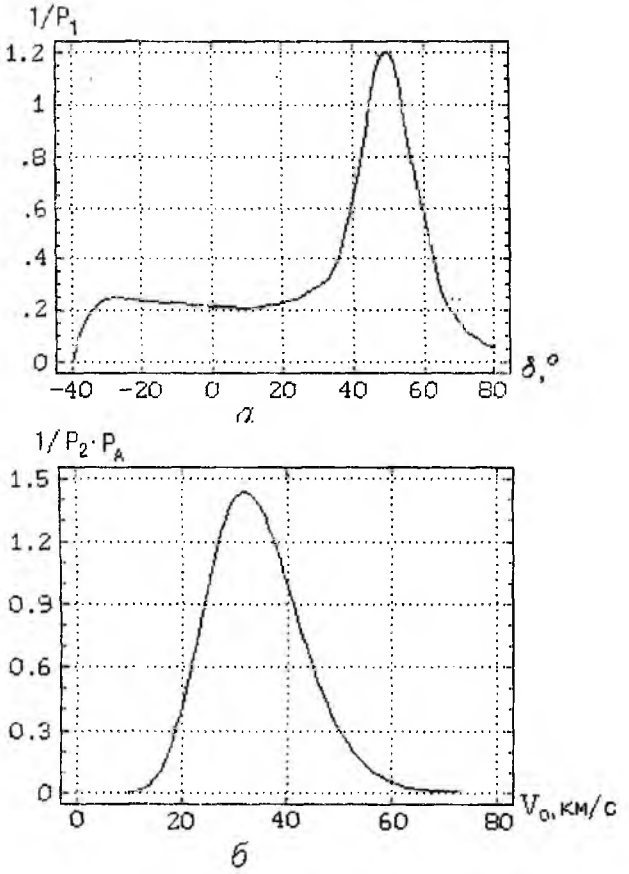

Рис. 3

В [3] предложены методы оценки произведения $1/P_2$ и $1/P_A$,основанные на статистическом анализе результатов наблюдений, которые не требуют привлечения каких-либо физических моделей процессов образования метеорного следа и отражения радиоволн от него.

На рис. 3, б приведен график зависимости $1/(P_2 P_A)$ от скорости метеора V_0 для комплекса МАРС.

Астрономический фактор замечаемости обычно рассчитывают по формуле вероятности встречи метеорного тела с Землей, полученной в [12] с учетом изменения долготы восходящего узла и аргумента перигелия под действием возмущений со стороны планет:

$$P_3 = \frac{\pi V_g \sin i}{R_{sc}^2 V_\infty^2}\left(2 - \frac{1}{a} - p\right)^{1/2}, \qquad (2)$$

где i – наклонение орбиты, a – большая полуось, p – параметр орбиты, R_{sc} – радиус сферы захвата Земли, V_∞ – внеатмосферная скорость метеора. Астрономический фактор (2) рассчитан на одно обращение метеорного тела вокруг Солнца. Чтобы привести все оценки к одному масштабу времени (одному году), необходимо P_3 домножить на $a^{3/2}$.

Таким образом, приписывая каждому зарегистрированному метеору вес, равный $P_1 P_2 P_A P_3 a^{3/2}$, можно перейти от распределений зарегистрированных радиометеоров к исправленным распределениям метеорных тел с массами больше некоторой предельно регистрируемой (для комплекса МАРС это 10^{-5} г), пересекающих сферу радиусом 1 а.е. вокруг Солнца.

На рис.4 приведены группы графиков одномерных распределений группированных (*а*) и спорадических (*б*) метеорных тел. Приведены графики суточного хода численности орбит, распределения геоцентрических (V_g) и гелиоцентрических (V_h) скоростей метеороидов, эксцентриситетов e, перигелийных расстояний q, наклонений i, аргументов перигелиев ω, а также распределения радиантов метеороидов по гелиоцентрической долготе $\lambda' - \lambda_a$ и широте β'. Сразу отметим, что все попарно сравниваемые распределения одного и другого класса метеорных тел существенно отличаются друг от друга.

