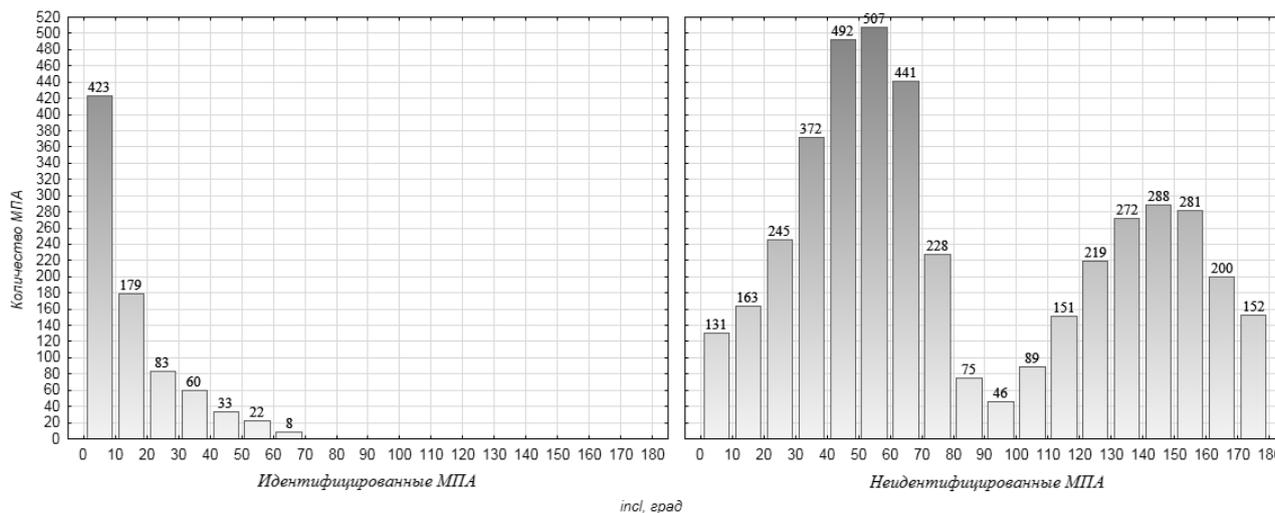


О ПРОБЛЕМЕ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

Введение

Связующим звеном между зарегистрированными метеорными телами и их родительскими телами являются метеорные потоки. Еще 10 лет тому назад подавляющее число исследователей малых тел Солнечной системы исходили из того, что родительскими телами метеороидов и, следовательно, метеорных явлений в атмосфере Земли являются исключительно кометы. Своего рода прорыв произошел, когда с высокой вероятностью было установлено, что родительским телом самого известного ежегодного метеорного потока Геминиды является потенциально опасный астероид из группы Аполлона 3200 Phaethon.

К настоящему времени известны тысячи метеорных потоков и ассоциаций (МПА) и лишь для небольшой части из них найдены родительские тела. Например, на рис. 1 приведены результаты идентификации 5160 МПА каталога ХНУРЭ [1] согласно критерию Саутурта - Хокинса [2] по базе NASA (https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi) из 16205 (на апрель 2017 г.) потенциально опасных для Земли астероидов и комет (объектов NEOs). Идентифицировано 835 МПА или 16 % каталога. Причем, как видно из графиков, для наклонения менее 30 градусов идентифицировано 56 % МПА. В то же время для наклонений более 70 градусов не идентифицировано ни одного МПА, что можно объяснить практическим



отсутствием объектов NEOs с подобными орбитами в каталоге NASA.

Рис. 1

Таким образом, если предположить, что у большинства метеорных потоков существуют источники, поддерживающие популяцию метеороидов на уровне, позволяющем выявить их на фоне спорадических метеороидов, то, следовательно, в каталогах орбит метеорных потоков содержится ценная информация о потенциально опасных для Земли астероидах и кометах, которые пока не обнаружены другими средствами наблюдений.

1. Анализ условий пересечения орбит объектов NEOs с орбитой Земли

Априорная вероятность сближения орбит космического тела (КТ) и Земли может быть рассчитана по выражению [3]

$$v_1 = 5.4189 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{3.141 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1-exc^2)} \cos(incl)}{3 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1-exc^2)} \cos(incl)}} \times \left(\frac{a^2(1-exc^2)}{2a - 1 - a^2(1-exc^2)} + \frac{1}{\sin^2(incl)} \right), \quad (1)$$

где *incl*, *a* и *exc* – наклонение, большая полуось и эксцентриситет орбиты КТ

соответственно.

