



ISSN 1607–2855

Том 7 • № 2 • 2011 С. 252 – 257

УДК 523.64; 523.62

Метеорные частицы с неявно выраженными гиперболическими орбитами

А.К. Маркина, Л.Я. Скобликова

НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета

Исследуется возможность обнаружения межзвездных метеороидов с неявно выраженными гиперболическими орбитами. Показано, что основанием для предположения об их межзвездном происхождении является распределение гиперболических орбит метеорных частиц по элонгации межзвездного радианта от апекса Солнца с учетом выявленных закономерностей в условиях сближения их с Землей.

МЕТЕОРНІ ЧАСТИНКИ ІЗ НЕЯВНО ВИРАЖЕНИМИ ГІПЕРБОЛІЧНИМИ ОРБІТАМИ, Маркіна А.К. Скоблікова Л.Я. — Досліджується можливість виявлення міжзоряних метеороїдів із неявно вираженими гіперболічними орбітами. Показано, що підставою для припущення про їх міжзоряне походження є розподіл гіперболічних орбіт метеорних частинок за елонгацією міжзоряного радіанта від апекса Сонця з врахуванням виявлених закономірностей в умовах їхнього зближення із Землею.

METEORIC PARTICLES WITH IMPLICIT HYPERBOLIC ORBITS, by Markina A.K., Skoblikova L.Ya. — Opportunities for detecting interstellar meteoroids with implicit hyperbolic orbits are explored. It is indicated that the idea of their interstellar origin is based on the distribution of hyperbolic orbits of meteoric particles according to elongation of interstellar radiant from solar apex with a due account of conformity in conditions for their close approach to the Earth.

Ключевые слова: орбиты метеорных частиц.

Key words: orbits of meteoric particles.

1. ВВЕДЕНИЕ

В каталогах метеорных орбит, полученных на основе фотографических, телевизионных и радиолокационных наблюдений, содержится примерно от 5 до 10% и более гиперболических орбит метеоров (гиперболические метеоры). Дискуссия о причинах появления метеорных частиц, имеющих непериодическое движение, возникла в начале 50-х годов после вычисления их скоростей по фотографическим наблюдениям. Такими причинами могут быть: 1) низкая точность измерения их скоростей, из-за наличие систематических и случайных погрешностей наблюдений; 2) процессы, происходящие внутри Солнечной системы: взрывы и дробления ядер комет, миникомет, астероидов, гравитационные возмущения (в основном от Юпитера), в результате чего эллиптическая орбита метеора преобразовывается в гиперболическую внутри Солнечной системы; 3) проникновение в атмосферу Земли частиц межзвездной пыли (межзвездные метеоры).

Гипотезу о межзвездной природе метеорных частиц, имеющих гиперболические орбиты с большими эксцентриситетами, поддерживал С.К. Всехсвятский [2]. Он считал, что гиперболические метеоры возникают в результате эруптивных процессов в Галактике. Проблема гиперболических метеоров посвящен ряд публикаций [4, 5, 11, 14]. Ожидаемые распределения элементов орбит межзвездных частиц в Солнечной системе исследовались в работах [1, 6, 15]. Актуальность данной проблемы не уменьшилась и в настоящее время. Доказательство существования межзвездных метеорных частиц может изменить взгляды на происхождение и эволюцию метеорной материи.

В работах [8, 9] показано, что реально существуют метеороиды, гелиоцентрическая скорость которых на 5–10 км/с и более превышает параболическую на гелиоцентрическом расстоянии $r = 1$ а.е. (эксцесс E_h) и, что они не могли образоваться в результате процессов, происходящих внутри Солнечной системы, а проникли в атмосферу Земли из межзвездного пространства. Их количество составляет около 10–20% от гиперболических метеорных орбит, а это менее 1% от всех орбит (их около 25 000), содержащихся в каталогах, т.е. наблюдение межзвездной метеорной частицы — явление достаточно редкое.

Предполагается, что и среди неявно выраженных гиперболических орбит метеорных частиц (эксцесс $E_h < 2$ км/с) есть истинные гиперболические орбиты межзвездных метеороидов. Трудность состоит в их выделении из гиперболических орбит, определенных ошибочно и орбит метеорных частиц, получивших гиперболическую скорость внутри Солнечной системы.