В суточном ходе численности потоковых метеороидов четко выражены “апексный”, ”солнечный” и ”антисолнечный” максимумы. У спорадических метеороидов “солнечный” максимум (с 12 до 14 часов) отсутствует, что объясняется характером распределений радиантов по гелиоцентрической долготе $\lambda' - \lambda_a$ тех и других, приведенных на этом же рисунке. Более подробно распределения радиантов будут проанализированы ниже.

Все потоковые метеороиды можно разделить на две группы по значениям геоцентрических скоростей: приблизительно 60% из них движутся со скоростями 15...45 км/с, остальные – со скоростями 45...70 км/с, очень мал вклад метеороидов со скоростями 45...47 км/с. Подавляющее большинство спорадических метеороидов имеют скорости, лежащие в узком диапазоне 50...70 км/с.

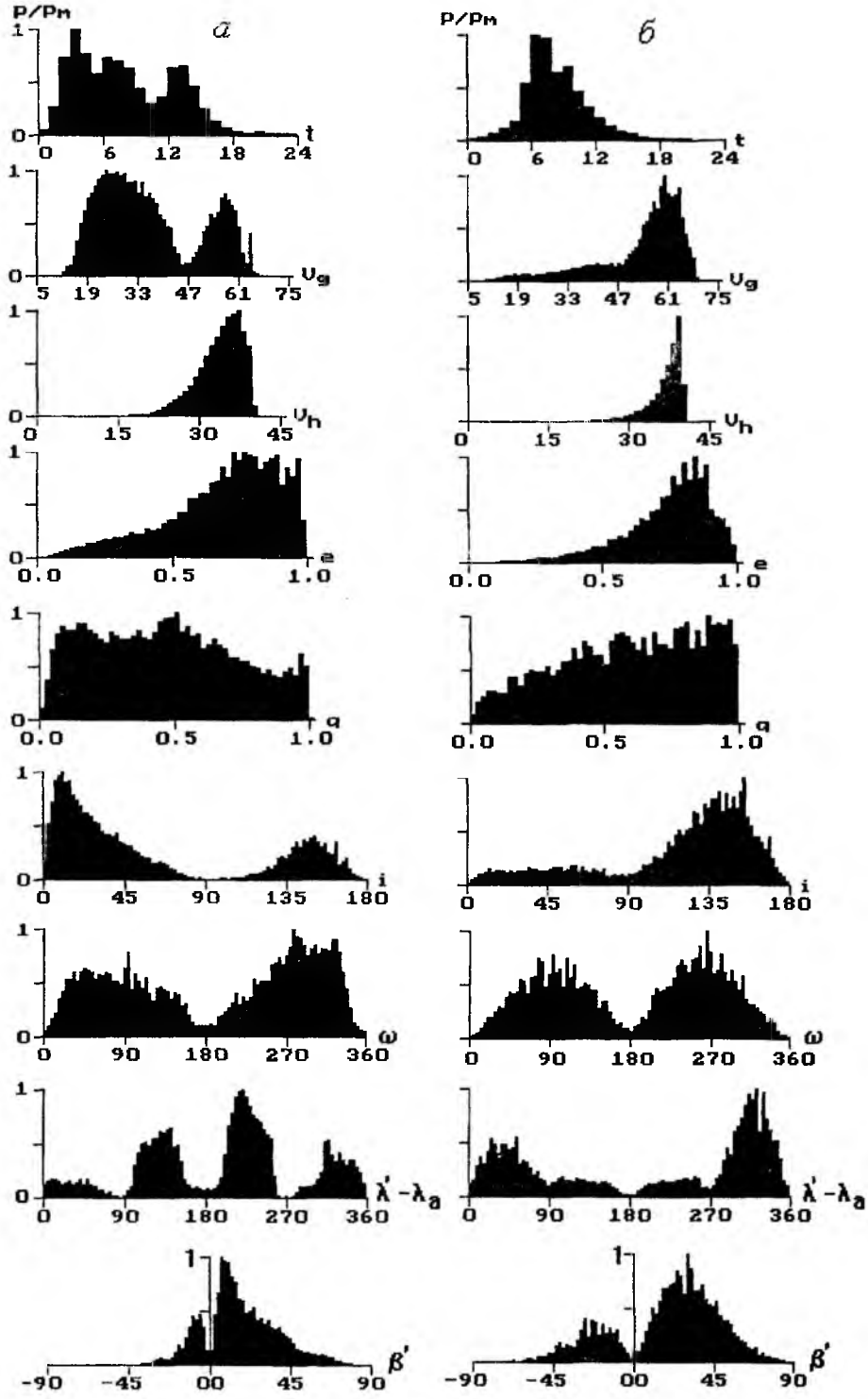

Рис. 4

Распределения гелиоцентрических скоростей V_h спорадических метеороидов концентрируется в узком диапазоне 30...42 км/с, вклад метеороидов со скоростями $V_h < 30$ км/с не превышает 10%. Среди потоковых метеороидов скорости меньше 30 км/с имеет, приблизительно, каждый пятый. Если воспользоваться приближенной формулой, связывающей значение гелиоцентрической скорости с величиной большой полуоси орбиты

$$a = 1/(2 - V_h^2), \tag{3}$$

где гелиоцентрическая скорость метеороида выражена в единицах средней орбитальной скорости Земли, получим, что среди спорадических метеороидов только незначительная часть движется по

орбитам с $a < 1$ а.е., тогда как приблизительно 20% потоковых метеороидов имеют орбиты с большими полуосями, лежащими в диапазоне 0.5...1 а.е.

Распределения метеороидов по величине эксцентриситета во всем диапазоне наклонений в одной и другой выборке мало отличаются друг от друга, однако отличия становятся существенными, если рассматривать отдельные узкие диапазоны значений наклонений орбит.

