

## АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ НА КОМПЛЕКСЕ МАРС ХНУРЭ

### Введение

Метеоры наблюдают и изучают в течение столетий, но только в последние полвека стали четко выясняться природа, физические свойства, характеристики орбит и происхождение тех космических тел, которые являются источниками метеоритов. Интерес исследователей к метеорным явлениям связан с несколькими группами научных проблем.

Во-первых, изучение траектории метеоров, процессов свечения и ионизации вещества метеорных тел важно для выяснения их физической природы как вещества из далеких районов Солнечной системы. Во-вторых, оценивая как общее число метеорных тел распределяется по группам с разными массами, скоростями, направлениями, можно не только изучать весь комплекс малых тел Солнечной системы, но еще и создать основу для построения теории происхождения и эволюции метеорного вещества. В-третьих, важной практической задачей является оценка метеорной опасности на различных космических трассах.

Наиболее полное представление о характере распределения метеорного вещества в околоземном и межпланетном космическом пространстве можно получить на основании радиолокационных наблюдений метеоров. При радиолокационных исследованиях метеорных тел информацию о физических и динамических параметрах метеорных тел получают путем обработки сигналов, отраженных от метеорных следов, являющихся результатом взаимодействия метеорных тел с атмосферой Земли.

В данной статье приведен анализ распределений параметров орбит индивидуальных метеоров по результатам радиометеорных исследований в 1972 – 1978 гг. на комплексе МАРС ХНУРЭ [1]. Данный каталог состоит из 157000 орбит индивидуальных метеоров.

### Генетические связи комет, астероидов и метеорных тел в Солнечной системе.

Время жизни большинства метеорных тел не превосходит десяти миллионов лет [2], т.е. несоизмеримо мало по сравнению с возрастом Солнечной системы. Таким образом, метеорное вещество во внутренних областях Солнечной системы должно все время пополняться из каких-то источников. По современным представлениям все малые тела Солнечной системы являются членами одного метеорно-астероидно-кометного комплекса. Вследствие этого изучение пылевой составляющей позволяет исследовать параметры потенциальных родительских тел метеорных потоков – астероидов и комет, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли.

В большинстве работ, посвященных поиску генетических связей между малыми телами Солнечной системы, делается вывод, что основным источником притока метеорного вещества являются долгопериодические и короткопериодические кометы. Отметим здесь лишь [3], в которой утверждается, что 72 % известных метеорных потоков и ассоциаций имеют кометное происхождение.

Авторы [4] для объяснения обнаруженного из радионаблюдений большого числа орбит мелких метеорных тел с большими наклонами  $30^{\circ} < i < 165^{\circ}$ , малыми эксцентриситетами  $e < 0.7$  и малыми размерами  $a < 2$  а.е. предположили, что на больших расстояниях от Солнца существует пылевое облако, в котором частицы движутся по орбитам очень больших размеров с произвольными наклонами. Вследствие эффекта Пойнтинга – Робертсона размеры орбит метеорных тел уменьшаются со временем, и как только данные орбиты оказываются близкими к орбите Юпитера, происходит переброска метеорных тел на орбиты со сравнительно небольшими размерами ( $a \leq 5$  а.е.), большими эксцентриситетами ( $e > 0.7$ ) и малыми

наклонениями ( $i \leq 30^\circ$ ). При дальнейшем уменьшении размеров орбит частицы приближаются к орбите Земли и могут столкнуться с Землей.

В работе [5] кроме активных и «высохших» комет не исключается наличие третьего источника, а именно: источником метеорных роев, возможно, являются некоторые астероиды, орбиты которых сближаются с орбитой Земли NEA. В этой же работе отмечено, что пока не существует удовлетворительной модели, объясняющей, как астероид может порождать и поддерживать (пополнять) метеорный рой.

### **Распределения параметров орбит метеорных тел, зарегистрированных на комплексе МАРС ХНУРЭ**

Оценить вклад астероидов и комет в метеорную составляющую Солнечной системы можно по сходству распределений параметров орбит известных объектов NEOS (астероиды и кометы, орбиты которых сближаются с орбитой Земли) с распределениями параметров орбит зарегистрированных метеорных тел.

Приписывая каждому метеору вес, равный произведению физического, геометрического и астрономического факторов для данной метеорной РЛС  $P_\phi^{-1} P_z^{-1} P_a^{-1}$  [6 – 8], можно перейти от измеренного данной РЛС распределения радиометеоров по различным параметрам к распределению метеорных тел в межпланетном пространстве. На рис. 1 приведены исправленные распределения параметров орбит метеорных тел (геоцентрической скорости  $v_g$ , гелиоцентрической скорости  $v_h$ , эксцентриситета  $e$ , перигелийного расстояния  $q$ , наклонения  $i$ , аргумента перигелия  $\omega$ , гелиоцентрических долготы  $\lambda' - \lambda_a$  и широты  $\beta'$  радианта соответственно) каталога ХНУРЭ. На рис. 2 приведены исправленные распределения параметров орбит потоковых (объем выборки  $N = 96463$ ) и спорадических (объем выборки  $N = 60604$ ) метеорных тел каталога ХНУРЭ. На графиках рис. 1 и 2 по оси ординат откладывается количество орбит в процентах от общего объема выборки  $N$ , по оси абсцисс – параметр, по которому строится распределение.

