

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ И АССОЦИАЦИЙ КАТАЛОГА ХНУРЭ

Введение

Важной задачей астрономической интерпретации радиолокационных наблюдений метеоров является выделение из общей совокупности зарегистрированных метеоров метеорных потоков. Корректное сравнение потоков по интенсивности позволяет найти «молодые» метеорные потоки, обладающие значительной плотностью потока и небольшими размерами сечения средней орбиты. Последнее позволяет исследовать пути эволюции метеорных потоков, а значит, и метеорного вещества в целом.

Следует отметить, что радионаблюдения метеоров является косвенными, то есть информацию о физических и динамических параметрах метеороидов получают путем обработки радиосигналов, отраженных от метеорных следов, которые являются результатом взаимодействия метеорных тел с атмосферой Земли. Следовательно, результаты радионаблюдений метеоров являются искаженными из-за селективности метода наблюдений. Селективность наблюдений метеоров приводит к систематической погрешности, которую уменьшить путем увеличения объема выборки невозможно. В работах [1 - 3] приведены алгоритмы учета физического, геометрического и астрономического факторов селективности. Однако для корректного сравнения потоков по интенсивности необходимо также учесть условия пересечения средней орбиты потока с орбитой Земли.

1. Методика расчета плотности метеорного потока в стандартном перигелии его средней орбиты (более подробно см. в [4])

Условия пересечения средних орбит метеорных потоков с орбитой Земли сильно отличаются и, следовательно, чтобы проводить сравнение метеорных потоков, необходимо исключить (или ослабить) влияние этих условий пересечения, т.е. анализировать все потоки в фиксированном поперечном сечении, например в перигелии средней орбиты. Алгоритм решения этой задачи таков.

1.1. Определить топоцентрическую плотность метеорного потока.

Чтобы привести метеорные потоки к одинаковым условиям относительно их плотности, от числа зарегистрированных метеоров в каждом потоке необходимо перейти к среднечасовому количеству метеоров в каждом потоке. При обработке каталога ХНУРЭ расчет был проведен по формуле

$$\Pi = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{N_i}{T_i}, \quad (1)$$

где n может принимать значения от 1 до 7 в зависимости от того, в течение скольких лет из семи (1972 – 1978 годы) происходило накопление базы орбит индивидуальных орбит метеоров; N_i – количество метеоров потока, зарегистрированных в течение i -го года; T_i – количество часов, в течение которых наблюдался поток в i -м году.

1.2. Перейти от топоцентрической плотности метеорного потока к геоцентрической.

Геоцентрическая плотность Π_G (плотность, которую имел бы поток до попадания в сферу притяжения движущейся Земли) рассчитывается по формуле

$$\Pi_G = \Pi \frac{4v_g^2(v_\infty \cos(Z) + v_g)(v_\infty + v_g \cos(Z))}{(v_\infty^2 + 2v_\infty v_g \cos(Z) + v_g^2)^2} = \Pi k_G, \quad (2)$$

где Z – зенитное расстояние радианта средней орбиты потока, v_g и v_∞ – геоцентрическая и топоцентрическая скорости частиц метеорного потока соответственно.

Для планет земной группы при переходе от топо- к геоцентрическим структурным характеристикам зависимостью от видимого зенитного расстояния радианта Z можно пренебречь. Поэтому, вместо (2) можно использовать выражение

$$\Pi_G = \Pi \frac{v_g}{v_\infty}. \quad (3)$$

1.3. Перейти от геоцентрической плотности метеорного потока к гелиоцентрической.

Исправленную с учетом движения Земли плотность метеорного потока по известной геоцентрической плотности можно рассчитать по выражению

$$\Pi_H = \Pi_G \frac{v_h}{v_g} = \Pi \frac{v_h}{v_\infty} = \Pi k_H, \quad (4)$$

где v_h – гелиоцентрическая скорость частиц метеорного потока.

1.4. Учесть условия пересечения средней орбиты метеорного потока с орбитой Земли.

Гелиоцентрические характеристики потока относятся к конкретной области орбиты – узлу – месту пересечения орбит Земли и метеорного потока. Очевидно, что положение узла относительно перигелия у разных потоков различно, так что узел может находиться в разных местах их орбит. Поэтому для сравнения структурных характеристик потоков нужно использовать методику, основанную на сравнении плотности потоков в определенной точке орбиты. В качестве такой точки удобнее всего взять перигелий средней орбиты.

Выражение, связывающее топоцентрическую плотность и плотность метеорного потока в перигелии средней орбиты:

$$\Pi_q = \Pi \frac{v_h}{v_\infty} \frac{1}{\sqrt{1 + 2e \cdot \cos(\psi_\Omega) + e^2}} \left(\frac{1 + e^2}{1 + e \cdot \cos(\psi_\Omega)} \right) = \Pi k_q, \quad (5)$$

где e – эксцентриситет средней орбиты потока, ψ_Ω – угол истинной аномалии в момент наблюдения потока с Земли [6].

Из анализа выражения (5) можно сделать следующий вывод: для короткопериодических потоков условие орбитальной встречи с Землей является более сильным фактором селективности, чем притяжение и движение Земли, т. к. наблюдаемая гелиоцентрическая плотность потока у долгопериодических роев близка к максимально возможной (встреча потока с Землей происходит вблизи перигелия орбиты потока), а у короткопериодических существенно меньше в перигелии (встреча потока с Землей происходит вблизи афелия орбиты потока). Следовательно, значения плотности потока в перигелии средних орбит короткопериодических роев могут быть существенно выше, чем у долгопериодических.

Необходимо отметить, что коэффициент k_q в формуле (5) позволяет учесть влияние углового расстояния перигелия на структурные характеристики метеорных потоков – астрономического фактора для потоков. Однако использовать рассчитанные плотности потока в перигелии средней орбиты Π_q для сравнения метеорных потоков по интенсивности некорректно. Дело в том, что на структурные характеристики метеорных потоков также оказывает влияние гравитация Солнца, и чем меньше значение перигелийного расстояния q средней орбиты потока, тем сильнее сказывается на характеристиках потока фактор солнечной гравитации. Следовательно, для корректности сравнения потоков необходимо учесть различия в перигелийных расстояниях. Это можно сделать, если плотность Π_q нормировать к стандартному гелиоцентрическому расстоянию $q_{st} = 1 \text{ а. е.}$

Выражение пересчета Π_q в аналогичные значения $\Pi_{q_{st}}$ можно получить из условия равенства общего числа частиц в подобных эллиптических струях, имеющих один и тот же разброс больших полуосей, но разные перигелийные расстояния q_1 и q_2 :

$$\Pi_{q_{st}} = \Pi_q q^{2.5} = \Pi k_q q^{2.5} = \Pi k_{q_{st}}. \quad (6)$$

1.5. Учет физического и геометрического факторов замечаемости для каждого метеорного потока проводится путем расчета весового коэффициента:

$$W_{\Sigma} = \sum_i^M (P_{\phi i} \cdot P_{r i})^{-1}, \quad (7)$$

где M – количество метеоров в данном потоке, $P_{\phi i}$ и $P_{r i}$ – физический и геометрический факторы замечаемости для i -го метеороида соответственно.

1.6. Выражения для плотности Π_q^W метеорного потока в перигелии средней орбиты и плотности $\Pi_{q st}^W$ в стандартном перигелии средней орбиты метеорного потока:

$$\begin{aligned} \Pi_q^W &= \Pi k_q W_{\Sigma}; \\ \Pi_{q st}^W &= \Pi k_q W_{\Sigma} q^{2.5}. \end{aligned} \quad (8)$$

2. Результаты сравнения потоков метеороидов из каталога ХНУРЭ по интенсивности

Приведем результаты сравнения метеорных потоков на примере трех потоков № 4756, № 4755 и № 982 из каталога ХНУРЭ [5]. Все эти три потока находятся в первой двадцатке по количеству зарегистрированных метеоров и тесно связаны с ААА-астероидами: № 4756 и № 4755 с астероидом 3200 Phaethon при значениях D -критерия 0,07 и 0,14 соответственно; № 982 с астероидом 2003 QQ47 при значении D -критерия 0,18. В табл. 1 приведены некоторые их характеристики.