Наиболее существенно различаются распределения потоковых и спорадических метеороидов по величине перигелийного расстояния и наклонения орбит.

Распределение по величине q, построенное по выборке потоковых метеоров, имеет три экстремума, положение которых согласуется с аналогичным распределением, построенным для потоковых фотографических метеоров, однако, экстремумы в нашем случае, во-первых, менее четко выражены и, во-вторых, если по фотографическим данным максимум при $q \cong 0.5$ а.е. только намечается, то для более мелких тел он становится глобальным. Для спорадических метеороидов качественно распределение согласуется с аналогичным, построенным по фотографическим наблюдениям.

Распределения мелких метеороидов по величине наклонения орбит отличается от тех, что получены фотографическим методом. Так, у последних практически отсутствуют метеороиды с обратным движением. Если сравнивать распределения наклонений потоковых и спорадических радиометеоров, зарегистрированных аппаратурой средней эффективной чувствительности [8], и слабых радиометеоров, анализируемых в настоящей работе, то согласие получается очень хорошим.

На рис. 5 приведены распределения радиантов потоковых (*а*) и спорадических (*б*) метеороидов в эклиптикальной гелиоцентрической системе координат $(\lambda' - \lambda_a, \beta')$. Соответствующие одномерные распределения изображены на рис.4. Можно отметить, что в исправленных распределениях произошли существенные изменения: полностью отсутствуют максимумы при $\lambda' - \lambda_a = 180^{\circ}$ и 0° в распределении потоковых метеороидов, в распределении спорадических метеороидов практически исчезли мощные скопления радиантов с $\lambda' - \lambda_a = 180^{\circ} \pm 45^{\circ}$, существенно меньшую роль в общем потоке мелких метеороидов стали играть высокоширотные радианты.

