


УДК 524.42-32-17

## КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АССОЦИАЦИИ TW НУА

© 2026 В. В. Бобылев<sup>1\*</sup> <sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 2 сентября 2025 года; после доработки 12 января 2026 года; принята к публикации 26 февраля 2026 года

Выполнен кинематический анализ молодой звездной ассоциации TW Нуа. Компоненты матрицы смещений в линейной модели Огородникова–Милна оценивались как графическим методом, так и путем решения основных кинематических уравнений. Подтверждено объемное расширение ассоциации с коэффициентом  $K_{xyz} = 103 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ , что дает динамическую оценку возраста  $t = 9.7 \pm 0.8$  млн лет. На основе графического метода впервые получены оценки параметров собственного твердотельного вращения ассоциации  $\omega$  вокруг галактических осей  $x$  и  $y$  со значениями скоростей в интервале  $50\text{--}70 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$  и ошибками их определения  $14\text{--}19 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ . Однако эти величины не подтверждаются другим методом. Например, при решении кинематических уравнений только по собственным движениям все три компонента твердотельного вращения значимо не отличаются от нуля,  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (4, 7, 11) \pm (5, 5, 5) \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ .

Ключевые слова: Галактика: рассеянные скопления и ассоциации: общие сведения — Галактика: рассеянные скопления и ассоциации: отдельные: TW Нуа — Галактика: кинематика и динамика

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Молодая звездная ассоциация TW Нуа является одной из ближайших к Солнцу. Большинство ее членов — маломассивные звезды спектральных классов K и M, не достигшие стадии главной последовательности.

Изучению этой ассоциации посвящено большое количество публикаций (de la Reza et al., 1989; Gregorio-Hetem et al., 1992; Zuckerman and Becklin, 1993; Makarov and Fabricius, 2001; Mamajek, 2005; de la Reza et al., 2006; Ducourant et al., 2014; Donaldson et al., 2016; Luhman, 2023; Bobylev, Vajkova, 2024; Olivares et al., 2025). Возраст TW Нуа примерно 10 млн лет (см., например, Gagné et al., 2018). Он оценивался как на основе кинематики звезд (по эффекту расширения), так и с помощью подгонки к подходящим изохронам. Стоит обратить внимание на работу Miret-Roig et al. (2025), где в таблице С.1 дана обширная сводка исторических определений возраста этой ассоциации, демонстрирующая неплохое согласие оценок, полученных различными методами. Все оценки заключены в интервале 3–12 млн лет.

Главный интерес в изучении кинематики ассоциации TW Нуа состоит в том, что она достаточно компактная, с центром на расстоянии около 60 пк

от Солнца. В этом случае очень точны компоненты скоростей звезд ассоциации, вычисляемые по собственным движениям из каталога Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023). Действительно, средняя ошибка тригонометрических параллаксов Gaia составляет 0.04 мсд и  $0.04 \text{ мсд год}^{-1}$  в собственном движении. Здесь средняя относительная ошибка параллакса равна 0.3%, поэтому звезды ассоциации TW Нуа имеют среднюю ошибку прямоугольных координат около 0.07 пк и около  $0.06 \text{ км с}^{-1}$  для тангенциальных скоростей. Таким образом, желательнее для звезд этой ассоциации иметь значения лучевых скоростей со средней ошибкой измерения, существенно меньшей  $1 \text{ км с}^{-1}$ , чего в настоящее время нет.

Анализ кинематики близких к Солнцу звездных группировок с использованием высокоточных данных позволяет в настоящее время получать важные результаты. Например, Armstrong et al. (2025) изучили кинематические особенности большого количества очень молодых мелких звездных группировок внутри OB-ассоциации US (является частью OB-ассоциации Скорпиона–Центавра). Авторы заключили, что в пределах US происходит стохастическое звездообразование. А ведь именно для OB-ассоциации US была разработана модель последовательного звездообразования (Preibisch and Zinnecker, 1999). И в настоящее время ее

\*E-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

модификация применяется к US в виде модели «от скопления к скоплению» (Posch et al., 2025).

Как известно, OB-ассоциации склонны к расширению, которое возникает после взрывов наиболее массивных звезд в качестве сверхновых и выметания большого количества газа за пределы ассоциации. Количественное подтверждение такого эффекта при анализе различных OB-ассоциаций обнаружено в работах Mel'nik and Dambis (2017, 2018), Wright (2020), Bobylev and Bajkova (2023, 2024), Armstrong et al. (2025). Наиболее известной является оценка плоского коэффициента расширения  $K_{xy} = 50 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ , найденная Vlaauw (1964) из анализа кинематики OB-ассоциации Скорпиона—Центавра. Однако такие оценки обычно основаны на изучении либо расширения вдоль одного направления, либо расширения в какой-либо плоскости. Уникальность ассоциации TW Нуа состоит в том, что у нее было зафиксировано объемное расширение с коэффициентом  $K_{xyz} = 102 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$  (Luhman, 2023).

В работе Luhman (2023) был выполнен сбор и анализ наземных измерений лучевых скоростей звезд-кандидатов ассоциации TW Нуа. Nagananda et al. (2024) и Olivares et al. (2025) для ряда звезд из списка наиболее вероятных членов ассоциации, составленного Luhman (2023), получили новые измерения лучевых скоростей.

Важнейшее значение коэффициента объемного расширения состоит в том, что он позволяет получить динамическую оценку возраста ассоциации независимо от метода изохрон. В частности, динамический возраст ассоциации TW Нуа составляет около 10 млн лет (например, Bobylev and Bajkova, 2024; Luhman, 2023; Olivares et al., 2025).

Кроме того, особое внимание стоит уделить изучению собственного вращения ассоциации. Во-первых, такое вращение может свидетельствовать о том, указывать на то, что родительское облако сформировалось в турбулентной среде. Во-вторых, необходимо убедиться в том, что различные методы анализа дают непротиворечивые результаты. Поэтому поиск какого-либо собственного вращения ассоциации TW Нуа является одним из направлений исследования в нашей работе.