Целью исследования в данной работе и есть выявление особенностей, характерных для межзвездных метеоров, в наблюдаемых и вычисленных, согласно вероятности столкновения межзвездной метеорной

частицы с Землей, распределения орбитальных элементов и параметров межзвездного движения, а также в условиях сближения с Землей метеорных частиц с неявно выраженными гиперболическими орбитами.

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ОРБИТ МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ

В каталогах метеорных орбит DMS (Dutch Meteor Society) Photographic- and Video- Database полученных с 1982 по 2000 годы (Hans Betlem, Marc de Lignie, DMS) и MSSWG (The Meteor Science Seminar Working Group) Meteoroids orbits (multi-station) from Yoshihiko Shigeno (фотографические и TV наблюдения с 1983 по 2003 годы) (Yoshihiko Shigeno, MSSWG) содержится соответственно почти 3% и 2% неявно выраженных гиперболических орбит спорадических метеорных частиц. Для 80% из них эксцесс $E_h < 2$ км/с, т.е. находится в пределах среднеквадратичной погрешности измерения скорости метеоров потока Персеид [8]. Исследовались наблюдаемые распределения (заштрихованные гистограммы) этих гиперболических метеоров и соответствующие нормированные распределения (незаштрихованные гистограммы), вычисленные, согласно полной вероятности столкновения межзвездной метеорной частицы с Землей, по элементам орбит и вычисленным параметрам, определяющим движение частицы в межзвездном пространстве.

Для применения понятия вероятности столкновения с Землей метеорной частицы, движущейся по гиперболической орбите, в работе [9] предложена модель, отличная от модели Эпика. Отличие состоит в том, что фиксируется аргумент перигелия ω , чем учитывается то обстоятельство, что частица на гиперболической орбите имеет только один шанс встретиться с Землей в одном из узлов орбиты, а для эллиптических орбит предполагается, что с вероятностью равной единице рано или поздно такое сближение произойдет.

Полная вероятность проникновения межзвездной метеорной частицы в атмосферу Земли $P_{hh} = P_h \cdot Q_h$, где P_h — вероятность попадания метеорной частицы, движущейся на гиперболической орбите, в земной шар:

$$P_h = \frac{R^2}{\pi \sin i} \left[\frac{3 + \frac{1}{|a|} - 2\sqrt{p} \cos i}{2 + \frac{1}{|a|} - p} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

Q_h — вероятность необходимого сближения орбит тела и Земли:

$$Q_h = 0.0054p (e^2 - (p-1)^2)^{-1/2}. \quad (2)$$

Здесь $p = |a|(e^2 - 1)$, $R = 4.3 \cdot 10^{-5}$ а.е. Уравнения для P_h и Q_h правильны для $q < 0.98$ а.е. и $i > 2^\circ$ [4].

В наблюдаемом распределении исследуемых метеоров по перигелийному расстоянию q (рис. 1а) отчетливо выделяется максимум при $q = 0.9 \div 1.0$ а.е., что соответствует максимуму вероятности регистрации метеоров, и второй менее заметный максимум при $q = 0.3 \div 0.4$ а.е. Учет статистического веса каждого наблюдения смещает максимум распределения на значения перигелийного расстояния от 0.1 до 0.4 а.е. и значительно уменьшается количество орбит с перигелийными расстояниями $q = 0.9 \div 1.0$ а.е., а также в распределении метеоров по эксцентриситету e приводит к увеличению числа метеоров в интервале $e = 1.00 \div 1.02$ с 22% до 38% (рис. 1б). Такие распределения по q и e свойственны межзвездным метеорным частицам [3]. Распределение метеоров по наклону орбиты i (рис. 1в) отличается от аналогичного распределения спорадических метеоров с короткопериодическими орбитами. Наблюдаемое распределение метеоров имеет максимум при $i > 120^\circ$ и совсем мало орбит метеоров с прямым движением. Учет статистического веса каждого наблюдения увеличивает симметричность этого распределения относительно $i = 90^\circ$.

Для сравнения вычислены соответствующие распределения (кроме эксцентриситета) метеоров с явно выраженными гиперболическими орбитами ($E_h > 10$ км/с), взятых из каталога транспланетных радиантов [7], (рис. 2). Как видно, нормированные распределения метеоров для обоих типов орбит по q и i , имеют аналогичный характер и совпадают с выводами работы [9] о межзвездном происхождении метеорных частиц с явно выраженными гиперболическими орбитами.

