

## ТОЧНОСТЬ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА ПАР ТРАНСНЕПТУНОВЫХ ОБЪЕКТОВ НА БЛИЗКИХ ОРБИТАХ

В. Д. Гусев, Э. Д. Кузнецов  
*Уральский федеральный университет*

На основе анализа результатов численного моделирования выполнено исследование методов оценки возраста пар транснептуновых объектов: 1) анализ схождения линий узлов и линий апсид, 2) анализ минимумов метрики Холшевникова. Было выполнено моделирование вероятностной эволюции модельных пар транснептуновых объектов возрастом 10 млн лет. Получены ошибки определения возраста пар при различной точности определения орбит. Точность определения орбит 11 % известных транснептуновых объектов достаточна для оценки возраста пар 10–15 млн лет с точностью до 2–3 млн лет. Точность определения орбит 39 % известных транснептуновых объектов недостаточна для получения надежных оценок возраста при возрасте пар 10–15 млн лет.

## ACCURACY OF AGE ESTIMATION METHODS FOR PAIRS OF TRANS-NEPTUNIAN OBJECTS IN CLOSE ORBITS

V. D. Gusev, E. D. Kuznetsov  
*Ural Federal University*

On the basis of the analysis of the results of numerical modeling, the study of methods for estimating the age of pairs of transneptunian objects is performed: 1) analysis of the convergence of node lines and apsidal lines, 2) analysis of the minima of the Kholshchevnikov metric. We simulated the probabilistic evolution of model pairs of transneptunian objects 10 Myr old. We obtained errors in determining the ages of pairs at different orbital determination accuracies. The accuracy of determining the orbits of 11 % of known transneptunian objects is sufficient to estimate the ages of 10–15 Myr pairs with an accuracy of 2–3 Myr. The accuracy of determining the orbits of 39 % of known transneptunian objects is insufficient for obtaining reliable age estimates at the ages of 10–15 Myr pairs.

## Введение

В работе [1] было впервые высказано предположение о возможном существовании столкновительных семейств малых тел за орбитой Нептуна. Первое семейство, идентифицированное во внешней части Солнечной системы, было связано с карликовой планетой (136108) Науша [2]. В работе [3] выполнен поиск пар транснептуновых объектов (ТНО) на близких орбитах с большими полуосями более 30 а. е. Обнаружено 26 пар транснептуновых объектов, которые могут иметь общее происхождение.

Возможно, что в классическом поясе Койпера, в отличие от Главного пояса астероидов, доминирующим механизмом формирования пар и семейств малых тел является распад двойных и кратных ТНО, а не соударения. Сверхширокие двойные системы пояса Койпера могут распадаться при длительном взаимодействии с другими объектами того же класса [4]. Распад сверхшироких двойных ТНО может являться одним из механизмов формирования пар ТНО на близких орбитах в современную эпоху.

В данной работе исследованы методы оценки возраста пар ТНО. Рассмотрены модельные пары ТНО. Возраст пар оценен на основе анализа моментов схождения линий узлов и линий апсид (см., например, [5]), а также моментов достижения минимальных значений орбитальной метрики Холшевникова в пространстве кеплеровых орбит (см., например, [6]).

## Описание методики

**Анализ одновременных сближений линий узлов и линий апсид.** Молодые пары могут иметь заметно различающиеся большие полуоси  $a$  и эксцентриситеты  $e$ , но близкие значения долгот восходящих узлов  $\Omega$  и аргументов перицентра  $\omega$  (см., например, [7]). Разности долгот восходящих узлов  $\Delta\Omega$  и разности аргументов перицентров  $\Delta\omega$  компонентов пары ТНО должны одновременно стремиться к нулю в окрестности момента формирования.

**Анализ минимумов орбитальной метрики.** Так как орбиты фрагментов распада должны быть близки, минимум метрики должен указывать на момент формирования пары. В данной работе для оценки расстояния между орбитами используется орбитальная метрика Холшевникова  $\rho_2$  [8]. Обозначение метрики соответствует обозначению из [8].

Исследование методов оценки возраста пар ТНО выполняется на основе численного моделирования динамической эволюции компонентов распавшейся сверхширокой двойной системы. На первом этапе проводится интегрирование уравнений движения от момента образования пары  $t_0$  в будущее до момента  $t_1$  с целью создания пары ТНО заданного возраста  $\tau = t_1 - t_0$ . На втором этапе выполняется интегрирование уравнений движения от момента  $t_1$  в прошлое до момента  $t_2 < t_0$  с целью определения возраста пары методами анализа минимумов орбитальной метрики Холшевникова и анализа одновременных сближений линий узлов и линий апсид орбит объектов. При интегрировании в прошлое учитывается характерная для ТНО ошибка определения орбиты. Была исследована эволюция двух пар ТНО, относящихся к динамически холодному населению классического пояса Койпера, массы компонентов которых равны  $9.95 \cdot 10^{18}$  кг.