Цель настоящей работы — изучение трехмерной кинематики ассоциации TW Нуа с использованием новейших данных о лучевых скоростях ряда членов ассоциации. В работе применяются методы оценки параметров линейной модели Огородникова—Милна, позволяющие включать в выборку как звезды с измеренными собственными движениями и лучевыми скоростями, так и звезды, для которых доступны данные только о собственных движениях.

## 2. МЕТОДЫ

В наших исследованиях мы используем прямоугольную систему координат в центре которой находится Солнце. Ось  $x$  направлена в сторону галактического центра, ось  $y$  — в сторону галактического вращения и ось  $z$  — на северный полюс Галактики. Тогда  $x = r \cos l \cos b$ ,  $y = r \sin l \cos b$  и  $z = r \sin b$ , где  $r = 1/\pi$  — гелиоцентрическое расстояние до звезды в кпк, которое вычисляется через ее тригонометрический параллакс  $\pi$  в мсд.

Из наблюдений известны лучевая скорость звезды  $V_r$  и две проекции ее тангенциальной скорости:  $V_l = 4.74 r \mu_l \cos b$  и  $V_b = 4.74 r \mu_b$ , направленные вдоль галактической долготы  $l$  и широты  $b$  соответственно, выраженные в  $\text{км с}^{-1}$ . Здесь коэффициент 4.74 — отношение числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году. Компоненты собственного движения  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$  выражены в  $\text{мсд год}^{-1}$ .

Через компоненты  $V_r$ ,  $V_l$ ,  $V_b$  вычисляются скорости  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , где скорость  $U$  направлена от Солнца к центру Галактики,  $V$  — в направлении вращения Галактики, а  $W$  — на северный галактический полюс:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b. \end{aligned} \quad (1)$$

Таким образом, скорости  $U, V, W$  направлены вдоль соответствующих координатных осей  $x, y, z$ .

### 2.1. Линейная модель Огородникова—Милна

В линейной модели Огородникова—Милна (Ogorodnikov, 1965) наблюдаемая скорость звезды  $\mathbf{V}(r)$ , имеющая гелиоцентрический радиус-вектор  $\mathbf{r}$ , с точностью до членов первого порядка малости  $r/R_0 \ll 1$  описывается уравнением в векторной форме:

$$\mathbf{V}(r) = \mathbf{V}_\odot + M\mathbf{r} + \mathbf{V}', \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}_\odot(X_\odot, Y_\odot, Z_\odot)$  — пекулярная скорость Солнца относительно рассматриваемых звезд;  $\mathbf{V}'$  — остаточная скорость звезды;  $M$  — матрица смещений, компонентами которой являются частные производные скорости  $\mathbf{u}(u_1, u_2, u_3)$  по расстоянию  $\mathbf{r}(r_1, r_2, r_3)$ . Здесь  $\mathbf{u} = \mathbf{V}(R) - \mathbf{V}(R_0)$ , а  $R$  и  $R_0$  — галактоцентрические расстояния звезды и Солнца (точнее расстояния от Солнца до оси вращения Галактики) соответственно. Тогда элементы матрицы смещений определяются как

$$M_{pq} = \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} \right)_0, \quad p, q = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где нулевой индекс означает, что производные взяты в точке  $R = R_0$ . Все девять элементов матрицы  $M$  определяются с помощью трех компонент наблюдаемых скоростей — лучевых скоростей  $V_r$  и компонент  $V_l, V_b$ , рассчитанных на основе собственных движений звезд:

$$\begin{aligned}
V_r &= -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l \\
&- W_\odot \sin b + \cos^2 b \cos^2 l M_{11} \\
&+ r[\cos^2 b \cos l \sin l M_{12} + \cos b \sin b \cos l M_{13} \\
&+ \cos^2 b \sin l \cos l M_{21} + \cos^2 b \sin^2 l M_{22} \\
&+ \cos b \sin b \sin l M_{23} + \sin b \cos b \cos l M_{31} \\
&+ \cos b \sin b \sin l M_{32} + \sin^2 b M_{33}], \\
V_l &= U_\odot \sin l - V_\odot \cos l \\
&- \cos b \cos l \sin l M_{11} + r[-\cos b \sin^2 l M_{12} \\
&- \sin b \sin l M_{13} + \cos b \cos^2 l M_{21} \\
&+ \cos b \sin l \cos l M_{22} + \sin b \cos l M_{23}], \\
V_b &= U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b \\
&- W_\odot \cos b - \sin b \cos b \cos^2 l M_{11} \\
&+ r[-\sin b \cos b \sin l \cos l M_{12} - \sin^2 b \cos l M_{13} \\
&- \sin b \cos b \sin l \cos l M_{21} \\
&- \sin b \cos b \sin^2 l M_{22} \\
&- \sin^2 b \sin l M_{23} + \cos^2 b \cos l M_{31} \\
&+ \cos^2 b \sin l M_{32} + \sin b \cos b M_{33}].
\end{aligned} \tag{4}$$

Матрицу  $M$  можно разделить на симметричную  $M^+$  (тензор локальной деформации) и антисимметричную  $M^-$  (тензор вращения) части:

$$\begin{aligned}
M_{pq}^+ &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} + \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_0, \\
M_{pq}^- &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r_q} - \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_0.
\end{aligned} \tag{5}$$

Величины  $M_{32}^-, M_{13}^-, M_{21}^-$  являются компонентами вектора твердотельного вращения малой около-солнечной окрестности вокруг осей  $x, y, z$  соответственно. В согласии с выбранной нами прямоугольной системой координат положительными вращениями считаются вращения от оси 1 к 2 ( $\omega_z$ ), от оси 2 к 3 ( $\omega_x$ ), от оси 3 к 1 ( $\omega_y$ ):

$$M^- = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix}.$$

Каждая из величин  $M_{12}^+, M_{13}^+, M_{23}^+$  описывает деформацию в соответствующей плоскости. Диа-

гональные компоненты тензора локальной деформации  $M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$  (а также внедиагональные компоненты матрицы  $M$ :  $M_{12}, M_{13}, M_{23}$ ) описывают общее локальное сжатие или расширение всей звездной системы. В систему условных уравнений (4) входят двенадцать искоемых неизвестных, которые можно найти методом наименьших квадратов (МНК).

