

УДК 521.11

## ПОИСК НЕБЕСНЫХ ТЕЛ ОБЩЕГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ: МЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Кохирова Г. И., Холшевников К. В., Бабаджанов П. Б., Хамроев У. Х.,  
Миланов Д. В.

### IDENTIFYING CELESTIAL BODIES OF COMMON ORIGIN USING METRIC APPROACH

Kokhirova G. I. \*, Babadzhonov P. B. \*, Khamroev U. Kh. \*, Kholshchevnikov K. V. \*\*,  
Milanov D. V. \*\*

\* Institute of Astrophysics of the Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, 734042, Tajikistan

\*\* Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199034, Russia  
e-mail: kokhirova2004@mail.ru

*Abstract.* Finding a common origin for various celestial bodies, especially the relations between meteoroid streams, comets and asteroids (possibly extinct comets) remains one of the important problems in the Solar System astronomy. Different criteria, starting with one by Southworth and Hawkins, have been used for this purpose. Unfortunately, they do not satisfy axioms of metric space, in particular the triangle axiom. Besides, they are inapplicable if at least one of the orbits is circular. Recently we proposed metrics free of all these drawbacks. In the present paper the traditional criteria are applied, as well as new metrics, to the problem of searching for minor bodies of the Solar System with a common origin. The focus is on the asteroid-meteoroid complex  $\sigma$ -Capricornids (Adonis family). Our investigations confirm genetic relations of objects of the complex, and allow us to determine a moment of the maximal similarity of their orbits. Most probably at this moment a break-up of the nucleus of a comet-progenitor of the complex occurs. Besides, we examine several NEA supposedly connected with the  $\sigma$ -Capricornids complex. It was established that besides the meteoroid stream itself at least 5 NEO of a comet nature: (2101) Adonis, 1995CS, 2008BO16, 2011EC41, 2013CN36 enter the complex.

*Keywords:* metric space, space of Keplerian orbits, asteroid, comet, evolution, common origin.

Установление близости (похожести) орбит космических объектов и, возможно, их общего происхождения — одна из важных задач астрономии, в особенности астрономии комет и метеороидных роев. В качестве критериев близости орбит используются как классические критерии Саутворта–Хокинза и Драммонда, так и недавно введенные метрики, удовлетворяющие всем аксиомам метрического пространства [1]. Поскольку новые метрики еще не проникли широко в астрономическую практику, в первом парагра-

фе кратко описываются их свойства. Затем будут представлены результаты исследования астероидно-метеороидного комплекса  $\sigma$ -Каприкорнид (семейство Адониса) с целью подтверждения родственной связи объектов комплекса и определения вероятного момента распада его родительской кометы. Данный подход позволил найти время, когда орбиты имели максимальное совпадение, и в этот момент с высокой вероятностью произошло деление родительской кометы комплекса.

Кохирова Гулчехра Исроиловна, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент АН Республики Таджикистан, директор Института астрофизики АН Республики Таджикистан, ведущий научный сотрудник отдела межпланетных тел Института астрофизики АН Республики Таджикистан; e-mail: kokhirova2004@mail.ru

Холшевников Константин Владиславович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: kvk@astro.spbu.ru

Бабаджанов Пулат Бабаджанович, д-р физ.-мат. наук, академик АН Республики Таджикистан, зав. отделом межпланетных тел Института астрофизики АН Республики Таджикистан; e-mail: p.b.babadzhonov@mail.ru;

Хамроев Умеджон Ходжамкулович, научный сотрудник отдела межпланетных тел Института астрофизики АН Республики Таджикистан; e-mail: Umed-1982@mail.ru

Миланов Данила Владимирович, аспирант кафедры небесной механики Санкт-Петербургского государственного университета; e-mail: danila.milanov@gmail.com

### 1. Метрика в пространстве непрямолинейных кеплеровских орбит

Прямолинейные орбиты чрезвычайно редко встречаются в астрономии, например, при падении метеороида перпендикулярно поверхности Земли. В то же время метрика в пространстве всех орбит существенно сложнее метрики в пространстве криволинейных орбит  $\mathbb{H}$  и потому ограничимся рассмотрением последней.

Каждая орбита  $\mathcal{E} \in \mathbb{H}$  однозначно определяется двумя ортогональными векторами  $\mathbf{u} \neq 0, \mathbf{v}$ , пропорциональными вектору момента импульса и вектору Лапласа–Рунге–Ленца, соответственно. Обратное, каждая пара ортогональных векторов  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$  при условии  $|\mathbf{u}| > 0$  определяет прямолинейную орбиту  $\mathcal{E} \in \mathbb{H}$ . Примем

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z), \quad \mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z), \quad (1.1)$$

$$|\mathbf{u}| = \sqrt{p}, \quad |\mathbf{v}| = e\sqrt{p},$$

$$\mathbf{u}\mathbf{v} = u_x v_x + u_y v_y + u_z v_z = 0, \quad (1.2)$$

$$|\mathbf{u}| > 0.$$

Здесь

$$u_x = \sqrt{p} \sin i \sin \Omega,$$

$$v_x = e\sqrt{p}(\cos \omega \cos \Omega - \cos i \sin \omega \sin \Omega),$$

$$u_y = -\sqrt{p} \sin i \cos \Omega, \quad (1.3)$$

$$v_y = e\sqrt{p}(\cos \omega \sin \Omega + \cos i \sin \omega \cos \Omega),$$

$$u_z = \sqrt{p} \cos i, v_z = e\sqrt{p} \sin i \sin \omega,$$

где  $p, e, i, \omega, \Omega$  — стандартные обозначения фокального параметра, эксцентриситета, наклона, аргумента перицентра и долготы восходящего узла. Повторим, что  $\mathcal{E}$  однозначно определяется набором шести чисел  $u_x, \dots, v_z$ , связанных условиями (1.2). Пять кеплеровских элементов также определяют орбиту однозначно. Обратное тоже верно с необходимыми оговорками. Во-первых, примем  $0 \leq i \leq \pi$ . Во-вторых, при  $i = 0$  или  $i = \pi$  считаем  $\Omega = 0$ . В третьих, если  $e = 0$ , считаем  $\omega = 0$ .

Пространство  $\mathbb{H}$  вложено в  $\mathbb{R}^6$ , являясь 5-мерной поверхностью второго порядка (конусом)  $\mathbf{u}\mathbf{v} = 0$  без 3-мерной плоскости  $\mathbf{u} = 0$ . Определим метрику в пространстве  $\mathbb{H}$  евклидовым расстоянием в объемлющем пространстве  $\mathbb{R}^6$ :

$$\varrho_2(\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2) = \sqrt{(\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_2)^2 + (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)^2}, \quad (1.4)$$

где  $\mathbf{u}_k = \mathbf{u}(\mathcal{E}_k), \mathbf{v}_k = \mathbf{v}(\mathcal{E}_k)$ . Подчеркнем, что функция (1.4) определена и не имеет особенностей в пространстве  $\mathbb{H}$ , включающем все эллиптические, параболические и гиперболические орбиты. Она удовлетворяет всем аксиомам метрического пространства и может быть принята за расстояние в  $\mathbb{H}$ .

