

Э. Д. Кузнецов, О. М. Аль-Шиблави, В. Д. Гусев, Д. С. Устинов

Уральский федеральный университет, проспект Ленина, 51, Екатеринбург, 620000, Россия, [eduard.kuznetsov@urfu.ru](mailto:eduard.kuznetsov@urfu.ru)

## Введение

- Наблюдения транснептуновых объектов (ТНО) с помощью космических аппаратов, кривые блеска при покрытии звезд ТНО, кривые блеска ТНО, получаемые в результате фотометрических наблюдений, показывают, что большинство исследованных ТНО являются либо **контактно-двойными**, либо **двойными**, либо **кратными системами**.
- Результаты моделирования показывают, что среди **холодных объектов пояса Койпера** реализуются условия для сохранения тесных двойных ТНО с компонентами примерно равных масс.
- Дальнейшая эволюция этих двойных систем может приводить к формированию **контактно-двойных ТНО** в результате приливного уменьшения большой полуоси орбиты и мягкого слипания компонент.
- Другой сценарий, опять же под действием приливов, может приводить к уходу спутника и формированию **пары ТНО** на близких орбитах.
- Контактно-двойные ТНО также могут быть источниками **пар ТНО** на близких орбитах в случае разрушения контактно-двойного ТНО вследствие удара или вращательного распада при высокой угловой скорости осевого вращения.
- Данная работа посвящена поиску пар ТНО на близких орбитах.

## Поиск пар ТНО на близких орбитах

- Поиск молодых пар динамически коррелированных транснептуновых объектов с большими полуосями орбит более 30 а.е. выполнялся с использованием **метрик Холшевникова** (Kholshchevnikov et al., 2016) в пространстве кеплеровых орбит.
  - **Метрика**  $\rho_2$  определена в 5-мерном пространстве кеплеровых орбит (не учитывается положение на орбите).
  - **Метрика**  $\rho_5$  определена в 3-мерном фактор-пространстве позиционных элементов как минимальное значение  $\rho_2$  при всех возможных положениях узлов и перигелиев орбит.
- Анализ метрик  $\rho_2$  и  $\rho_5$  позволяет выделить **кандидатов в молодые пары ТНО**, для которых положения линий узлов и линий апсид должны быть близки, а следовательно,  $\rho_2 \approx \rho_5$ .
- Использован каталог элементов орбит AstDyS для нумерованных объектов и объектов, наблюдавшихся в нескольких оппозициях, на эпоху MJD 58800 (13.11.2019).
- **Критерии отбора** кандидатов в молодые пары ТНО:  $\rho_2 < 0.07$  (а.е.)<sup>1/2</sup>,  $\rho_5 < 0.07$  (а.е.)<sup>1/2</sup> и  $\rho_2 - \rho_5 < 0.015$  (а.е.)<sup>1/2</sup>. Также отбирались пары, включающие двойные ТНО, при  $\rho_2 < 0.12$  (а.е.)<sup>1/2</sup> и пары, в которых оба ТНО двойные —  $\rho_2 < 0.3$  (а.е.)<sup>1/2</sup>.
- Было обнаружено:
  - **26 пар ТНО** с метрикой  $\rho_2 < 0.07$  (а.е.)<sup>1/2</sup> ( $\rho_2^2 < 0.0049$  а.е. =  $0.73 \cdot 10^6$  км) (таблица 1),
  - **22 пары**, в которых один из ТНО является двойным при  $\rho_2 < 0.12$  (а.е.)<sup>1/2</sup> ( $\rho_2^2 < 0.0144$  а.е. =  $2.15 \cdot 10^6$  км) (таблица 2),
  - **11 пар двойных ТНО** при  $\rho_2 < 0.3$  (а.е.)<sup>1/2</sup> ( $\rho_2^2 < 0.009$  а.е. =  $13.5 \cdot 10^6$  км) (таблица 3).

