

УДК 523.683

## МНОГОФАКТОРНАЯ МЕТОДИКА ПОИСКА МАЛЫХ ТЕЛ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

© 2020 г. М. В. Сергиенко<sup>1,\*</sup>, М. Г. Соколова<sup>1</sup>, К. В. Холшевников<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, Казань, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: maria\_sergienko@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.

После доработки 14.01.2020 г.

Принята к публикации 24.01.2020 г.

Приводятся результаты поиска астероидов групп Аполлона, Амура, Атона с орбитами, близкими к орбитам метеороидов метеорного комплекса  $\delta$ -Канкриды (код DCA), состоящего из северной (код NCC) и южной (код SCC) ветвей. Поиск малых тел на близких орбитах выполнен на основе многофакторной методики совокупности ряда критериев: критерия схожести орбит Драммонда, метрики Холшевникова и параметров динамической эволюции орбит с использованием двух каталогов орбит метеоров (Японское метеорное общество, SonatoCo; CAMS Meteoroid Orbit Database v2.0, CAMS), полученных по телевизионным наблюдениям. Астероиды на близких орбитах с орбитами метеороидов северной NCC и южной SCC ветвей  $\delta$ -Канкрид выделены только в группе Аполлона. Общими для NCC и SCC ветвей выделены следующие астероиды: 2015 PU228, 2014 YQ34, 2017 YO4 (по каталогу орбит CAMS); Hephaistos 1978 SB, 2003 RW11, 2006 BF56, 2011 SR12, 2014 RS17, 2001 YB5 (по каталогу SonatoCo). Астероид 85182 (1991 AQ) отождествлен только с северной NCC ветвью потока, но по двум каталогам метеорных орбит.

DOI: 10.31857/S0004629920060055

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При изучении связей комплекса малых тел и идентификации метеорных потоков с их вероятными родительскими телами (РТ) широко используют критерии схожести орбит. Наиболее часто используют  $D$  критерии, согласно которым принимается, что два тела могут иметь общее происхождение, если расстояние между их орбитами в орбитальном пространстве меньше, чем некоторое заданное пороговое значение  $D_c$ . Критерии схожести орбит для отождествления малых тел использованы, в частности, в работах [1–4].

Критерии схожести орбит просты в применении и требуют знания лишь элементов орбит малых тел, но проблема их использования заключается в определении порогового значения  $D_c$ , относительно которого принимается или отклоняется гипотеза о возможной связи двух малых тел. Единой методики в этом вопросе не существует. Исследователи применяют разные подходы и, как результат, один и тот же метеорный поток отождествляется с разными кометами или астероидами. По данным центра метеорных данных Международного астрономического союза (МАС) в околоземном пространстве наблюдается порядка

ста метеорных потоков, для которых не найдено родительское тело (назовем такие потоки условно потоками-сиротами). Таким образом, разработка новых подходов и усовершенствование уже существующих методик поиска малых тел на близких орбитах являются актуальным направлением изучения происхождения и эволюции метеороидных и кометно-астероидных комплексов.

### 2. КРИТЕРИИ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ОРБИТ МАЛЫХ ТЕЛ

При изучении генетических связей малых тел используют критерии схожести орбит, в которых степень близости двух орбит оценивается формальным безразмерным параметром  $D$  в 5-мерном пространстве орбит, или в одном из его фактор-пространств меньшей размерности. Для  $D$  критериев Саутворта-Хокинса [5], Драммонда [6], Йопека [7], Ашера [8] на примере главных метеорных потоков с уже известными родительскими кометами Лирид (C/1861 G1 Thatcher), Персеид (109P/Swift-Tuttle), Орионид (1P/Halley), Леонид (55P/Tempel-Tuttle), Урсид (8P/Tuttle), Геминид (астероид 3200 Phaethon) ранее нами были исследованы пороговые значения  $D_c$ , их

внутренняя и внешняя сходимости [9]. Было показано, что наиболее устойчивым к геометрии орбит метеоров и менее чувствительным к инструментальным ошибкам их определения, полученным фотографическим и телевизионным методами, является критерий Драммонда, записанный в виде

$$D_{DR}^2 = \left( \frac{e_2 - e_1}{e_2 + e_1} \right)^2 + \left( \frac{q_2 - q_1}{q_2 + q_1} \right)^2 + \left( \frac{I_{21}}{180^\circ} \right)^2 + \left( \frac{e_2 + e_1}{2} \right)^2 \left( \frac{\theta_{21}}{180^\circ} \right)^2, \quad (1)$$

где  $\theta = \arccos(\sin \beta_2 \sin \beta_1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1 \cos(\lambda_2 - \lambda_1))$ ,  $\lambda = \Omega + \arctg(\cos i \operatorname{tg} \omega)$  (прибавляется  $180^\circ$ , если  $\cos \omega < 0$ ),  $\beta = \arcsin(\sin i \sin \omega)$ ,  $I, e, q$  – взаимный наклон, эксцентриситеты и перигелийные расстояния гелиоцентрических орбит двух малых тел. Поэтому при выборе критериев был использован  $D$  критерий Драммонда.

Все указанные выше критерии обладают неустраняемыми недостатками [2, 10–12]: они плохо работают для околосферических орбит и не удовлетворяют аксиоме треугольника, а именно, в некоторых случаях

$$D(x, z) > D(x, y) + D(y, z),$$

где  $x, y, z$  – тройка орбит.