## 2.2. Графический способ

Все девять элементов матрицы смещений  $M$  можно определить и графическим способом. Для этого необходимо найти линейную зависимость вида

$$v = M_{pq} x + b, \text{ где } p, q = 1, 2, 3,$$

например, методом наименьших квадратов. Чтобы применить этот метод, потребуются пространственные скорости звезд:  $U, V, W$ . Согласно соотношениям (1), при их вычислении необходимо совместное использование тригонометрических параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей звезд.

Именно графическим способом Luhman (2023) оценил коэффициент объемного расширения ассоциации ТWА Нуа:

$$\begin{aligned}
K_{xyz} &= (\partial U/\partial x + \partial V/\partial y + \partial W/\partial z)/3 \\
&= 102 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.
\end{aligned}$$

При этом значения всех трех градиентов оказались значимо отличающимися от нуля. В работе Bobulev and Vajkova (2024) полученное значение  $K_{xyz}$  было подтверждено с помощью того же графического метода — используя практически те же данные, авторы нашли  $K_{xyz} = 103 \pm 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ .

Оценка значений элементов матрицы смещений  $M$  путем решения системы кинематических уравнений вида (4) представляет интерес для сравнения результатов, полученных различными методами. В этом случае все девять элементов матрицы  $M$  определяются одновременно в результате совместного решения.

## 3. ДАННЫЕ

В настоящей работе используется список членов ассоциации ТW Нуа, составленный Luhman (2023). В этом списке содержится 67 наиболее вероятных членов ассоциации, которые являются членами 55 двойных или кратных систем. Не для всех звезд имеются измерения лучевых скоростей. Список звезд ассоциации с измеренными лучевыми скоростями мы расширили до 58 путем добавления

данных из работ Nagananda et al. (2024) и Miret-Roig et al. (2025).

Nagananda et al. (2024) уточнили списки звезд-кандидатов в следующих семи молодых звездных ассоциациях: TW Нуа, Tuc-Hog, Argus,  $\beta$  Pic, Carina, Columba и AB Dog. Для семи звезд из списка ассоциации TW Нуа (Luhman, 2023), ранее не имевших измерений лучевых скоростей, авторы привлекли спектроскопические данные, позволившие оценить лучевые скорости с приемлемой точностью (менее  $2 \text{ км с}^{-1}$ ).

В работе Olivares et al. (2025) проведено детальное изучение распределения звезд в ассоциации TW Нуа и обнаружен градиент возрастов. Авторы установили, что ассоциация состоит из двух частей, различающихся по возрасту: одна часть имеет возраст 9 млн лет, другая — 6 млн лет. При этом оценка возрастов была выполнена по фотометрическим данным на основе изохронного фитинга. Olivares et al. (2025) динамическим методом подтвердили небольшое различие в возрасте этих группировок. Кроме того, авторы показали эволюционную связь ассоциации TW Нуа с более возрастной группировкой  $\sigma$  Cen, а также с еще более старой ОВ-ассоциацией Скорпиона–Центавра. Для анализируемых звезд авторы собрали из литературы данные о лучевых скоростях; мы использовали их для звезды Gaia DR3 3534414594600352896.

Исходные данные о звездах нашей выборки представлены в таблицах 1 и 2.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

##### 4.1. Результаты применения графического способа

На рис. 1 для 58 звезд ассоциации TW Нуа приведены скорости  $U$ ,  $V$ ,  $W$  в зависимости от соответ-

ствующих координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . По данным каждого из представленных девяти графиков был осуществлен поиск линейной зависимости вида  $v = M_{pq}x + b$ ,  $p, q = 1, 2, 3$  методом наименьших квадратов. При этом в каждом случае отбраковывались большие невязки по критерию  $3\sigma$ . В итоге были найдены следующие параметры:

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= \partial U / \partial x = 112 \pm 8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -14.0 \pm 0.2 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{12} &= \partial U / \partial y = -60 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -15.0 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{13} &= \partial U / \partial z = 165 \pm 31 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -16.8 \pm 0.8 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{21} &= \partial V / \partial x = -49 \pm 20 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -17.8 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{22} &= \partial V / \partial y = 87 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -14.2 \pm 0.9 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{23} &= \partial V / \partial z = -145 \pm 37 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -15.1 \pm 0.8 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{31} &= \partial W / \partial x = 30 \pm 16 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -6.7 \pm 0.4 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{32} &= \partial W / \partial y = -24 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -7.5 \pm 0.9 \text{ км с}^{-1}, \\
 M_{33} &= \partial W / \partial z = 123 \pm 25 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\
 b &= -9.1 \pm 0.6 \text{ км с}^{-1}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

**Таблица 1.** Координаты, параллаксы и собственные движения звезд ассоциации TW Нуа. В столбцах таблицы указаны: (1) — номера звезд по каталогу Gaia DR3, (2) и (3) — экваториальные координаты объектов, (4) — тригонометрические параллаксы, (5) и (6) — собственные движения звезд, взятые из каталога Gaia DR3