На рис. 2 приведены категоризированные диаграммы вероятности v_1 (чем больше размер символа «○», тем больше вероятность v_1) в функции элементов орбит метеорных потоков каталога ХНУРЭ – наклонения, эксцентриситета и перигелийного расстояния (в анализе участвовало 4682 потока, для которых выражение под квадратным корнем в (1) больше нуля). Аналогичные зависимости для объектов NEOs приведены на рис. 3.

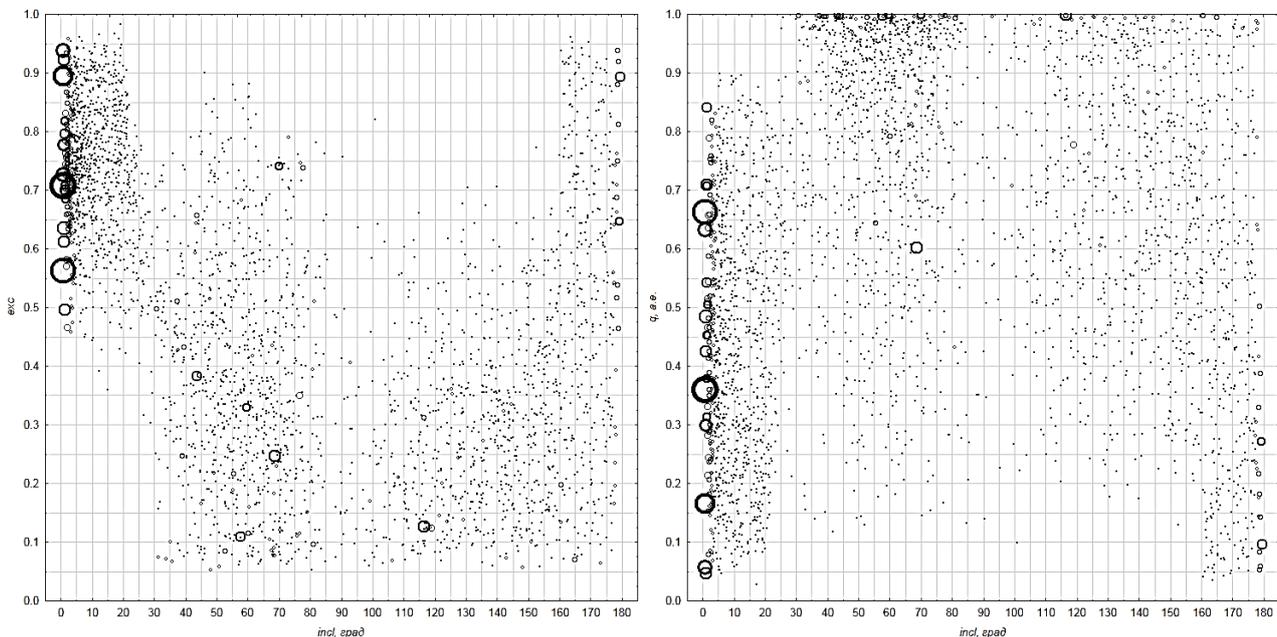


Рис. 2

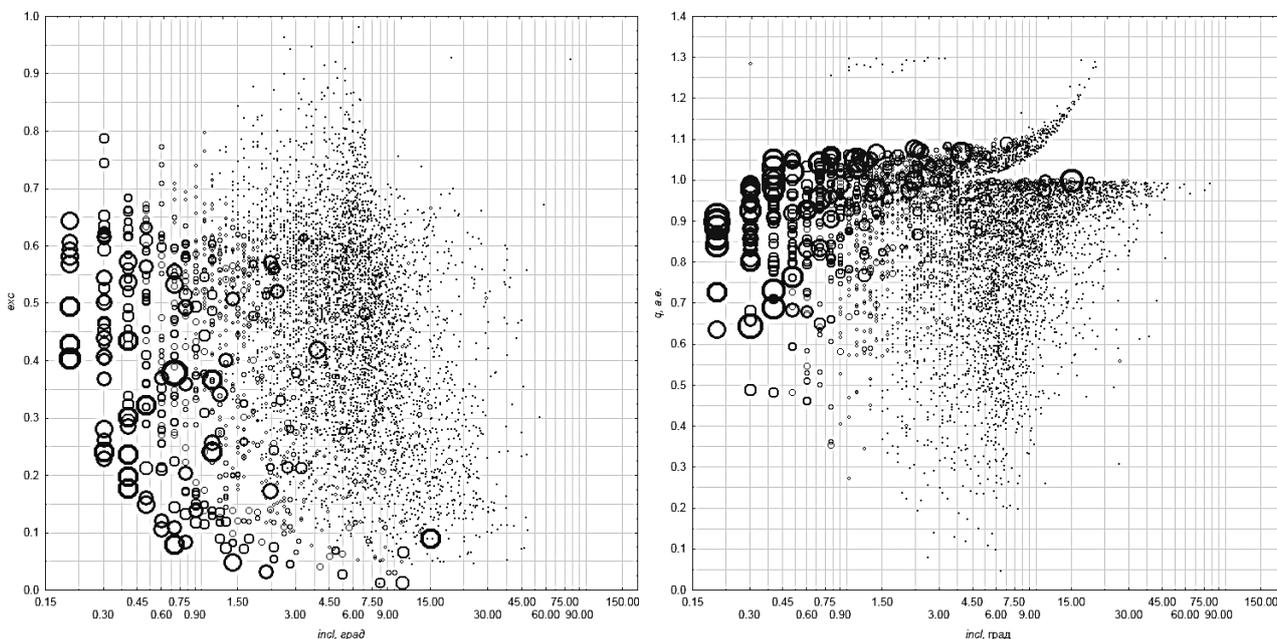


Рис. 3

Наибольшую априорную вероятность сближения орбит имеют потоки (и их потенциальные родительские тела NEOs), орбиты которых расположены в четырех кластерах: 1) наклонения в диапазоне $incl < 10^\circ$, эксцентриситеты $exc > 0.5$ и перигелийные расстояния $q < 0.7$ а.е.; 2) наклонения в диапазоне $40^\circ < incl < 70^\circ$, эксцентриситеты $exc < 0.4$ и перигелийные расстояния $q \approx 1$ а.е.; 3) наклонения в диапазоне $110^\circ < incl < 140^\circ$,

эксцентриситеты $exc < 0.4$ и перигелийные расстояния $q \approx 1$ а.е.; 4) наклонения в диапазоне $incl > 170^\circ$, эксцентриситеты $exc > 0.5$ и перигелийные расстояния $q < 0.5$ а.е.

Как видно из графиков на рис. 3, наибольшую априорную вероятность сближения орбит имеют объекты NEOs с наклонениями орбит $incl < 10^\circ$, эксцентриситетами в интервале $0.1 < exc < 0.7$ и перигелийными расстояниями $q > 0.6$ а.е. Ретроградные орбиты ($incl > 90^\circ$) практически отсутствуют.

Для выявления природы гипотетических тел метеорных потоков был использован критерий Кресака Pe [4] разделения на орбиты кометные и астероидного типа:

$$Pe = a^{1.5} exc = \begin{cases} > 2.5 & \text{для орбит кометного типа,} \\ < 2.5 & \text{для орбит астероидного типа.} \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 4 приведена диаграмма вероятность v_1 – критерий Кресака Pe орбит МПА каталога ХНУРЭ. Как видно из рис. 4, большинство (4682, или 89.85 %) метеорных потоков имеет астероидное происхождение.

