

## ВЕРОЯТНОСТЬ СТОЛКНОВЕНИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ РОДИТЕЛЬСКИХ ТЕЛ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ С ЗЕМЛЕЙ

### Введение

Траектория движения Земли вокруг Солнца пронизывает облако астероидов и комет, орбиты которых проходят очень близко к земной поверхности. Совокупность этих объектов NEOs представляет реальную опасность для жизни на Земле в случае, если один из них столкнется с Землей. В связи с этим первым шагом для оценки и предотвращения опасности является создание в ближайшие годы каталога большинства NEOs, размеры которых достаточно велики (порядка 1 км), чтобы вызвать глобальную катастрофу [1]. По современным оценкам только астероидов с размерами около 1 км, орбиты которых пересекают орбиту Земли, в Солнечной системе более 2000. Из них известно только 5 – 6 %. Если не использовать специальные инструменты и программы поиска, для достижения уровня полноты упомянутого каталога до 80 – 90 % потребуется не менее 100 лет. Специальные программы, такие как Space-watch и GEODSS, могут решить эту задачу приблизительно за 10 лет.

Перечисленные выше программы ориентированы на поиск только одного важного, но не единственного подмножества NEOs, а именно: астероидов групп Аполлона, Атона и Амура (AAA-астероидов). Объяснить это можно тем, что данные объекты имеют достаточно большие размеры, а перигелийные расстояния их орбит  $q \leq 1.3 \text{ a.e.}$ , т.е. AAA-астероиды потенциально сближаются с орбитой Земли. Отметим также, что методы наблюдений обладают избирательностью к характеристикам объектов, следовательно, зарегистрированная выборка не может полностью описывать всю совокупность NEOs.

Одним из возможных методов поиска потенциально опасных астероидов является метод оценки элементов орбит NEOs по известным орбитам метеорных потоков, родительскими телами которых они являются. Если предположить, что у большинства метеорных роев, проявлениями которых являются метеорные потоки, существуют источники, поддерживающие популяцию метеороидов на уровне, позволяющем выявить их на фоне спорадических метеороидов, то отсюда следует, что в каталогах орбит метеорных потоков содержится ценная информация о NEOs, которые пока не обнаружены другими средствами наблюдений. Поскольку данные о метеорных потоках получены наземными методами наблюдений, то средние орбиты потоков всегда пересекаются с орбитой Земли, следовательно, орбита родительского тела и метеорного потока, связанного с потоком, если и не пересекается с орбитой Земли, то расположена вблизи ее и в процессе эволюции может стать таковой.

В статье предложена методика поиска астероидов и короткопериодических комет, орбиты которых совпадают с орбитой Земли на основе каталога метеорных потоков, полученного по результатам радиометеорных исследований в 1972-1978 гг. на комплексе МАРС ХНУРЭ [2]. Данный каталог состоит из 5160 метеорных потоков. Для 796 и 40 из этих потоков найдены родительские тела из числа известных AAA-астероидов и комет соответственно [3].

### Оценка вероятности пересечения орбит космических тел с орбитой Земли

Вероятность встречи космического тела с Землей можно представить в виде [4]:

$$v = v_1 v_2, \quad (1)$$

где  $v_1$  – априорная вероятность сближения орбит;  $v_2$  – условная вероятность попадания тела в атмосферу планеты при условии, что сближение орбит состоялось.

При вычислении вероятности встречи Земли с метеорным потоком, когда безразлично какой конкретно метеороид из потока проникает в атмосферу Земли, необходимо учесть только  $v_1$ . Вероятность  $v_1$  рассчитывается по формуле [4]:

$$v_1 = \frac{17.024}{10^5 \pi} \sqrt{\left(1 + \frac{0.141}{3 - a^{-1} - 2e\sqrt{a - a^{-1}} \cos(i)}\right) \left(\frac{a^2(1 - e^2)}{2a - 1 - a^2(1 - e^2)} + \operatorname{cosec}^2(i)\right)}, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $e$  и  $i$  – большая полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты космического тела соответственно. Учет астрономического веса  $W_A = v_1^{-1}$  метеорного потока позволяет от «видимых» распределений орбит метеорных потоков, а следовательно, и распределений орбит родительских тел, перейти к оценкам распределений таковых, пересекающих сферу радиусом 1 а.е. вокруг Солнца. Полученные распределения, анализируемые ниже, важны при оценке результатов, получаемых методами наблюдений, где присутствуют объекты, орбиты которых не обязательно пересекаются с орбитой Земли.