Gaia DR3	RA, град.	Dec, град.	$\pi \pm \sigma$ , мсд	$\mu_\alpha \cos \delta \pm \sigma$ , мсд/год	$\mu_\delta \pm \sigma$ , мсд/год
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
3532218595001808768	167.8671	-26.9175	$20.27 \pm 0.08$	$-83.82 \pm 0.07$	$-20.98 \pm 0.07$
5396105586807802880	170.2725	-38.7547	$15.29 \pm 0.02$	$-63.05 \pm 0.03$	$-14.60 \pm 0.02$
5397574190745629312	171.7136	-38.4155	$14.62 \pm 0.02$	$-60.70 \pm 0.03$	$-15.49 \pm 0.02$
5378040370245563008	179.8658	-45.1721	$13.84 \pm 0.09$	$-56.45 \pm 0.07$	$-18.34 \pm 0.07$
3465989374664029184	180.6579	-33.4780	$15.98 \pm 0.03$	$-66.24 \pm 0.03$	$-23.39 \pm 0.02$
6145304323118631680	187.5214	-44.0434	$12.79 \pm 0.02$	$-52.18 \pm 0.01$	$-21.90 \pm 0.01$
6139584010795996160	192.7046	-42.5233	$10.26 \pm 0.04$	$-38.72 \pm 0.04$	$-19.98 \pm 0.03$
5412403269717562240	146.6154	-44.9613	$21.44 \pm 0.03$	$-78.26 \pm 0.03$	$9.26 \pm 0.03$
5460240959047928832	153.0376	-31.4126	$18.79 \pm 0.06$	$-78.51 \pm 0.04$	$-11.59 \pm 0.06$
5460240959050125568	153.0376	-31.4126	$18.79 \pm 0.06$	$-78.51 \pm 0.04$	$-11.59 \pm 0.06$

Таблица 1. (Продолжение)

Gaia DR3	RA, град.	Dec, град.	$\pi \pm \sigma$ , мсд	$\mu_\alpha \cos \delta \pm \sigma$ , мсд/год	$\mu_\delta \pm \sigma$ , мсд/год
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
5414158429569765632	154.8231	-44.6267	14.66 ± 0.02	-57.53 ± 0.02	-0.64 ± 0.02
5416221633076680320	156.3369	-42.6983	11.30 ± 0.02	-44.50 ± 0.01	-1.82 ± 0.02
5467714064704570112	157.1905	-28.5105	16.35 ± 0.04	-65.37 ± 0.04	-12.56 ± 0.04
5444751795151480320	160.6248	-33.6713	29.33 ± 0.03	-118.75 ± 0.02	-19.65 ± 0.03
5470330146463996032	162.3282	-25.1566	9.50 ± 0.04	-39.56 ± 0.04	-8.38 ± 0.04
3536988276442796800	164.7101	-23.7725	22.83 ± 0.03	-95.38 ± 0.03	-22.96 ± 0.03
5401795662560500352	165.4659	-34.7048	16.63 ± 0.01	-68.31 ± 0.01	-13.90 ± 0.01
5401822669314874240	165.5406	-34.5099	16.88 ± 0.13	-69.49 ± 0.12	-14.52 ± 0.11
3532027383058513664	167.1829	-28.0808	18.31 ± 0.08	-69.21 ± 0.06	-22.18 ± 0.07
5452498541764280832	167.3070	-30.0278	21.77 ± 0.20	-85.80 ± 0.20	-15.90 ± 0.20
5396978667757576064	167.6157	-37.5311	26.99 ± 0.04	-115.52 ± 0.04	-16.89 ± 0.04
5396978667759696000	167.6157	-37.5311	26.99 ± 0.04	-115.52 ± 0.04	-16.89 ± 0.04
5399220743767211776	170.3214	-34.7794	16.71 ± 0.02	-69.10 ± 0.02	-17.96 ± 0.02
5399220743767211264	170.3223	-34.7806	16.71 ± 0.02	-69.07 ± 0.02	-16.77 ± 0.02
3534414590303807232	170.5216	-24.7776	20.06 ± 0.29	-88.29 ± 0.37	-41.11 ± 0.19
5348165127505382400	171.0079	-52.8449	12.38 ± 0.03	-47.85 ± 0.03	-7.82 ± 0.03
5398663566250727680	172.9798	-34.6077	20.13 ± 0.06	-84.79 ± 0.06	-22.54 ± 0.05
5398663566249861120	172.9798	-34.6077	20.13 ± 0.06	-84.79 ± 0.06	-22.54 ± 0.05
3481965995873045888	173.0755	-30.3089	21.42 ± 0.22	-89.41 ± 0.25	-24.55 ± 0.17
3481965141177021568	173.0758	-30.3312	21.09 ± 0.04	-89.13 ± 0.05	-25.22 ± 0.03
3485098646237003136	173.1711	-26.8693	21.63 ± 0.03	-91.04 ± 0.03	-24.16 ± 0.02
3485098646237003392	173.1715	-26.8657	21.76 ± 0.03	-90.61 ± 0.03	-27.38 ± 0.02
3478940625208241920	174.8905	-30.6669	20.45 ± 0.03	-86.42 ± 0.02	-25.83 ± 0.01
3478519134297202560	174.9626	-31.9894	21.41 ± 0.23	-89.83 ± 0.23	-25.34 ± 0.16
3463395519358168064	177.0986	-37.4802	13.14 ± 0.03	-57.04 ± 0.03	-15.89 ± 0.02
3463395523652894336	177.1006	-37.4804	13.07 ± 0.01	-53.01 ± 0.01	-18.33 ± 0.01
3567379121431731328	180.0063	-17.5254	18.85 ± 0.03	-78.94 ± 0.03	-28.16 ± 0.02
3465944500845668224	180.1143	-34.0938	14.13 ± 0.07	-58.14 ± 0.08	-21.02 ± 0.05
3466327989885650176	181.7951	-32.5150	12.24 ± 0.06	-46.67 ± 0.06	-22.43 ± 0.03
3466308095597260032	181.8637	-32.7835	17.60 ± 0.09	-73.62 ± 0.09	-26.57 ± 0.05
3459372646830687104	181.8891	-39.5484	15.46 ± 0.12	-64.04 ± 0.09	-23.68 ± 0.07
3459492631038236416	181.9511	-39.0014	15.23 ± 0.96	-63.58 ± 0.66	-24.47 ± 0.69
6150861598484393856	183.8776	-39.8120	18.66 ± 0.03	-76.85 ± 0.02	-28.19 ± 0.01
6151330196594603648	184.4964	-37.5788	12.90 ± 0.04	-52.62 ± 0.03	-21.80 ± 0.03
6143632653128880896	184.5776	-45.4782	12.32 ± 0.03	-50.41 ± 0.03	-19.23 ± 0.02
6132146982868270976	187.9083	-45.9833	12.47 ± 0.02	-49.68 ± 0.02	-20.95 ± 0.01
6146107993101452160	188.7673	-41.6109	17.40 ± 0.03	-69.52 ± 0.02	-29.56 ± 0.02
6147119548096085376	188.9536	-39.8403	14.04 ± 0.03	-56.71 ± 0.03	-24.86 ± 0.03
6147117722735170176	189.0019	-39.8712	14.15 ± 0.02	-59.06 ± 0.02	-30.03 ± 0.02
6147117727029871360	189.0040	-39.8696	14.13 ± 0.05	-55.65 ± 0.04	-23.88 ± 0.04
6147044433411060224	189.3012	-40.3635	15.72 ± 0.03	-62.89 ± 0.02	-28.17 ± 0.02
6132672029732817024	191.3087	-44.4856	12.15 ± 0.34	-46.15 ± 0.31	-22.52 ± 0.24