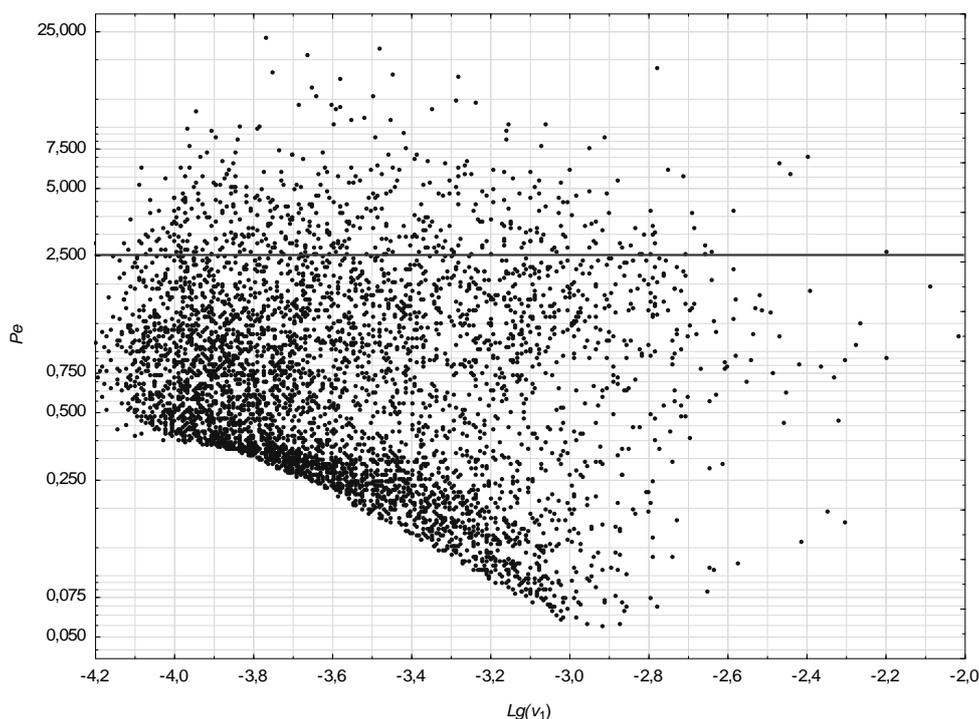


Рис. 4

Таким образом, для большинства опасных потоков родительскими телами можно считать астероиды групп Apollos, Amors и Atens.

2. Анализ условий столкновения объектов NEOs с орбитой Земли

Вероятность прохождения орбиты КТ через область захвата Земли можно рассчитать по формуле [3]:

$$v_2 = \frac{1.064 \cdot 10^{-5}}{4a^{3/2}} \sqrt{\frac{3a - 1 - 2a\sqrt{a(1-exc^2)}\cos(incl)}{q+Q-1-q \cdot Q}}. \quad (3)$$

Функция (3) при перигелийном расстоянии орбиты КТ $[q = a(1 - exc)] \rightarrow 1$ и афелийном расстоянии орбиты КТ $[Q = a(1 + exc)] \rightarrow 1$ имеет особенности, поэтому ею можно пользоваться только в случаях, когда выражение $q + Q - 1 - q \cdot Q \neq 0$. В противном случае вероятность $v_2 \rightarrow \infty$. Из анализа рис. 5, где приведена кумулятивная гистограмма метеорных потоков по параметру $q + Q - 1 - q \cdot Q$, следует, что в диапазон $q + Q - 1 - q \cdot Q < 0.01$ попадают 487 или 10.4 % потоков. В работе [5] отмечено, при

выводе формулы для вероятности v_2 не учитывались вековые возмущения эксцентриситетов и наклонов орбит КТ.

Чтобы учесть изменения данных элементов орбиты, можно использовать, как показано в [6], квазистационарные параметры орбиты КТ Моисеева $C1 = (1 - exc^2) \cos^2(incl) = const$ и Лидова $C2 = exc^2(0.4 - \sin^2(incl) \sin^2(\omega)) = const$ (ω – аргумент перигелия орбиты КТ).

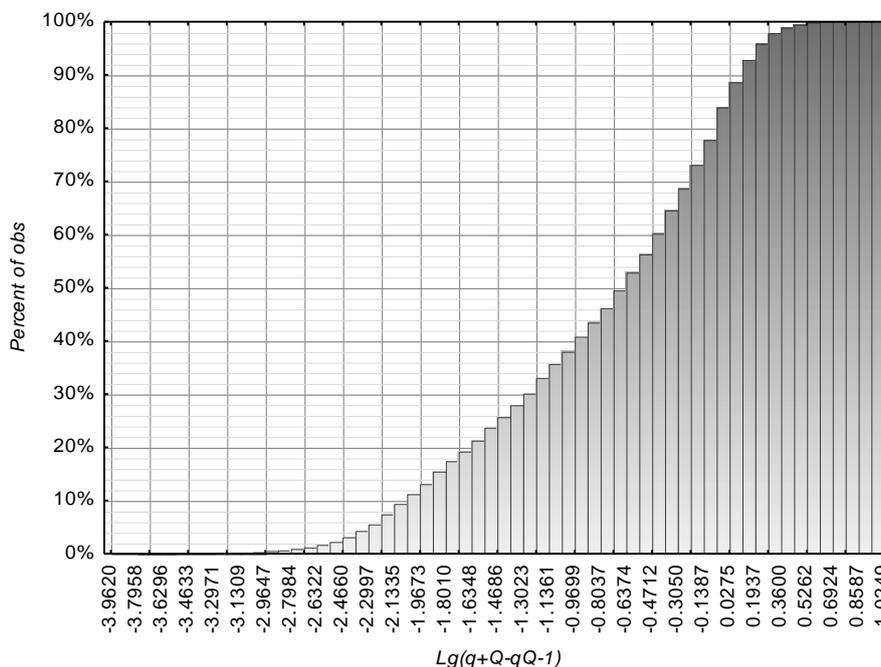


Рис. 5

Согласно [6] алгоритм расчета вероятности столкновения космического тела с Землей следующий:

1) дискриминант уравнения

$$p^2 - p \left[C1 \cdot a - \frac{0.6}{a} + 2 \right] + 0.4 - C1 \cdot (1 - 2a) - C2 = 0 \quad (4)$$

меньше нуля, следовательно, орбиты тела и Земли никогда не пересекаются, и вероятность их встречи равна нулю;

2) дискриминант уравнения (4) больше нуля, но только один корень p_k удовлетворяет условию

$$p_k < a \left(1 - 2.5e^2(0.4 - \sin^2(i) \sin^2(\omega)) \right), \quad (5)$$

тогда вероятность столкновения КТ с Землей определяется по формуле

$$v_0 = \frac{1.811 \cdot 10^{-9} (3 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1 - exc^2)} \cos(incl) + 0.141)}{\pi a^{3/2} \sin(incl_k) \sqrt{(3 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1 - exc^2)} \cos(incl)) (2 - a^{-1} - p_k)}}, \quad (6)$$

где

$$incl_k = \arccos \left(\sqrt{\frac{a(1 - exc^2)}{p_k}} \cos(incl) \right); \quad (7)$$

3) дискриминант уравнения (4) больше нуля и оба корня p_1 и p_2 удовлетворяют условию (5), тогда вероятность столкновения КТ с Землей определяется по формуле

$$v_0 = \frac{1.811 \cdot 10^{-9} (3 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1 - exc^2)} \cos(incl) + 0.141)}{\pi a^{3/2} \sqrt{3 - a^{-1} - 2\sqrt{a(1 - exc^2)} \cos(incl)}} \times \left(\frac{(2 - \frac{1}{a} - p_1)^{-0.5}}{\sin(incl_1)} + \frac{(2 - \frac{1}{a} - p_2)^{-0.5}}{\sin(incl_2)} \right), \quad (8)$$

где наклоны $incl_1$ и $incl_2$ рассчитываются по (7) путем постановки p_1 и p_2 соответственно.

На рис. 6 приведены категоризированные диаграммы вероятности v_0 (чем больше

размер символа «○», тем больше вероятность v_0) в функции элементов орбит метеорных потоков каталога ХНУРЭ – наклонения, эксцентриситета и перигелийного расстояния.

Как видно из графиков на рис. 6, наибольшую вероятность встречи космического тела с Землей имеют потоки (и их потенциальные родительские тела NEOs), орбиты которых имеют наклонения $incl > 170^\circ$.