Параметрами, определяющими движение частицы в межзвездном пространстве в гелиоцентрической эклиптической системе координат являются скорость межзвездной частицы при $r \rightarrow \infty$ — V_∞ , гелиоцентрические эклиптические координаты межзвездных радиантов λ_r и β_r , которые вычислялись при помощи

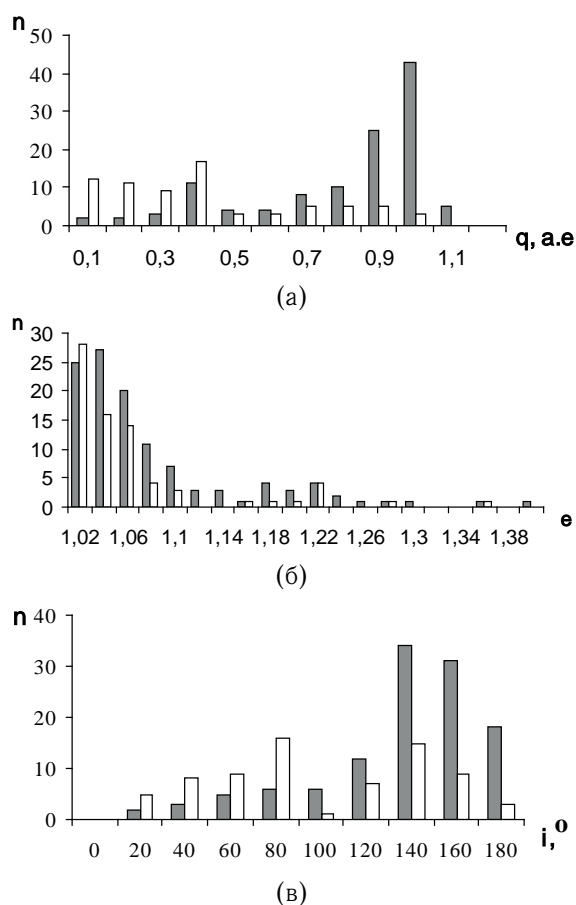


Рис. 1. Распределение гиперболических орбит метеоров по перигелийному расстоянию (а), эксцентриситету (б) и наклонению орбиты (в).

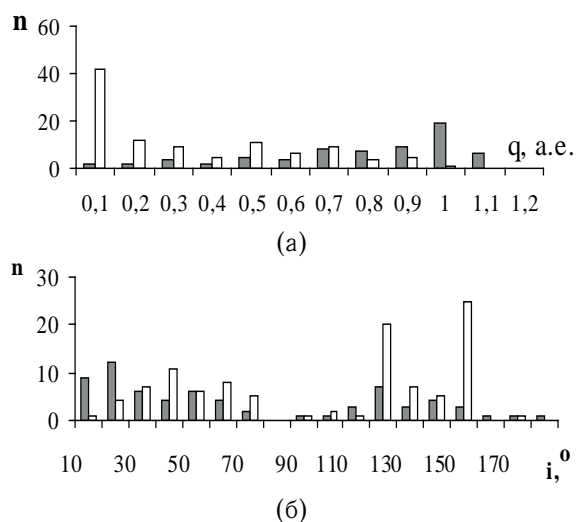


Рис. 2. Распределение гиперболических орбит метеоров по перигелийному расстоянию (а) и наклонению орбит (б) при $E_h > 10$ км/с.

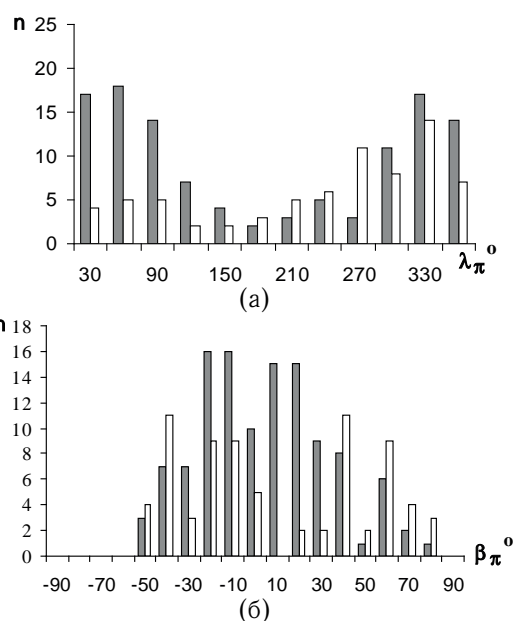


Рис. 3. Распределение по эклиптическим долготе λ_π (а) и широте β_π (б) перигелиев гиперболических метеорных орбит