*Замечание 1.* Сохранена нумерация метрик из [1].

*Замечание 2.* Величина  $\varrho_2$  (как и вводимые ниже  $\varrho_3, \varrho_4, \varrho_5$ ) имеет физическую размерность корня из единицы длины. Поэтому, например,

$$\sqrt{\text{a.e.}} = 12231,02081\sqrt{\text{км}} = 386778,8386\sqrt{\text{м}},$$

$$\sqrt{\text{км}} = 31,62277660\sqrt{\text{м}}.$$

Этот небольшой недостаток можно исправить, заменив в (1.1, 1.3)  $\sqrt{p}$  на  $p$ . Однако в этом случае теряется физический смысл  $\mathbf{u}$  как вектора момента импульса (с точностью до нормировки). Поэтому стоит смириться со странной размерностью расстояния. Ниже при вычислениях за единицу длины принята астрономическая единица.

### 2. Метрики в фактор-пространствах непрямолинейных кеплеровских орбит

*Определение.* Пусть в пространстве  $\mathbb{X}$  введена некоторая эквивалентность. Фактор-пространством  $\mathbb{Y}$  называется множество, элементами  $y$  которого служат классы элементов  $x \in \mathbb{X}$ , эквивалентных друг другу.

Например, на сфере можно отождествить точки с одинаковой широтой. Фактор-пространством будет множество параллелей (или, что то же, множество их широт, т.е. отрезок  $-\pi/2 \leq y \leq \pi/2$ ). При отождествлении точек с одинаковой долготой фактор-пространством будет множество меридианов (или, что то же самое, множество их долгот, т.е. единичная окружность, экватор).

В задачах небесной механики часто, хотя и не всегда, узлы орбит имеют большие вековые возмущения, тогда как остальные 4 элемента орбиты меняются незначительно. Поэтому полезно иногда игнорировать узлы, или, что то же самое, отождествлять орбиты с одинаковыми  $p, e, i, \omega$  вне зависимости от значений  $\Omega$ . Это достигается введением 4-мерного фактор пространства  $\mathbb{H}/\Omega$ , элементом которого является класс орбит с фиксированными  $p, e, i, \omega$  и всевозможными значе-

ниями  $\Omega$ . Определим естественную метрику в  $\mathbb{H}/\Omega$ :

$$\varrho_3 = \min_{\Omega_1, \Omega_2} \varrho_2. \quad (2.1)$$

Возможна ситуация, когда быстрее изменяются направления перицентров. Напомним, что перигей орбиты Луны движется существенно быстрее узла. Поэтому разумно ввести фактор-пространство  $\mathbb{H}/\omega$ , элементом которого является класс орбит с фиксированными  $p, e, i, \Omega$  и всевозможными значениями  $\omega$ . Метрика в этом пространстве дается формулой

$$\varrho_4 = \min_{\omega_1, \omega_2} \varrho_2. \quad (2.2)$$

Можно идти и дальше, игнорируя и узлы, и перицентры. Достаточно ввести трехмерное фактор-пространство  $\mathbb{H}/(\Omega, \omega)$  с метрикой

$$\varrho_5 = \min_{\Omega_1, \Omega_2, \omega_1, \omega_2} \varrho_2. \quad (2.3)$$

Приведем рабочие формулы для вычисления метрик  $\varrho_k$ . Все они имеют вид

$$\begin{aligned} \varrho_k^2 &= (1 + e_1^2)p_1 + \\ &+ (1 + e_2^2)p_2 - 2\sqrt{p_1 p_2} B_k, \quad (2.4) \\ k &= 2, 3, 4, 5, \end{aligned}$$

различаясь лишь величинами  $B_k$ . Именно,

$$B_2 = \cos I + e_1 e_2 \cos P,$$

$$B_4 = e_1 e_2 + \cos I, \quad B_5 = e_1 e_2 + \cos(i_1 - i_2),$$

$$B_3 = c_1 c_2 + e_1 e_2 s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + \sqrt{s_1^2 s_2^2 + B},$$

$$\begin{aligned} B &= e_1^2 e_2^2 (1 - s_1^2 \sin^2 \omega_1) (1 - s_2^2 \sin^2 \omega_2) + \\ &+ 2e_1 e_2 s_1 s_2 (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2), \end{aligned}$$

Здесь

$$\cos I = c_1 c_2 + s_1 s_2 \cos \Delta,$$

$$\begin{aligned} \cos P &= s_1 s_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2 + \\ &+ (\cos \omega_1 \cos \omega_2 + c_1 c_2 \sin \omega_1 \sin \omega_2) \cos \Delta + \\ &+ (c_2 \cos \omega_1 \sin \omega_2 - c_1 \sin \omega_1 \cos \omega_2) \sin \Delta, \end{aligned}$$

где  $c = \cos i$ ,  $s = \sin i$ ,  $\Delta = \Omega_1 - \Omega_2$ .

*Замечание 1.* Величины  $I, P$  имеют простой геометрический смысл взаимного наклона (угла между векторами площадей) и угла

между векторами Лапласа–Рунге–Ленца, соответственно.

*Замечание 2.* Определяемые формулами типа (2.1) величины  $\varrho_k$ ,  $k = 3, 4, 5$ , не обязаны удовлетворять всем аксиомам метрического пространства. Однако в нашем случае неприятностей нет:  $\varrho_k$  являются полноценными метриками, как показано в [2].

### 3. Комплексы околоземных родственных объектов

Динамические свойства служат основным средством в определении общего происхождения каких-либо околоземных объектов (ОЗО), т.к. по наблюдениям их орбиты определяются с достаточной точностью. На этой основе выявлено родство между кометами, астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ), и метеороидными роями, и существование родственных связей между околоземными объектами стало общепризнанным фактом. Группа ОЗО, состоящая из АСЗ и метеороидного роя с подтвержденным общим происхождением, называется астероидно-метеороидным комплексом. Для некоторых комплексов известной является также и родительская комета. Астероиды, сближающиеся с Землей, принадлежащие комплексам ОЗО, в реальности являются угасшими кометными ядрами.

Астероидно-метеороидный комплекс Таурид является самым известным таким семейством. Комплекс состоит из кометы Энке, метеороидного роя Тауриды и более 40 АСЗ. Показано, что эти АСЗ наряду с кометой Энке двигаются по орбитам в пределах роя Таурид, в действительности они являются угасшими фрагментами кометы Энке, либо вместе с кометой Энке являются осколками более крупной кометы — прародительницы роя [3–10]. Напомним, что рой Таурид порождает четыре метеорных потока, наблюдаемых на Земле: ночные Северные и Южные Тауриды и дневные  $\zeta$ -Персеиды и  $\beta$ -Тауриды.