**Геоцентрическая скорость метеоров.** Распределение (рис. 1, а) имеет два максимума в интервалах скоростей 20 – 40 и 50 – 65 км/с. Первый максимум пологий, второй максимум является глобальным и примерно в три раза больше первого. При этом среднее значение составляет 46,8 км/с, а значение медианы – 52,5 км/с. Исправленное распределение геоцентрических скоростей потоковых (рис. 2, а) метеорных тел похоже на аналогичное распределение на рис. 1, причем вклады метеорных тел со скоростями менее 40 и более 45 км/с практически одинаковы. Подавляющее большинство спорадических (рис. 2, б) метеорных тел имеют скорости, лежащие в узком диапазоне 50 – 70 км/с. Следовательно, большая часть медленных метеорных тел относится к потоковым.

**Гелиоцентрическая скорость метеорных тел.** Распределение (рис. 1, б) гелиоцентрических скоростей одномодальное со средним 32,2 км/с. Подавляющее большинство спорадических (рис. 2, в) метеорных тел концентрируется в диапазоне гелиоцентрических скоростей 28 – 42 км/с, вклад метеорных тел со скоростями  $v_h < 28$  км/с не превышает 15 %. При этом значение среднего составляет 33,1 км/с. Среди потоковых (рис. 2, г) метеорных тел около 30 % имеют скорость меньше 28 км/с. Если воспользоваться приближенной формулой, связывающей значения гелиоцентрической скорости и большой полуоси орбиты, то получим, что по орбитам с большими полуосями  $a < 1$  а.е. движется практически вдвое больше потоковых метеорных тел, чем спорадических.

**Эксцентриситеты орбит метеорных тел.** По виду распределений (рис. 1, в) эксцентриситетов орбит метеорных тел можно судить о происхождении метеорных тел. Распределение эксцентриситетов потоковых (рис. 2, д) метеорных тел имеет два максимума, соответствующие астероидам ( $0.1 < e < 0.3$ ) и короткопериодическим кометам семейства Юпитера ( $0.7 < e < 0.9$ ). Причем, максимумы соизмеримы, следовательно, вклад в метеорный комплекс