Таблица 1. (Продолжение)

Gaia DR3	RA, град.	Dec, град.	$\pi \pm \sigma$ , мсд	$\mu_\alpha \cos \delta \pm \sigma$ , мсд/год	$\mu_\delta \pm \sigma$ , мсд/год
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
6152893526035165312	191.9343	-38.2797	$11.94 \pm 0.35$	$-44.73 \pm 0.34$	$-21.56 \pm 0.24$
6183591791897683584	194.7623	-31.7550	$13.55 \pm 0.03$	$-53.18 \pm 0.02$	$-28.65 \pm 0.02$
3468438639892079360	186.7137	-33.2704	$15.54 \pm 0.10$	$-63.04 \pm 0.12$	$-29.31 \pm 0.08$
6132134304124539264	188.7342	-45.6355	$12.74 \pm 0.14$	$-51.24 \pm 0.13$	$-26.76 \pm 0.12$
6132134299824086144	188.7342	-45.6355	$12.74 \pm 0.14$	$-51.24 \pm 0.13$	$-26.76 \pm 0.12$
3534414594600352896	170.5216	-24.7776	$20.06 \pm 0.29$	$-88.29 \pm 0.37$	$-41.11 \pm 0.19$
6179256348830614784	196.5755	-34.4826	$11.82 \pm 0.10$	$-45.35 \pm 0.09$	$-25.63 \pm 0.08$
5457259083514583552	161.4690	-28.3251	$11.96 \pm 0.08$	$-48.89 \pm 0.07$	$-8.55 \pm 0.07$
5401389770971149568	164.3194	-35.2153	$10.60 \pm 0.09$	$-38.57 \pm 0.08$	$-10.76 \pm 0.08$
5399990638128330752	166.6856	-37.2532	$9.80 \pm 0.26$	$-41.30 \pm 0.27$	$-7.76 \pm 0.26$
3493814268751183744	179.2006	-22.4894	$12.75 \pm 0.06$	$-53.14 \pm 0.04$	$-19.88 \pm 0.03$
3459725624422311424	180.9958	-38.3613	$12.17 \pm 0.18$	$-50.24 \pm 0.13$	$-18.67 \pm 0.10$
6145303429765430784	187.5239	-44.0756	$12.82 \pm 0.03$	$-52.01 \pm 0.02$	$-21.73 \pm 0.02$
6133420114251217664	189.2707	-44.3221	$11.14 \pm 0.06$	$-44.41 \pm 0.04$	$-19.22 \pm 0.04$
6114656192408518784	209.4920	-37.9930	$12.54 \pm 0.02$	$-42.59 \pm 0.02$	$-31.55 \pm 0.03$

**Таблица 2.** Лучевые скорости звезд ассоциации TW Нуа. В столбцах таблицы указаны: (1) — номера звезд по каталогу Gaia DR3, (2) и (3) — экваториальные координаты объектов, (4) — лучевые скорости звезд. В столбце (5) введены следующие обозначения литературных источников: [1] — Luhman (2023); [2] — Nagananda et al. (2024); [3] — Miret-Roig et al. (2025)

Gaia DR3	RA, град.	Dec, град.	$V_r \pm \sigma$ , км с <sup>-1</sup>	Ссылка
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
3532218595001808768	167.867062	-26.917533	$11.0 \pm 2.5$	[2]
5396105586807802880	170.272480	-38.754655	$11.6 \pm 1.0$	[2]
5397574190745629312	171.713550	-38.415451	$12.2 \pm 1.0$	[2]
5378040370245563008	179.865771	-45.172094	$11.6 \pm 2.0$	[2]
3465989374664029184	180.657946	-33.477954	$7.5 \pm 2.0$	[2]
6145304323118631680	187.521409	-44.043422	$10.5 \pm 2.0$	[2]
6139584010795996160	192.704566	-42.523281	$11.0 \pm 2.0$	[2]
5412403269717562240	146.615442	-44.961309	$15.69 \pm 1.52$	[1]
5460240959047928832	153.037644	-31.412610	$15.14 \pm 1.66$	[1]
5460240959050125568	153.037644	-31.412610	$14.08 \pm 0.81$	[1]
5414158429569765632	154.823077	-44.626664	$15.84 \pm 1.06$	[1]
5416221633076680320	156.336889	-42.698328	$17.87 \pm 0.11$	[1]
5467714064704570112	157.190500	-28.510480	$12.40 \pm 0.30$	[1]
5444751795151480320	160.624790	-33.671262	$12.45 \pm 0.01$	[1]
5470330146463996032	162.328173	-25.156608	$19.0 \pm 2.0$	[1]
3536988276442796800	164.710121	-23.772498	$8.20 \pm 0.20$	[1]
5401795662560500352	165.465903	-34.704793	$12.50 \pm 0.02$	[1]
5401822669314874240	165.540616	-34.509943	$9.0 \pm 3.0$	[1]
3532027383058513664	167.182943	-28.080752	$9.30 \pm 0.48$	[1]
5452498541764280832	167.307030	-30.027840	$11.10 \pm 0.01$	[1]