Хорошо известен астероидно-метеороидный комплекс Квадрантид, который включает комету 96P/Маххольц 1, метеороидный рой Квадрантид и АСЗ 2003ЕН1, в реальности являющийся угасшим фрагментом родительской кометы роя [11–15]. Недавно показано, что распад родительской кометы, возможно, на два фрагмента — комету Маххольца и ОЗО 2003ЕН1 произошел с высокой вероятностью 9,5 тыс. лет назад [1, 16]. Метеороидный рой Квадрантид порождает восемь

метеорных потоков, наблюдаемых на Земле. Комплексы Писцид,  $\iota$ -Акварид,  $\chi$ -Скорпиид и др., связанные с несколькими АСЗ кометной природы, также выявлены на основе исследования динамических свойств ОЗО [17–20].

Таким образом, определение возможного родства объектов первоначально основано на использовании их современных орбит. Если в настоящем орбиты схожи, то можно предположить родство объектов. Однако, современные орбиты могут сильно различаться, при этом предполагается, что объекты все-таки связаны и могли быть единым телом в прошлом. Вычисляя эволюцию орбит и отслеживая их элементы на более длительных промежутках времени, можно найти момент наибольшей схожести орбит, когда с очень высокой вероятностью произошла фрагментация родительского тела. Следовательно, задача сводится к измерению расстояний между орбитами объектов. Для сравнения орбит, как уже упоминалось, существуют несколько общепризнанных и широко используемых критериев. Применим известные критерии и предложенные здесь метрики для измерения расстояний между орбитами объектов астероидно-метеороидного комплекса  $\sigma$ -Каприкорнид (семейство Адониса).

#### 4. Астероидно-метеороидный комплекс $\sigma$ -Каприкорнид

Впервые возможная связь АСЗ (2101) Адонис с метеорным потоком Скорпииды–Сагиттарида на основе схожести их элементов орбит предложена в [21]. Однако результаты вычисления эволюции орбиты этого потока не подтвердили эту связь [22, 23]. Возможная связь Адониса с шестью известными метеорными потоками допущена в [24] на основе сходства их динамических свойств.

Драммонд [25] вычислил теоретические геоцентрические радианты и скорости в точках минимальных расстояний орбиты Адониса от орбиты Земли и, используя  $D_{SH}$  критерий [26], пришел к выводу, что Адонис связан с метеорными потоками  $\chi$ -Сагиттарида и Скорпииды–Сагиттарида и похоже, что этот астероид является потухшей кометой.

Основываясь на физических свойствах объектов, Вейсман и др. [27] предположили, что АСЗ Адонис и ряд других астероидов, весьма вероятно, имеют кометное происхождение. Аномальное радиолокационное эхо Адониса [28] было интерпретировано как

указатель на то, что этот астероид может быть угасшей кометой [29].

На основе обратного интегрирования орбиты Адониса на период времени около 15 тыс. лет методом Альфана–Горячева П.Б. Бабаджанов показал [30], что за один цикл изменения аргумента перигелия  $\omega$  Адонис пересекает орбиту Земли четыре раза. Следовательно, его гипотетический родственный метеороидный рой мог бы произвести четыре метеорных потока, наблюдаемых на Земле в феврале и июле. В результате поиска в каталогах наблюдаемых метеорных потоков все теоретически предсказанные метеорные потоки отождествлены с ночными  $\sigma$ -Каприкорнидами и  $\chi$ -Сагиттаридами и дневными  $\chi$ -Каприкорнидами и Каприкорниды–Сагиттаридами. Все эти потоки активны в настоящее время. Существование метеорных потоков, связанных с Адонисом, является доказательством кометной природы этого астероида.

Исследование эволюции орбиты АСЗ 1995CS, к тому же классифицированного как потенциально опасный астероид, показало, что в течение одного цикла изменения аргумента перигелия  $\omega$  его орбита также пересекает орбиту Земли четыре раза, причем при тех же значениях  $\omega$ , как и Адонис. Более того, установлено, что элементы орбиты 1995CS почти совпадают с теоретическими элементами орбиты, соответствующей наблюдаемым дневным  $\chi$ -Каприкорнидам. На момент обнаружения гелиоцентрическое расстояние восходящего узла орбиты 1995CS было равно приблизительно 1,0 а.е. По элементам орбиты 1995CS в точке минимального расстояния от орбиты Земли вычислены теоретические геоцентрические координаты радианта, скорость и долгота Солнца при максимуме активности теоретически родственного с ним метеорного потока:  $\alpha = 310,8^\circ$ ,  $\delta = -21,1^\circ$ ,  $V_g = 24,9$  км/с,  $L_\odot = 315,7^\circ$ . Эти значения отождествлены с геоцентрическим радиантом и скоростью, а также долготой Солнца дневного метеорного потока  $\chi$ -Каприкорниды, связанного с Адонисом. На этой основе сделан вывод, что околоземный объект 1995CS имеет кометное происхождение и, вероятно, является фрагментом Адониса. 1995CS движется в метеороидном рое, порождающем метеорный поток  $\chi$ -Каприкорниды [30]. Отметим, что эквивалентный диаметр  $d$  астероида 1995CS равен

Таблица 1. Элементы современных орбит АСЗ (2101) Адонис и 1995CS, и метеорных потоков  $\sigma$ -Каприкорниды и  $\chi$ -Каприкорниды (J2000.0)

Объект	$q$ (а.е.)	$e$	$i$ (град.)	$\omega$ (град.)	$\Omega$ (град.)	$\pi$ (град.)
Адонис	0.44	0.77	1.35	42.30	350.70	33.0
1995CS	0.44	0.77	2.60	252.20	135.70	27.9
$\sigma$ -Каприкорниды	0.43	0.76	2.10	290.30	107.60	37.9
$\chi$ -Каприкорниды	0.36	0.79	6.80	242.50	145.10	27.6

50 м, тогда как диаметр самого Адониса составляет 800 м.

Позже найдены еще три АСЗ 2008BO16, 2011EC41, 2013CT36, исследованные по той же методике. Показано, что они также связаны с метеорными потоками метеороидного роя  $\sigma$ -Каприкорниды. Таким образом, астероидно-метеороидный комплекс  $\sigma$ -Каприкорнид состоит из метеороидного роя  $\sigma$ -Каприкорнид и пяти ОЗО кометной природы: (2101) Адонис, 1995CS, 2008BO16, 2011EC41, 2013CT36 [31]. Метеороидный рой  $\sigma$ -Каприкорниды порождает четыре метеорных потока, наблюдаемые на Земле: ночные  $\sigma$ -Каприкорниды и  $\chi$ -Сагиттарида, и дневные  $\chi$ -Каприкорниды и Каприкорниды-Сагиттарида. Впервые эти метеорные потоки были выделены в [24, 32] по результатам радиолокационных наблюдений метеоров. В списке подтвержденных метеорных потоков МАС поток  $\sigma$ -Каприкорниды имеет номер 179 и обозначен как SCA. Болиды, зарегистрированные болидными сетями США, Канады и Таджикистана, также подтверждают активность потока [31]. Дневные  $\chi$ -Каприкорниды и Каприкорниды-Сагиттарида приведены в списке метеорных потоков МАС как № 114 DXC и № 115 DCS, соответственно.