Эти недостатки, однако, не сильно портят картину, так как метеорные и кометные орбиты являются вытянутыми, и аксиома треугольника все же выполняется в ослабленном варианте [12]:

$$D(x, z) < A[D(x, y) + D(y, z)]$$

при некоторой постоянной  $A > 1$ .

В 2016 г. опубликован свободный от отмеченных недостатков критерий, являющийся метрикой (расстоянием) в пятимерном пространстве непрямолинейных кеплеровых орбит. В работах [2, 10] определены метрики в нескольких фактор-пространствах. Здесь мы используем метрику  $\rho$ , определенную в трехмерном фактор-пространстве как

$$\rho^2 = (1 + e_1^2)p_1 + (1 + e_2^2)p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2}(e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2)). \quad (2)$$

Элементом этого пространства является класс орбит с фиксированными фокальным параметром  $p$ , эксцентриситетом  $e$  и наклоном  $i$ , которые со временем меняются незначительно, и всевозможными значениями направления перигелия  $\omega$  и узлов орбиты  $\Omega$ , испытывающих большие вековые возмущения. Физическая размерность  $\rho$  – корень из единицы длины, поэтому далее будем вычислять  $\rho^2$  в астрономических единицах (а.е.). Соответственно для критерия Драммонда (1) также будем вычислять величину  $D_{Dr}^2$ .

*Замечание.* Определенная формулой (2) метрика  $\rho$  обозначалась в [2] как  $\rho_5$ , а в [10] – как  $\rho_3$ .

Вследствие планетных возмущений орбиты метеороидов в одном и том же рое могут значительно отличаться как друг от друга, так и от орбиты родительского тела [13]. Поэтому наряду с  $D$  критериями применяют еще три критерия [14, 15], полученные на основе решения ограниченной задачи трех тел Солнце–Юпитер – малое тело (астероид). Это постоянная Тиссерана [16, 17]:

$$T = \frac{1}{a} + 2(1 + m_{пл})^{1/2} \frac{1}{a_{пл}^{3/2}} (a(1 - e^2))^{1/2} \cos i,$$

где  $m_{пл}$ ,  $a_{пл}$  – отношение массы планеты к массе Солнца и большая полуось планеты; применительно к Юпитеру

$$T = a^{-1} + 0.16860(a(1 - e^2))^{1/2} \cos i, \quad (3)$$

и два квазистационарных параметра:

$$\mu = \sqrt{a(1 - e^2)} \cos i \quad (4)$$

$$\nu = (1 - e^2)(0.4 - \sin^2 \omega \sin^2 i) = \text{const}. \quad (5)$$

Вычисления вековых гравитационных возмущений от девяти планет и с учетом негравитационного эффекта Пойнтинга–Робертсона на интервале 10 тыс. лет показали, что относительные изменения квазистационарных параметров  $\mu$  и  $\nu$  составляют не более 5–10%. За тот же период времени долгота восходящего узла  $\Omega$  и аргумент перигелия  $\omega$  орбиты изменяются значительно, но часто (хотя и не всегда) значение долготы перигелия как суммы

$$\pi = \Omega + \omega \quad (6)$$

сохраняет стабильность [18]. В частности, это имеет место для  $\delta$ -Канкрид, как будет показано ниже. Таким образом, для предположения о возможной связи двух малых тел необходимо, чтобы в процессе своей эволюции их орбиты сохраняли близкие значения постоянной Тиссерана  $T$ , квазистационарных параметров  $\mu$ ,  $\nu$  и долгот перигелиев  $\pi$ .

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ КРИТЕРИЕВ СХОЖЕСТИ ОРБИТ

Существуют два основных подхода в определении верхнего порогового значения  $D_c$ : статистический и метод ретро-моделирования орбит. При статистическом подходе значение  $D_c$  определяется на основе статистической выборки исследуемых орбит, принадлежащих метеорным потокам с известными родительскими телами, например [19]

$$D_c = 0.8n^{-1/4},$$

где  $n$  – размер выборки отождествляемых метеороидных орбит.

При таком подходе для большинства пар: метеороид – родительское тело для  $D$  критериев независимо от метеороидного потока пороговое значение  $D_c$  не превышает значения 0.2. Однако применение этих формул не всегда может быть оправдано из-за различной точности и статистической обеспеченности орбит метеороидов, приведенных в каталогах метеороидных орбит. В работе [3] реализован способ определения  $D_c$  на основе двухэтапной графической интерполяции: сначала пороговое значение  $D_c$  определяется для каждого выбранного  $D$  критерия, а затем на его основе индивидуально определяется  $D_c$  для исследуемого метеороидного потока. Однако в методике, описанной в работе [3], при определении значений  $D_c$  учитываются только ошибки определения орбит астероидов, в то время как инструментальные ошибки наблюдений метеороидов значительно выше.

При втором подходе определения значения  $D_c$  используются орбиты метеороидов, полученные путем моделирования их выброса из родительского тела (задаются точка и направление выброса на орбите родительского тела, скорость выброса и масса частицы) и последующей орбитальной эволюции. Метод применим для потоков с уже известными родительскими телами. Как показали исследования [20–22], при таком подходе значение  $D_c$  для пары орбит “модельный метеороид-комета” получается значительно ниже значения 0.2 для метеороидных потоков с родительской кометой группы Галлея и выше для потоков, относящихся к группе Юпитера.