На рис. 1 – 3 приведены значения астрономического веса потоков из каталога ХНУРЭ функции наклонения, эксцентриситета и перигелийного расстояния их орбит соответственно. Видно, что наибольшие значения  $W_A$  или, наименьшую вероятность пересечения с орбитой Земли имеют потоки (и их родительские тела NEOs), орбиты которых сильно вытянуты ( $e > 0.8$ ), имеют наклонения в диапазоне  $50^\circ < i < 140^\circ$ , а также очень малые значения перигелийного расстояния ( $q < 0.3$  а.е.).

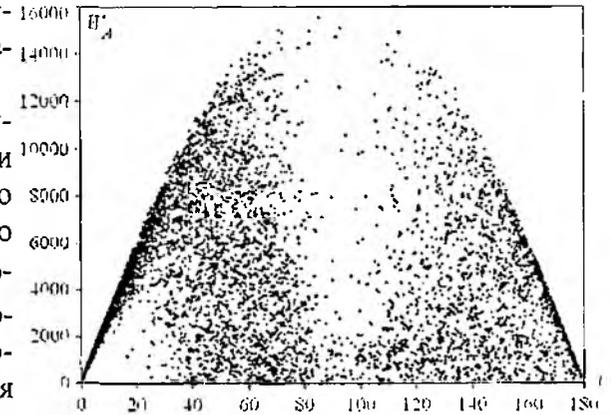


Рис. 1

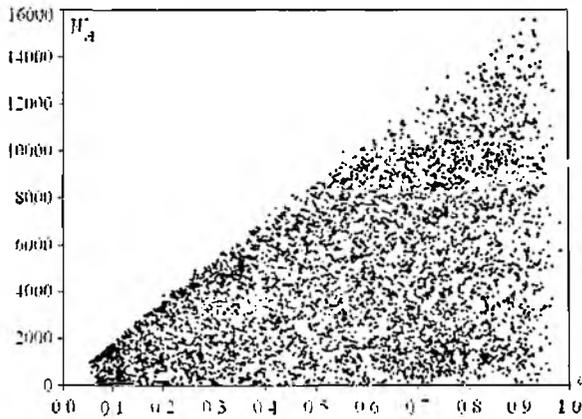


Рис. 2

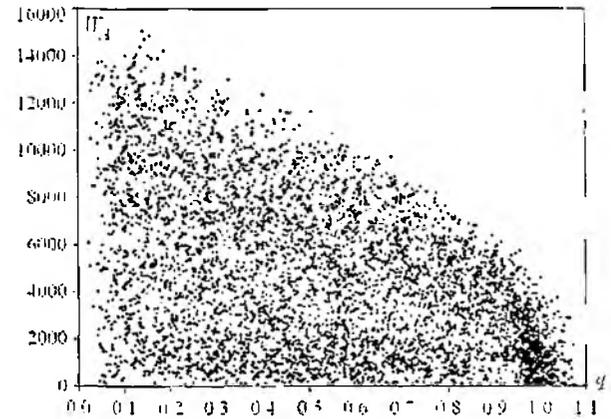


Рис. 3

Наоборот, наибольшую вероятность пересечения с орбитой Земли имеют потоки и их родительские тела, орбиты которых имеют наклонение  $i < 20^\circ$  в том числе и ретроградные, эксцентриситеты меньше, приблизительно, 0.3, а перигелийные расстояния больше 0.8 а.е.

На рис. 4 приведены пронормированные исправленные за влияние астрономической селекции распределения эксцентриситетов, наклонений и перигелийных расстояний орбит метеорных потоков. На рис. 5, 6 приведены аналогичные распределения для элементов орбит 5969 ААА-астероидов и 280 комет [5]. На рис. 7 приведены точечные диаграммы  $(q, i)$ ,  $(e, i)$  и  $(q, e)$  распределений орбит метеорных потоков. На каждой из диаграмм отмечены области, куда попадает большинство (90%) ААА-астероидов и комет.

Можно отметить, что распределения элементов орбит метеорных потоков, комет и ААА-астероидов существенно отличаются друг от друга. Для метеорных потоков, родительскими телами которых являются астеронды, характерны орбиты с эксцентриситетом  $e = 0.3 \div 0.7$ , перигелийным расстоянием  $q = 0.6 \div 1.1$  а.е. и наклонением  $i < 60^\circ$ .