Таблица 1

Характеристика	Поток		
	№ 4756	№ 4755	№ 982
Количество метеоров в потоке N	702	365	202
Топоцентрическая плотность Π	0.228	0.091	0.125
Топоцентрическая исправленная плотность $\Pi^W = \Pi W_{\Sigma}$	202.74	32.73	15.09
Плотность в перигелии средней орбиты Π_q^W	3313.48	327.65	15.59
Плотность в стандартном перигелии средней орбиты $\Pi_{q st}^W$	58.024	6.13	13.02
Большая полуось a , а.е.	1.195	1.268	0.994
Эксцентриситет e	0.833	0.876	0.064
Наклонение i , град.	22.735	29.426	63.106
Перигелийное расстояние средней орбиты q , а.е.	0.198	0.157	0.930

На рис. 1 приведена диаграмма значений плотности Π в функции числа N метеоров в потоке. Из анализа рис. 1 следует, что переход к топоцентрической плотности потока приводит к существенным перераспределениям потоков по их плотности. Например, поток № 982 при численности метеоров в 1,8 раза меньше, чем поток № 4755, имеет топоцентрическую плотность в 1,4 раза больше.

На рис. 2 приведена точечная диаграмма значений исправленной топоцентрической плотности Π^W в функции топоцентрической плотности Π . Сравнив диаграммы рис. 1 и 2 на примере трех выделенных потоков, можно видеть, как произошли перераспределения их по топоцентрическим плотностям. Если «видимая» плотность потока № 982 находилась на втором месте по интенсивности, то исправленная с учетом факторов селективности уже не является таковой – есть более восьми десятков потоков, у которых Π^W больше, причем есть такие, у которых исправленная топоцентрическая плотность превышает плотность потока № 982 в 10-12 раз. Этот же эффект наблюдается и для потока № 4755, но в меньшей степени. Поток № 4756 обладает максимальными плотностями Π и Π^W .

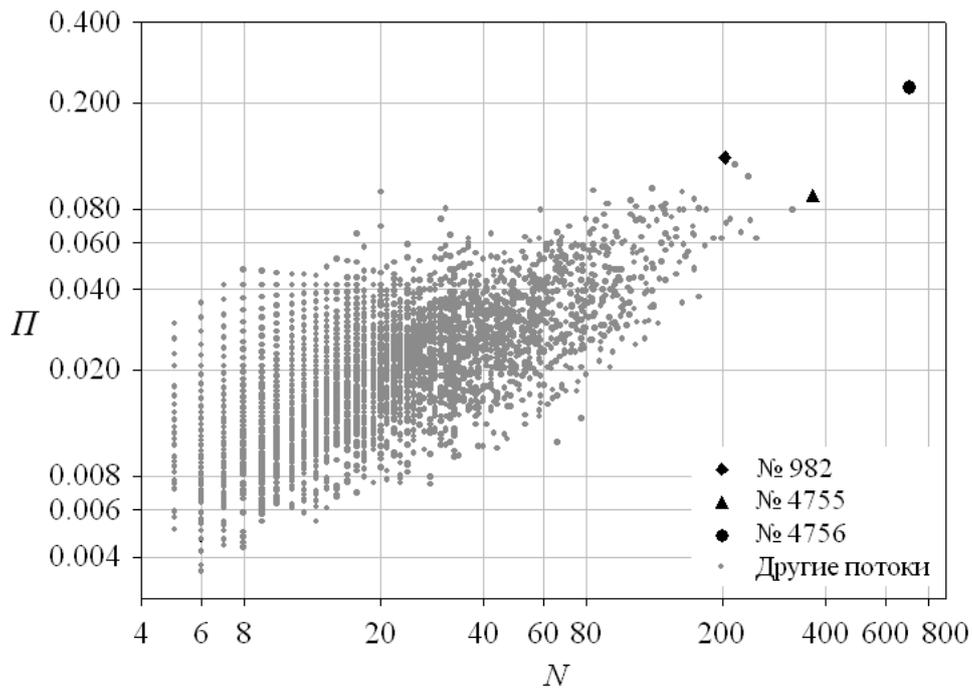


Рис. 1

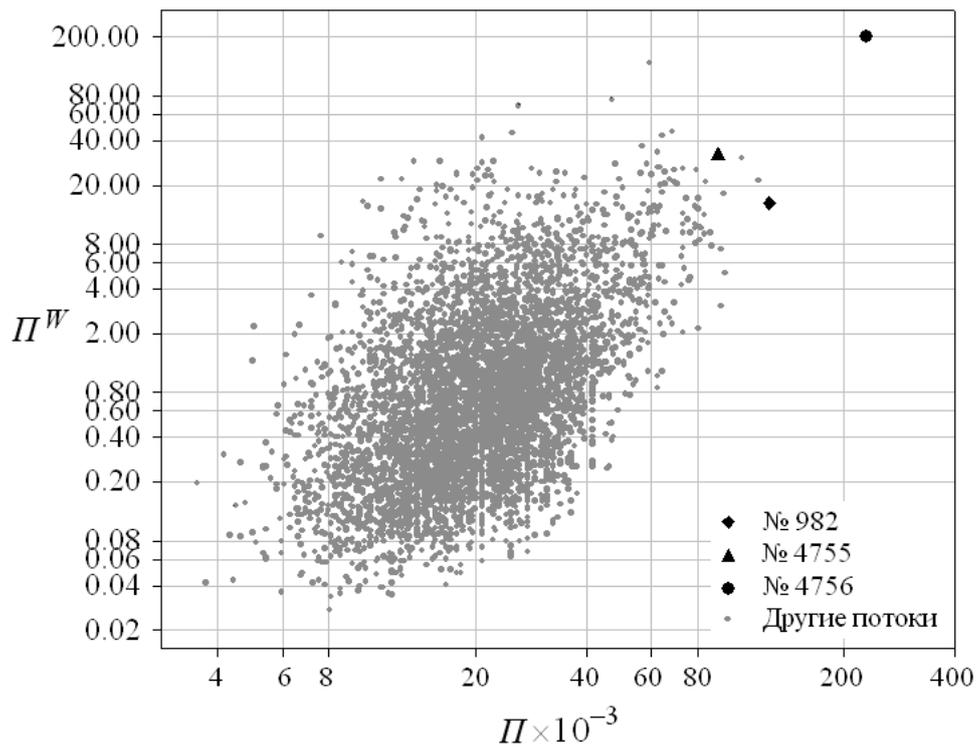


Рис. 2

На рис. 3 приведена точечная диаграмма, демонстрирующая связь между исправленными с учетом факторов селективности плотностями Π^W и исправленными плотностями потоков в перигелиях орбит Π_q^W . Если сравнить диаграммы, приведенные на рис. 2 и 3, можно отметить, что, например, у потока № 4756 плотность Π_q^W приблизительно в 40 раз превышает плотность Π . Отметим, что поток № 982 на диаграмме рис. 3 «затерялся» среди других потоков, в то время как плотность Π_q^W значительно выросла.