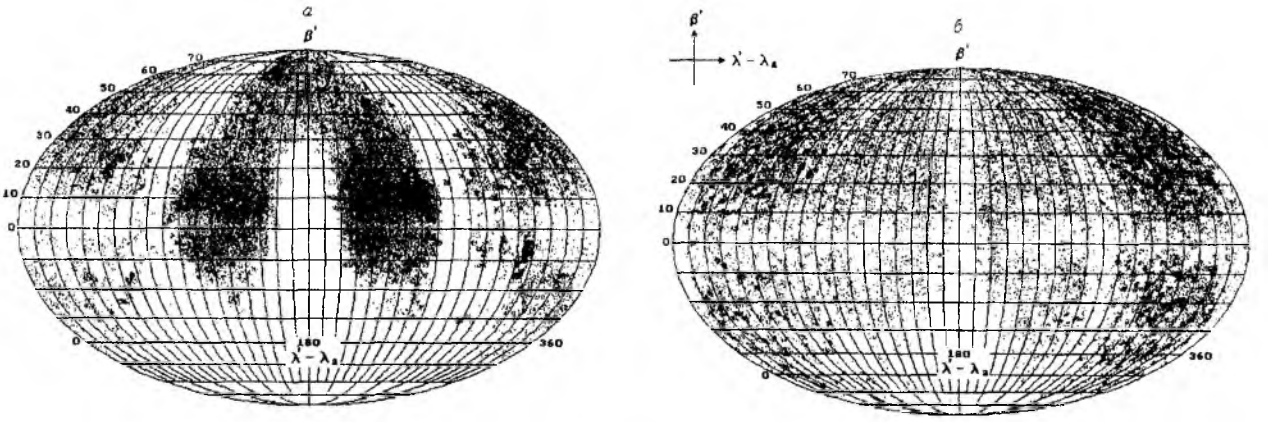

Рис. 5

На рис. 6 приведены двумерные распределения по афелийным расстояниям и наклонениям орбит (Q, i) и их сечения по различным диапазонам значений наклонения орбит потоковых (*а*) и спорадических метеороидов (*б*). Анализ этих распределений указывает на слабую зависимость распределений от значений наклонений орбит для спорадических мелких метеорных тел. Этот факт, а также сам вид двумерного распределения (Q, i) для спорадических метеороидов дают основание предположить, что произошли они в основном в результате дезынтеграции ядер долгопериодических комет. Действительно, все метеороиды, движущиеся по орбитам с $Q > 5$ а.е., имеют кометное происхождение. Если вклад частиц другого происхождения (короткопериодические кометы семейства Юпитера и астероидов) мал, то с уменьшением Q число таких метеороидов должно медленно (из-за влияния эффекта Пойнтинга-Робертсона) убывать. Такую картину мы и наблюдаем в распределениях рис.6*б* при $i > 90^{\circ}$. У метеороидов с прямым движением с уменьшением Q наблюдается даже некоторое увеличение количества метеороидов, что указывает на наличие каких то других источников. Это могут

быть короткопериодические кометы семейства Юпитера, астероиды пояса, объекты группы Аполлона. Анализ распределений рис.6*а* показывает, что долгопериодические кометы, если и вносят вклад в популяцию потоковых метеороидов, то он незначителен. Проверка этого важного фундаментального результата потребовала проведения специального исследования. Подробно результаты его изложены в работе [11]. Ниже мы приведем только основные выводы и обсуждение полученных впервые оценок.