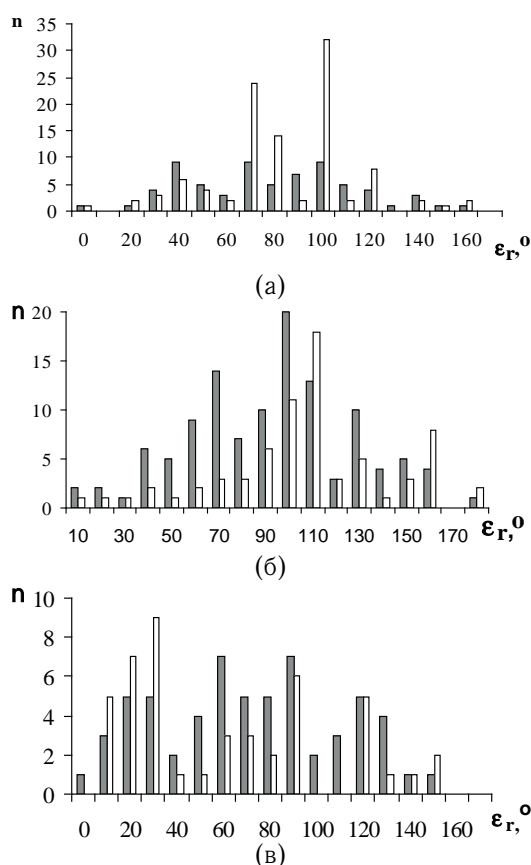


Рис. 4. Распределение гиперболических орбит метеорных частиц по элонгации межзвездного радианта от апекса Солнца с $E_h > 10$ км/с (а), по каталогу [MSSWG] (б) и работе [13] (в).

системы уравнений:

$$\begin{aligned} V_{\infty} \cos \beta_r \cos \lambda_r &= -\frac{k}{e\sqrt{-a}} \left(P_x + Q_x \sqrt{e^2 - 1} \right), \\ V_{\infty} \cos \beta_r \sin \lambda_r &= -\frac{k}{e\sqrt{-a}} \left(P_y + Q_y \sqrt{e^2 - 1} \right), \\ V_{\infty} \sin \beta_r &= -\frac{k}{e\sqrt{-a}} \left(P_z + Q_z \sqrt{e^2 - 1} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_x, P_y, P_z, Q_x, Q_y, Q_z$ — эклиптические гелиоцентрические координаты единичных векторов, направленных в перигелий и перпендикулярно к нему в плоскости орбиты, которые определяются по элементам орбиты: аргументу перигелия ω , долготе восходящего узла Ω , наклонению орбиты i , эксцентриситету e и большой полуоси a , известных из наблюдений. Здесь величина k определяет скорость движения Земли по своей орбите и равна 29.76 км/с, т.е. межзвездная скорость метеорной частицы будет измеряться в км/с. Параметрами межзвездного движения являются также расстояние асимптоты гиперболы d от начала отсчета $d = |a|\sqrt{e^2 - 1}$, угол наклона плоскости, проведенной через начало отсчета и асимптоту гиперболы, который совпадает с наклонением орбиты i .

Наблюдаемое распределение числа гиперболических метеоров по величине межзвездной скорости имеет максимум при $V_{\infty} = 6 \div 10$ км/с. Учет статистического веса увеличивает число орбит со значениями межзвездной скорости от 2 до 6 км/с. Расстояния асимптот от начала отсчета для максимального числа неявно выраженных гиперболических орбит метеорных частиц находятся в интервале $d = 4 \div 10$ а.е. В нормированном распределении максимум смещается на значения $d = 2 \div 6$ а.е.

Представляет интерес распределение исследуемых метеорных частиц по углу между асимптотой гиперболы и осью абсцисс $f = 180^\circ - \arccos(-1/e)$. В наблюдаемом распределении имеется четкий максимум при значениях угла от 10° до 20° , затем резкое уменьшение числа орбит после 40° . С учетом статистического веса распределение имеет более равномерный ход при значениях угла от 0° до 40° .