Определение пороговых значений критерия Драммонда (1) и метрики Холшевникова (2), а также пороговых значений постоянной Тиссерана (3), квазистационарных параметров (4), (5), долготы перигелия (6) было выполнено нами на основе вычисления средней орбиты метеороидного потока внутри каждого использованного каталога метеороидных орбит по следующему алгоритму:

1) расчет средней орбиты метеороидного потока по всей совокупности индивидуальных орбит метеороидов потока;

2) расчет значений критерия Драммонда  $D_{DRi}$  (1), метрики Холшевникова  $\rho_i$  (2), для каждой пары орбит: орбита метеороида – средняя орбита метеороидного потока;

3) расчет средних значений критерия Драммонда  $D_{DR}$ , метрики Холшевникова  $\rho$  и их средних квадратических ошибок (СКО)  $\sigma D_{DR}$ ,  $\sigma \rho$ ;

4) расчет значений постоянной Тиссерана  $T_i$  (3), параметров  $\mu_i$  (4),  $\nu_i$  (5), долготы перигелия  $\pi_i$  (6) по элементам индивидуальных орбит метеороидов;

5) расчет средних значений постоянной Тиссерана  $T$ , параметров  $\mu$ ,  $\nu$ , долготы перигелия  $\pi$  и их средних квадратических ошибок (СКО)  $\sigma T$ ,  $\sigma \mu$ ,  $\sigma \nu$ ,  $\sigma \pi$ ;

6) вычисление значений каждого из критериев (1–6) для пары орбит: орбита астероида – средняя орбита метеороидного потока;

7) проверка выполнения критериев (1–6) на основе их СКО  $\sigma D_{DR}$ ,  $\sigma \rho$ ,  $\sigma T$ ,  $\sigma \mu$ ,  $\sigma \nu$ ,  $\sigma \pi$ .

Из-за многочисленных возмущений, учет которых возможен только с ограниченной точностью (например, негравитационные возмущения), а также из-за погрешностей наблюдений реалистична только статистическая постановка вопроса о близости орбит. В идеале каждому критерию следует поставить в соответствие фактор  $P$ , непрерывно изменяющийся от 1 до 0. Например, для  $\rho^2$  значения  $P$  убывают от 1 для  $\rho^2 = 0$  до 0 для  $\rho^2 = 0.1$  а.е. Однако закон распределения  $P$  нам неизвестен. Поэтому мы ограничились упрощенной постановкой. Именно, фактору  $P$  мы приписываем множество значений, состоящее из четырех элементов  $P = \{1, 0.9, 0.8, 0.7\}$ . Если значения критерия выступают за некоторое пороговое значение, соответствующая орбита отбрасывается, что равносильно равенству  $P = 0$ . Совокупности критериев ставится в соответствие фактор  $P = P_1 P_2 \dots P_n$ . Произвольный выбор возможных значений  $P_i$  слабо влияет на результат, меняя только пороговое значение  $P$ .

Для критерия Драммонда и метрики Холшевникова принималось, что если для пары орбит:  $x$  (орбита астероида) и  $y$  (средняя орбита потока) имеет место неравенство:

$$\begin{aligned} D_c^2(x, y) &\leq D_c^2, \\ \rho_c^2(x, y) &\leq \rho_c^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где пороговые значения  $D_c$  и  $\rho_c$  равны, соответственно, средним значениям для потока внутри каталога орбит, то критерии (1) и (2) оцениваются факторами  $P_1 = 1$ ,  $P_2 = 1$ ; если имеет место неравенство:

$$\begin{aligned} D_c^2(x, y) < D_c^2(x, y) &\leq D_c^2(x, y) + \sigma D_{DR}, \\ \rho_c^2(x, y) < \rho_c^2(x, y) &\leq \rho_c^2(x, y) + \sigma \rho, \end{aligned}$$

то критерии (1) и (2) оцениваются факторами  $P_1 = 0.9$ ,  $P_2 = 0.9$ . Если имеет место неравенство:

$$\begin{aligned} D_c^2(x, y) < D_c^2(x, y) &\leq D_c^2(x, y) + 2\sigma D_{DR}, \\ \rho_c^2(x, y) < \rho_c^2(x, y) &\leq \rho_c^2(x, y) + 2\sigma \rho, \end{aligned} \quad (8)$$

то критерии (1) и (2) оцениваются факторами  $P_1 = 0.8$ ,  $P_2 = 0.8$  и т. д.

Выполнение критерия (3) по постоянной Тиссерана  $T$  для пары орбит “орбита астероида ( $x$ ) –

средняя орбита потока ( $y$ )” также оценивается на основе СКО  $\sigma T$  следующим образом:

– если выполняется неравенство

$$T - \sigma T < T(x, y) \leq T + \sigma T,$$

то критерий (3) оценивается фактором  $P_3 = 0.9$ ;

– если выполняется неравенство

$$T - 2\sigma T \leq T(x, y) \leq T + 2\sigma T, \quad (9)$$

то критерий (3) оценивается фактором  $P_3 = 0.8$  и т.д.