### 5. Орбиты АСЗ (2101) Адонис и 1995CS и их эволюция

Элементы современных орбит АСЗ (2101) Адонис и 1995CS [33], а также метеорных потоков  $\sigma$ -Каприкорниды и  $\chi$ -Каприкорниды [24, 32] приведены в табл. 1, где  $q$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $\omega$ ,  $\Omega$  и  $\pi = \Omega + \omega$  — перигелийное расстояние, эксцентриситет, наклон, аргумент перигелия, долгота восходящего узла и долгота перигелия, соответственно. Все значения угловых элементов даны для равноденствия 2000,0. Как видно из табл. 1, схожесть орбит 1995CS и  $\chi$ -Каприкорнид очевидна. Элементы орбиты  $q$ ,  $e$ ,  $i$  объекта 1995CS очень близки к соответствующим элементам орбиты Адониса, вклю-

чая близость направлений их перигелиев  $\pi$ , отличающихся лишь на  $5,2^\circ$ . Но долготы их восходящих узлов  $\Omega$  и аргументы перигелиев  $\omega$  отличаются в значительной степени, указывая на то, что объекты находятся в разных фазах их прецессионных циклов.

Сходство перигелийных расстояний, эксцентриситетов, наклонов и направлений перигелиев этих двух объектов дает основание предположить, что в прошлом они отделились от общего тела или меньший по размеру 1995CS отделился от большего Адониса [34].

Дробление астероидов и комет на крупные фрагменты происходит с небольшими скоростями разлета. Это обуславливает на начальном этапе и незначительные различия в элементах орбит. Поэтому при установлении связи объектов необходимо исследовать эволюцию орбит и найти момент их наибольшего схождения. Если такое схождение найдено, то этот момент можно принять за момент разделения фрагментов.

Для проверки имеющихся предположений и поиска момента распада родительской кометы комплекса  $\sigma$ -Каприкорнид авторы вычислили эволюцию орбит Адониса и 1995CS и измерили расстояние между их орбитами на длительном временном интервале.

Для исследования эволюции орбит используются различные численные методы интегрирования дифференциальных уравнений возмущенного движения многих тел. В этой работе использован метод Эверхарта [35] для вычисления дифференциальных планетных возмущений. При создании модели вычислены гравитационные возмущения от всех больших планет Солнечной системы, с учетом их взаимных возмущений. Уравнения движения проинтегрированы на временном промежутке от настоящего момента на 40 тыс. лет назад.

В результате вычисления оскулирующих элементов орбит выявлено, что у астероидов совпадает эволюционный тип: в течение одного цикла изменения аргумента перигелия

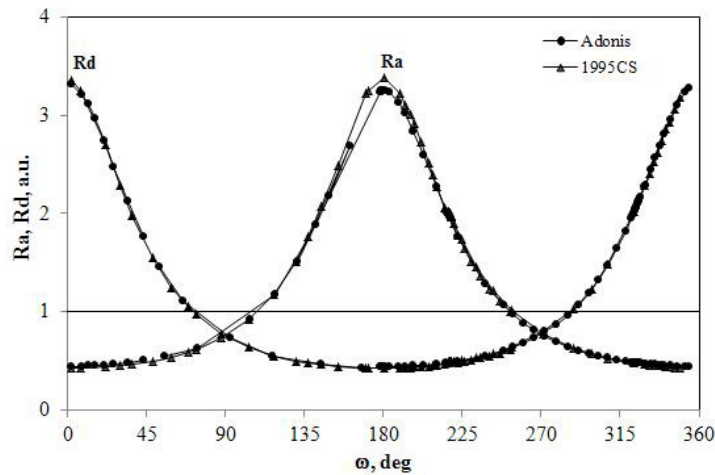


Рис. 1. Изменения гелиоцентрических расстояний восходящих  $R_a$  и нисходящих  $R_d$  узлов орбит АСЗ Адонис и 1995CS за один цикл изменения их аргументов перигелиев  $\omega$

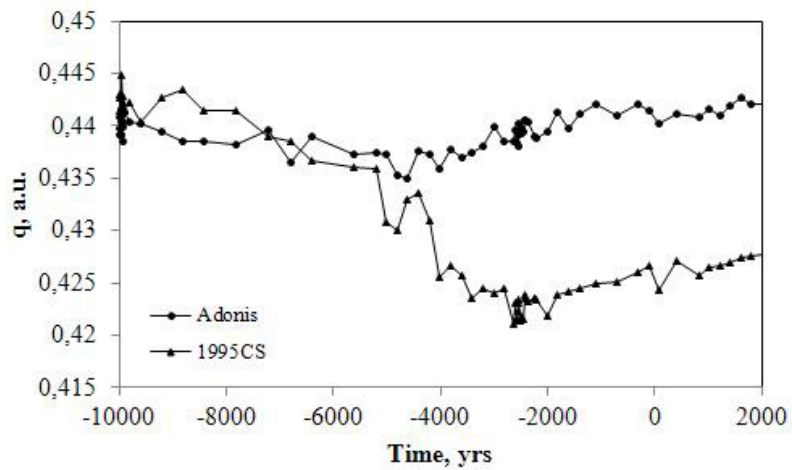
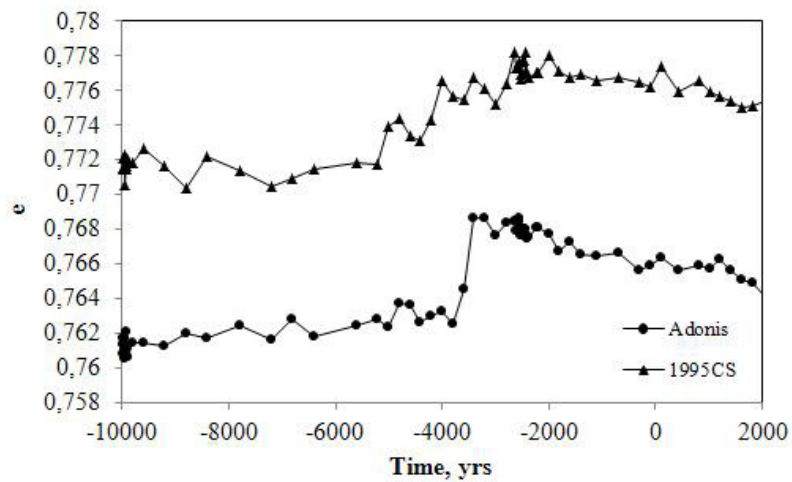
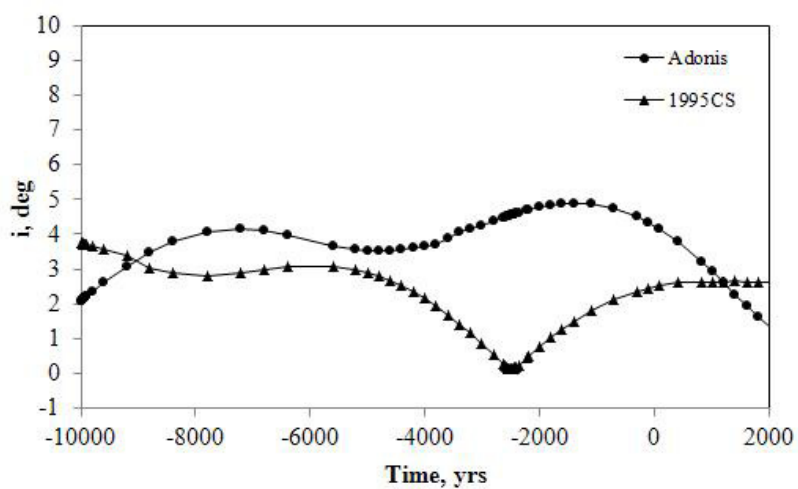
оба объекта пересекают орбиту Земли четыре раза. Это наглядно демонстрирует рис. 1, на котором показаны изменения гелиоцентрических расстояний восходящих  $R_a$  и нисходящих  $R_d$  узлов орбит АСЗ Адонис и 1995CS за один цикл изменения их аргументов перигелиев  $\omega$ . Сплошная линия, соответствующая  $R_a = 1$  а.е. и  $R_d = 1$  а.е., показывает положения пересечений орбит АСЗ с орбитой Земли. Продолжительность одного такого цикла для Адониса составляет почти 13 тыс. лет и для 1995CS — около 11 тыс. лет. Эволюция орбит является типичной для объектов, пересекающих орбиту Земли четыре раза, и характеризуется небольшими диапазонами изменения перигелийных расстояний, эксцентриситетов и наклонов (рис. 2–4). Изменения  $\omega$  и  $\Omega$  со временем приведены на рис. 5–6. При этом вековые изменения долгот перигелиев  $\pi$  Адониса и 1995CS идентичны и в течение длительного времени разность между их значениями  $\pi$  стабильно сохраняется, не превышая величины  $6^\circ$  (рис. 7). Кроме того, большие полуоси орбит Адониса и 1995CS становятся одинаковыми в промежутке времени 2–3,5 тыс. лет до н.э.