Таблица 2. (Продолжение)

Gaia DR3	RA, град.	Dec, град.	$V_r \pm \sigma$ , км с <sup>-1</sup>	Ссылка
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
5396978667757576064	167.615653	-37.531057	9.89 ± 0.62	[1]
5396978667759696000	167.615653	-37.531057	9.52 ± 0.86	[1]
5399220743767211776	170.321373	-34.779386	11.67 ± 0.07	[1]
5399220743767211264	170.322306	-34.780568	12.07 ± 0.04	[1]
3534414590303807232	170.521605	-24.777618	8.70 ± 0.90	[1]
5348165127505382400	171.007879	-52.844865	7.67 ± 4.06	[1]
5398663566250727680	172.979796	-34.607657	13.4 ± 2.0	[1]
5398663566249861120	172.979796	-34.607657	13.43 ± 1.35	[1]
3481965995873045888	173.075452	-30.308899	12.0 ± 3.0	[1]
3481965141177021568	173.075839	-30.331184	12.30 ± 1.50	[1]
3485098646237003136	173.171102	-26.869304	8.61 ± 0.03	[1]
3485098646237003392	173.171490	-26.865667	8.68 ± 0.02	[1]
3478940625208241920	174.890491	-30.666883	5.80 ± 0.70	[1]
3478519134297202560	174.962604	-31.989403	11.6 ± 2.0	[1]
3463395519358168064	177.098576	-37.480215	12.28 ± 0.03	[1]
3463395523652894336	177.100631	-37.480391	11.65 ± 0.02	[1]
3567379121431731328	180.006251	-17.525365	12.29 ± 4.15	[1]
3465944500845668224	180.114282	-34.093756	11.0 ± 2.0	[1]
3466327989885650176	181.795122	-32.515032	10.47 ± 0.41	[1]
3466308095597260032	181.863679	-32.783519	7.71 ± 2.61	[1]
3459372646830687104	181.889079	-39.548443	11.2 ± 2.0	[1]
3459492631038236416	181.951108	-39.001354	20 ± 7	[1]
6150861598484393856	183.877557	-39.811960	6.14 ± 1.68	[1]
6151330196594603648	184.496373	-37.578796	13.72 ± 2.40	[1]
6143632653128880896	184.577591	-45.478248	9.34 ± 3.01	[1]
6132146982868270976	187.908304	-45.983276	8.1 ± 4.0	[1]
6146107993101452160	188.767320	-41.610858	6.31 ± 0.23	[1]
6147119548096085376	188.953587	-39.840268	8.43 ± 1.47	[1]
6147117722735170176	189.001946	-39.871159	8.92 ± 0.06	[1]
6147117727029871360	189.003977	-39.869612	10.95 ± 0.59	[1]
6147044433411060224	189.301235	-40.363514	6.30 ± 0.90	[1]
6132672029732817024	191.308716	-44.485580	8.0 ± 3.0	[1]
6152893526035165312	191.934281	-38.279658	14 ± 6	[1]
6183591791897683584	194.762347	-31.755036	3.79 ± 3.82	[1]
3468438639892079360	186.713655	-33.270355	7.15 ± 0.26	[1]
6132134304124539264	188.734159	-45.635501	7.07 ± 3.21	[1]
6132134299824086144	188.734159	-45.635501	9.27 ± 0.38	[1]
3534414594600352896	170.521605	-24.777618	5.70 ± 0.10	[3]

В шести случаях  $M_{\text{рқ}}$  значительно отличаются от нуля. Такие зависимости показаны на соответствующих панелях рис. 1. Наиболее интересными являются три градиента, которые в линейной

модели Огородникова—Милна (Ogorodnikov, 1965; Bobylev and Vajkova, 2023) являются диагональными членами матрицы деформаций и описывают эффекты расширения звездной системы. На рис. 1