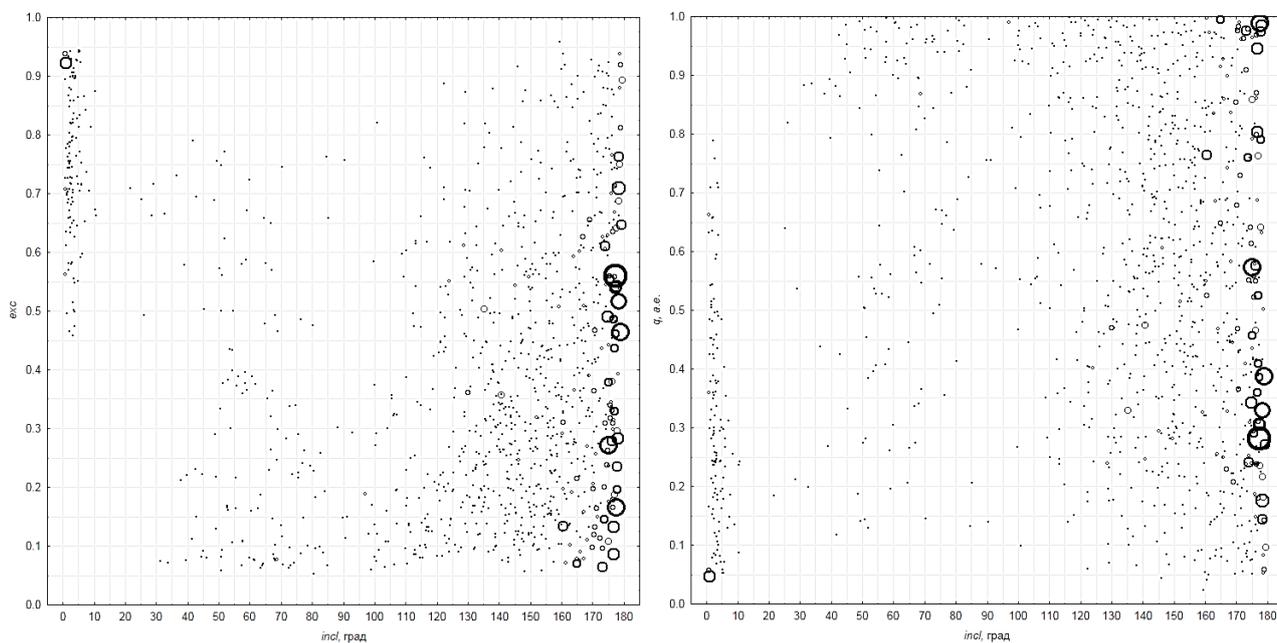


Рис. 6

На рис. 7 дана диаграмма вероятность v_0 – критерий Кресака Pe . Наибольшую вероятность встречи космического тела с Землей имеют потоки астероидного происхождения.

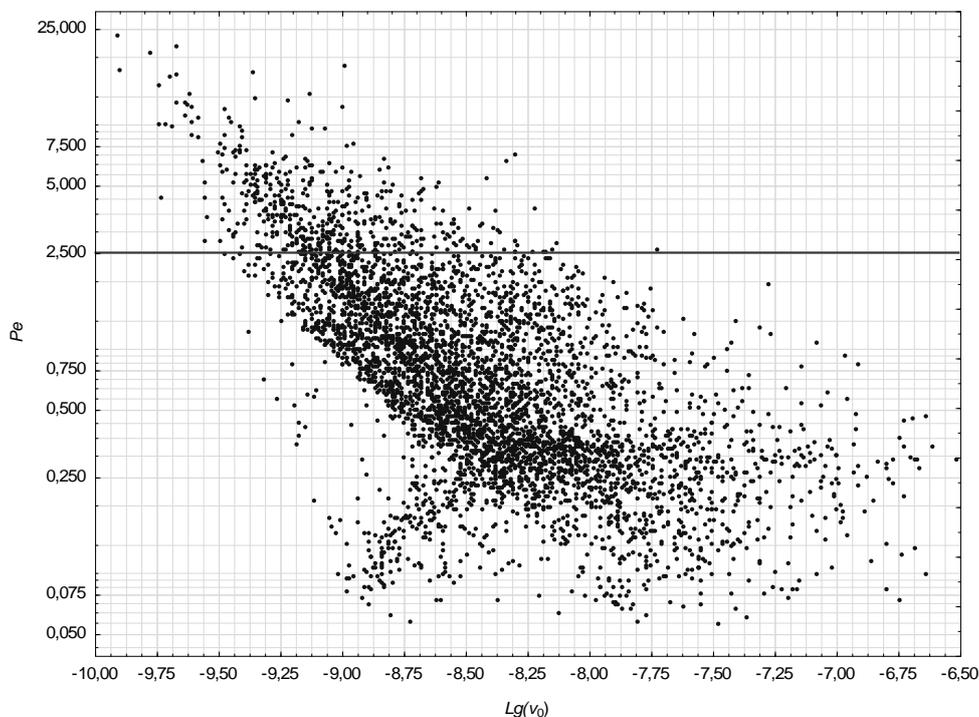


Рис. 7

Следует напомнить, что (6) и (8) дают оценку вероятности столкновения $v_0 = v_1 v_2$. Для родительских тел метеорных потоков в предположении, что они имеют орбиты,

совпадающие со средними орбитами соответствующих потоков, вероятность v_1 близка к 1. Тогда вероятность столкновения $v'_2 = v_0/v_1$ резко возрастает.

На рис. 8 приведены категоризированные диаграммы вероятности v'_2 (чем больше размер символа «○», тем больше вероятность v'_2) в функции элементов орбит метеорных потоков каталога ХНУРЭ – наклонения, эксцентриситета и перигелийного расстояния.