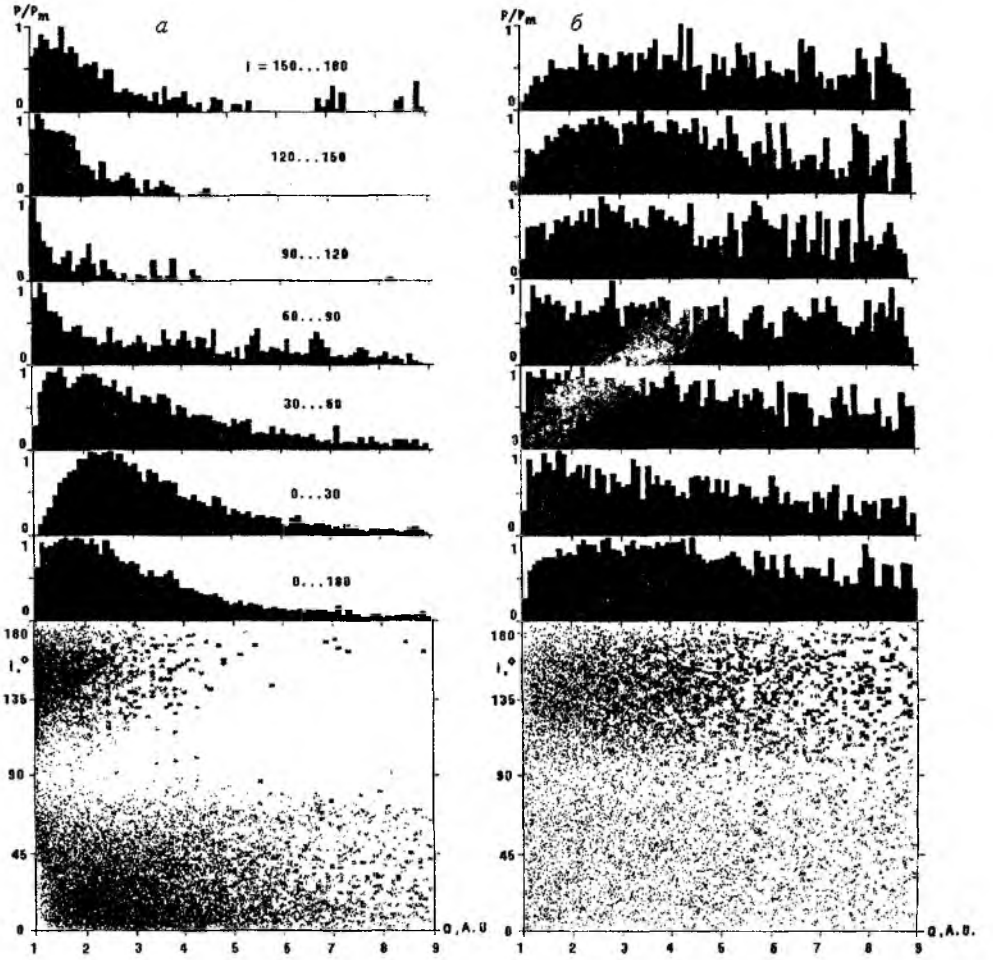

Рис. 6

Основной вывод из результатов анализа распределений элементов орбит и радиантов метеороидов с массами больше 10^{-5} г, пересекающих сферу радиусом 1 а.е. вокруг Солнца, только малая часть которых приведена в настоящей статье, состоит в том, что все аналогичные распределения потоковых и спорадических метеорных тел резко отличаются друг от друга. Связано это, во-первых, с происхождением тех и других и, во-вторых, с возрастом потоковых и спорадических метеороидов. Тот факт, что распределения спорадических метеороидов менее структурированы (имеют большую энтропию, т.е. распределения близки к равномерным) свидетельствует о том, что процессы эволюции их орбит под воздействием гравитационных и негравитационных сил уже сильно трансформировали их орбиты.

3. Источники потоковых и спорадических метеороидов в Солнечной системе

В настоящее время выделены три источника метеороидов: кометы, астероиды основного пояса астероидов и тела групп Аполлона, Амура, Атона (ААА – астероиды), которые сами могут иметь либо кометное, либо астероидное происхождение. Вклад этих источников, по оценкам различных исследователей, различен, но то, что в метеорном комплексе Солнечной системы присутствуют метеороиды всех этих типов, не вызывает сомнений. Поскольку радиолокационный метод не позволяет надежно оценивать физические характеристики метеороидов, ограничимся анализом только элементов орбит.

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. Последовательность обработки данных для этой процедуры в сжатом виде такова: 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 анализ 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 невключенных 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 (класс 1), астероидов пояса (класс 2), КП-комет (класс 3), орбиты которых расположены в пределах орбиты Сатурна, и ДП-комет (класс 4), афелийные расстояния которых превосходят среднее значение большой полуоси орбиты Сатурна. Анализировались три модели классификации. В первой модели в качестве переменных для классификации были выбраны: наклонение орбиты i, эксцентриситет e, перигелийное расстояние q, величина, обратная корню квадратному из величины афелийного расстояния $Q^{-1/2}$ и аргумент перигелия ω. Из них первые четыре прошли проверку на значимость и включены в модель. 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 равны 0.25, были рассчитаны оценки дискриминантных функций d_i для каждого из классов. 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.

В модели №2 в качестве переменных для классификации были выбраны квазипостоянные параметры орбит: T_j, μ, ν и C (см. подробнее в [11]). 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, 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 во времени и, следовательно, дольше сохраняют эту связь.

Третья модель базируется на методе, не требующем обучающих выборок, и использует критерий отношения правдоподобия (см. подробнее [13] и [11]). В этом случае задача сводится к проверке 3-х гипотез: орбита метеороида принадлежит к кометному классу орбит (класс 5), к орбитам астероидного типа (класс 6), орбита не отождествляется ни с кометным, ни с астероидным типом (класс 7).