Аналогично (9) для пары орбит “ $x$  (орбита астероида) и  $y$  (средняя орбита потока)” оценивалась степень выполнения критериев (4–6) квазистационарных параметров  $\mu$ ,  $\nu$ , долготы перигелия  $\pi$  на основе их СКО  $\sigma\mu$ ,  $\sigma\nu$ ,  $\sigma\pi$  с факторами  $P_4$ ,  $P_5$  и  $P_6$  соответственно. Для критериев (3–6) оценивается именно интервальный разброс значений  $T$ ,  $\mu$ ,  $\nu$ ,  $\pi$  между орбитами астероида и средней орбитой потока, а не их полное совпадение, поэтому факторам  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  и  $P_6$  значение единицы не присваивается.

Для каждой пары орбит “ $x$  (орбита астероида) и  $y$  (средняя орбита потока)” мера выполнения всей совокупности критериев (1–6) оценивалась по формуле:

$$P = \prod P_i, \quad (10)$$

т.е. произведение  $P_i$  факторов выполнения каждого критерия при  $i = 1, \dots, 6$ . Отбор астероидов, для орбит которых предполагается схожесть с орбитами метеороидов, выполняется на основе значений СКО критериев  $\sigma D_{DR}$ ,  $\sigma r$ ,  $\sigma T$ ,  $\sigma\mu$ ,  $\sigma\nu$ ,  $\sigma\pi$ , полученных для пары “ $x$  (орбита астероида) и  $y$  (средняя орбита потока)”, и меры  $P$  выполнения критериев.

## 4. ПОИСК АСТЕРОИДОВ С БЛИЗКИМИ ОРБИТАМИ МЕТЕОРОИДОВ $\delta$ -КАНКРИД

### 4.1. Объект исследования

Данная методика была применена для поиска вероятных родительских тел малого метеорного потока  $\delta$ -Канкриды среди околоземных астероидов, некоторые из которых могут быть потухшими кометами или продуктами их распада. Поток  $\delta$ -Канкриды имеет две ветви – северные (NCC) и южные (SCC)  $\delta$ -Канкриды, но в некоторых источниках, например, в базе данных визуальных наблюдений метеоров Международной метеорной организации (ММО) он обозначен как DCA без деления на ветви. Поток является подтвержденным МАС малым метеорным потоком и не имеет достоверно установленных генетических связей ни с одним малым телом Солнечной системы. Комплекс  $\delta$ -Канкрид наблюдается в период с 1 по 31 января, размер его средней ор-

биты порядка 2.5 а.е., геоцентрическая скорость 27 км/с. Поток мало изучен и данных об исследованиях его структуры и эволюции практически нет.

По визуальным наблюдениям за период 1987–2006 гг., выполненным под эгидой ММО (<http://www.imo.net/data/visual>, дата обращения 30.05.2018), была изучена структура  $\delta$ -Канкрид (DCA). Приведем данные только об активности потока, которая определяется зенитным часовым числом ( $ZHR$ ). Значение  $ZHR$ , пропорциональное плотности потока метеорных тел с массами больше, чем минимальная регистрируемая масса метеороида, соответствующая метеору +3<sup>m</sup> и ярче, определялось по формуле

$$ZHR = \frac{N}{t} k e^{0.4F} \cos^{-S} Z, \quad (11)$$

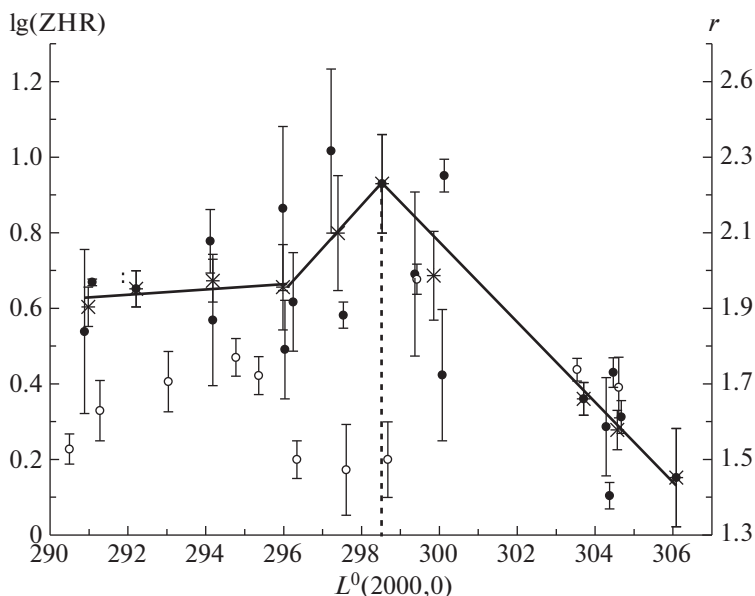
где  $N$  – зарегистрированное число метеоров в интервале времени  $t$ ,  $k$  – поправка приведения наблюдаемого числа метеоров к +3<sup>m</sup>,  $Z$  – зенитное расстояние радианта,  $F$  – фаза Луны. Параметр  $S$  распределения метеороидов потока по массам (интегральный масс-индекс) связан с параметром  $r$  функции светимости метеоров соотношением

$$S = 1 + 2.5 \lg r. \quad (12)$$

Методика определения параметров функции светимости  $r$  и  $S$ ,  $ZHR$  по визуальным наблюдениям метеоров подробно описана в [23–25].