На следующем этапе необходимо сравнить орбиты на временном промежутке, в течение которого вычислена эволюция.

## 6. Расстояние между орбитами Адониса и 1995CS

Для измерения близости орбит использовано пять инструментов: традиционные  $D_{SH}$  критерий Саутворта и Хокинса [26] и  $D_r$  кри-

терий Драммонда [36], а также метрики  $\varrho_2$ ,  $\varrho_3$  и  $\varrho_4$ , рассмотренные в этой работе. Результаты вычисления расстояния между орбитами объектов на период времени 10 тыс. лет назад, где наблюдается наибольшая близость орбит, даны на рис. 8. Как показывают приведенные графики, практически одинаково зависят от времени расстояния, определенные с помощью критериев  $D_{SH}$ ,  $D_r$  и метрики  $\varrho_2$ . В то же время расстояния, вычисленные с использованием метрик  $\varrho_3$  и  $\varrho_4$ , проявили также аналогичную зависимость от времени. Общая зависимость этих двух кластеров расстояний от времени оказалась идентичной, но разнесена на небольшой постоянный по значению сдвиг по оси ординат. Значения всех использованных функций расстояния не превышают величины 0,145 на всем интервале интегрирования орбит. Напомним, что для утверждения родственной связи между двумя объектами, необходимо, чтобы величины критериев не превышали предельного значения 0,20 [26]. Весьма вероятно, что эти объекты длительное время имели очень схожие орбиты, и их разделение могло произойти в любой момент исследуемого интервала времени. Тем не менее, наименьшее значение всех пяти функций и, следовательно, наибольшее совпадение орбит имело место в 3474 г. до н.э., т.е. почти 5,5 тыс. лет назад. Это время можно рассматривать как наиболее вероятный момент фрагментации общего тела. Элементы орбит объектов и значения функций расстояния на момент наибольшего совпадения орбит приведены в табл. 2 и 3.

Рис. 2. Изменения перигелийного расстояния  $q$  орбит АСЗ Адонис и 1995СS со временемРис. 3. Изменения эксцентриситета  $e$  орбит АСЗ Адонис и 1995СS со временемРис. 4. Изменения наклона  $i$  орбит АСЗ Адонис и 1995СS со временем

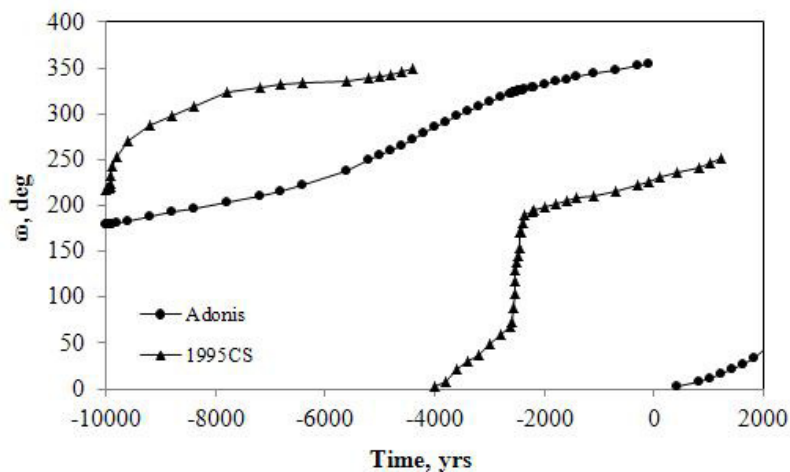


Рис. 5. Изменения аргумента перигелия  $\omega$  орбит АСЗ Адонис и 1995CS со временем

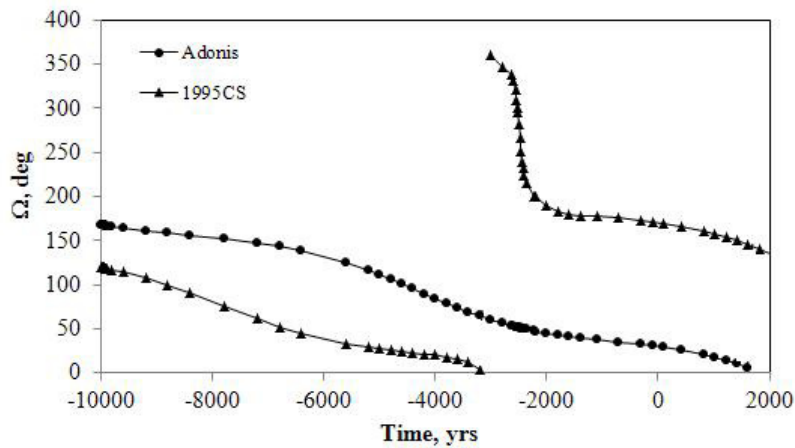


Рис. 6. Изменения долготы восходящего узла  $\Omega$  орбит АСЗ Адонис и 1995CS со временем