В таблице приведены оценки вклада комет и астероидов в метеорный комплекс вблизи орбиты Земли, полученные по трем описанным выше моделям классификации.

Таблица

Модель	Класс	Потоковые метеоры (метеороиды)		Спорадические метеоры (метеороиды)	
		N/N_Σ, %	W/W_Σ, %	N/N_Σ, %	W/W_Σ, %
1	1	92.38	79.61	87.75	57.11
	2	0	0	0	0
	3	7.6	19.25	10.93	19.39
	4	0.02	1.14	1.32	23.5
2	1	89.6	72.3	80.5	32.4
	2	1.2	2.9	3.4	4.1
	3	8.7	18.8	8.2	7.0
	4	0.5	6.0	7.9	56.5
3	5	31.9	38.6	26.4	47.2
	6	0.1	0.1	0.2	0.1
	7	68.0	61.3	73.4	52.7

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% спорадиче-

ских метеоров отнесены к классу ААА-астероидов, относительно мало метеоров включены 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 из классов. Уменьшился вклад метеороидов, родительскими телами которых, предположительно, являются ААА-астероиды (до 80% среди потоковых и до 57% среди спорадических). В 2.5 раза возрос вклад потоковых и в 1.8 раз 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, у 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 тех, что получены 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 три 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 тому, что получен 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 вклад в комплекс 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 (здесь 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.

Здесь мы не приводим анализ одномерных и многомерных распределений элементов орбит и координат радиантов потоковых и спорадических метеоров и метеороидов различных классов (см. [11]). Остановимся только на некоторых важные выводах.

Источниками метеороидов, которые могут быть обнаружены наземными средствами наблюдений, являются объекты Солнечной системы, орбиты которых 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 P/Shoemaker-Levy 9 на Юпитер, сближение с Землей кометы 1996 B2 Hyakutake в марте 1996 года, 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. Здесь мы использовали традиционную классификацию NEOs: ААА-астероиды, астероиды пояса, кометы. Однако, по мере совершенствования методов и средств наблюдения малых тел Солнечной системы, во-первых, лавинообразно растет количество обнаруженных NEOs. Так, на конец июня 2001 года было известно 1391 ААА-астероидов. Из нихболее половины (62%) были открыты за последние 6 лет, причем 8 ААА-астероидщв движутся по орбитам, наклонение которых превышает 45^0 . Во-вторых, границы между классами NEOs становятся все менее четкими [14 – 18 и др.]. Особую роль играют работы, в которых анализируется замечаемость вероятных родительских тел метеороидов. В [19] отмечено, 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 автор работы [20].

В работе [21] проведено сравнение результатов численного интегрирования известных в настоящее время КП комет с количеством кратеров, обнаруженных с помощью космических аппаратов на спутниках Юпитера. Показано, что должны существовать необнаруженные пока КП-кометы на орбитах с ма-

лыми наклонениями и количество их в 10 … 20 раз превышает количество известных КП-комет.

В работе [22] предсказано существование еще одного вероятного источника метеороидов – малых комет, которых, по мнению авторов, существует большое количество. Авторы отмечают, что оценка распределений элементов орбит малых комет – это задача будущих исследований, однако те 3 кометы, которые приводятся в качестве примера малых комет (P/Tuttle-Giacobini-Kresak, P/Pons-Winnecke, P/Sugano-Saigusa-Fujikawa), имеют существенно разные орбиты. Так, наклонения, например, составляют, соответственно, 13, 22 и 97^0.

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. Интерес представляет работа [23], в которой, кроме прочего, развита идея авторов [24], 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 С.К. Всехсвятский [25]. 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, что те 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 [23, 26 и др.]. Косвенным подтверждением справедливости гипотезы Клубе-Напиера-Стила могут служить работы [17, 18 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 отмечено в [27], из-за того, что время существования метеороидного роя много меньше возраста Солнечной системы, рой должен формироваться за счет родительских тел, которые существуют в настоящее время. Тогда в рамках гипотезы Клубе-Напиера-Стила ненаблюдаемые тела, о которых речь шла выше, должны все время подпитывать рои метеороидами. 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 К.С. Всехсвятского, в частности в [25], развита гипотеза извержения, сформулированная и обоснованная Лагранжем, Ольберсом, Проктором, Кроммелином и др. С.К. Всехсвятский приводит многочисленные факты, подтверждающие истинность 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 посредине: 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, эруптив-

ными поцессами на Меркурии и Венере.