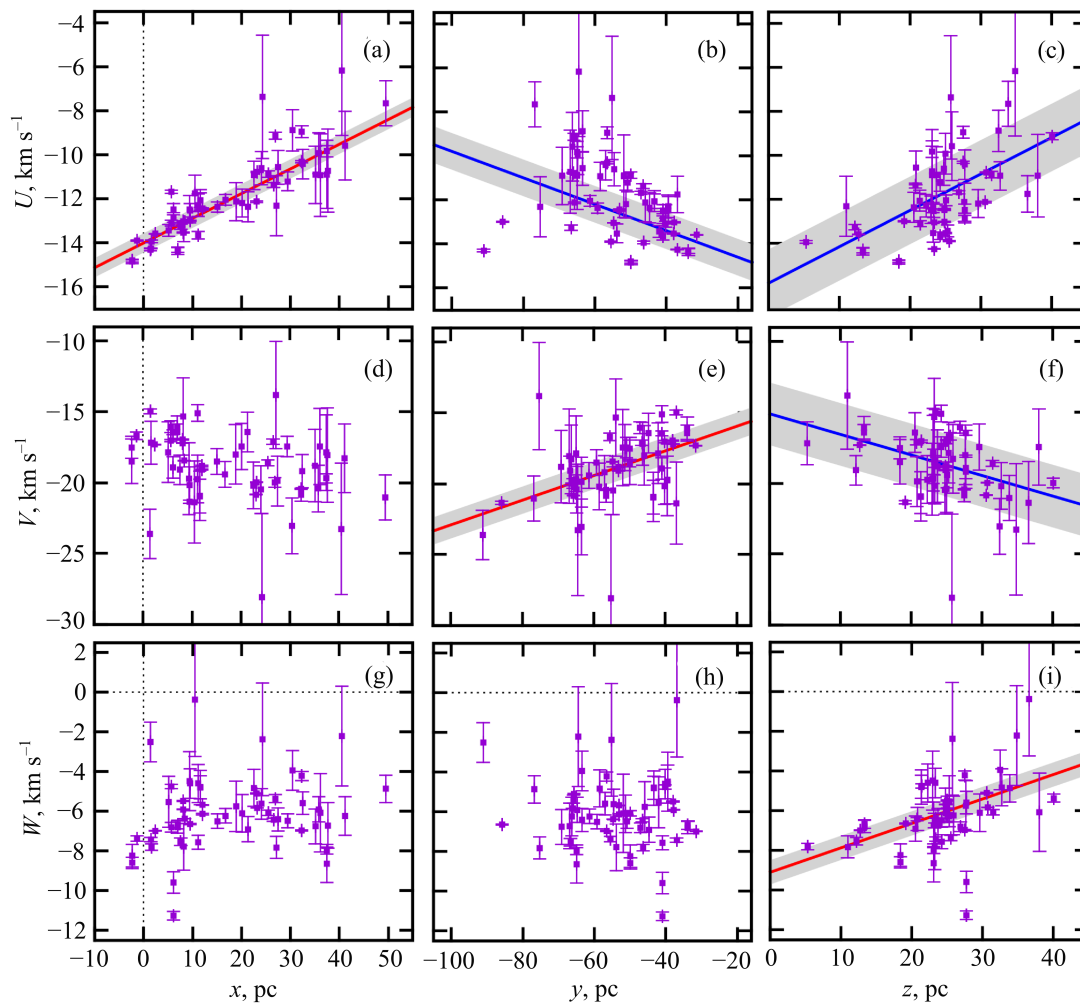


Рис. 1. Зависимости скоростей  $U$ ,  $V$ ,  $W$  от координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

соответствующие зависимости обозначены красными линиями. Оценим значение коэффициента объемного расширения ассоциации TW Нуа:

$$K_{xyz} = 107 \pm 10 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}. \quad (7)$$

А также найдем промежуток времени, прошедший от начала расширения звездной системы до настоящего момента:  $t = 977.5/K_{xyz} = 9.1 \pm 1.1$  млн лет.

На основе найденных значений (6) с использованием соотношений (5) получаем следующие значения трех угловых скоростей вращения:

$$\begin{aligned} \omega_x &= M_{32}^- = 61 \pm 18 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_y &= M_{13}^- = 68 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_z &= M_{21}^- = 6 \pm 13 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4.2. Применение модели Огородникова–Милна

Система условных уравнений вида (4) была решена методом наименьших квадратов для трех

случаев. В первом случае были использованы 58 звезд, для которых имеется полная информация — лучевая скорость и два компонента собственного движения. Во втором случае использовались все 67 звезд нашего списка, все 58 звезд с измеренными лучевыми скоростями, а каждая звезда без измеренных лучевых скоростей давала только два уравнения  $V_l$  и  $V_b$ . Наконец, в третьем случае были использованы все 67 звезд, но для звезд с ошибками лучевых скоростей более  $3 \text{ км с}^{-1}$  использовались только их компоненты  $V_l$  и  $V_b$ . Результаты отражены в таблице 3, где  $N_{\text{equat}}$  — количество использованных уравнений в решаемой системе вида (4), а  $\sigma_0$  — ошибка единицы веса, получаемая при МНК-решении.

Отметим, что как в первом, так и во втором случае звезда Gaia DR3 3459492631038236416 отбрасывалась по критерию  $3\sigma$ . В третьем случае вклад ее лучевой скорости автоматически не учитывался, так как ошибка измерения здесь очень велика —  $7 \text{ км с}^{-1}$ .

Таблица 3. Значения параметров модели Огородникова–Милна

Параметры	58 звезд	67 звезд	67 звезд
(1)	(2)	(3)	(4)
$N_{\text{equat}}$	173	191	181
$\sigma_0$ , км с <sup>-1</sup>	1.32	1.27	1.04
$U_{\odot}$ , км с <sup>-1</sup>	14.63 ± 0.87	14.61 ± 0.72	14.67 ± 0.59
$V_{\odot}$ , км с <sup>-1</sup>	13.27 ± 0.88	13.36 ± 0.82	13.06 ± 0.67
$W_{\odot}$ , км с <sup>-1</sup>	8.48 ± 0.87	8.68 ± 0.74	8.87 ± 0.62
$M_{11}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	116 ± 16	115 ± 13	125 ± 11
$M_{12}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	9 ± 16	7 ± 13	-5 ± 11
$M_{13}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	44 ± 26	41 ± 22	13 ± 19
$M_{21}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	-6 ± 16	-6 ± 15	-22 ± 13
$M_{22}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	49 ± 16	50 ± 15	89 ± 14
$M_{23}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	-108 ± 26	-102 ± 24	-26 ± 23
$M_{31}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	11 ± 16	10 ± 13	17 ± 11
$M_{32}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	16 ± 17	15 ± 14	-1 ± 11
$M_{33}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	119 ± 26	127 ± 23	95 ± 20
$K_{xyz}$ , км с <sup>-1</sup> кпк <sup>-1</sup>	95 ± 12	97 ± 10	103 ± 9

По данным из второй колонки таблицы 3 получаем следующие оценки трех угловых скоростей вращения:

$$\begin{aligned} \omega_x &= 58 \pm 14 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_y &= 16 \pm 13 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_z &= -7 \pm 10 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из сравнения результатов анализа кинематики звезд ассоциации TW Нуа, найденных двумя методами, видно, что подтверждается наличие объемного расширения этой ассоциации. Помимо этого, здесь имеется значимо отличающееся от нуля собственное вращение ассоциации вокруг галактической оси  $x$  с угловой скоростью  $\Omega_x = 58 \pm 14 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ , что согласуется с результатом (8), полученным графическим способом.