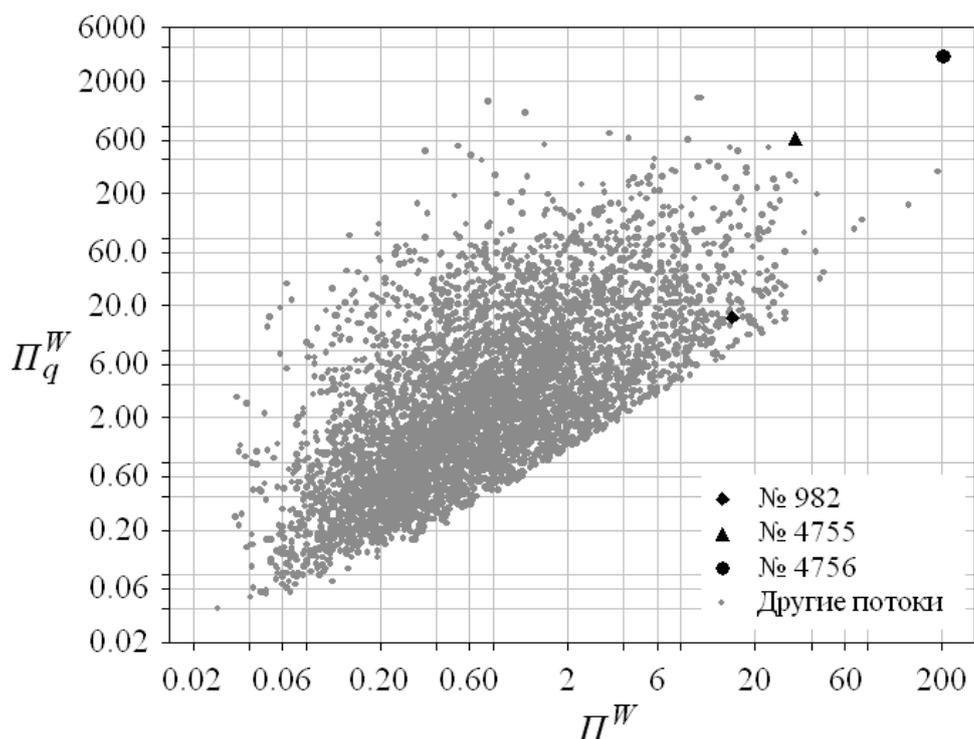


Рис. 3

Следующим шагом приведения всех потоков к одинаковым условиям относительно плотности потока является пересчет плотности потока к стандартному расстоянию перигелия (1 а.е.) его средней орбиты. Очевидно, что такой пересчет плотности потока мало изменит оценки плотности у тех потоков, у которых перигелийное расстояние q средней орбиты мало отличается от 1 а.е., но в том случае, когда перигелийное расстояние q средней орбиты потока существенно отличается от 1 а.е. в ту, либо другую сторону, оценки плотности потока $\Pi_{q\ st}^W$ будут существенно отличаться от величины Π_q^W .

Диаграмма, приведенная на рис. 4, иллюстрирует это утверждение. Необходимо подчеркнуть, что какая-либо связь плотности в стандартном перигелии $\Pi_{q\ st}^W$ с плотностью в реальном перигелии средней орбиты Π_q^W потока отсутствует.

На рис. 5 и 6 приведены диаграммы, демонстрирующие связи топоцентрических плотностей потоков с плотностями в перигелиях средних орбит потоков метеороидов и в стандартных перигелиях, соответственно. Из анализа графиков, приведенных на данных рисунках, можно сделать следующий вывод: переход от плотности потока в перигелии его реальной орбиты к виртуальным плотностям в стандартном перигелии существенно меняет расположение потоков на диаграмме. Это четко видно на примере потоков № 4755 и № 982.

На рис. 7 и 8 приведены графики, аналогичные тем, что изображены на рис. 5 и 6 соответственно. Отличие в том, что в качестве независимой переменной здесь выступает N , т.е., количество метеоров в каждом из потоков – одна из важнейших экспериментально полученных характеристик любого метеорного потока – чем больше N , тем выше вероятность существования реального потока.

Выводы из анализа графиков рис. 7 и 8 такие же, как уже неоднократно делались выше. Важно подчеркнуть следующее: в каталоге ХНУРЭ есть два потока – № 1297 и № 2130, у которых количество метеоров N много меньше, чем у потока № 4756, но их плотность потока метеороидов в стандартном перигелии выше, чем у потока № 4756. Очевидно, что это связано с элементами орбит потоков. В табл. 2 приведены некоторые характеристики этих потоков.