Было установлено, что для метеоров DCA с минимальной регистрируемой звездной величиной +3<sup>m</sup> и ярче усредненное за все годы наблюдений максимальное зенитное часовое число составляет  $ZHR_{\max} = 8.6 \pm 1.8$  и наблюдается на долготе Солнца  $L_{\max} = 298.5^\circ \pm 1.2^\circ$  (рис. 1). Максимум активности  $L_{\max}$  в пределах  $1^\circ$  совпадает с положением основного минимума параметра  $r$  функции светимости, обусловленного концентрацией более крупных метеороидов на данном участке потока (рис. 1). По данным других источников [26] значение  $L_{\max}$  равно  $296.3^\circ$  (по визуальным наблюдениям 1989 г.);  $299^\circ$  (по телевизионным наблюдениям 1999–2009 гг.). Таким образом, моменты наступления максимальной активности  $\delta$ -Канкрид, полученные на основе разных методов наблюдений метеоров, варьируются в пределах порядка  $2^\circ$  относительно полученного нами  $L_{\max}$ .

По положению максимальной активности потока относительно долготы узла орбиты РТ, по ширине профиля, наклону восходящей и нисходящей ветвей можно судить о его эволюционной стадии. Для молодых роев максимум активности практически совпадает с долготой узла орбиты РТ. Для более старых потоков максимум активности по долготе Солнца может не совпадать с узлом



**Рис. 1.**  $\delta$ -Канкриды по визуальным наблюдениям 1987–2006 гг. (темные кружки – индивидуальные значения ZHR; крестики и сплошная линия – усредненные значения ZHR; открытые кружки – усредненные значения параметра  $r$  функции светимости, штриховая линия – положение максимума активности  $L_{\max}$ ).

орбиты РТ вследствие гравитационных возмущений от планет [27]. В случае метеорного потока с неизвестным РТ по моменту наступления  $L_{\max}$  максимальной активности потока  $ZHR_{\max}$  и положению минимума параметра  $r$  функции светимости можно судить о вероятном значении узла орбиты потенциального РТ в момент образования роя. Таким образом, вероятное родительское тело  $\delta$ -Канкрид в период образования роя могло иметь орбиту с долготой узла в интервале значений  $296^{\circ}$ – $300^{\circ}$ .

#### 4.2. Наблюдательная база метеорных орбит и астероидов

Для исследования связей  $\delta$ -Канкрид с астероидами были использованы телевизионные каталоги метеорных орбит Японской метеорной сети SonatoCo (Японское метеорное общество (<http://sonotaco.jp/doc/SNM/index.html>, SonatoCo) и каталог CAMS Meteoroid Orbit Database v2.0 (<http://cams.seti.org/>, CAMS). В SonatoCo по наблюдениям 2007–2015 гг. представлено 111 и 59 орбит метеоров NCC северной и SCC южной ветвей соответственно. В каталоге CAMS орбитальные элементы представлены для 74 орбит NCC и 69 орбит SCC ветвей за 2007–2009 гг. Точность измерений составляет: для каталога SonatoCo направления –  $0.03^{\circ}$ , времени регистрации события –  $0.3$  с, скорости метеороидов главных потоков  $\pm 20\%$ , малых потоков  $\pm 30\%$ , индивидуальные ошибки элементов орбит не приводятся. В каталоге CAMS для всех орбит и их параметров

приведены ошибки определения, которые учитываются при вычислениях. В других опубликованных телевизионных и фотографических каталогах орбиты  $\delta$ -Канкрид не представлены. Не использовались каталоги орбит, в которых наблюдаемые метеоры не отнесены к какому-либо метеорному потоку, например, Лундский сводный фотографический каталог (<https://www.astro.sk/~ne/IAUM-DC/PhV2016/photo.html>).

Актуальная база данных орбит астероидов групп Аполлона, Амура, Атона, пересекающих орбиту Земли, представлена на сайте ([http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb\\_query.cgi](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi), дата обращения 28.04.2019).

#### 4.3. Результаты поиска астероидов с орбитами, близкими метеороидам $\delta$ -Канкрид

Согласно описанному выше алгоритму по каждому каталогу орбит SonatoCo и CAMS вычислялись орбитальные элементы средней орбиты (перигелийное расстояние  $q$ , а.е., эксцентриситет  $e$ , наклон орбиты  $i$ , долгота восходящего узла  $\Omega$ , аргумент перигелия  $\omega$ , долгота перигелия  $\pi$  на эпоху J2000.0) южной SCC и северной NCC ветвей  $\delta$ -Канкрид и их средние квадратические ошибки  $\sigma$  (СКО) (табл. 1).