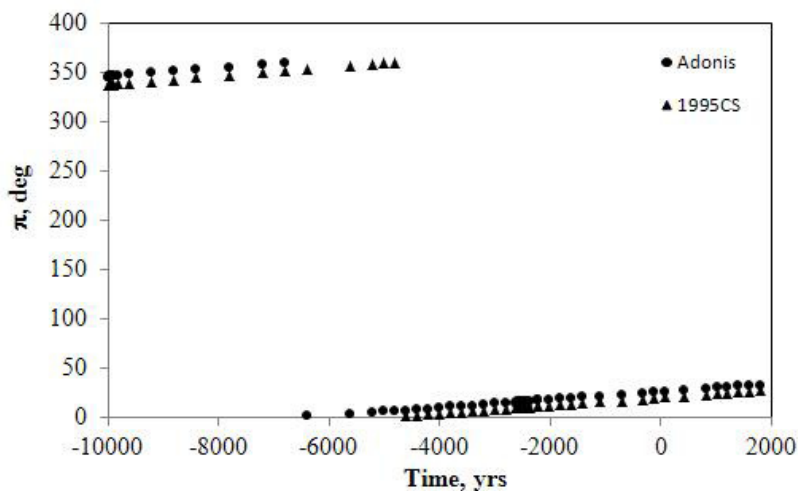


Рис. 7. Изменения долготы перигелия  $\pi$  орбит АСЗ Адонис и 1995CS со временем



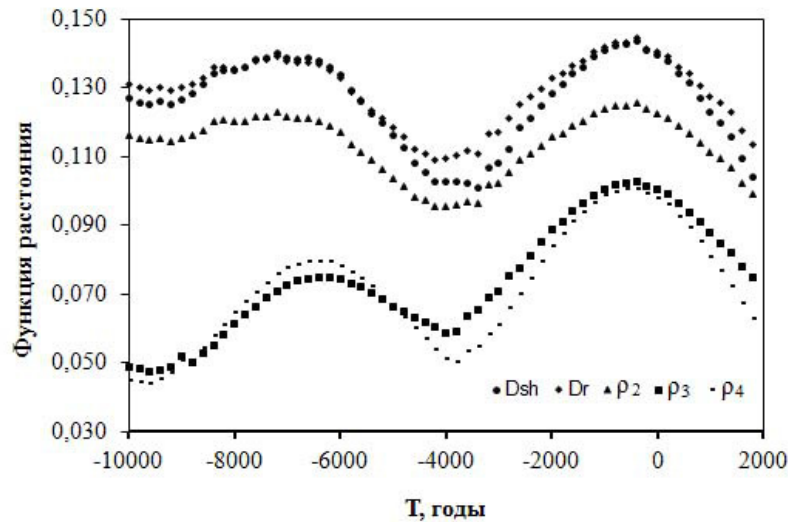


Рис. 8. Вековые изменения пяти функций расстояний между орбитами АСЗ Адонис и 1995CS на период времени 12 тыс. лет назад

Таблица 2. Элементы орбит АСЗ (2101) Адонис и 1995CS в 3474 г. до н.э. (J2000.0)

Объект	$a$ (а.е.)	$q$ (а.е.)	$e$	$i$ (град.)	$\omega$ (град.)	$\Omega$ (град.)	$\pi$ (град.)
Адонис	1,889	0,438	0,767	4,00	300,64	70,58	11,22
1995CS	1,897	0,425	0,775	1,51	351,41	14,02	5,43

Отметим, что и на начало интегрирования все функции достигают минимальных значений — 0,098. По-видимому, это связано с тем, что если объекты разделились относительно недавно, то это положение наибольшего совпадения их орбит еще не утеряно вследствие планетных возмущений.

## 7. Дискуссия

Для исследования возможной генетической связи Адониса и 1995CS Стил [34] провел серию обратных интегрирований их орбит на интервале времени почти 55 тыс. лет и пришел к выводу, что эти два объекта могли иметь схожие орбиты и, следовательно, разделиться, по крайней мере, около 30 тыс. лет назад. Такой вывод обусловлен тем, что Стил искал абсолютного совпадения орбит объектов по всем элементам, не вычисляя при этом никаких критериев схожести орбит. Действительно, как уже упоминалось, долготы восходящих узлов  $\Omega$  и аргументы перигелиев  $\omega$  современных орбит Адониса и 1995CS отличаются в значительной степени, что говорит о том, что объекты находятся в разных фазах их прецессионных циклов. Однако, направления их перигелиев  $\pi = \Omega + \omega$  отличаются всего

лишь на  $5,2^\circ$ , вековые изменения  $\pi$  у Адониса и 1995CS идут параллельно и разность между ними стабильно сохраняется вокруг величины  $6^\circ$  в течение длительного времени. Для орбит с низким наклоном наибольший вклад в значения функций расстояния дают не отдельно разности между величинами  $\Omega$  и  $\omega$ , а разность между величинами  $\pi$  двух сравниваемых орбит. Малые величины  $\Delta\pi$  для орбит двух объектов обуславливают малые значения функции расстояния между ними, при этом минимальные величины функции будут достигаться при равных значениях аргументов перигелиев. Как видно из табл. 2, долготы восходящих узлов орбит объектов на момент 3474 г. до н.э. значительно отличаются, однако аргументы перигелиев отличаются уже почти на  $51^\circ$  (для современных орбит эта разность равна  $200^\circ$ ), при этом  $\Delta\pi$  по-прежнему невелико и составляет  $5,8^\circ$ . Два последних фактора и обусловили низкие значения критериев близости орбит. Если бы Стил сравнил орбиты с помощью критериев, позволяющих определить меру их близости, то, несомненно, нашел бы период наибольшего совпадения орбит, который соответствовал бы моменту, выявленному в этой работе.

Таблица 3. Расстояния между орбитами АСЗ (2101) Адонис и 1995CS в 3474 г. до н.э. (J2000.0)

Метрика	$D_{SH}$	$D_r$	$\varrho_2$	$\varrho_3$	$\varrho_4$
Величина	0,09	0,10	0,09	0,06	0,05

### Заклучение

Найденное время наибольшего совпадения орбит или наименьшего расстояния между ними можно рассматривать как наиболее вероятный момент дробления ядра кометы-прародительницы комплекса  $\sigma$ -Каприкорнид. Скорее всего, распад кометы произошел почти 5,5 тыс. лет назад. Можно также предположить, что Адонис и 1995CS являются крупными угасшими фрагментами ядра той кометы.

Результаты сравнения орбит объектов рассмотренного комплекса позволяют сделать вывод, что метрики  $\varrho_2$ ,  $\varrho_3$  и  $\varrho_4$  являются надежными средствами для определения расстояния между орбитами. Показано, что результаты, полученные с их помощью, не противоречат данным, полученным на основе применения таких апробированных средств, как  $D_{SH}$  критерий Саутворта и Хокинса и  $D_r$  критерий Драммонда. Для выявления возможного родства околоземных объектов в качестве меры сходства их орбит можно использовать метрики  $\varrho_2$ ,  $\varrho_3$  и  $\varrho_4$ .