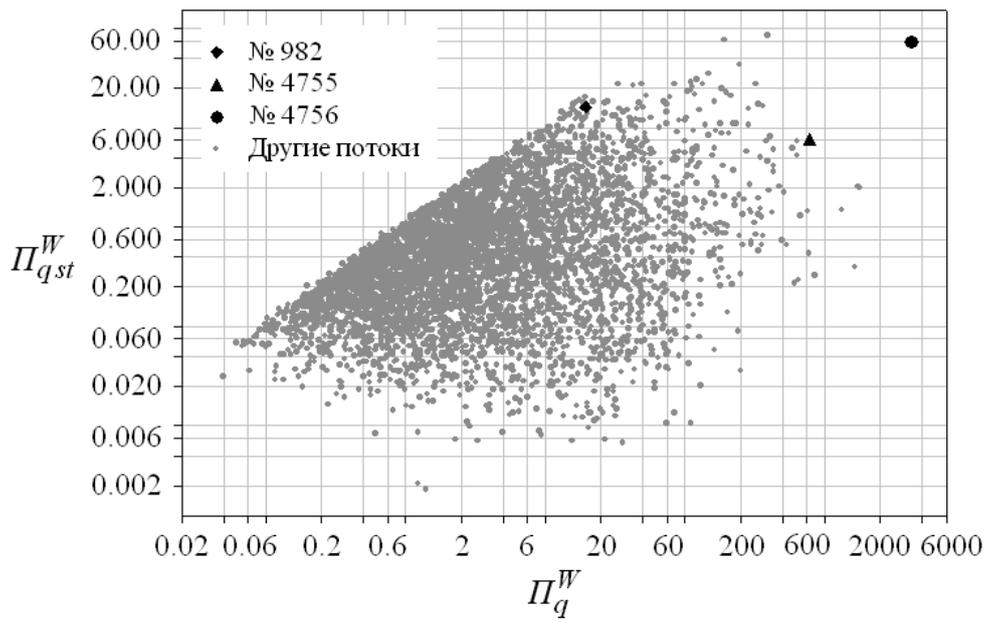


Рис. 4

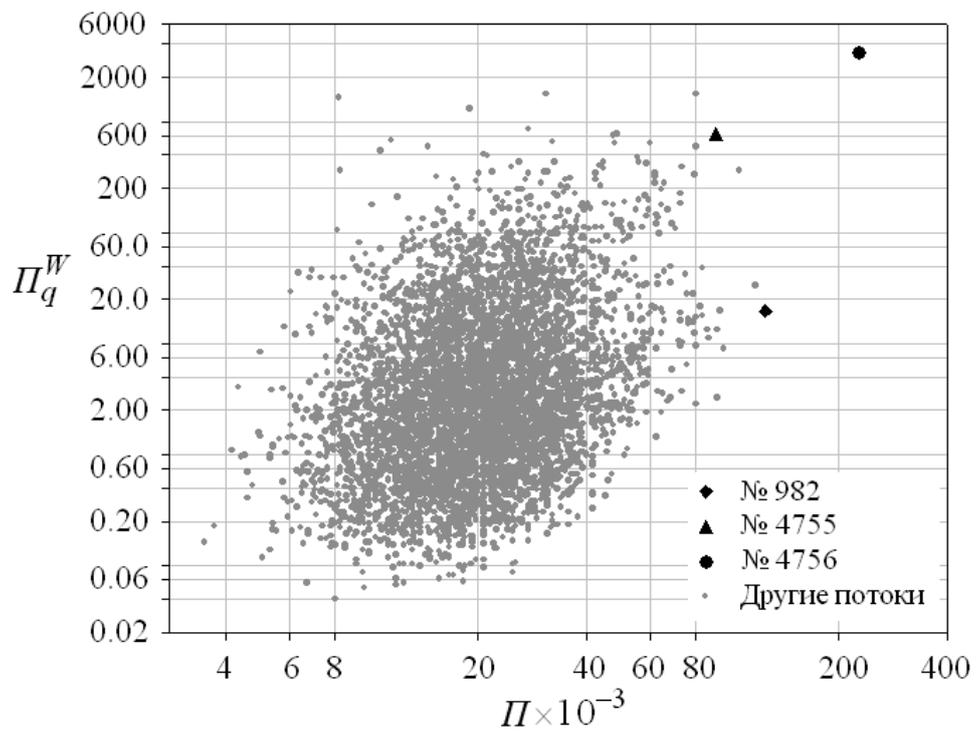


Рис. 5

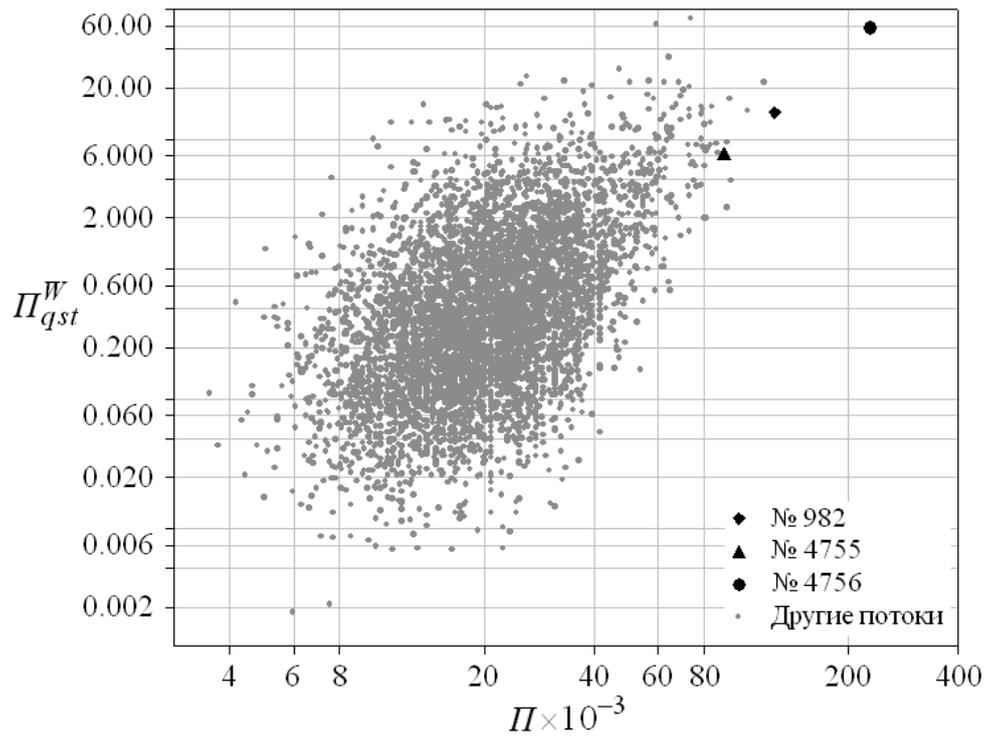


Рис. 6

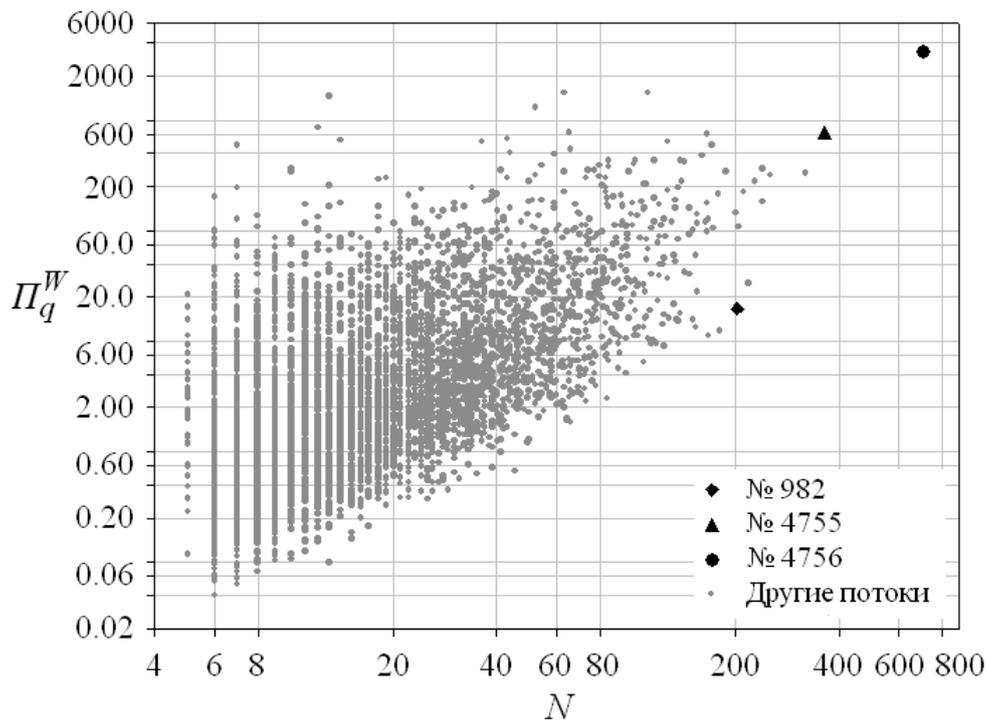


Рис. 7

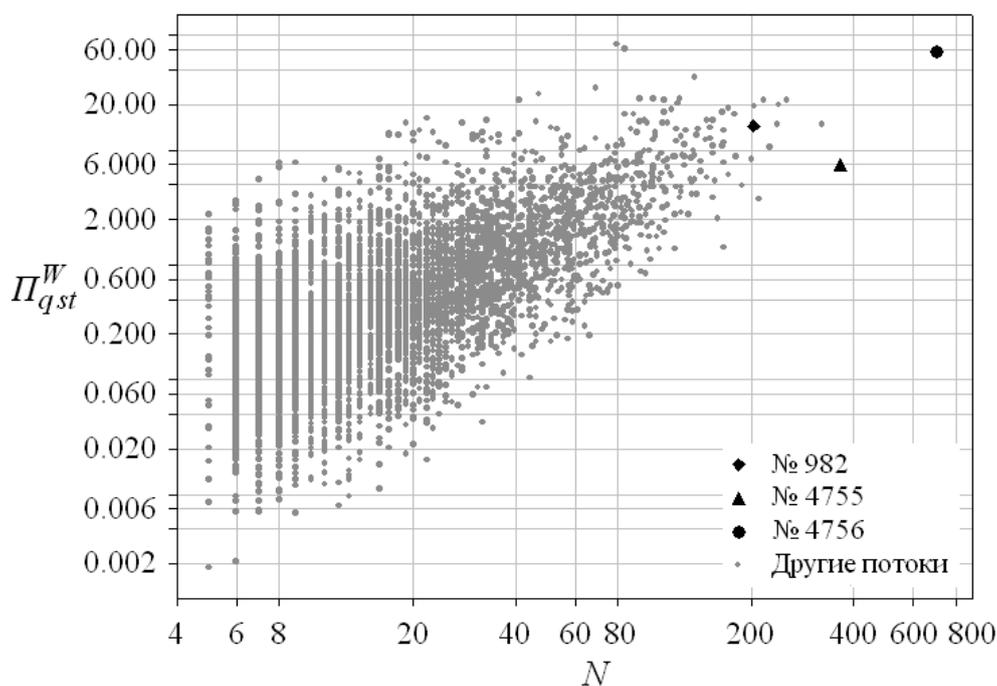


Рис. 8

Таблица 2

Характеристика	Поток		
	№ 4756	№ 1297	№ 2130
Количество метеоров в потоке N	702	80	84
Топоцентрическая плотность Π	0.228	0.074	0.059
Топоцентрическая исправленная плотность $\Pi^W = \Pi W_{\Sigma}$	202.74	188.93	133.08
Плотность в перигелии средней орбиты Π_q^W	3313.48	316.09	155.61
Плотность в стандартном перигелии средней орбиты Π_{qst}^W	58.024	68.07	61.29
Большая полуось a , а.е.	1.195	0.779	0.869
Эксцентриситет e	0.833	0.305	0.207
Наклонение i , град.	22.735	132.565	132.579
Перигелийное расстояние средней орбиты q , а.е.	0.198	0.541	0.688
Афелийное расстояние средней орбиты Q , а.е.	2.192	1.017	1.050

Из анализа оценок, приведенных в табл. 2, следует, что элементы орбит и скорости метеороидов потока № 4756 существенно отличаются от элементов орбит и скоростей метеороидов потоков № 1297 и № 2130. Оба этих потока имеют малые по размерам (по сравнению с потоком № 4756) высокоэллиптические орбиты и пересекаются с Землей в афелии средней орбиты. Главное же отличие орбит потоков № 1297 и № 2130 с одной стороны и потока № 4756 - с другой заключается в том, что в первом случае движение метеороидов является ретроградным, во втором – прямым.