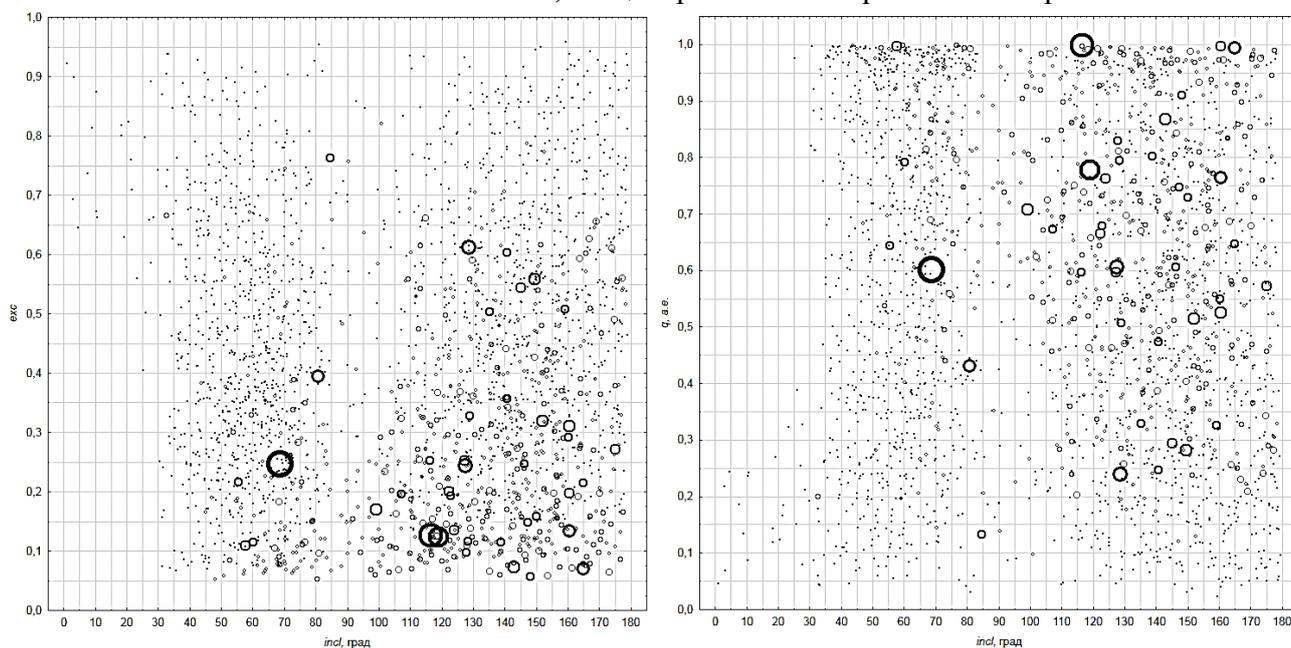


Рис. 8

Как видно из графиков на рис. 8, наибольшую вероятность столкновения гипотетических родительских тел метеорных потоков, при условии, что эти потоки проявляли себя в атмосфере Земли, имеют потоки, орбиты которых имеют наклонения $incl > 90^\circ$, эксцентриситеты $exc < 0.3$ и перигелийные расстояния $q > 0.5$ а.е.

На рис. 9 приведена диаграмма вероятности v'_2 – критерий Кресака Pe . Как видно из графика на рис. 9, наибольшую вероятность v'_2 имеют потоки астероидного происхождения.