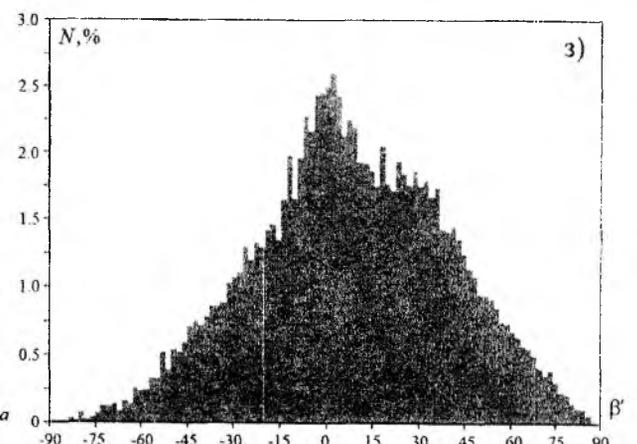
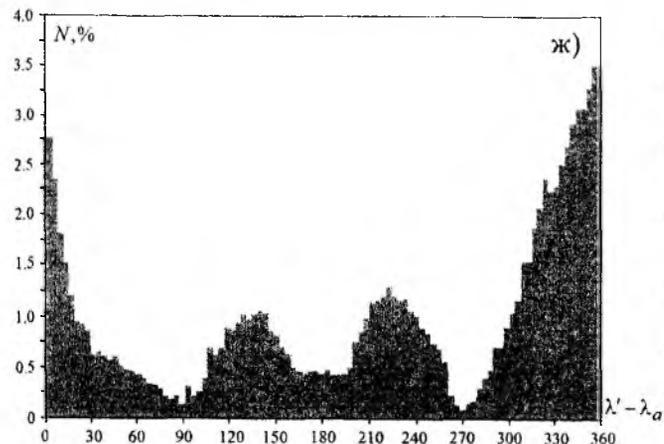
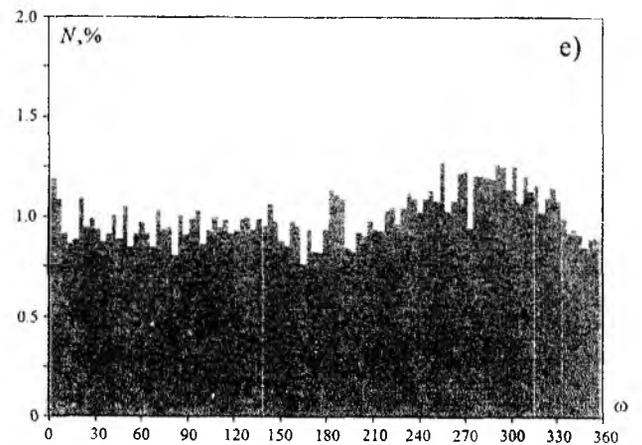
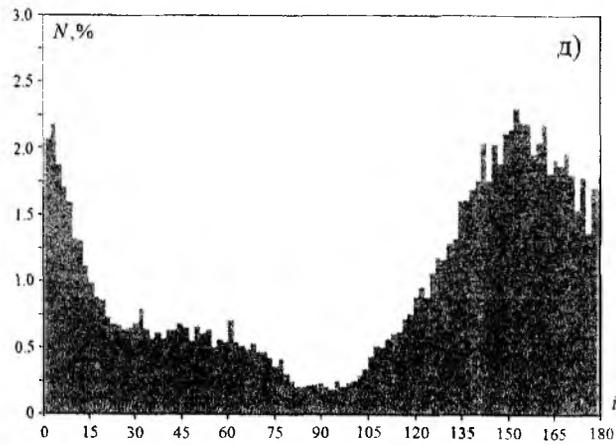
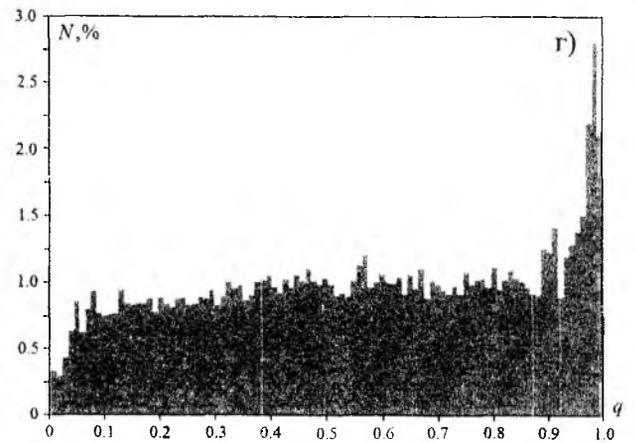
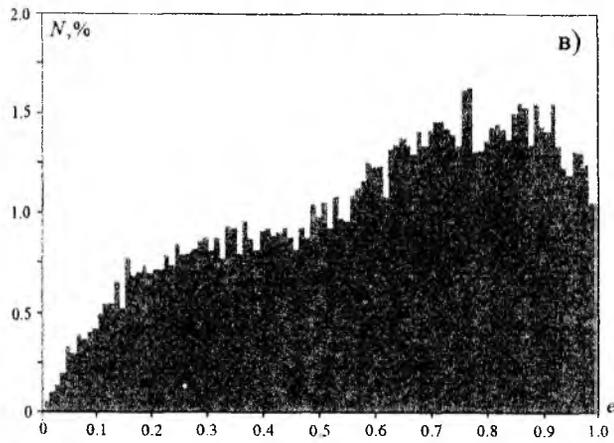
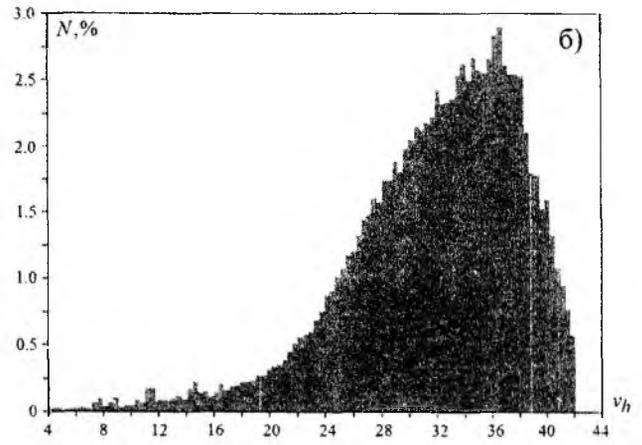
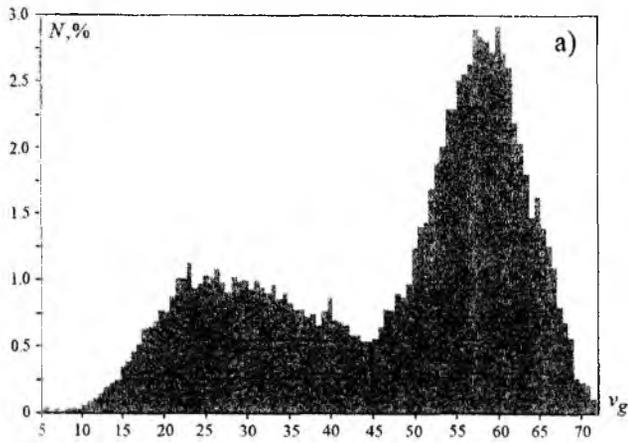