С помощью нескольких графиков проанализируем влияние элементов средних орбит метеорных потоков на виртуальную плотность потока в стандартном перигелии.

На рис. 9 и 10 приведены диаграммы зависимости плотностей потоков метеороидов Π_q^W в перигелии средней орбиты потока и плотности потока Π_{qst}^W в стандартном перигелии от больших полуосей средних орбит метеорных потоков.

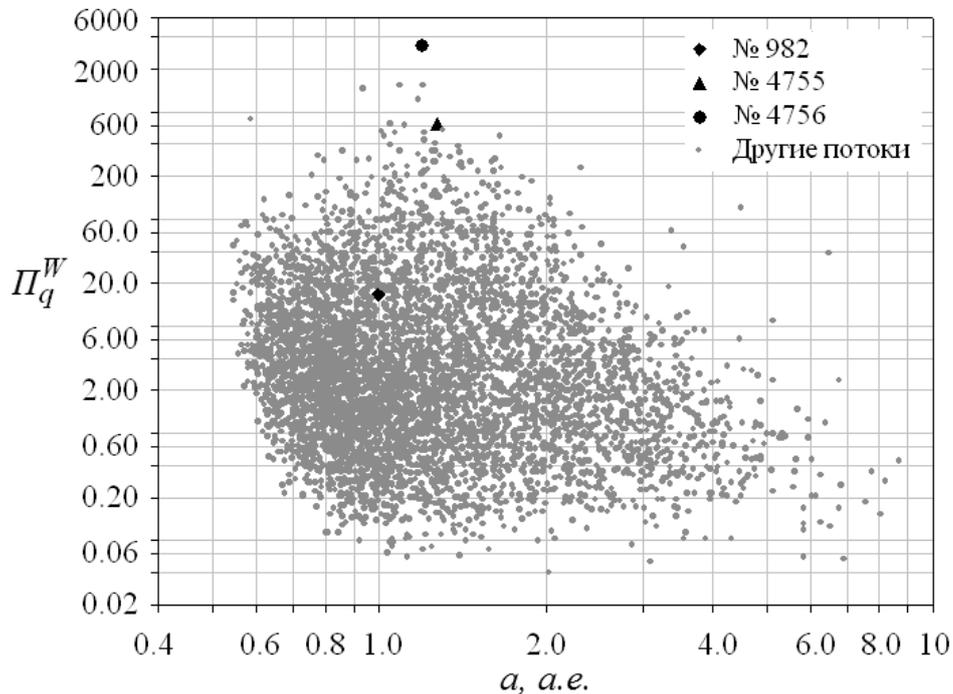


Рис. 9

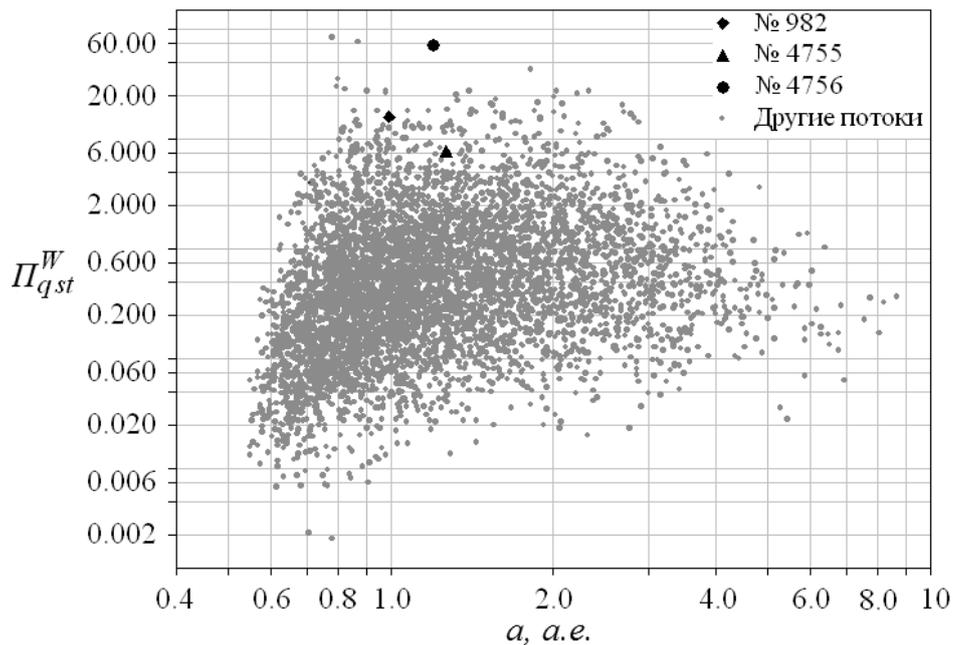


Рис. 10

Можно отметить, что по плотности потоков метеороидов в перигелиях средних орбит Π_q^W подавляющее большинство потоков каталога ХНУРЭ концентрируется в узком диапазоне $0.5 < a < 3 \text{ а.е.}$ и острый максимум приходится на значение $a \approx 1 \text{ а.е.}$ Потоки с $a > 3 \text{ а.е.}$ имеют очень низкие плотности. В стандартном перигелии картина существенно меняется. Максимальные плотности $a > 3 \text{ а.е.}$ имеют потоки с $a \approx 1 \text{ а.е.}$, вклад потоков с $a > 3 \text{ а.е.}$ резко возрос. А это – область потоков кометного происхождения.

На рис. 11 и 12 показаны графики, аналогичные тем, что приведены на рис. 9 и 10 соответственно, но в качестве аргумента выступает перигелийное расстояние q средней орбиты потока метеоров.