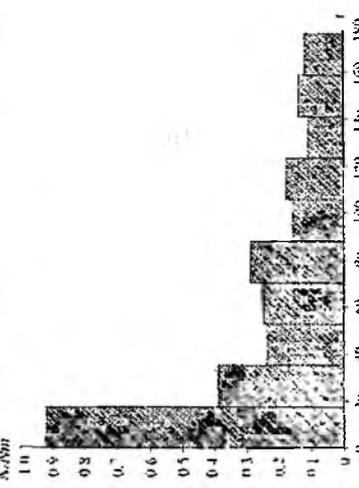
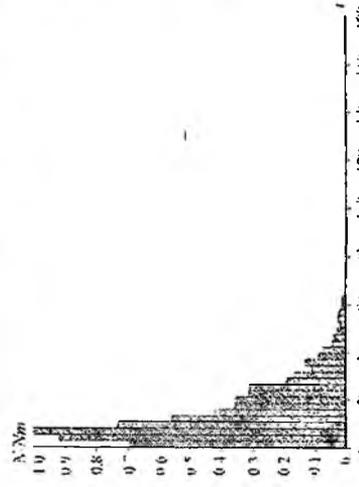
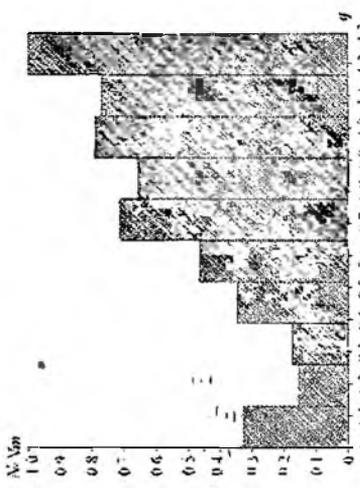
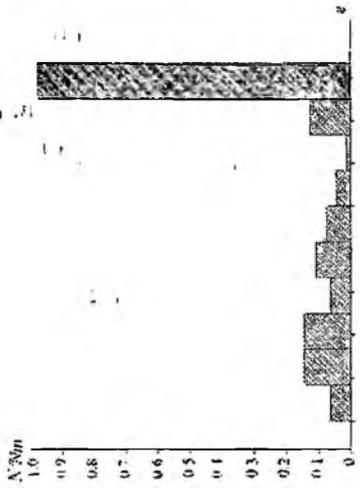
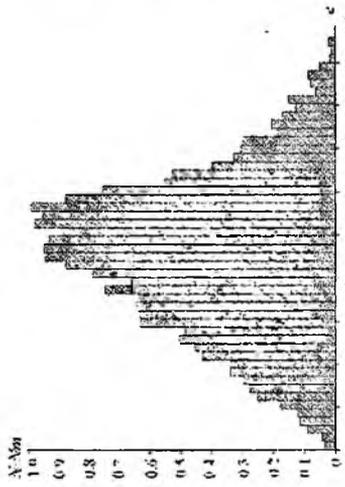


Рис. 4

Рис. 5

Рис. 6

Для метеорных потоков, родительскими телами которых являются кометы, характерны орбиты с эксцентриситетом  $e > 0.9$ , перигелийным расстоянием  $q > 0.8$  а.е. и наклоном  $i < 30^\circ$ . Большинство же метеорных потоков (около 25 %) с еще неидентифицированными родительскими телами имеют вытянутые орбиты с эксцентриситетом  $e > 0.7$  и перигелийным расстоянием  $q < 0.3$  а.е., что соответствует короткопериодическим кометам с афелийным расстоянием:

$$Q = \frac{1+e}{1-e} q \rightarrow Q < 1.5 \text{ а.е.} \quad (3)$$

Время жизни комет на подобных орбитах измеряется всего несколькими годами [6], поэтому не известно пока ни одной такой кометы. В то же время известно несколько десятков метеорных потоков с такими орбитами, в том числе такие активные, как Геминиды, Ариетиды,  $\delta$  Аквариды и др. Последнее говорит в пользу гипотезы об относительной «безопасности» короткопериодических комет. Их ядра распыляются за время, недостаточное для захвата орбиты кометы полем притяжения Земли. Следовательно, на Земле регистрируются лишь следы комет – метеорные потоки.

Отметим также, что приблизительно у четверти «неидентифицированных» метеорных потоков родительские тела имеют ретроградные орбиты, с практически равномерно распределенными эксцентриситетом и перигелийным расстоянием. Последнее говорит об астероидном происхождении данных метеорных потоков.