## Обсуждение результатов

- Анализ элементов орбит ТНО, входящих в пары, приведенные в таблице 1, показал, что все объекты можно отнести к **холодным классическим объектам пояса Койпера**. Максимальные эксцентриситеты орбит у ТНО, входящих в пару 2004 VA131 — 2004 VU131, составляют 0.0937 и 0.0945, соответственно. Максимальные наклоны орбит достигают 5° для ТНО пары (500839) 2013 GW137 — 2015 GZ58.
- Наиболее вероятными механизмами образования пар ТНО представляются: разрушение контактно-двойных ТНО в результате удара или вращательной неустойчивости, распад двойных или кратных систем ТНО.
- Возможно, что пара **2004 VA131 — 2004 VU131** с минимальными метриками  $\rho_2$  и  $\rho_5$  (см. таблицу 1) является **самой молодой парой ТНО** из известных на сегодняшний день. Проверка этого вывода требует исследования вероятностной эволюции. Результаты численного моделирования с помощью комплексов программ Orbit9 и Mercury на основе номинальных орбит ТНО 2004 VA131 и 2004 VU131 из каталога AstDyS на эпоху MJD 58800 показывают, что ближайшее к современной эпохе низкоскоростное сближение на расстояние менее радиуса Хилла при скорости, меньшей второй космической, могло реализоваться 15.6 лет назад.

## Заключение

- Проведенное исследование является начальным этапом изучения динамических свойств пар ТНО на близких орбитах.
- В дальнейшем предполагается **исследование вероятностной эволюции** пар ТНО с целью уточнения их возраста. Будет использоваться программа **Orbit9**, выполняющая совместное интегрирование уравнений движения восьми больших планет и карликовой планеты Плутон.
- Отдельно будут исследоваться пары, в которые входят **двойные ТНО**. Эти пары представляют особый интерес, т.к. они могли образоваться в результате распада кратных ТНО и/или разрушения контактно-двойных ТНО.

## Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0038.

## Список литературы

1. Kholshchevnikov K. V., Kokhirova G. I., Babadzhanyan P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2016. V. 462. P. 2275–2283.

Таблица 1. Пары ТНО на близких орбитах

| Пара ТНО            |            | $\rho_2$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> | $\rho_5$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> |
|---------------------|------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2004 VA131          | 2004 VU131 | 0.0195                           | 0.0054                           |
| 1999 HV11           | 2015 VF172 | 0.0348                           | 0.0316                           |
| 2003 QL91           | 2015 VA173 | 0.0366                           | 0.0331                           |
| 2013 SD101          | 2015 VY170 | 0.0438                           | 0.0392                           |
| 2002 CY154          | 2005 EW318 | 0.0461                           | 0.0377                           |
| (88268) 2001 KK76   | 2015 GV58  | 0.0542                           | 0.0432                           |
| 2000 PW29           | 2015 GL58  | 0.0587                           | 0.0286                           |
| (468422) 2000 FA8   | 2000 YV1   | 0.0591                           | 0.0420                           |
| 2003 QD91           | 2015 VC173 | 0.0592                           | 0.0387                           |
| 2000 ON67           | 2013 UN17  | 0.0597                           | 0.0457                           |
| 2002 FW36           | 2015 VF170 | 0.0600                           | 0.0239                           |
| (500839) 2013 GW137 | 2015 GZ58  | 0.0602                           | 0.0182                           |
| (88268) 2001 KK76   | 2013 UL17  | 0.0620                           | 0.0445                           |
| 2013 UR17           | 2015 GY58  | 0.0632                           | 0.0518                           |
| 2000 PM30           | 2001 OZ108 | 0.0637                           | 0.0573                           |
| 2003 QX90           | 2013 UN17  | 0.0638                           | 0.0586                           |
| 1997 CT29           | 2015 VQ169 | 0.0643                           | 0.0380                           |
| (534405) 2014 TW85  | 2002 PV170 | 0.0645                           | 0.0389                           |
| 2009 UF156          | 2013 SX100 | 0.0653                           | 0.0137                           |
| 1998 WX24           | 2001 FK185 | 0.0654                           | 0.0427                           |
| (534405) 2014 TW85  | 2015 GS56  | 0.0659                           | 0.0594                           |
| 2003 HZ56           | 2010 NF146 | 0.0660                           | 0.0451                           |
| (33001) 1997 CU29   | 1999 CN119 | 0.0672                           | 0.0598                           |
| 2004 DM71           | 2005 EC318 | 0.0675                           | 0.0505                           |
| 2002 CS154          | 2002 VB131 | 0.0679                           | 0.0674                           |
| 2003 YN179          | 2010 NF146 | 0.0689                           | 0.0539                           |
| 2001 HA59           | 2015 VH170 | 0.0699                           | 0.0515                           |