Рис. 1

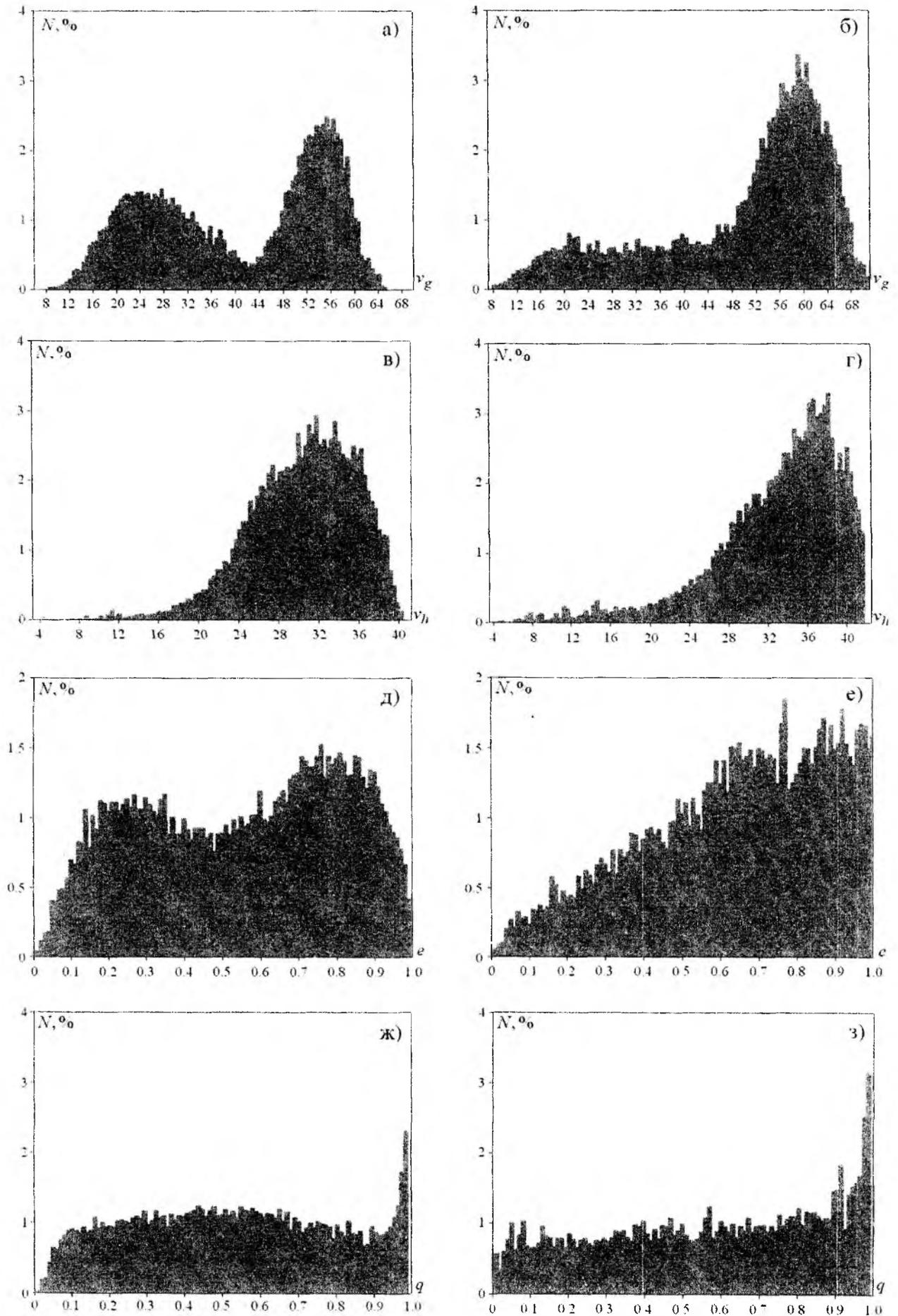


Рис. 2

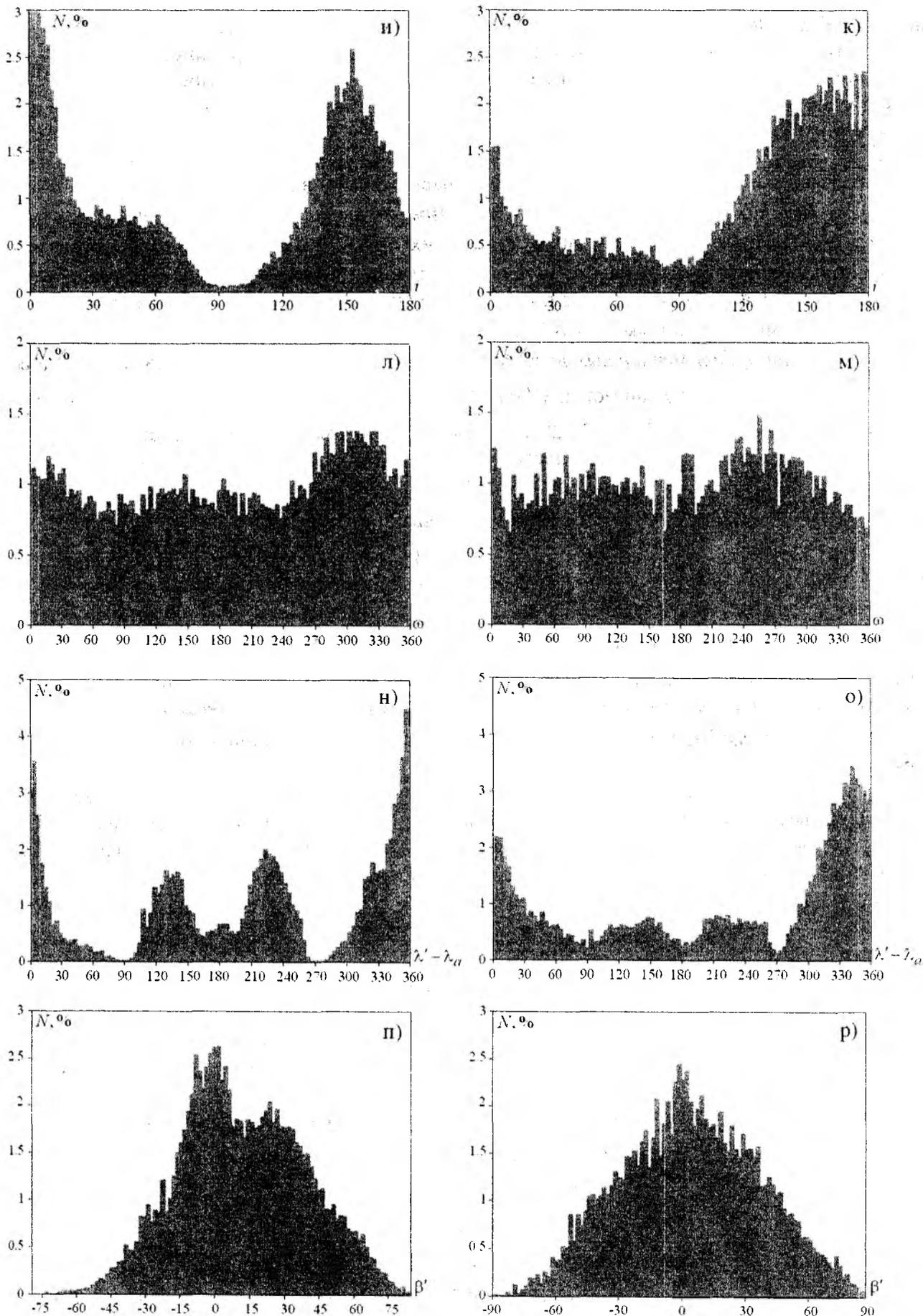


Рис. 2 (Продолжение)

*вблизи орбиты Земли астероидов групп Аполлона, Атона и Амура также соизмерим с вкладом комет.* Распределение спорадических (рис. 2, е) метеорных тел резко отличается от распределения потоковых: во-первых, не имеет каких-либо явных особенностей, кроме линейного тренда, во-вторых, большинство метеорных тел с эксцентриситетами, близкими к единице, относится к спорадическим.

*Перигелийные расстояния орбит метеорных тел.* Распределение (рис. 1, з) перигелийных расстояний метеорных тел является почти равномерным в интервале  $0.05 < q < 0.95$  а.е., максимум распределения при  $q > 0.95$  а.е. и минимум при  $q < 0.05$  а.е. Распределения параметра  $q$  для потоковых (рис. 2, ж) и спорадических (рис. 2, з) метеорных тел по форме мало отличаются друг от друга. Отметим лишь преобладание потоковых метеорных тел в диапазоне  $0.1 < q < 0.7$  а.е. и значительное преобладание спорадических метеорных тел на орбитах с перигелийными расстояниями  $q < 0.1$  а.е.