### Оценка вероятности столкновения космических тел с Землей

Вероятность  $v_1$  определяет вероятность сближения орбит метеорного потока тела с орбитой Земли, то есть вероятность того, что соответствующий поток можно будет обнаружить наземными методами. В нашем случае рассматриваются потоки, которые уже обнаружены, следовательно, вероятность  $v_1 = 1$ , а вероятность встречи космического тела с Землей

$$v = v_2. \quad (4)$$

Вероятность  $v_2$  можно рассчитать по формуле Эпика [4]:

$$v_2 = \frac{R_{sc}}{4a^{3/2}} \sqrt{\frac{3a-1-2a\sqrt{a(1-e^2)}\cos i}{2a-1-a^2(1-e^2)}} = \frac{R_{sc}}{4a^{3/2}} \sqrt{\frac{3a-1-2a\sqrt{a(1-e^2)}\cos i}{q+Q-1-q\cdot Q}}, \quad (5)$$

где  $q$  и  $Q$  – перигелийное и афелийное расстояния орбиты комического тела.

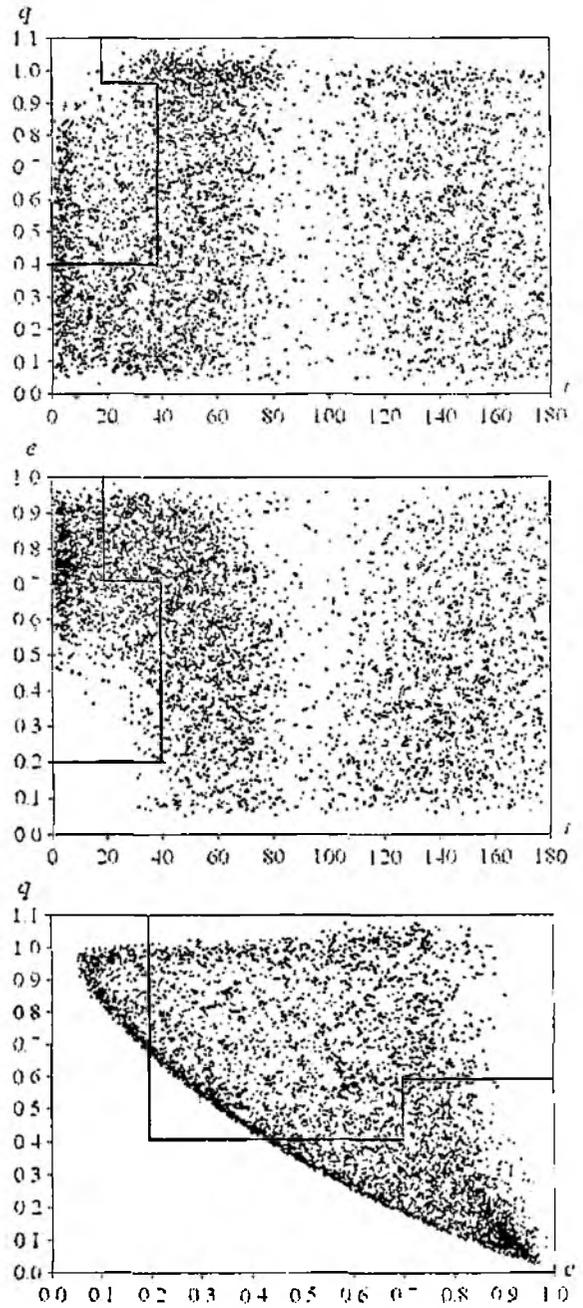


Рис. 7

Функция (5) при  $[q = a(1-e)] \rightarrow 1$  и  $[Q = a(1+e)] \rightarrow 1$  имеет особенности (разрывы), поэтому ею можно пользоваться только в случаях, когда выражение  $q + Q - 1 - q \cdot Q \neq 0$ . В противном случае вероятность  $v_2 \rightarrow \infty$ , что противоречит данным наблюдений.

В работе [7] отмечено, при выводе формулы для  $v_2$  Эпик принял, что вековые возмущения практически не изменяют больших полуосей, эксцентриситетов и наклонов орбит космического тела, что справедливо только для полуосей. Чтобы учесть изменения остальных элементов орбиты, можно использовать квазистационарные параметры [8]. К таким параметрам относятся следующие два интеграла, полученных Лидовым [9] и Моисеевым [10]:

$$v = e^2 (0.4 - \sin^2(i) \sin^2(\omega)), \quad (6)$$

$$\mu = \sqrt{p} \cos i = \sqrt{a(1-e^2)} \cos(i). \quad (7)$$

где  $\omega$  и  $p$  – аргумент перигелия и параметр орбиты космического тела соответственно.