Средние значения критерия Драммонда  $D_{DR}$  (1), метрики Холшевникова  $\rho$  (2), постоянной Тиссерана  $T$  (3) и квазистационарных параметров  $\mu$  (4),  $\nu$  (5), долготы перигелия  $\pi$  (6) и их СКО определялись на основе вычисления данных па-

**Таблица 1.** Средние орбиты SCC южной и NCC северной ветвей δ-Канкрид

Поток	$q \pm \sigma$ (а.е.)	$e \pm \sigma$	$i^\circ \pm \sigma^\circ$	$\Omega^\circ \pm \sigma^\circ$	$\omega^\circ \pm \sigma^\circ$	$\pi^\circ \pm \sigma^\circ$	Каталог
SCC	0.376 ±0.100	0.812 ±0.061	5.676 ±2.321	121.066 ±6.202	112.638 ±13.189	233.705 ±7.600	SonatoCo
	0.429 ±0.047	0.810 ±0.025	4.921 ±1.120	111.853 ±6.941	107.743 ±8.542	219.596 ±11.944	CAMS
NCC	0.419 ±0.108	0.801 ±0.058	2.481 ±1.709	298.923 ±6.292	286.323 ±12.917	225.246 ±7.637	SonatoCo
	0.412 ±0.047	0.813 ±0.026	2.781 ±1.082	277.921 ±23.306	275.108 ±23.192	217.354 ±6.597	CAMS

раметров для каждой пары орбит “индивидуальная орбита метеороида – средняя орбита потока” (табл. 1) отдельно для каждого каталога (табл. 2 и 3).

Списки астероидов, выделенные для ветвей SCC и NCC δ-Канкрид по каждому каталогу, приведены в табл. 4. Отбор астероидов проводился на основе значений СКО критериев  $\sigma D_{DR}$ ,  $\sigma r$ ,  $\sigma T$ ,  $\sigma \mu$ ,  $\sigma v$ ,  $\sigma \pi$  по правилу  $2\sigma$ . Следовательно, в список астероидов, приведенных в табл. 4, вошли только те астероиды, для которых все использованные нами критерии (1–6) выполняются со значениями факторов  $P_i \geq 0.8$  (с учетом округления до десятых долей). При этом мера  $P$  (10) выполнения совокупности всех критериев принимает значение: для каталога CAMS выше или равно 0.5; для каталога SonatoCo – выше или равно 0.6, что, вероятно, обусловлено несколько более высокими СКО средних элементов орбиты потока (табл. 1) и критериев (табл. 2, 3) по сравнению с CAMS.

Сравнение результатов поиска астероидов с орбитами, схожими с орбитами δ-Канкрид, с данными других источников приведено в табл. 5. В случае, если астероид нами не отобран, один из критериев (1–6) не удовлетворяет правилу  $2\sigma$ .

**Таблица 2.** Средние значения  $D_{DR}$  критерия Драммонда и  $\rho$  метрики Холшевникова для SCC южной и NCC северной ветвей δ-Канкрид

Поток	$D_{DR}^2 \pm \sigma$	$\rho^2 \pm \sigma$ (а.е.)	Каталог
SCC	0.021 ±0.025	0.021 ±0.028	SonatoCo
	0.006 ±0.005	0.005 ±0.005	CAMS
NCC	0.020 ±0.023	0.017 ±0.021	SonatoCo
	0.019 ±0.010	0.005 ±0.005	CAMS

В табл. 6 для отобранных как для SCC, так и для NCC астероидов даны орбитальные и физические характеристики по данным ([http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb\\_query.cgi](http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi), дата обращения 28.04.2019) в сравнении с параметрами средних орбит ветвей потока. В табл. 6 приведены следующие значения:  $e_n, q_n, i_n, \Omega_n, e, q, i, \Omega$  – орбитальные элементы потока и астероида;  $T_n, T$  – постоянные Тиссерана потока и астероида;  $H, D, \alpha$  – абсолютная звездная величина, диаметр, геометрическое альbedo астероида (в случае, если известны);  $r_{min}$  – расстояние его сближения с Землей.

Согласно [18, 29] объекты со значением постоянной Тиссерана относительно Юпитера  $T < 3.1$  движутся по кометоподобным орбитам, а с  $T > 3.1$  – по астероидным орбитам. Кроме того, предполагается, что астероиды с низким геометрическим альbedo, лежащим в интервале от 0.02 до 0.12, могут быть угасшими кометами [30]. По значению постоянной Тиссерана  $T_n = 3.17$  комплекс δ-Канкрид занимает промежуточное положение между классом комет и астероидов (табл. 6). За исключением двух астероидов 2011 SR12, 2014 RS17, все астероиды имеют кометный, а астероид 85182 (1991 AQ) – промежуточный типы орбит. По ор-

**Таблица 3.** Средние значения постоянной Тиссерана  $T$ , квазистационарных параметров  $\mu$  и  $v$ , долготы перигелия  $\pi$  для SCC южной и NCC северной ветвей δ-Канкрид

Поток	$T \pm \sigma$	$v \pm \sigma$	$\mu \pm \sigma$	$\pi \pm \sigma$	Каталог
SCC	3.241 ±0.755	0.125 ±0.038	0.816 ±0.103	233.705 ±7.624	SonatoCo
	3.076 ±0.316	0.134 ±0.021	0.875 ±0.053	214.378 ±6.665	CAMS
NCC	3.301 ±0.402	0.134 ±0.035	0.863 ±0.105	225.246 ±7.637	SonatoCo
	3.126 ±0.381	0.134 ±0.023	0.861 ±0.055	217.354 ±7.677	CAMS