*Наклонения орбит метеорных тел.* Распределение (рис. 2, е) наклонений имеет два соизмеримых максимума в диапазонах  $0^0 < i < 20^0$  и  $135^0 < i < 170^0$ . При этом значения среднего и медианы равны  $105.3^0$  и  $131.2^0$  соответственно, и только 36 % метеорных тел имеют орбиты с прямым движением. Распределение метеорных тел по наклонениям орбит для потоковых (рис. 2, и) метеорных тел имеет два максимума, соответствующие *NEOS-астероидам* ( $i < 20^0$ , 25 % орбит) и *NEOS-кометам* ( $140^0 < i < 170^0$ , 35 % орбит). Отметим также, что среднее и медиана равны  $91.1^0$  и  $116.3^0$  соответственно, и 47 % метеорных тел имеют орбиты с прямым движением. Распределение спорадических (рис. 2, к) метеорных тел также имеет два максимума, но резко отличается от распределения потоковых. Во-первых, в диапазоне  $0^0 < i < 90^0$  график существенно сгладился: практически в два раза уменьшилось значение максимума при  $i < 20^0$ , а также практически исчез минимум при  $i = 90^0$ . Во-вторых, значительно увеличилось количество орбит с обратным движением. Среднее и медиана равны  $115.4^0$  и  $135.3^0$  соответственно, и лишь 28 % метеорных тел имеют орбиты с прямым движением.

*Аргумент перигелия орбит метеорных тел.* Распределение (рис. 1, е) практически равномерно во всем диапазоне возможных значений  $\omega$ . Распределения по аргументам перигелия для потоковых (рис. 2, л) и спорадических (рис. 2, м) метеорных тел также близки к равномерному. Отметим лишь незначительный максимум в распределении для потоковых метеорных тел в диапазоне значений  $270^0 < \omega < 330^0$ .

*Гелиоцентрические долготы.* Распределение (рис. 1, ж) имеет три максимума: апексный, солнечный и антисолнечный. причем острым и глобальным является апексный максимум. При этом данная картина характерна как для потоковых (рис. 2, н), так и для спорадических (рис. 2, о) метеорных тел. Также отметим, что для потоковых метеорных тел достаточно четко проявляется антиапексный максимум. В распределении спорадических метеорных тел отсутствует антиапексный максимум, ослаблены солнечный и антисолнечный максимумы.

*Гелиоцентрические широты.* На графике распределения (рис. 1, з) гелиоцентрических широт наблюдается один максимум в окрестности  $\beta' = 0^0$ . Отметим также, что 62 % орбит имеют широту радианта  $\beta' > 0^0$ . Распределения гелиоцентрических широт радианта для потоковых (рис. 2, п) и спорадических (рис. 2, р) метеорных тел близки к одномодальному в окрестности  $\beta' = 0^0$ . Отметим лишь, что распределение для спорадических метеорных тел имеет практически треугольную форму, в то время как для потоковых метеорных тел в диапазоне  $15^0 \leq \beta' \leq 30^0$  наблюдается пологий участок.

На рис. 3 приведены двумерные распределения элементов орбит метеорных тел каталога ХНУРЭ. Обозначения на рис. 3 соответствуют таковым на рис. 1.

*Распределение геоцентрических скоростей и наклонов орбит.* Из анализа этого распределения (рис. 3, а) можно сделать следующие выводы: в распределении четко проявляются два кластера: в первом находятся медленные метеорные тела ( $v_g < 40$  км/с) с прямым движением, во втором – быстрые метеорные тела ( $v_g > 40$  км/с). Можно утверждать, что первый кластер включает метеорные тела, родительскими телами которых являются и астероиды, и ядра комет, второй кластер включает метеорные тела только кометного происхождения.

*Распределение гелиоцентрических скоростей и наклонов орбит.* Как следует из анализа этого распределения (рис. 3, б), его можно разделить на три кластера: в первом находятся метеорные тела с наклонами орбит  $0^0 < i < 20^0$  и сконцентрированные в диапазоне скоростей 28–40 км/с. Во втором кластере находятся метеорные тела с прямым движением ( $i > 20^0$ ), для которых наблюдается практически равномерное распределение гелиоцентрических скоростей в диапазоне 16–40 км/с. В третьем кластере находятся метеорные тела с обратным движением, для которых наблюдается линейный рост количества орбит с одновременным ростом  $i$  и  $v_h$  до максимума в окрестности  $v_h = 36$  км/с и  $i = 160^0$ .

*Распределение эксцентриситетов и наклонов орбит.* Распределение (рис. 3, в) можно разделить на три кластера: в первом находятся метеорные тела с наклонами орбит  $0^0 < i < 20^0$  и сконцентрированные в диапазоне  $0.6 < e < 1.0$ . Во втором кластере находятся метеорные тела с прямым движением ( $i > 20^0$ ), для которых наблюдается практически равномерное распределение во всем диапазоне возможных значений эксцентриситета. В третьем кластере находятся метеорные тела с обратным движением, для которых наблюдается линейный рост количества орбит с ростом наклона. Из анализа графика можно сделать вывод: основная часть метеорных тел на круговых и близких к круговым орбитам имеет обратное движение, а большинство метеорных тел с высокоэллиптическими орбитами имеет наклонение  $i < 20^0$ .