Таблица 2. Пары ТНО на близких орбитах, в которых один из компонентов является двойным

| Двойной ТНО         | ТНО                | $\rho_2$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> | $\rho_5$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> |
|---------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2005 GD187          | 2001 OG109         | 0.0731                           | 0.0664                           |
| (275809) 2001 QY297 | 2015 VB169         | 0.0732                           | 0.0654                           |
| (469610) 2004 HF79  | 1997 CT29          | 0.0791                           | 0.0546                           |
| 2005 GD187          | 2015 VV170         | 0.0918                           | 0.0664                           |
| 2002 VD131          | (505446) 2013 SP99 | 0.0976                           | 0.0945                           |
| 2004 HK79           | 2015 VB171         | 0.0996                           | 0.0657                           |
| 2006 JV58           | 2004 KF19          | 0.0998                           | 0.0707                           |
| (275809) 2001 QY297 | 2006 HB123         | 0.1039                           | 0.0856                           |
| 2003 QY90           | 2002 CU154         | 0.1049                           | 0.0957                           |
| 2015 RP280          | 2012 HE85          | 0.1083                           | 0.0933                           |
| 2000 CF105          | 2015 GJ57          | 0.1110                           | 0.0977                           |
| 2003 UN284          | 1996 TK66          | 0.1124                           | 0.0834                           |
| 2015 VW168          | 2013 UL17          | 0.1133                           | 0.0989                           |
| 2004 HK79           | 2004 VB131         | 0.1135                           | 0.0674                           |
| (505447) 2013 SQ99  | 2004 HE79          | 0.1141                           | 0.0872                           |
| 2004 HK79           | 2015 GA57          | 0.1144                           | 0.0199                           |
| 2005 GD187          | (420356) Praamzius | 0.1148                           | 0.0889                           |
| 2004 HK79           | 2004 VV131         | 0.1159                           | 0.0678                           |
| 2004 PW117          | 2015 GT57          | 0.1174                           | 0.0978                           |
| 2002 VD131          | 2002 CZ224         | 0.1184                           | 0.0983                           |
| 2004 PW117          | 2013 TL172         | 0.1188                           | 0.0265                           |
| (469610) 2004 HF79  | 2013 UL17          | 0.1209                           | 0.0837                           |

Таблица 3. Пары ТНО на близких орбитах, в которых оба компонента являются двойными

| Пары двойных ТНО    |                     | $\rho_2$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> | $\rho_5$ , (а.е.) <sup>1/2</sup> |
|---------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2003 QY90           | 2005 CE81           | 0.0859                           | 0.0840                           |
| 2000 CF105          | 2006 BR284          | 0.1017                           | 0.0756                           |
| (134860) 2000 OJ67  | (469610) 2004 HF79  | 0.1189                           | 0.0981                           |
| (364171) 2006 JZ81  | (505447) 2013 SQ99  | 0.1633                           | 0.0828                           |
| (469610) 2004 HF79  | 2003 HG57           | 0.1634                           | 0.0761                           |
| 2004 HK79           | 2007 DS101          | 0.1726                           | 0.0699                           |
| (275809) 2001 QY297 | 2004 HK79           | 0.1918                           | 0.0460                           |
| 2001 QQ322          | 2003 WU188          | 0.1961                           | 0.0871                           |
| (134860) 2000 OJ67  | (524366) 2001 XR254 | 0.2025                           | 0.0965                           |
| (134860) 2000 OJ67  | 2005 GD187          | 0.2387                           | 0.0472                           |
| (524366) 2001 XR254 | 2015 VW168          | 0.3020                           | 0.0980                           |