**Таблица 4.** Астероиды, отобранные для SCC южной и NCC северной ветвей  $\delta$ -Канкрид

Поток	Астероиды	$P$	Астероиды	$P$
	каталог SonatoCo		каталог CAMS	
SCC	2212 Hephaistos (1978 SB)	0.7	2017 YO4	0.6
	2011 SR12	0.7	2015 PU228	0.5
	2014 RS17	0.7	2010 XC11	0.5
	2006 BF56	0.6	2003 RW11	0.5
	2003 RW11	0.6	2014 YQ34	0.5
	2009 BB	0.6		
	162825 (2001 BO61)	0.6		
	356394 (2010 QD2)	0.6		
	2001 YB5	0.6		
	2006 AM8	0.6		
NCC	каталог SonatoCo		каталог CAMS	
	2006 BF56	0.7	2014 YQ34	0.6
	85182 (1991 AQ)	0.7	85182 (1991 AQ)	0.5
	2017 YO4	0.6	2017 YO4	0.6
	2015 PU228	0.6	2015 PU228	0.5
	2003 RW11	0.6	2019 AQ	0.5
	2011 SR12	0.6		
	2010 XC11	0.6		
	2014 BX2	0.6		
	2014 RS17	0.6		
	2001 YB5	0.6		
	2212 Hephaistos (1978 SB)	0.6		
	2015 PC	0.6		

бите, размеру и альбедо астероид 2003 RW11, выделенный для обеих ветвей, демонстрирует кометный тип и может быть ядром угасшей ко-

меты. По значению альбедо крупные астероиды Hephaistos 1978 SB и 85182 (1991 AQ) классифицируются как астероиды. Астероиды 2006 BF56, 2001 YB5, 2014 RS17, 2014 YQ34 являются потенциально опасными, сближаясь с Землей менее, чем на 900 тыс. км, они попадают в сферу ее влияния.

**Таблица 5.** Астероиды на близких орбитах с  $\delta$ -Канкридами по разным источникам

Поток	Астероид	Источники
SCC	2212 Hephaistos (1978 SB)	авторы; [28]
	2001 YB5	авторы; [26]
	2010 XC11	авторы; [3]
	85182 (1991 AQ)	[28]
	(480822)1998YM4	[3]
NCC	2212 Hephaistos (1978 SB)	авторы; [28]
	2003 RW11	авторы; [28]
	2015 PU228	авторы; [3]
	85182 (1991 AQ)	авторы; [3, 26, 28]
	2013 YL2	[3]

Если сравнивать положение узлов орбит  $\Omega$  астероидов, приведенных в табл. 6, с профилем активности потока  $\delta$ -Канкриды (рис. 1), то современное положение узлов орбит астероидов 2006 BF56, 2015 PU228, 2001YB5 попадает в диапазон дат наблюдения потока. Данные объекты, звездная величина которых слабее  $+20^m$ , имеют, подобно астероиду 2015 PU228 (табл. 6), небольшие размеры, и могут быть продуктами распада более крупного родительского тела.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для поиска астероидов со схожими орбитами с метеороидами комплекса  $\delta$ -Канкриды использо-

**Таблица 6.** Параметры астероидов, отобранных для метеороидов SCC южной и NCC северной ветвей  $\delta$ -Канкрид

Астероиды	$e$	$q$ (а.е.)	$i^\circ$	$\Omega^\circ$	$T$	$H/D$ , км	$\alpha$	$r_{\min}$ (а.е.)
SCC $\delta$ -Канкриды $e_n = 0.81$ $q_n = 0.38$ а.е. $i_n = 5^\circ$ $\Omega_n = 121^\circ$ $T_n = 3.17$								
NCC $\delta$ -Канкриды $e_n = 0.80$ $q_n = 0.42$ а.е. $i_n = 3^\circ$ $\Omega_n = 298^\circ$ $T_n = 3.17$								
Нephaistos 1978 SB	0.838	0.350	11.553	27.540	3.099	13.87 <sup>m</sup> /5.7	0.163	0.116
2011 SR12	0.804	0.395	12.072	203.481	3.302	19.6 <sup>m</sup> /–	–	0.150
2014 RS17	0.771	0.443	1.628	322	3.461	23.2 <sup>m</sup> /–	–	0.006
2006 BF56	0.799	0.471	0.961	125.244	3.030	29.6 <sup>m</sup> /–	–	0.001
2003 RW11	0.823	0.467	10.358	170.859	2.768	18.7 <sup>m</sup> /1.507	0.026	0.077
2017 YO4	0.830	0.381	7.397	189.660	3.053	20.6 <sup>m</sup> /–	–	0.086
2015 PU228	0.790	0.479	9.445	301.870	3.082	20.3 <sup>m</sup> /0.328	0.125	0.214
2014 YQ34	0.830	0.427	3.424	272.316	2.848	20.9 <sup>m</sup> /–	–	0.006
2001 YB5	0.865	0.317	5.550	288.390	2.895	20.9 <sup>m</sup> /–	–	0.004
2010 XC11	0.850	0.377	9.112	94.216	2.791	18.7 <sup>m</sup> /–	–	0.030
85182 1991 AQ	0.777	0.496	3.130	339.642	3.164	17.1 <sup>m</sup> /1.1	0.242	0.017

вана многофакторная методика, основанная на применении ряда критериев:  $D$  критерия Драммонда, метрики Холшевникова и параметров динамической эволюции орбит. Применение совокупности критериев повышает достоверность результатов исследований о возможной связи малых тел Солнечной системы. Пороговые значения критериев отождествления орбит определены с учетом дисперсии орбит метеороидов в потоке как за счет начальных условий их выбросов из РТ, так и последующей эволюции их орбит. Кроме того, пороговые значения критериев определяются внутри каждого используемого каталога метеорных орбит, что позволяет учитывать инструментальные ошибки метода наблюдения метеоров. При отборе кандидатов возможных РТ потоков-сирот применен статистический подход на основе определения меры выполнения критериев с помощью интервальных оценок их СКО.