В соответствии с теорией извержения для образования комет с обратным движением минимальная скорость продуктов извержения должна быть больше или равной 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 2 (см. рис. 1). Таким образом, в результате выброса комет с планет и спутников в популяции вероятных родительских тел метеороидных роев и, следовательно, метеорных потоков должны присутствовать плохо или вообще пока ненаблюдаемые объекты на орбитах произвольных размеров с прямым и обратным движением. Как следует из приведенного выше анализа, результаты, полученные в Харькове, согласуются именно с таким сценарием.

Список литературы: 1. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с. 2. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.В.* Метеорные явления в аимосфере Земли. М.: Наука, 1967. 260 с. 3. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г.* Метеоры и метеорное вещество. Киев: Наукова думка, 1989. 293 с. 4. *Кащеев Б.Л, Волощук Ю.И, Ткачук А.А. и др.* Метеорная автоматизированная система // Метеорные исследования №4, 1977. С. 11 – 61. 5. *Белькович О.И.* Статистическая теория радиолокации метеоров. Казань: Изд-во КГУ, 1971. 103 с. 6. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л.* Распределение метеорных тел вблизи орбиты Земли. М.: Наука, 1981. 187 с. 7. *Лебединец В.Н.* Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 248 с. 8. *Лебединец В.Н.* Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 272 с. 9. *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. 10. *Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л.* Метеорній 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. 441 – 460. 11. *Волощук Ю.И., Воргуль А.В., Кащеев Б.Л.* Метеорній комплекс вблизи орбиті Земли: спорадический фон, потоки, ассоциации. 3. Источники потоковых и спорадических метеорных тел // Астрон. вестн. 1997. Т.31. № 4. С. 345 – 369. 12. *Opik E.J.* Collision Probabilities with Planets and Distribution of Interplanetary Matter // Proc. Roy. Irish Acad. 1951. V/ A54. №12. P. 165 – 169. 13. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с. 14. *Jewitt D.* From Comets to Asteroids: When Hairy Stars Go Bald. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.185-201. 15. *Menichella M., Paolicchi P., Farinella P.* The Main Belt as a Source of Near-Earth Asteroids. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.133-149. 16. *Babadzhanov P. B.* Is 2329 Orthos a Dead Comet? // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.305-310. 17. *Williams I. P.* The Dynamics of Meteoroid Streams. / J. Stohl, I.P. Williams (eds.) // Meteoroids and their Parent Bodies. Astronomical Inst., Slovac Acad. Sci., Bratislava, 1993. P. 31-40. 18. *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. 19. *Emel'yanenko V.V., Bailey M.E.* Dynamical Evolution of Comets and the Problem of Cometary Fading. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.35-40. 20. *Salitis A.* Origin and Evolution of the Long-Period Comets. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.41-44. 21. *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**. 22. *Brandt J.C., A'hearn M.F., Randall C.E., Schleicher D.G., Shoemaker E.M., Stewart A.I.F.* On the Existence of Small Comets and their Interactions with Planets. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.243-249. 23. *Steel D.I.* The Limitations of NEO-Uniformitarianism. // Earth, Moon, and Planets. 1996. **72**. P.279-292. 24. *Clube S.V.M., Napier W.M.* The microstructure of terrestrial catastrophism. // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1984. **211**, P. 953-968. 25. *Всехсвятский С.К.* Природа и происхождение комет и метеорного вещества.- М.: "Просвещение", 1967. 164 с. 26. *Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I.* The Taurid Complex Asteroids. / J. Stohl, I.P. Williams (eds.) // Meteoroids and their Parent Bodies. Astronomical Inst., Slovac Acad. Sci., Bratislava, 1993. P. 93-96. 27. *Williams I.P.* Meteoroids: Interrelations [illegible] their Parent Bodies. // Abstracts presented at the International Conference on Asteroids, Comets and Meteors. [illegible] 96, COSPAR Colloquium 10, July 8-12, 1996, Versailles, France. P. 102. 28.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 23.10.2001