### Литература

1. *Kholshchevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhyanov P. B., Khamroev U. H.* Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *MNRAS*. 2016. Vol. 462. Iss. 2. P. 2275–2283.
2. *Milanov D. V.* Metrics in Keplerian orbits quotient spaces // *Celest. Mech. Dyn. Astr.* 2018. Vol. 130. Iss. 4. P. 391–403.
3. *Asher D. J., Clube S. V. M., Steel D. I.* Asteroids in the Taurid Complex // *MNRAS*. 1993. Vol. 264. Iss. 1. P. 93–105.
4. *Babadzhyanov P. B.* Search for meteor showers associated with Near-Earth Asteroids. I. Taurid Complex // *Astron. and Astrophys.* 2001. Vol. 373. No. 1. P. 329–335.
5. *Babadzhyanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I.* Near-Earth objects in the Taurid complex // *MNRAS*. 2008. Vol. 386. Iss. 3. P. 1436–1442.
6. *Madiedo J. M., Trigo-Rodriguez J. M., Williams I. P., Ortiz J. L., Cabrera J.* The Northern  $\chi$ -Orionid meteoroid stream and possible association with the potentially hazardous asteroid 2008XM1 // *MNRAS*. 2013. Vol. 431. P. 2464–2470.
7. *Porubčan V., Williams I. P., Kornoš L.* Associations Between Asteroids and Meteoroid Streams // *Earth, Moon and Planets*. 2004. Vol. 95. Iss. 1–4. P. 697–712.
8. *Porubčan V., Kornoš L., Williams I. P.* The Taurid complex meteor showers and asteroids // *Contrib. of the Astron. Observ. Scalnate Pleso*. 2006. Vol. 36. No. 2. P. 103–117.
9. *Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2010 TU149 in the Taurid complex. In: Abstracts of European Planetary Science Congress 2012, held 23–28 September, 2012 in Madrid, Spain, 2012a, EPSC2012, 886R.
10. *Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P.* Asteroid 2005 UW6—A 'New' Object in the Taurid Complex? In: Abstracts of conf. Asteroids, Comets, Meteors 2012, held on May 16–20, 2012 in Niigata, Japan, 2012b, LPI Contribution No. 1667, 6222R.
11. *Babadzhyanov P. B., Williams I. P., Kokhirova G. I.* The meteor showers associated with 2003EH1 // *MNRAS*. 2008. Vol. 386. Iss. 4. P. 2271–2277.
12. *Jenniskens P.* 2003 EH1 Is the Quadrantid Shower Parent Comet // *The Astron. J.* 2004. Vol. 127. No. 5. P. 3018–3022.
13. *Neslušan L., jr. Hajduková M., Jakubík M.* Meteor-shower complex of asteroid 2003 EH1 compared with that of comet 96P/Machholz // *Astron. and Astrophys.* 2013. Vol. 560. Iss. 10. P. A47.
14. *Neslušan L., Kaňuchová Z., Tomko D.* The meteor-shower complex of comet 96P/Machholz revisited // *Astron. and Astrophys.* 2013. Vol. 551. No. 14. P. A87.
15. *Williams I. P., Ryabova G. O., Baturin A. P., Chernitsov A. M.* The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1 // *MNRAS*. 2004. Vol. 355. Iss. 4. P. 1171–1181.
16. *Babadzhyanov P. B., Kokhirova G. I., Williams I. P., Obruchov Yu. V.* Investigation into the relationship of comet 96P/Machholz 1 and asteroid 2003 EH1 // *Astron. and Astrophys.* 2017. Vol. 598. P. A94.
17. *Babadzhyanov P. B., Williams I. P.* Is the near-Earth asteroid 2000PG3 an extinct comet? In: Milani A., Valsecchi G. B., Vokrouhlický D. (Eds.) Near-Earth Objects our Celestial Neighbours: Opportunity and Risk. Proc. IAU Symposium 236, 2007, Cambridge University Press, Cambridge. P. 135–140.

18. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Piscids meteoroid stream // *Astron. and Astrophys.* 2008. Vol. 479. P. 249–255.
19. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Iota-Aquariids meteoroid stream // *Astron. and Astrophys.* 2009. Vol. 507. P. 1067–1072.
20. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Scorpiids meteoroid complex // *Astron. and Astrophys.* 2013. Vol. 556. P. 25B.
21. Hoffmeister C. Die Meteorströme. Leipzig, Verlag Johann Ambrosine Bart., 1948. 168 p.
22. Plavec M. On the Relations between Minor Planets and Meteor Streams // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1953. Vol. 4. P. 195.
23. Plavec M. On the Relations between Minor Planets and Meteor Streams // *Bull. Astron. Inst. Czechosl.* 1954. Vol. 5. P. 38.
24. Sekanina Z. Statistical model of meteor streams. IV – A study of radio streams from the synoptic year // *Icarus.* 1976. Vol. 27. P. 265–321.
25. Drummond J.D. Theoretical meteor radiant of Apollo, Amor, and Aten asteroids // *Icarus.* 1982. Vol. 49. P. 143–153.
26. Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // *Smith. Contrib. Astrophys.* 1963. Vol. 7. P. 261–285.
27. Weissman P.R., A'Hearn M.F., Rickman H., McFadden L.A. Evolution of comets into asteroids. In: Binzel, R.P., Gehrels, T., Mathews M.S. (eds.), *Proc. of the conf. Asteroids II*, Tucson, AZ, 1989. Tucson: Univ. of Arizona Press. P. 880–920.
28. Ostro S.J., Campbell D.B., Chandler J.F. et al. Asteroid radar astrometry // *Astron. J.* 1991. Vol. 102. P. 1490O.
29. McFadden L.A., Cochran A.L., Barker E.S., Cruikshank D.P., Hartmann W.K. The enigmatic object 2201 Oljato - Is it an asteroid or an evolved comet? // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 3031M.
30. Babadzhanov P.B. Meteor showers associated with the near-Earth asteroid (2101) Adonis // *Astron. and Astrophys.* 2003. Vol. 397. No. 1. P. 319–323.
31. Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh. The Sigma-Capricornids complex of near-Earth objects // *Adv. in Space Res.* 2015. Vol. 55. P. 1784–1791.
32. Sekanina Z. Statistical model of meteor streams. III. Stream search among 19303 radio meteors // *Icarus.* 1973. Vol. 18. P. 253–284.
33. Jet Propulsion Laboratory – CNEOS (Center of Near Earth Object Studies). URL: <http://neo.jpl.nasa.gov> (дата обращения 27.10.2017).
34. Steel D.I. On the orbital similarity of Earth-crossing asteroids (2101) Adonis and 1995 CS // *Planet. and Space Sci.* 1997. Vol. 45. P. 327–335.
35. Everhart E. Implicit Single-Sequence Methods for Integrating Orbits // *Celest. Mech.* 1974. Vol. 10. P. 35–55.
36. Drummond J.D. A test of comet and meteor shower associations // *Icarus.* 1981. Vol. 45. P. 545–553.