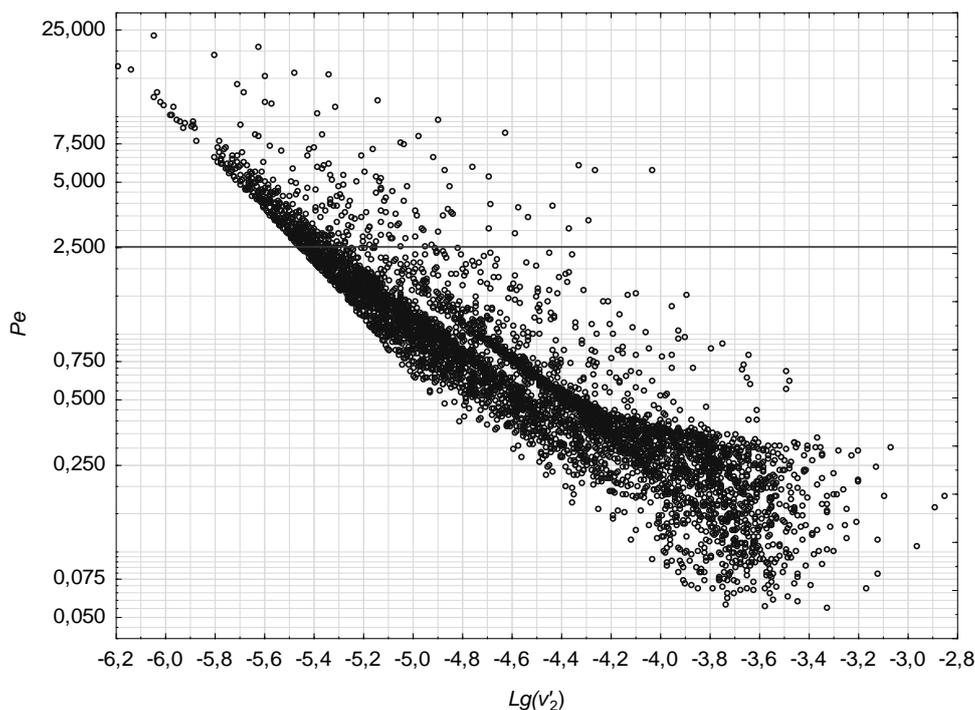


Рис. 9

Выводы

1. Из 200 наиболее «опасных» метеорных потоков по оценкам вероятности v'_2 большинство потоков, во-первых, имеют ретроградные орбиты (для 177 потоков или 88.5 % выполняется условие $incl > 90^\circ$), причем максимальная вероятность v'_2 соответствует наклонениям $incl \approx 60^\circ$ и 120° ; во-вторых, пересекают орбиту Земли либо в афелии (для 157 потоков или 78.5 % выполняется условие $1 < Q < 1.05$ а.е.), либо в перигелии (для 34 потоков или 17 % выполняется условие $0.95 < q < 1$ а.е.).

2. Значения эксцентриситетов анализируемых потоков расположены в диапазоне $0.05 < exc < 0.76$, причем для 178 потоков или 89 % выполняется условие $exc < 0.5$; значения большей полуоси расположены в диапазоне $0.57 < a < 1.54$ а.е., причем для 162 потоков или 81 % выполняется условие $a < 1$ а.е., что говорит в пользу их астероидного происхождения, а именно астероидов группы Atens – околоземных астероидов, чьи орбиты пересекают земную орбиту с внутренней стороны: афелийные расстояния орбит больше перигелийного расстояния Земли $Q > 0.983$ а.е. и большая полуось меньше земной $a < 1$ а.е.

Всего на данный момент (апрель 2017 г.) известно 1176 астероидов группы Atens. Столь малая популяция объясняется, во-первых, тем, что наблюдение визуальными методами NEOs Atens возможно только в ночное время суток, когда они оказываются от Солнца дальше, чем Земля (причем, чем меньше афелийные расстояния орбит астероидов, тем сложнее их обнаружить, поскольку появляются они над горизонтом лишь незадолго перед рассветом или сразу после захода Солнца и легко теряются в его лучах на фоне еще светлого неба); во-вторых, астероиды группы Atens имеют малые размеры (у наиболее крупного всего 3,4 км), следовательно, и обнаружить их ночью на фоне темного неба также сложнее.

3. Вероятность хотя бы одного столкновения Земли с родительскими телами анализируемых потоков в год составляет 0.074 или, в среднем, 74 столкновения за 1000 лет. Вероятность хотя бы одного столкновения Земли с родительскими телами потоков из каталога ХНУРЭ в год составляет 0.304 или, в среднем, 304 столкновения за 1000 лет.

4. Для решения задачи прогнозирования астероидно-кометной опасности, во-первых,

требуется целенаправленный поиск астероидов группы Атены (особенно с ретроградными орбитами); во-вторых, требуются исследования в области теории квантования пространства орбит метеорных тел в Солнечной системе с целью подтверждения гипотезы группирования генетически не связанных метеорных тел на общей стабильной орбите, т.е. гипотезы формирования метеорного потока без родительского тела из спорадического фона.

Список литературы: 1. *Волощук, Ю.И.* Метеорные потоки и ассоциации, выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове : монография / Ю.И. Волощук, Д.Ю. Горелов. – Харьков : Изд-во НТМТ, 2011. – 382 с. 8. 2. *Southworth R.D., Hawkins G.S.* Statistics of Neteor Streams // *Smithson. Contribs. Astrophys.* -1963. – №7. – P. 261-285. 3. *Öpik E.* Collision probabilities with the planet and the distribution of interplanetary matter // *Proc. Roy. Irish. Acad.* – 1951. – N 12. – P. 165-169. 4. *Kresak, L.* Relation of Meteor Orbits to the Orbits of Comets and Asteroids // *Smithson. Contribs. Astrophys.* – 1967. – V. 11. – P. 9–34. 5. *Краммер, Е.Н., Шеатака, И.С.* Вероятность выпадения на поверхность планет межпланетных тел типа Аполлона – Амура // *Астрон. вестн.* – 1987. – Т. 21, №3. – С. 225-232. 6. *Горелов, Д.Ю.* Вероятность столкновения гипотетических родительских тел метеорных потоков с Землей / Д.Ю. Горелов, Н.В. Плащенко // *Радиотехника.* – 2009. – Вып. № 157. – С. 30-36.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 04.04.2017