В работе [9] для динамически холодного населения классического пояса Койпера были получены критерии формирования пары ТНО в результате распада сверхширокой двойной системы под действием возмущений от Солнца и планет Солнечной системы. На основе критерия были определены динамические характеристики молодых пар ТНО непосредственно после их формирования. Было показано, что в момент распада расстояние между компонентами двойной системы принимает значение  $1.6 \pm 0.3$  радиуса сферы Хилла двойной системы, а относительная скорость компонентов равна второй космической скорости для массы двойной системы на объектоцентрическом расстоянии, равном относительному расстоянию между центрами масс объектов.

Чтобы оценить влияние неопределенности орбиты на оценку возраста, мы провели моделирование вероятностной эволюции модельных пар. При моделировании вероятностной эволюции генерировалось 500 клонов каждого компонента пары возрастом 10 млн лет. Клоны генерировались на основе разложения Холецкого для многомерных нормальных распределений (см., например, [10]). На основе ковариационных матриц ТНО (612388) 2002 PV170 и 1999 CN119 были получены элементы орбит клонов, моделирующих орбиту, известную с высокой и низкой точностью соответственно. Для одной пары был построен набор клонов, моделирующих орбиту, определенную со сверхвысокой точностью. В этом случае ошибки определения элементов орбиты были уменьшены в 10 раз по сравнению с моделированием при использовании ковариационной матрицы ТНО (612388) 2002 PV170.

Численное моделирование динамической эволюции компонентов пары выполнялось в пакете **Rebound**. Использовался модифицированный интегратор Эверхарта 15-го порядка с адаптивным шагом. Учитывались возмущения от четырех планет-гигантов и Плутона.

## Изложение результатов

На основе результатов численного интегрирования, используя критерии формирования пар ТНО, был оценен возраст модельных пар ТНО. Для каждой пары были получены две оценки возраста: 1) в виде среднего значения  $t_{\text{mean}}$  со стандартным отклонением  $\sigma_t$  и 2) медианное значение  $t_{\text{med}}$  с 5 и 95 % процентилями. В табл. 1 и 2 приведены оценки возраста модельных пар ТНО, полученные методами анализа схождения линий апсид и линий узлов и анализа метрики Холшевникова  $\rho_2$  соответственно.

Таблица 1. Оценки возраста модельных пар ТНО, полученные методом анализа схождения линий апсид и линий узлов

| Номер варианта | Номер пары | Точность определения номинальной орбиты | $t_{\text{mean}}$ , млн лет | $t_{\text{med}}$ , млн лет |
|----------------|------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| 1              | 1          | Высокая                                 | $9.3 \pm 1.1$               | $9.2^{+2.1}_{-1.7}$        |
| 2              | 2          | Высокая                                 | $10.2 \pm 1.8$              | $9.8^{+4.0}_{-1.9}$        |
| 3              | 1          | Сверхвысокая                            | $10.05 \pm 0.20$            | $10.03^{+0.35}_{-0.25}$    |
| 4              | 1          | Низкая                                  | $6.5 \pm 4.1$               | $6.3^{+7.5}_{-5.5}$        |
| 5              | 2          | Низкая                                  | $8.0 \pm 3.8$               | $8.0^{+6.0}_{-5.8}$        |

Таблица 2. Оценки возраста пар ТНО, полученные методом анализа минимумов метрики Холшевникова  $\rho_2$

| Номер варианта | Номер пары | Точность определения номинальной орбиты | $t_{\text{mean}}$ , млн лет | $t_{\text{med}}$ , млн лет |
|----------------|------------|---|-----------------------------|----------------------------|
| 1              | 1          | Высокая                                 | $9.5 \pm 1.0$               | $9.4^{+1.9}_{-1.5}$        |
| 2              | 2          | Высокая                                 | $9.9 \pm 1.9$               | $9.9^{+3.3}_{-2.2}$        |
| 3              | 1          | Сверхвысокая                            | $10.08 \pm 0.26$            | $10.08^{+0.45}_{-0.41}$    |
| 4              | 1          | Низкая                                  | $2.9 \pm 4.0$               | $2.9^{+10.0}_{-2.9}$       |
| 5              | 2          | Низкая                                  | $4.0 \pm 4.6$               | $4.0^{+10.7}_{-4.0}$       |