Вычислялись эклиптические долгота и широта перигелиев орбит исследуемых метеоров $\lambda_{\pi}, \beta_{\pi}$:

$$\begin{aligned} \beta_{\pi} &= \arcsin(\sin \omega \sin i), \\ \lambda_{\pi} &= \Omega + \arctg(\tg \omega \cos i), \\ \lambda_{\pi} &= \Omega + \arccos \left(\frac{\cos \omega}{\cos \beta_{\pi}} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Распределение по эклиптической долготе перигелия неравномерно (рис. 3а), заметна концентрация орбит около значений $\lambda_{\pi} \leq 90^\circ$ и $\lambda_{\pi} \geq 270^\circ$. Учет статистического веса увеличивает число метеоров вблизи апекса Солнца ($\lambda_a = 269^\circ$). Этим оно отличается от аналогичного практически равномерного распределения короткопериодических орбит спорадических метеоров из каталога [16]. Наблюдаемое распределение метеоров по эклиптической широте перигелия β_{π} почти симметрично относительно $\beta_{\pi} = 0^\circ$, а нормированное — асимметрично, с явным увеличением числа орбит в интервале $\beta_{\pi} = 40^\circ \div 60^\circ$ (рис. 3б). Полученный результат не противоречит основному выводу в работе [5]: неравномерность в распределении метеорных частиц с гиперболическими орбитами по эклиптической долготе перигелия и асимметричность распределения по эклиптической широте являются аргументами существования среди них метеорных частиц межзвездного происхождения.

В нормированных распределениях исследуемых орбит метеорных частиц и явно выраженных гиперболических орбит с $E_x > 10$ км/с по аргументу перигелия ω наблюдается четкий минимум при $\omega = 150^\circ \div 210^\circ$, отсутствуют орбиты с $\omega \cong 0^\circ$. Аналогичное наблюдаемое распределение отобранных эллиптических орбит спорадических метеоров из каталога [16] резко отличается от предыдущих, а именно — максимальное число орбит имеют значение $\omega = 150^\circ \div 210^\circ$. Нормированное распределение по долготе восходящего узла Ω для исследуемых и явно выраженных гиперболических орбит метеоров имеет четкий минимум при $\Omega = 150^\circ \div 210^\circ$ и практически отсутствуют орбиты с $\Omega > 270^\circ$. Наблюдаемое распределение по долготе восходящего узла отобранных короткопериодических орбит имеет более равномерный ход. Полученные результаты согласуются с выводами в работе [12].

Таким образом, в приведенных выше распределениях неявно выраженных гиперболических орбит метеорных частиц выявлены особенности, характерные для межзвездных метеорных частиц.

В то же время из распределения, вычисленного с учетом статистического веса, по элонгации межзвездных радиантов от апекса Солнца ε_r , которая определялась по эклиптическим гелиоцентрическим координатам вектора межзвездной скорости метеорной частицы (рис. 4б), видно, что концентрация межзвездных радиантов для исследуемых метеорных частиц больше в антиапексной по отношению к Солнцу полусфере (72%) в отличие от явно выраженных гиперболических метеоров с $E_x > 5$ км/с [9] и $E_x > 10$ км/с (рис. 4а). Для них межзвездные радианты концентрируются вблизи апекса Солнца, и это является одним из аргументов, подтверждающих их межзвездное происхождение [1].

Таблица 1. Условия встречи метеорных частиц с гиперболическими орбитами с Землей. Здесь M_1 — частицы, не пересекающие плоскость эклиптики, M_2 — частицы, пересекающие ее в нисходящем узле орбиты, M_3 — пересекающие до перигелия орбиты, M_4 — при $\varepsilon_2 < 90^\circ$, M_5 — пересекающие в нисходящем узле, но до перигелия с $\varepsilon_2 < 90^\circ$, M_6 — пересекающие в восходящем узле до перигелия с $\varepsilon_2 < 90^\circ$, M_7 — при $\varepsilon_2 < 90^\circ$ (исправленное).