*Распределение перигелийных расстояний и наклонов орбит.* Распределение (рис. 3, г) можно разделить на три кластера: в первом находятся метеорные тела с наклонами орбит  $0^0 < i < 20^0$  и практически равномерным распределением в диапазоне  $0.2 < q < 0.8$  а.е. Во втором кластере находятся метеорные тела с прямым движением ( $i > 20^0$ ), для которых наблюдается два максимума при  $q < 0.1$  а.е и  $q > 0.9$  а.е. и практически равномерное распределение в оставшемся диапазоне возможных значений перигелийных расстояний. В третьем кластере находятся метеорные тела с обратным движением, для которых наблюдается линейный рост количества орбит с ростом наклона до максимума в окрестности  $q = 0.95$  а.е. и  $i = 160^0$ . Из анализа графика можно сделать вывод: основная часть метеорных тел с перигелийными расстояниями  $q < 0.1$  а.е. имеет прямое движение, в то время как большинство метеорных тел с перигелийными расстояниями  $q > 0.9$  а.е. имеют обратное движение.

*Распределение больших полуосей и наклонов орбит.* Распределение (рис. 3, д) можно разделить на три кластера: в первом находятся метеорные тела с наклонами орбит  $0^0 < i < 20^0$  и сконцентрированные в диапазоне  $0.2 < a^{-1} < 0.8$  а.е.<sup>-1</sup> ( $1.25 < a < 5$  а.е.). Во втором кластере находятся метеорные тела с прямым движением ( $i > 20^0$ ), для которых наблюдается практически равномерное распределение количества объектов во всем диапазоне возможных значений  $a$  и уменьшение количества объектов с ростом наклона.