На использовании квазистационарных параметров  $v$  и  $\mu$  основан метод оценки вероятности выпадения на поверхности планет, в частности Земли космических тел, разработанный в [8]. Рассмотрим его и составим алгоритм расчета вероятности  $v_2$ . Вероятность встречи межпланетного тела с Землей определяется значениями параметра  $p$  и наклона  $i$  его орбиты, соответствующих моменту сближения этих двух небесных объектов, когда должно выполняться условие

$$\frac{p}{1 \pm e \cos(\omega)} = 1. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$A = \frac{0.6}{a} - \mu^2 - 2 \text{ и } B = 0.4 + \left(2 - \frac{1}{a}\right) \mu^2 - v. \quad (9)$$

Решая уравнение встречи космического тела с Землей (8), можно получить уравнение относительно параметра орбиты космического тела:

$$p^2 + Ap + B = 0. \quad (10)$$

Отметим также, что в случае пересечения орбиты данного космического тела с орбитой Земли параметр орбиты  $p$  ограничен сверху условием [8]:

$$p_{max} = a(1 - 2.5v). \quad (11)$$

Теперь можно сформулировать алгоритм расчета вероятности столкновения космического тела с Землей. Необходимое условие того, что вероятность столкновения отлична от нуля, как следует из (10), имеет вид

$$A^2 - 4B \geq 0. \quad (12)$$

Если условие (12) выполняется, решением (10) находятся значения параметра  $p_1$  и  $p_2$  орбиты космического тела. Каждый из корней проверяется на выполнение условия (11). Для тех значений параметра орбиты, которые удовлетворяют этому условию, из (7) находим наклонение орбиты тела в момент сближения с Землей.

Получим алгоритм расчета вероятности встречи космического тела с Землей (аналог вероятности  $v$  из (1)). При этом возможны 3 случая:

1. Условие (12) не выполняется: орбиты космического тела и Земли никогда не пересекаются и вероятность их встречи равна 0.

2. Условие (12) выполняется, но только одно значение параметра орбиты удовлетворяет условию (11). Вероятность столкновения межпланетного тела с Землей определяется по формуле

$$w = \frac{R_{sc}^2}{\pi a^{3/2} \sin(i)} \sqrt{\frac{3 - a^{-1} - 2\mu}{2 - a^{-1} - p}} \quad (13)$$

3. Условие (12) выполняется и оба значения параметра орбиты тела удовлетворяет условию (11). Вероятность столкновения космического тела с Землей определяется по формуле

$$w = \frac{R_{sc}^2}{\pi a^{3/2}} \sqrt{3 - a^{-1} - 2\mu} \left( \frac{\sin(i_1) \sqrt{2 - a^{-1} - p_1} + \sin(i_2) \sqrt{2 - a^{-1} - p_2}}{\sin(i_1) \sin(i_2) \sqrt{(2 - a^{-1} - p_1)(2 - a^{-1} - p_2)}} \right) \quad (14)$$

В итоге вероятность столкновения космического тела с Землей может быть получена из выражения

$$v'_2 = \frac{w}{v_1} \quad (15)$$

В таблице приведен список 25 наиболее «опасных» метеорных потоков по оценкам вероятности  $v'_2$ . Здесь приняты следующие обозначения: *Sh* – метеорный поток из каталога ХНУРЭ; *e*, *i*, *q*, *Q* – эксцентриситет, наклонение и перигелийное расстояние средней орбиты потока соответственно; *rank<sub>п</sub>* – ранг метеорного потока по интенсивности.