Тип частиц M_i	Video $E_x < 2$ км/с (%)	Foto $E_x > 2$ км/с (%)	Foto $E_x < 5$ км/с (%)	Tele $E_x > 5$ км/с (%)	Radio $E_x > 2$ км/с (%)	$E_x > 5$ км/с (%)
M_1	23	10	69	69	50	64
M_2	63	69	73	81	70	79
M_3	77	81	83	47	68	70
M_4	48	64	50	56	64	55
M_5	55	66	55	31	46	50
M_6	71	50	78	67	65	82
M_7	52	59	56	53	47	58

В связи с этим, для оценки достоверности результатов проведенного исследования были отображены аналогичные спорадические гиперболические орбиты метеорных частиц из каталога [13], полученные наиболее точным фотографическим методом. Для них также $E_x < 2$ км/с, 64% имеют массу $m = 0 \div 4 \cdot 10^{-3}$ г. Из наблюдаемых распределений этих метеоров и вычисленных с учетом статистического веса по элонгации межзвездного радианта от апекса Солнца ε_r видно, что межзвездные радианты концентрируются вблизи апекса (64% и 67% соответственно) (рис. 4в), т.е. также, как и для метеоров с $E_x > 5$ км/с и $E_x > 10$ км/с.

Учитывая высокую точность фотографических наблюдений можно уверенно сказать, что большая часть метеорных частиц с неявно выраженными гиперболическими орбитами пришла из межзвездного пространства, тогда как в каталогах [16, 17] их меньше — преобладают орбиты метеорных частиц либо ошибочные, либо такие, которые образовались в результате процессов, происходящих внутри Солнечной системы.

Таким образом, можно утверждать, что только распределение неявно выраженных гиперболических метеорных орбит по элонгации межзвездных радиантов от апекса Солнца, вычисленного с учетом вероятности столкновения межзвездной метеорной частицы с Землей, наиболее реально отражает точность определения этих орбит.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ВСТРЕЧИ МЕТЕОРНЫХ ЧАСТИЦ С ГИПЕРБОЛИЧЕСКИМИ ОРБИТАМИ С ЗЕМЛЕЙ

Сближение метеорных частиц с гиперболическими орбитами с орбитой Земли происходит при таких значениях аргумента перигелия орбиты ω , при которых гелиоцентрическое расстояние r_1 или r_2 в восходящем или нисходящем узлах примет значение близкое к единице:

$$r_{1,2} = \frac{q(1+e)}{1 \pm e \cos \omega} \approx 1. \quad (5)$$

Радиальная скорость метеорной частицы в момент встречи с Землей \dot{r} (независимо от того, в каком узле — восходящем или нисходящем) определяет ее положение на орбите.

$$\dot{r}_{1,2} = \mp 29.76 \frac{e \sin \omega}{q(1+e)}. \quad (6)$$

Положительное \dot{r} означает, что встреча с Землей произошла после прохождения частицы через перигелий, отрицательное — до прохождения через перигелий. В табл. 1 представлены результаты исследования условий встречи исследуемых (Video) и, полученных фотографическим методом [13] — (Foto), метеорных частиц с неявно выраженными гиперболическими орбитами ($E_x < 2$ км/с) и их сравнение с $E_x > 0$ км/с из каталога транспланетных радиантов [7], полученных из фотографических (Foto), телевизионных (Tele) и радиолокационных (Radio) наблюдений.

Как видно из табл. 1: 1) метеорные частицы с $E_x > 5$ км/с и $E_x > 10$ км/с значительно чаще, чем исследуемые, не пересекают плоскость эклиптики, т.е. такое событие менее вероятно; 2) большинство исследуемых метеорных частиц так же, как и частицы с явно выраженными гиперболическими орбитами, встречаются с Землей в нисходящем узле своих орбит; 3) большинство метеорных частиц с $E_x > 5$ км/с и $E_x > 10$ км/с и частиц с неявно выраженными гиперболическими орбитами встречаются с Землей до прохождения перигелия своих орбит; 4) большинство метеорных частиц с явно выраженными гиперболическими орбитами и частиц с $E_x < 2$ км/с (Foto), кроме исследуемых (объяснение в предыдущем разделе), летят из направления на апекс Солнца; 5) метеорные частицы с неявно выраженными гиперболическими орбитами и с $E_x > 5$ км/с, $E_x > 10$ км/с разделяются на две группы. Первая группа представляет собой метеорные частицы, встречающиеся с Землей вблизи нисходящего узла до прохождения перигелия своей орбиты с элонгацией межзвездного радианта от апекса Солнца $\varepsilon_r < 90^\circ$. Это является основанием для