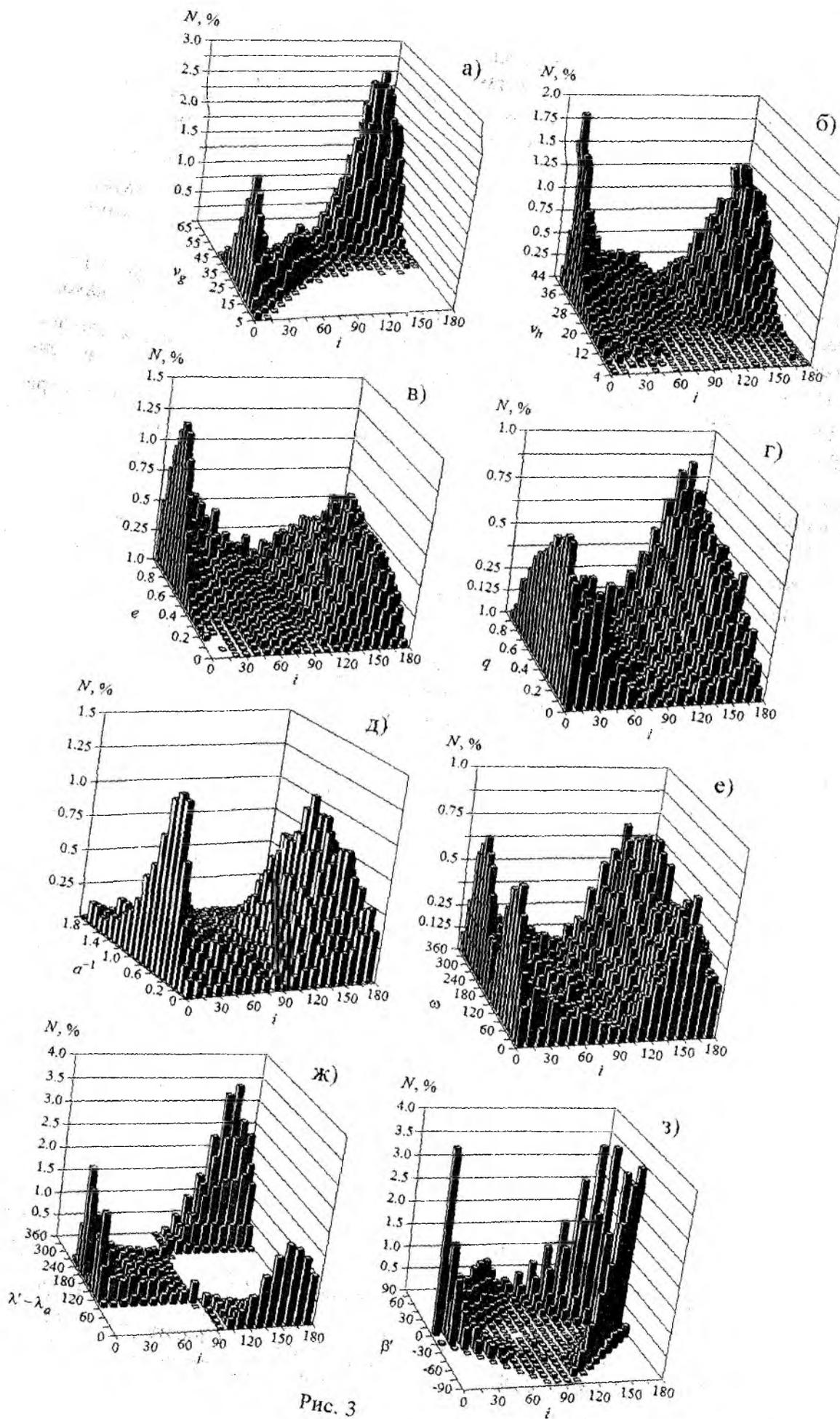


Рис. 3

В третьем кластере находятся метеорные тела с обратным движением, для которых наблюдается линейный рост количества орбит с ростом наклонения до максимума в окрестности  $a^{-1} = 0.85 \text{ а.е.}^{-1}$  ( $a = 1.18 \text{ а.е.}$ ) и  $i = 150^{\circ}$  и резкий спад при больших полуосях  $a^{-1} > 1.4 \text{ а.е.}^{-1}$  ( $a < 0.71 \text{ а.е.}$ ) во всем диапазоне наклонений ( $i > 90^{\circ}$ ). Также из анализа графика можно сделать вывод: большинство метеорных тел с большими полуосями  $a < 0.625 \text{ а.е.}$  ( $a > 1.6 \text{ а.е.}^{-1}$ ) имеет прямое движение, а большинство метеорных тел с большими полуосями  $a > 4 \text{ а.е.}$  ( $a^{-1} < 0.25 \text{ а.е.}^{-1}$ ) имеет обратное движение.

*Распределение аргументов перигелия и наклонений орбит.* Распределение (рис. 3, е) можно разделить на два кластера: в первом находятся метеорные тела с наклонениями орбит  $0^{\circ} < i < 15^{\circ}$  и двуимодальным распределением по  $\omega$  в окрестностях  $\omega = 90^{\circ}$  и  $\omega = 270^{\circ}$ . Во втором кластере находятся метеорные тела с прямым движением ( $i > 20^{\circ}$ ), для которых наблюдается плавное уменьшение количества орбит с ростом наклонения во всем диапазоне возможных значений  $\omega$ . В третьем кластере находятся метеорные тела с обратным движением, для которых наблюдается рост количества орбит с ростом наклонения до двух максимумов в окрестностях  $\omega = 60^{\circ}$ ,  $i = 165^{\circ}$  и  $\omega = 330^{\circ}$ ,  $i = 150^{\circ}$ .

*Распределение гелиоцентрических долгот и наклонений орбит.* Распределение (рис. 3, ж) можно разбить на два кластера: метеорные тела с прямым движением имеют долготы в диапазоне  $90^{\circ} < \lambda' - \lambda_a < 270^{\circ}$ , метеорные тела с обратным движением сконцентрированы вблизи апексного максимума.

*Распределение широт радианта и наклонений орбит.* В рассматриваемых распределениях (рис. 3, з) можно выделить три максимума: в окрестности  $\beta' = 0^{\circ}$  основной вклад вносят метеорные тела с наклонениями  $i < 15^{\circ}$ , в окрестностях  $\beta' = -15^{\circ}$  и  $\beta' = 15^{\circ}$  основной вклад вносят метеорные тела с обратным движением.

## Выводы

Анализ распределений параметров орбит индивидуальных метеоров каталога ХНУРЭ показал, что для большинства потоковых метеорных тел родительскими телами можно считать NEOS астероиды. Таким образом, изучая метеорные потоки, возможными родительскими телами которых являются астероиды, можно получить новые данные об астероидной составляющей Солнечной системы.

**Список литературы:** 1. Кащеев, Б.Л., Волощук, Ю.И., Ткачук, А.А., Дудник, Б.С., Дьяков, А.А., Жуков, В.В., Нечитайленко, В.А. Метеорная автоматизированная радиолокационная система // Метеорные исследования. – № 4. – М.: Сов. радио, 1977. – С. 11-61. 2. Андреев, Г.В., Бабаджанов, П.Б. Влияние гравитационного поля Земли на структурные характеристики метеорных потоков // Докл. АН ТаджССР. – 1981. – 24, №11. – С. 661 – 667. 3. Бабаджанов, П.Б., Кохирова, Г.И. Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли. – Душанбе: Дониш, 2009. – 185 с. 4. Davies, J. G. and Gill, J. Radio Echo Measurements of the Orbits of Faint Sporadic Meteors // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. – 1969. – 121. – 437-462. 5. Jopec, T. J., Valsecchi, G. B., Froeschle, Cl. Asteroid Meteoroid Streams // Asteroids III. – 2002. – P. 645 -652. 6. Горелов, Д.Ю. Уточнение методики учета физического фактора замечаемости при построении истинных распределений параметров радиометеоров / Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 149. – С. 62-68. 7. Горелов, Д.Ю. Оценка геометрического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров / Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. // Прикладная радиоэлектроника. – 2006. – Т.5, №4. – С. 519-527. 8. Горелов, Д.Ю. Новый метод расчета астрономического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров / Горелов Д.Ю., Волощук Ю.И. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 151. – С. 246-252.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 23.05.2012