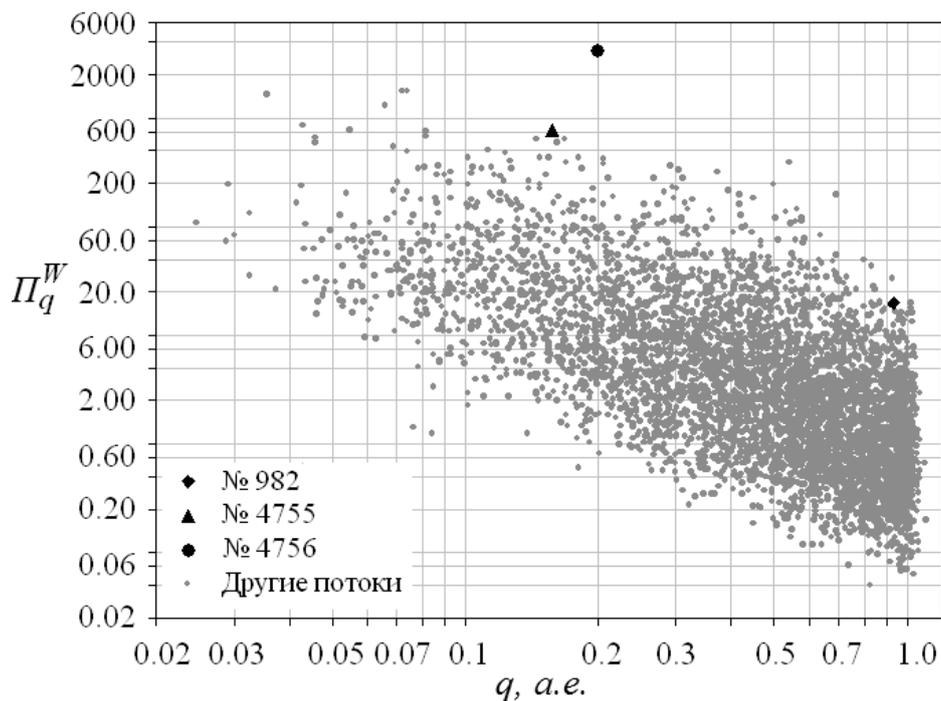


Рис. 11

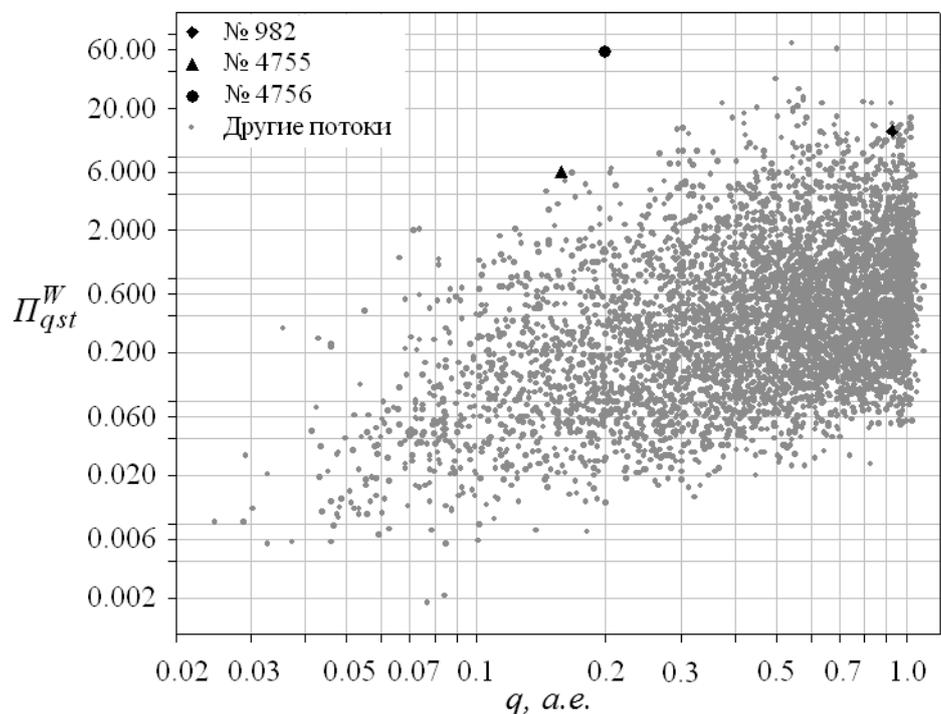


Рис. 12

Здесь, как и в предыдущем случае, большинство потоков каталога ХНУРЭ с относительно высокими значениями плотностей Π_q^W концентрируются в диапазоне $q < 0.5$ a.e. В остальной части диапазона изменения q размещаются потоки с низкими значениями плотности Π_q^W , хотя количество потоков в этом диапазоне велико.

Картина кардинально изменяется при пересчете плотностей к стандартному перигелию (рис. 12). Здесь уже, если не учитывать уникальный вообще и в каталоге ХНУРЭ в частности поток № 4756 (GEMINIDS), самые мощные по плотности $\Pi_{q\ st}^W$ расположены в диапазоне значений перигелийных расстояний $0.4 < q < 0.8$ а.е. а.е. При $q < 0.4$ а.е. их количество быстро убывает с уменьшением q , а при $q > 0.8$ а.е. их количество остается приблизительно одинаковым.

На рис. 13 и 14 приведены диаграммы расположения потоков каталога ХНУРЭ на плоскостях (e, Π_q^W) и $(e, \Pi_{q\ st}^W)$. Как и в предыдущем случае, диаграммы резко отличаются одна от другой. Если на рис. 13 потоки с наивысшими значениями плотности в перигелиях средних орбит потоков метеоров приходятся на диапазон значений эксцентриситетов $e > 0.8$ – резко вытянутые орбиты, то на рис. 14 четко выделяются две группы мощных по плотности в стандартном перигелии: одна $e < 0.4$ и другая $e > 0.6$.

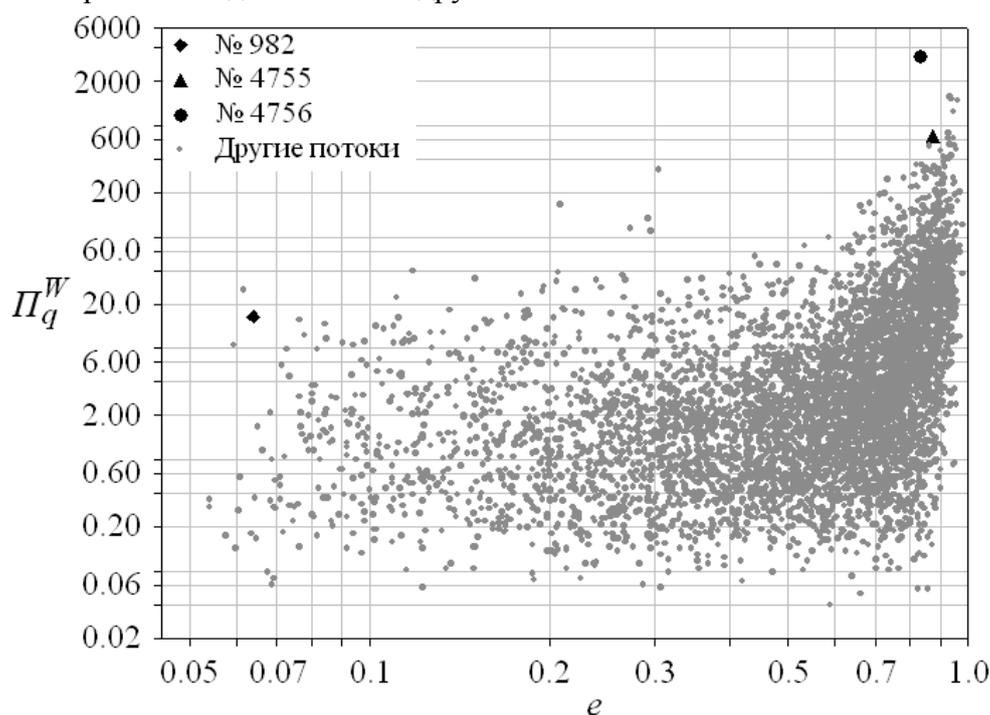


Рис. 13

На рис. 15 и 16 приведены диаграммы, аналогичные рассмотренным выше, но в качестве независимой переменной здесь выступает наклонение i плоскости средней орбиты потока к плоскости эклиптики. Можно отметить, что переход от плотности потока в перигелии его средней орбиты к плотности потока в стандартном перигелии внес принципиальные изменения в распределения потоков.

Увеличилось число потоков с такой плотностью $\Pi_{q\ st}^W$, которая выделяет их из общей совокупности, например $\Pi_{q\ st}^W > 10$. Кроме того, выявились потоки, орбиты которых имеют наклонения $i > 90^\circ$, а это является первым признаком их кометного происхождения. Если ограничиться только оценками плотности потоков в перигелиях их средних орбит, то вывод окажется другим, а именно: большинство потоков с высокой интенсивностью имеет $i < 90^\circ$ и, скорее всего, является продуктами дезинтеграции ААА-астероидов, среди которых несомненно присутствуют и «высохшие» ядра комет.