## References

1. Kholoshevnikov K.V., Kokhirova G.I., Babadzhanov P.B., Khamroev U.H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin. *MNRAS*, 2016, vol. 462, iss. 2, pp. 2275–2283. doi: 10.1093/mnras/stw1712
2. Milanov D.V. Metrics in Keplerian orbits quotient spaces. *Celest. Mech. Dyn. Astr.*, 2018, vol. 130, iss. 4, pp. 391–403.
3. Asher D.J., Clube S.V.M., Steel D.I. Asteroids in the Taurid Complex. *MNRAS*, 1993, vol. 264, iss. 1, pp. 93–105. doi: 10.1093/mnras/264.1.93
4. Babadzhanov P.B. Search for meteor showers associated with Near-Earth Asteroids. I. Taurid Complex. *emphAstron. and Astrophys.*, 2001, vol. 373, no. 1, pp. 329–335. doi: 10.1051/0004-6361:20010583
5. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth objects in the Taurid complex. *MNRAS*, 2008, vol. 386, iss. 3, pp. 1436–1442. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13096.x
6. Madiedo J.M., Trigo-Rodriguez J.M., Williams I.P., Ortiz J.L., Cabrera J. The Northern  $\chi$ -Orionid meteoroid stream and possible association with the potentially hazardous asteroid 2008XM1. *MNRAS*, 2013, vol. 431, pp. 2464–2470. doi: 10.1093/mnras/stt342
7. Porubčan V., Williams I.P., Kornoš L. Associations between asteroids and meteoroid streams. *Earth, Moon and Planets*, 2004, vol. 95, iss. 1–4, pp. 697–712.
8. Porubčan V., Kornoš L., Williams I.P. The Taurid complex meteor showers and asteroids. *Contrib. of the Astron. Observ. Skalnaté Pleso*, 2006, vol. 36, no. 2, pp. 103–117.
9. Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P. Asteroid 2010 TU149 in the Taurid complex. In: *Abstracts of European Planetary Science Congress 2012*, held 23–28 September, 2012 in Madrid, Spain, 2012a, EPSC2012, 886R.
10. Rudawska R., Vaubaillon J., Jenniskens P. Asteroid 2005 UW6—A 'New' Object in the Taurid Complex? In: *Abstracts of conf. 'Asteroids, Comets, Meteors 2012'*, held on May 16–20, 2012 in Niigata, Japan, 2012b, LPI Contribution No. 1667, 6222R.
11. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. The meteor showers associated with 2003EH1.

- MNRAS*, 2008, vol. 386, iss. 4, pp. 2271–2277. doi: 10.1111/j.1365-2966.2008.13202.x
12. Jenniskens P. 2003 EH1 Is the Quadrantid Shower Parent Comet. *The Astron. J.*, 2004, vol. 127, no. 5, pp. 3018–3022. doi: 10.1086/383213
  13. Neslušan L., jr. Hajduková M., Jakubík M. Meteor-shower complex of asteroid 2003 EH1 compared with that of comet 96P/Machholz. *Astron. and Astrophys.*, 2013, vol. 560, iss. 10, p. A47. doi: 10.1051/0004-6361/201322228
  14. Neslušan L., Kaňuchová Z., Tomko D. The meteor-shower complex of comet 96P/Machholz revisited. *Astron. and Astrophys.*, 2013, vol. 551, no. 14, p. A87. doi: 10.1051/0004-6361/201220299
  15. Williams I.P., Ryabova G.O., Baturin A.P., Chernitsov A.M. The parent of the Quadrantid meteoroid stream and asteroid 2003 EH1. *MNRAS*, 2004, vol. 355, iss. 4, pp. 1171–1181. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.08401.x
  16. Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Williams I.P., Obrubov Yu.V. Investigation into the relationship of comet 96P/Machholz 1 and asteroid 2003 EH1. *Astron. and Astrophys.*, 2017, vol. 598, p. A94. doi: 10.1051/0004-6361/201629006
  17. Babadzhanov P.B., Williams I.P. Is the near-Earth asteroid 2000PG3 an extinct comet? In: Milani A., Valsecchi G.B., Vokrouhlicky D. (eds.) *Near-Earth Objects our Celestial Neighbours: Opportunity and Risk. Proc. IAU Symposium 236*, 2007, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 135–140.
  18. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Piscids meteoroid stream. *Astron. and Astrophys.*, 2008, vol. 479, pp. 249–255. doi: 10.1051/0004-6361:20078185
  19. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Iota-Aquariids meteoroid stream. *Astron. and Astrophys.*, 2009, vol. 507, pp. 1067–1072. doi: 10.1051/0004-6361/200912936
  20. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I. Near-Earth asteroids among the Scorpids meteoroid complex. *Astron. and Astrophys.*, 2013, vol. 556, p. 25B. doi: 10.1051/0004-6361/201219828
  21. Hoffmeister C. Die Meteorströme. Leipzig, Verlag Johann Ambrosine Bart., 1948, 168 p.
  22. Plavec M. On the relations between minor planets and meteor streams. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 1953, vol. 4, p. 195.
  23. Plavec M. On the Relations between Minor Planets and Meteor Streams. *Bull. Astron. Inst. Czechosl.*, 1954, vol. 5, p. 38.
  24. Sekanina Z. Statistical model of meteor streams. IV – A study of radio streams from the synoptic year. *Icarus*, 1976, vol. 27, pp. 265–321.
  25. Drummond J.D. Theoretical meteor radiant of Apollo, Amor, and Aten asteroids. *Icarus*, 1982, vol. 49, pp. 143–153.
  26. Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams. *Smith. Contrib. Astrophys.*, 1963, vol. 7, pp. 261–285.
  27. Weissman P.R., A'Hearn M.F., Rickman H., McFadden L.A. Evolution of comets into asteroids. In: Binzel R.P., Gehrels T., Mathews M.S. (eds.) *Proc. of the conf. Asteroids II*, Tucson, AZ, 1989, Tucson, Univ. of Arizona Press, P. 880–920.
  28. Ostro S.J., Campbell D.B., Chandler J.F. et al. Asteroid radar astrometry. *Astron. J.*, 1991, vol. 102, p. 1490O. doi: 10.1086/115975
  29. McFadden L.A., Cochran A.L., Barker E.S., Cruikshank D.P., Hartmann W.K. The enigmatic object 2201 Oljato - Is it an asteroid or an evolved comet?. *J. Geophys. Res.*, 1993, vol. 98, p. 3031M. doi: 10.1029/92JE01895
  30. Babadzhanov P.B. Meteor showers associated with the near-Earth asteroid (2101) Adonis. *Astron. and Astrophys.*, 2003, vol. 397, no. 1, pp. 319–323. doi: 10.1051/0004-6361:20021506
  31. Babadzhanov P.B., Kokhirova G.I., Khamroev U.Kh. The Sigma-Capricornids complex of near-Earth objects. *Adv. in Space Res.*, 2015, vol. 55, pp. 1784–1791. doi: 10.1016/j.asr.2015.01.012
  32. Sekanina Z. Statistical model of meteor streams. III. Stream search among 19303 radio meteors. *Icarus*, 1973, vol. 18, pp. 253–284.
  33. Jet Propulsion Laboratory – CNEOS (Center of Near Earth Object Studies). URL: <http://neo.jpl.nasa.gov> (access date 27.10.2017).
  34. Steel D.I. On the orbital similarity of Earth-crossing asteroids (2101) Adonis and 1995 CS. *Planet. and Space Sci.*, 1997, vol. 45, pp. 327–335. doi: 10.1016/S0032-0633(96)00137-7
  35. Everhart E. Implicit single-sequence methods for integrating orbits. *Celest. Mech.*, 1974, vol. 10, pp. 35–55.
  36. Drummond J.D. A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, 1981, vol. 45, pp. 545–553.