предположения, что эти метеороиды имеют межзвездное происхождение. Вторая группа метеоров пересекает орбиту Земли в восходящем узле до прохождения перигелия своей орбиты и имеет элонгацию межзвездного радианта от апекса Солнца $\varepsilon_r > 90^\circ$ и это позволяет предположить, что эти метеороиды образованы внутри Солнечной системы. В последней строке табл. 1 представлено исправленное количество метеорных частиц, летящих с апексной полусферы, с учетом частиц, которые встречаются с Землей после прохождения перигелия, независимо в каком узле своей орбиты, т.е. изменяют направление своего движения на бесконечности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования статистических характеристик неявно выраженных гиперболических орбит метеорных частиц выявлены особенности, характерные для частиц межзвездного происхождения, которые усиливаются с учетом вероятности столкновения межзвездной метеорной частицы с Землей.

Показано, что основанием для предположения о межзвездном происхождении метеорных частиц с неявно выраженными гиперболическими орбитами, является распределение гиперболических орбит метеорных частиц по элонгации межзвездного радианта от апекса Солнца с учетом выявленных закономерностей в условиях сближения их с Землей.

Таким образом, можно сделать вывод, что метеорные частицы проникают в атмосферу Земли из межзвездного пространства не только по явно выраженным гиперболическим орбитам, но и по почти параболическим ($E_h < 2$ км/с). Их тем больше, чем выше точность наблюдений.

1. Белькович О.И., Потапов И.Н. Ожидаемое распределение элементов орбит межзвездных частиц в Солнечной системе // Астрон.востн. — 1985. — **19**, № 3. — С. 206–210.
2. Всехсвятский С.К. Эруптивные процессы в Галактике гиперболические метеоры // Проблемы косм. физики. — 1978. — **13**. — С. 141–146.
3. Казанцев А.М. Возможность обнаружения межзвездных метеороидов // Кинем. и физика неб. тел. — 1998. — С. 82–88.
4. Касеев Б.Л., Ткачук А.А., Коломиец С.В. О проблеме гиперболических метеоров // Проблемы косм. физики. — 1982. — **17**. — С. 3–15.
5. Касеев Б.Л., Коломиец С.В. Статистика перигельных направлений почти параболических и гиперболических орбит метеорных тел // Метеорные исследования. — 1984. — № 11. — С. 81–88.
6. Крамер Е.Н. О роли процесса формирования планет в образовании малых тел Солнечной системы // Тр. Сталинабадской астроном. обсерв. — Изд-во АН Тадж. ССР, 1954. — № 20.
7. Крамер Е.Н., Шестака И.С., Маркина А.К. // Каталог МЦДБ. — М.: ВИНТИ, 1986. — 185 с.
8. Крамер Е. Н., Маркина А. К. Метеорные частицы с гиперболическими орбитами // Астрон.востн. — 1997. — **31**, № 3. — С. 271–277.
9. Крамер Е. Н., Маркина А. К., Скобликова Л. Я. Статистические распределения межзвездной метеорной материи и вероятность столкновения с Землей // Астрон. востн. — 1998. — **32**, № 3. — С. 277–283.
10. Крамер Е.Н., Смирнов В.А. Межзвездные метеоры — реальность? // Астрон. востн. — 1999. — **33**, № 1. — С. 85–89.
11. Симакина Е.Г. О гиперболических орбитах метеоров // Астрон. востн. — 1968. — **12**, № 3. — С. 153–157.
12. Ткачук А.А., Коломиец С.В. Распределение угловых элементов почти параболических и гиперболических орбит метеорных тел // М.: Метеорные исследования. — 1985. — № 10. — С. 67–74.
13. McCrosky R.E., Posen A. Orbital elements of photographic meteors // Smithsonian Contrib. Astrophys. — 1961. — **4**, № 2. — P. 15–84.
14. Stohl J. On the problem of hyperbolic meteors // Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia. — 1970. — **21**, № 1. — P. 10–17.
15. Zook H.A. Hyperbolic cosmic dust: its origin and its astrophysical significance // Planer. Space Sci. — 1975. — **23**, № 10. — P. 1391–1397.
16. Hans Betlem, Marc de Liqnie DMS. <ftp://ftp.strw.leidenuniv.nl/pub/betlem/orbits>
17. Yoshihico Shigeno MSSWG. <http://www.imo.net/files/data/msswg>

Поступила в редакцию 24.10.2011