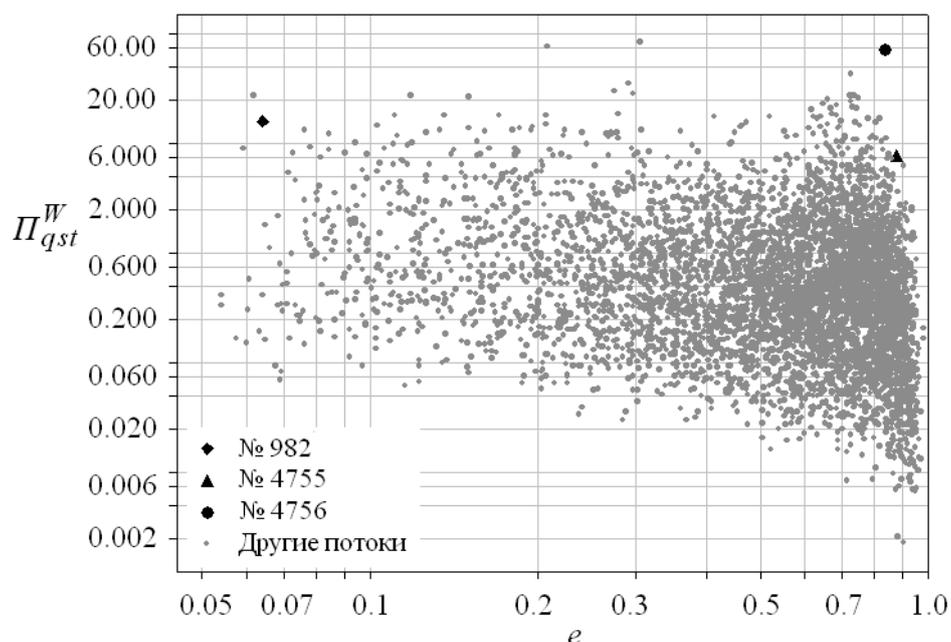


Рис. 14

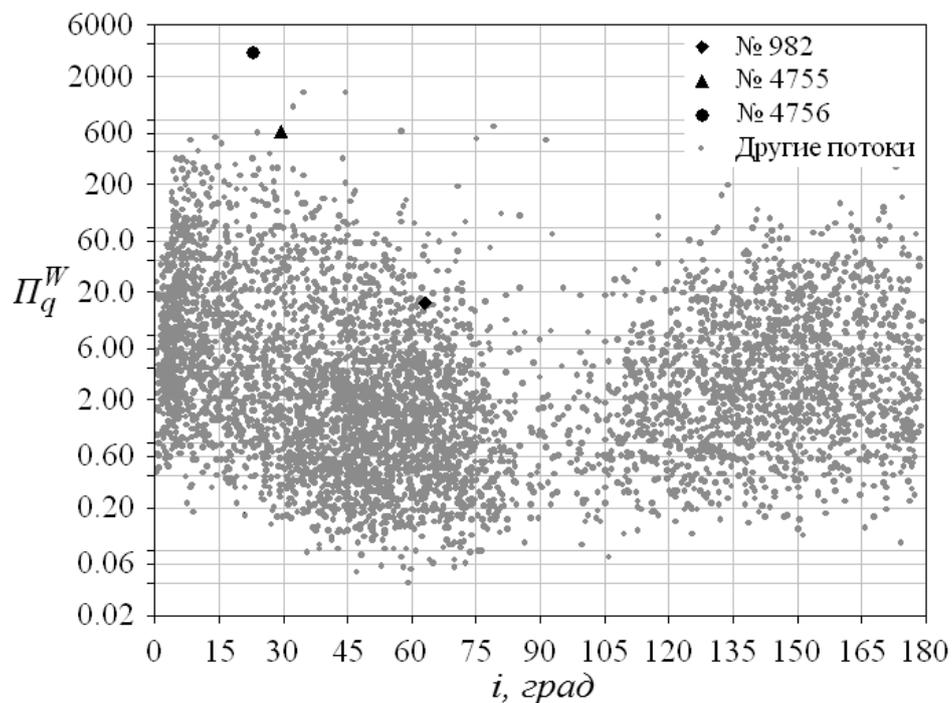


Рис. 15

На рис. 17 и 18 приведены двухмерные распределения (q, i) и (e, i) потоков из анализируемого каталога метеорных потоков. На рисунках выделены области, где располагаются ААА-астероиды.

Можно видеть, что в эти области попадает значительное количество потоков, причем и тех, у которых $\Pi_{qst}^W > 10$. Важно подчеркнуть, что и в диапазоне $i > 90^\circ$ расположено много потоков с высокой плотностью в стандартном перигелии. Если в область $i < 90^\circ$ могут попасть потоки как астероидного, так и кометного происхождения, то в область $i > 90^\circ$ по сегодняшним представлениям попадают только потоки, родительскими телами которых являются ядра комет.