Точный возраст модельных пар ТНО составляет 10 млн лет. В случае высокой и сверхвысокой точности определения орбит ТНО (варианты 1–3 в табл. 1 и 2) оба метода дают надежные оценки возраста пар. Точность оценок  $t_{\text{mean}}$  и  $t_{\text{med}}$  для пар ТНО с орбитами, определенными с высокой точностью, составляет 1–4 млн лет, а с орбитами, определенными со сверхвысокой точностью, — 0.20–0.45 млн лет. В случае орбит ТНО, определенных с низкой точностью (варианты 4–5 в табл. 1 и 2), ошибки оценки возраста превышают 4 млн лет. Причем ошибки оценок возраста, полученные с использованием метрики Холшевникова  $\rho_2$ , сравнимы с возрастом пары ТНО.

## Обсуждение результатов

Оценки возраста модельных пар ТНО, полученные на основе орбит низкой точности, не позволяют надежно определить возраст пар. При использовании орбит высокой и сверхвысокой точности имеется возможность получения надежных оценок возраста пар ТНО. Если возраст пары ТНО не превышает 15 млн лет, то для получения надежных оценок  $t_{\text{mean}}$  и

$t_{\text{med}}$  ошибки определения элементов орбит объектов не должны превышать соответствующие ошибки для ТНО 1999 CN119. Доля открытых ТНО, у которых ошибки определения орбит больше, составляет около 39 %. Около 11 % известных ТНО имеют ошибки определения элементов орбит меньше, чем для (612388) 2002 PV170. В случае если бы эти объекты образовывали пары на близких орбитах и имели возраст 10–15 млн лет, его можно было бы оценить с точностью до 2–3 млн лет.

## Заключение

На основе проведенного исследования методов оценки возраста пар ТНО на близких орбитах можно сделать следующие выводы. Для оценки возраста пар ТНО на интервалах 10–15 млн лет требуется, чтобы орбиты объектов были определены с высокой точностью. Только 11 % известных ТНО имеют орбиты, определенные с высокой точностью. В случае если бы эти объекты образовывали пары на близких орбитах, имеющие возраст 10–15 млн лет, его можно было бы оценить с точностью до 2–3 млн лет. Для 39 % известных ТНО, орбиты которых определены с низкой точностью, в том случае если они входят в пары на близких орбитах и имеют возраст 10–15 млн лет, оценки их возраста будут ненадежными.

## Библиографические ссылки

- [1] *Chiang E. I.* A Collisional Family in the Classical Kuiper Belt // *Astrophys. J. Lett.* — 2002. — Vol. 573, № 1. — P. L65–L68. astro-ph/0205275.
- [2] *Brown M. E., Barkume K. M., Ragozzine D., Schaller E. L.* A collisional family of icy objects in the Kuiper belt // *Nature.* — 2007. — Vol. 446, № 7133. — P. 294–296.
- [3] *Kuznetsov E. D., Al-Shiblawi O. M., Gusev V. D.* Dynamic Evolution of Pairs of Trans-Neptunian Objects // *Solar System Research.* — 2022. — Vol. 56, № 2. — P. 122–134.
- [4] *Campbell H. M., Stone L. R., Kaib N. A.* Close Trans-Neptunian Object Passages as a Driver of the Origin and Evolution of Ultrawide Kuiper Belt Binaries // *Astron. J.* — 2023. — Vol. 165, № 1. — P. 19. 2211.06383.
- [5] *Rosaev A., Plávalová E.* On relative velocity in very young asteroid families // *Icarus.* — 2018. — Vol. 304. — P. 135–142.
- [6] *Кузнецов Э. Д., Розаев А. Е., Плавалова Е. и др.* Поиск молодых пар астероидов на близких орбитах // *Астрон. вестн.* — 2020. — Т. 54, № 3. — С. 260–277.
- [7] *de León J., de la Fuente Marcos C., de la Fuente Marcos R.* Visible spectra of (474640) 2004 VN<sub>112</sub>-2013 RF<sub>98</sub> with OSIRIS at the 10.4 m GTC: evidence for binary dissociation near aphelion among the extreme trans-Neptunian objects // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 467, № 1. — P. L66–L70. 1701.02534.
- [8] *Kholshchikov 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 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2016. — Vol. 462, № 2. — P. 2275–2283.
- [9] *Гусев В. Д., Кузнецов Э. Д.* Моделирование распада двойных транснептуновых объектов // *Науч. тр. ИНАСАН.* — 2023. — Т. 8, № 6. — С. 268–272.
- [10] *Пригарин С. М.* Численное моделирование многомерных гауссовских распределений. — Новосибирск : ИИЦ НГУ, 2018.