<i>Sh</i>	$v'_2 \cdot 10^6$	<i>e</i>	<i>i</i> , град	<i>q</i> . а.е.	<i>Q</i> . а.е.	<i>rank<sub>п</sub></i>
5074	391.8	0.6122	173.78	0.2422	1.0069	5074
5092	358.01	0.9194	171.83	0.0563	1.3407	4173
4687	347.95	0.8808	173.14	0.0817	1.2891	5045
5003	328.95	0.2726	174.87	0.5744	1.0049	3226
4958	315.97	0.4917	174.45	0.3435	1.0081	3269
4033	314.77	0.8746	166.81	0.0746	1.1152	2296
4534	293.71	0.8384	172.35	0.1034	1.1763	4215
3852	276.85	0.2396	174.27	0.6420	1.0466	5148
3613	276.54	0.6532	168.71	0.2230	1.0630	4832
5049	269.03	0.6560	168.69	0.2094	1.0080	4129
4234	262.41	0.7852	170.29	0.1337	1.1112	3567
4058	254.54	0.3096	173.67	0.5520	1.0471	2440
3810	244.14	0.3800	174.87	0.4576	1.0185	4741
5091	231.32	0.6309	174.42	0.2413	1.0662	1942
4826	230.48	0.4677	170.33	0.3671	1.0122	1532
3536	229.63	0.7424	165.20	0.1569	1.0613	3720
4754	227.39	0.7777	173.89	0.1424	1.1388	1265
3610	222.37	0.1461	173.59	0.7612	1.0217	1685
5056	221.59	0.8857	170.15	0.1778	2.9333	1026
4841	219.02	0.7570	162.74	0.1446	1.0455	4142
4002	217.60	0.7280	164.60	0.1710	1.0864	5098
3953	210.15	0.3658	170.18	0.4703	1.0128	1578
3621	208.45	0.8767	148.21	0.0685	1.0426	1554
1792	206.18	0.6461	168.30	0.2234	1.0391	1900
4940	205.28	0.6276	166.62	0.2307	1.0083	2769

Основной вывод, который следует из анализа приведенных данных: по оценкам  $v'_2$  получается, что самыми «опасными» являются родительские тела метеорных потоков, наклонения орбит которых *i* больше  $160^\circ$ , а афелийные расстояния  $Q \rightarrow 1$  а.е. К таким относятся 90 % потоков, включенных в таблицу. Отметим также, что 68 % орбит потоков имеют экс-

центриситеты  $e > 0.6$  и перигелийные расстояния  $q < 0.3$  а.е., что говорит об их кометном происхождении. Остальные 32 % орбит потоков характерны для астероидов с ретроградными орбитами и афелийными расстояниями  $Q \rightarrow 1$  а.е.

### Выводы

1. Известные ААА-астероиды и кометы охватывают только малую часть (порядка 20 %) метеорных потоков каталога ХНУРЭ, а следовательно, и их родительских тел. Исследование орбит метеорных потоков позволяет выявить значительное количество потенциально опасных NEOs, вероятность обнаружения которых традиционными прямыми методами в настоящее время мала.

2. Разработана методика расчета вероятности  $v'_2$  столкновения космических тел с Землей, учитывающая изменения элементов орбиты потока в ходе его эволюции. Выявлены наиболее «опасные» метеорные потоки, чьи родительские тела представляют угрозу для Земли.

3. Наиболее «опасными» являются потоки, родительскими телами которых являются короткопериодические кометы и астероиды с наклонениями орбит более  $90^\circ$  и афелийными расстояниями  $Q \rightarrow 1$  а.е.

**Список литературы:** 1. Morrison D. The Spaceguard Survey: Report of the NASA International Near-Earth-Object Detection Workshop. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1992. 2. Волощук Ю.И., Клицев Б.Л., Подолька 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. 3. Волощук Ю.И., Соляник О.А. Структура и связи в межпланетных комплексах астероидов, комет и метеорного вещества // 2-й Междунар. радиоэлектронный Форум МРФ-2005: Сб. науч. трудов. Т. 1. Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ. 2005. С. 165 – 170. 4. Öpik E. Collision probabilities with the planet and the distribution of interplanetary matter // Proc. Roy. Irish. Acad. 1951. N 12. P. 165-169. 5. [www.neo.jpl.nasa.gov](http://www.neo.jpl.nasa.gov). 6. Лебедитец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 246 с. 7. Крамер Е.Н., Шестака И.С. Вероятность выпадения на поверхность планет межпланетных тел типа Аполлона – Амура // Астрон. вестн. 1987. Т. 21, №3. С. 225-232. 8. Крамер Е.Н., Шестака И.С. Квазистационарные параметры малых тел Солнечной системы // Астрон. вестн. 1987. Т. 21, №1. С. 75-83. 9. Лидов М.Л. Эволюция орбит искусственных спутников под действием гравитационных возмущений тел // Искусств. спутники Земли. 1961. № 8. С. 5-45. 10. 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.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 05.05.2009