Методика применена для поиска вероятных родительских тел мало изученного метеорного комплекса  $\delta$ -Канкриды в группах астероидов Аполлона, Амура, Атона, пересекающих орбиту Земли. Астероиды на близких орбитах, возможно связанные с NCC северной и SCC южной ветвями  $\delta$ -Канкрид, отождествлены только в группе Аполлона. Выполнен сравнительный анализ их характеристик с параметрами и структурой  $\delta$ -Канкрид. Общими для NCC и SCC ветвей выделены следующие астероиды: по каталогу орбит CAMS – 2015 PU228, 2014 YQ34, 2017 YO4; по каталогу SonatoCo – Нephaistos 1978 SB, 2003 RW11, 2006 BF56, 2011 SR12, 2014 RS17, 2001 YB5. Астероид

85182 (1991 AQ) отождествлен по двум каталогам метеорных орбит только с северной NCC ветвью потока.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 18-12-00050).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *T. J. Jopek and I. P. Williams*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **430**, 2377 (2013).
2. *K. V. Kholshchevnikov, G. I. Kokhirova, P. B. Babadzhanov, and U. H. Khamroev*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **462**, 2275 (2016).
3. *B. A. Dumitru, M. Birlan, M. Popescu, and D. A. Nedelcu*, Astron. and Astrophys. **607**, 5 (2017).
4. *G. I. Kokhirova, K. V. Kholshchevnikov, P. B. Babadzhanov, U. H. Khamroev, and D. V. Milanov*, Planetary and Space Science **157**, 28 (2018).
5. *R. B. Southworth and G. S. Hawkins*, Smithson. Contrib. Astrophys. **7**, 261 (1963).
6. *J. D. Drummond*, Icarus **45**, 545 (1981).
7. *T. J. Jopek*, Icarus **106**, 603 (1993).
8. *D. J. Asher, S. V. Clube, W. M. Napier, and D. I. Steel*, Vistas in Astronomy **38**, 1 (1994).
9. *M. G. Sokolova, E. D. Kondratyeva, and Y. A. Nefedyev*, Adv. Space Res. **52**, 1217 (2013).
10. *К. В. Холшевников*, в Трудах 45-й межд. студ. науч. конф. “Физика космоса” (Екатеринбург, Изд-во: УрФУ. 2016, с. 168–184).



11. *D. V. Milanov*, *Celest. Mech. Dyn. Astr.* **130**, 3, с. 75 (2018).
12. *D. V. Milanov, Yu. V. Milanova, and K. V. Kholshchikov*, *Celest. Mech. Dyn. Astron.* **131**, 5 (2019).
13. *Ю. В. Обрубов*, *Астрон. журн.* **68**, 1063 (1991).
14. *М. Л. Лидов*, *Искусственные спутники Земли.* **8**, с. 5 (1961).
15. *Е. Н. Крамер, И. С. Шестака*, *Астрон. вестник* **21**, 75 (1987).
16. *F. Tisserand*. *Traité de mécanique céleste*, Paris, Gauthier-Villars, V. 4, p. 203 (1896).
17. *М. Ф. Субботин*. *Введение в теоретическую астрономию* (М.: “Наука”, 1968).
18. *И. С. Шестака*, *Астрон. вестник* **28**, 70 (1994).
19. *В. А. Lindblad*, *Smithson. Contrib. Astrophys.* **12**, 14 (1971).
20. *Н. В. Куликова, Д. А. Калинин*, Сб. трудов конф. “Околоземная астрономия-2007”, с. 177 (Нальчик, 2008).
21. *М. Г. Ишмухаметова, Е. Д. Кондратьева, В. С. Усанин*, *Астрон. вестник* **43**, 453 (2009).
22. *Г. О. Рыабова*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **456**, 78 (2016).
23. *О. И. Белькович, М. Г. Ишмухаметова, Н. И. Сулейманов*, *Астрон. вестник* **35**, 448 (2001).
24. *О. И. Белькович, М. Г. Ишмухаметова*, *Астрон. вестник* **40**, 230 (2006).
25. *О. I. Bel'kovich, M. G. Ishmukhametova, and E. D. Kondrateva*, *Solar System Res.* **45**, 529 (2011).
26. *P. Jenniskens Showers and their Parent Comets* (Cambridge, UK: Cambridge University, 2006).
27. *М. Г. Соколова, М. В. Сергиенко*, *Астрон. вестник* **50**, 401 (2016).
28. *П. Б. Бабаджанов, Г. И. Кохирова*. *Метеорные потоки астероидов, пересекающих орбиту Земли* (Душанбе: “Доиш”, 2009).
29. *D. C. Jewitt*, *Astron. J.* **143**, 3 (2012).
30. *D. C. Jewitt*, *Astrophys. and Space Sci. Library* **167**, 19 (1992).