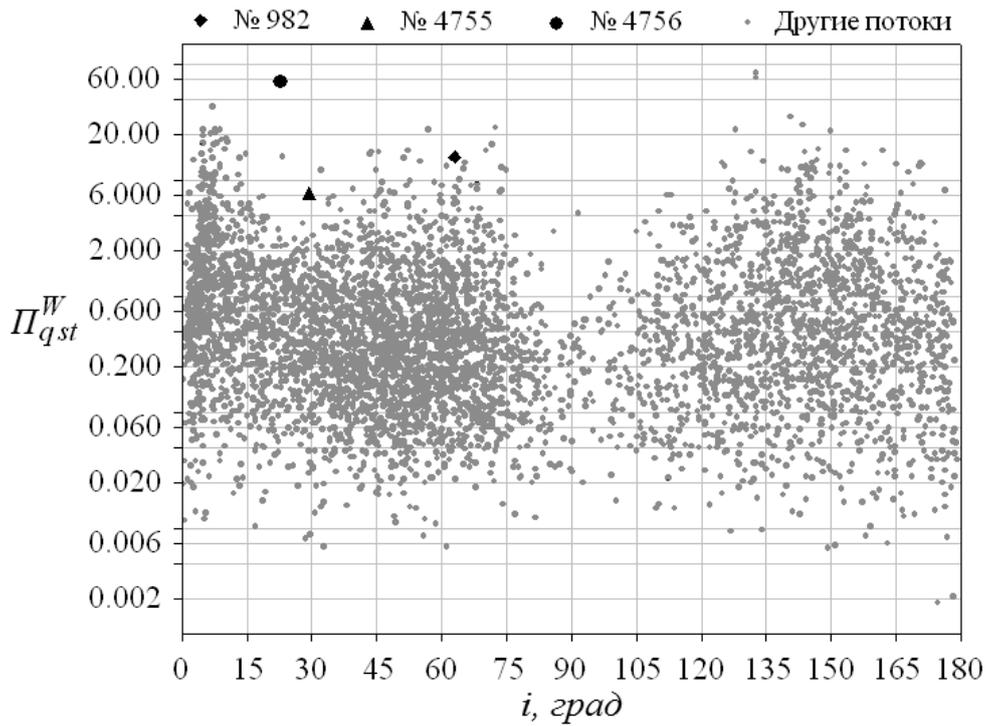


Рис. 16

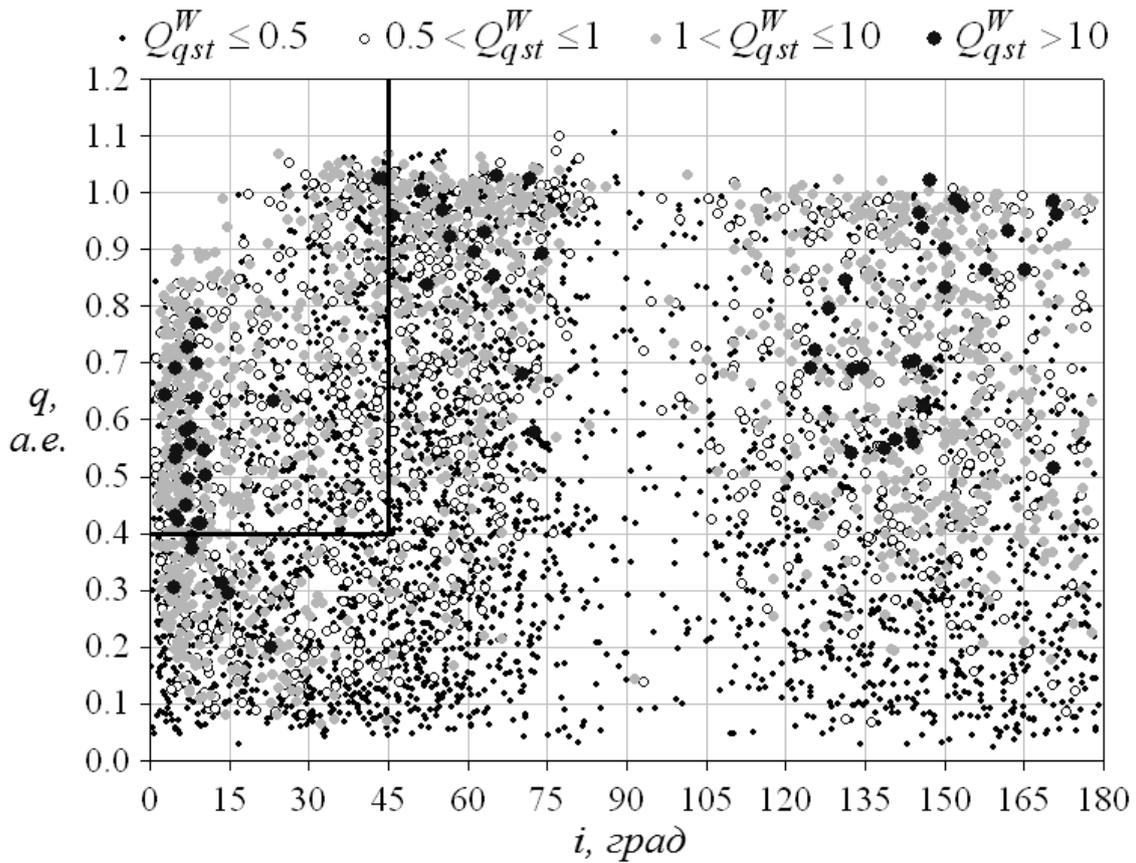


Рис. 17

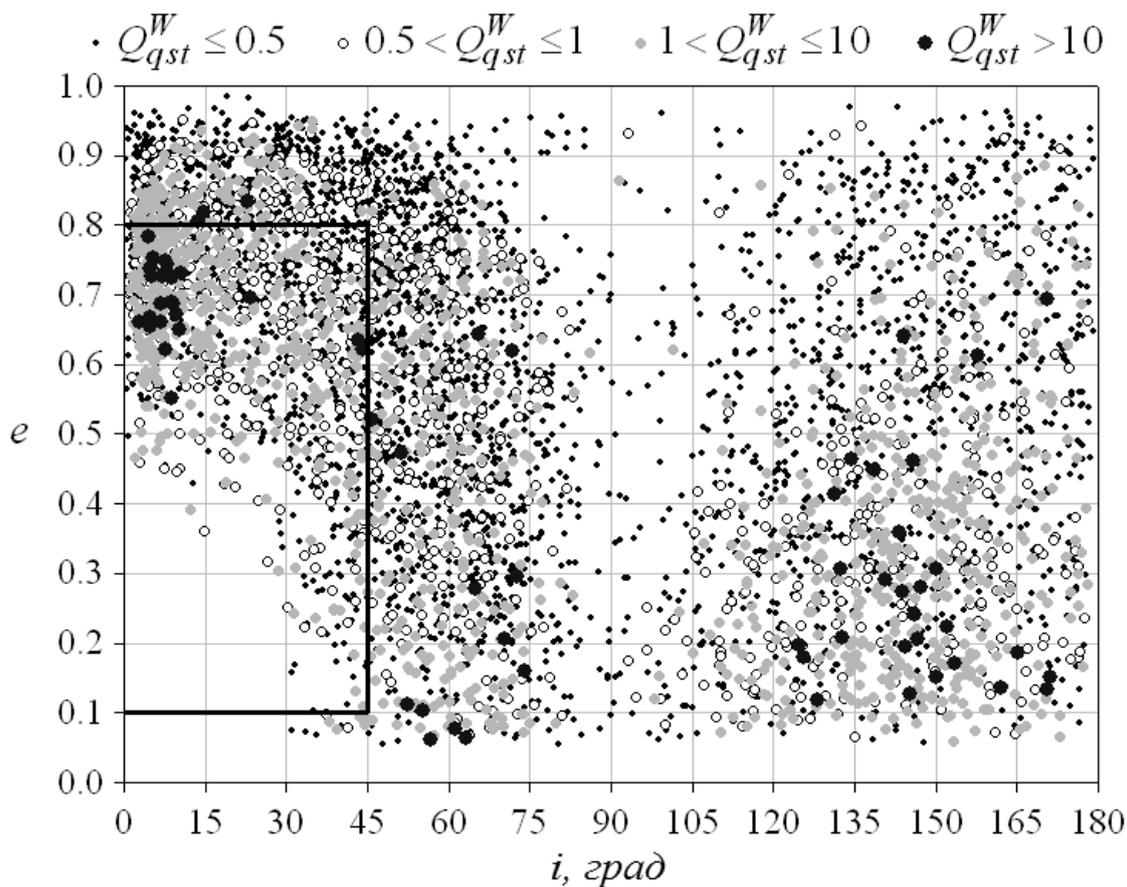


Рис. 18

Подводя итоги, можно констатировать, что среди потоков каталога ХНУРЭ есть такие, приведенная к стандартному перигелию плотность которых превышает плотность такого мощного потока, как № 4756 (GEMINIDS). Причин такого явления может быть две: во-первых, эти потоки являются молодыми и процессы трансформации орбит метеороидов под воздействием гравитационных и негравитационных эффектов еще не привели к уменьшению плотности; во-вторых, пылеобразующие свойства еще не найденных родительских тел превосходят таковые у астероида Phaeton, который, как в настоящее время принято, является родительским телом потока GEMINIDS.

Список литературы:

1. Горелов Д.Ю. Уточнение методики учета физического фактора замечаемости при построении истинных распределений параметров радиометеоров / Д.Ю.Горелов, Ю.И. Волощук // Радиотехника. – 2007. – Вып. 149. – С. 62-68.
2. Горелов Д.Ю. Оценка геометрического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров / Д.Ю.Горелов, Ю.И. Волощук // Прикладная радиоэлектроника. – 2006. – Т. 5, №4. – С. 519-527.
3. Горелов Д.Ю. Новый метод расчета астрономического фактора замечаемости в задаче определения истинных распределений параметров орбит радиометеоров / Д.Ю.Горелов, Ю.И. Волощук // Радиотехника. – 2007. – Вып. 151. – С. 246-252.
4. Горелов Д.Ю. Новый алгоритм оценки пространственной плотности потоков метеоров в подсистеме автоматического определения радиантов и орбит метеорных тел (ПАОРО) радиолокационного комплекса МАРС ХНУРЕ / Д.Ю.Горелов, Ю.И. Волощук // Радиотехника. – 2008. – Вып. 152. – С. 61-71.
5. Волощук Ю.И. Метеорные потоки и ассоциации, выявленные по результатам многолетних радиолокационных наблюдений метеоров в Харькове / Ю.И. Волощук Д.Ю.Горелов. – Харьков : Изд-во НТМТ, 2011. – 382 с.