Наши оценки компонент групповой скорости  $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$  близки к принятым в настоящее время значениям пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя:  $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.1, 12.2, 7.3) \text{ км с}^{-1}$  (Schönrich et al., 2010). Подобное совпадение выглядит удивительным для столь близкой звездной группировки. Оно свидетельствует о том, что среднее движение ассоциации не подвержено каким-либо значительным возмущениям.

Все параметры, полученные путем исключения лучевых скоростей с большими ошибками измере-

ния (см. четвертую колонку таблицы 3), определяются с наименьшими (по сравнению с остальными решениями) ошибками. Здесь значение коэффициента расширения  $K_{xyz} = 103 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ . В этом случае динамическая оценка возраста ассоциации составляет  $t = 9.7 \pm 0.8$  млн лет.

Значения  $K_{xyz}$  и  $t$ , найденные в настоящей работе, хорошо согласуются с данными, приведенными в исследованиях Luhman (2023), Bobylev and Vajkova (2024). Они также соответствуют оценкам Olivares et al. (2025), хотя авторы этой работы применили динамический метод уже к двум группировкам ассоциации TW Нуа (А и В) и получили для них  $t = 10.2 \pm 1.0$  млн лет и  $t = 8.5 \pm 1.3$  млн лет соответственно.

Отметим, что все три диагональных члена матрицы смещений значимо отличаются от нуля. Поэтому в каждой из трех плоскостей имеется плоский эффект расширения со следующими коэффициентами:

$$\begin{aligned} K_{xy} &= 107 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ K_{yz} &= 92 \pm 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ K_{xz} &= 110 \pm 11 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}. \end{aligned}$$

Как видно из последней колонки таблицы 3, значение ошибки единицы веса  $\sigma_0$  (является средним из суммы квадратов невязок) близко к  $1 \text{ км с}^{-1}$ . Фактически эта величина характеризует внутреннюю дисперсию скоростей в ассоциации TW Нуа.

Можно отметить хорошее согласие этой величины с оценкой  $0.8^{+0.3}_{-0.2}$  км с<sup>-1</sup>, полученной в работе Матажек (2005).

С использованием значений параметров из последней колонки таблицы 3 находим:

$$\begin{aligned}\omega_x &= 13 \pm 13 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_y &= -2 \pm 11 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_z &= -9 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},\end{aligned}\quad (10)$$

что указывает на отсутствие какого-либо значимого собственного вращения ассоциации ТУ Нуа вокруг какой-либо оси.

Было решено повторно применить графический способ к выборке звезд с ошибками лучевых скоростей менее 3 км с<sup>-1</sup>. Таких оказалось 47 звезд. Как и прежде, использовалось условие отбраковки больших невязок по критерию  $3\sigma$ . Однако в данном случае по этому критерию ничего отброшено не было. В итоге были найдены следующие параметры (без постоянного члена, значения которого здесь не представляют интереса):

$$\begin{aligned}M_{11} &= 128 \pm 8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{12} &= -55 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{13} &= 173 \pm 31 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \\ M_{21} &= -84 \pm 19 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{22} &= 106 \pm 16 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{23} &= -128 \pm 34 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \\ M_{31} &= 40 \pm 15 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{32} &= -28 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ M_{33} &= 98 \pm 22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.\end{aligned}\quad (11)$$

По этим данным находим оценки трех угловых скоростей вращения:

$$\begin{aligned}\omega_x &= 50 \pm 19 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_y &= 66 \pm 17 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_z &= -15 \pm 13 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},\end{aligned}\quad (12)$$

значения которых близки к тем, что получены этим методом в решении (8).

Значения  $\omega_z$ , найденные соответственно при решениях уравнений (8), в (9), (10) и (12) —  $6 \pm 13$ ,  $-7 \pm 10$ ,  $-9 \pm 9$  и  $-15 \pm 13$  км с<sup>-1</sup> кпк<sup>-1</sup> — согласуются между собой и свидетельствуют об

отсутствии значимо отличающегося от нуля вращения вокруг оси  $z$ .

Отметим, что в рассматриваемой околосолнечной окрестности случайные ошибки каждой из компонент,  $V_l$  и  $V_b$ , существенно меньше по сравнению с ошибками лучевых скоростей  $V_r$ . Так, вычисленные с использованием 67 звезд средние ошибки  $V_l$  и  $V_b$  составляют 0.1 и 0.07 км с<sup>-1</sup> соответственно, а средняя ошибка  $V_r$  равна 1.35 км с<sup>-1</sup>. Даже при использовании лучевых скоростей с ошибками менее 3 км с<sup>-1</sup> средняя ошибка  $V_r$  составляет 0.93 км с<sup>-1</sup>. Поэтому для оценки трех компонент вектора твердотельного вращения были использованы уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned}V_l &= U_\odot \sin l - V_\odot \cos l \\ &\quad + r(-\cos l \sin b \omega_x - \sin l \sin b \omega_y + \cos b \omega_z), \\ V_b &= U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b \\ &\quad - W_\odot \cos b + r(\sin l \omega_x + \cos l \omega_y),\end{aligned}\quad (13)$$

содержащие только шесть неизвестных — три линейные скорости группового движения ( $U_\odot, V_\odot, W_\odot$ ) и три угловые скорости твердотельного вращения ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ).

В результате МНК-решения системы условных уравнений вида (13) были найдены компоненты групповой скорости этой звездной системы,  $(U, V, W)_\odot = (14.66, 12.98, 8.45) \pm (0.28, 0.38, 0.34)$  км с<sup>-1</sup>, а также следующие компоненты вектора вращения:

$$\begin{aligned}\omega_x &= 5 \pm 5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_y &= 7 \pm 5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \omega_z &= 11 \pm 5 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.\end{aligned}\quad (14)$$

Все три компоненты вектора вращения (14) определены с существенно меньшими ошибками по сравнению с решением (10). Полученные данные подтверждают вывод, ранее сделанный на основе анализа результатов решения основных кинематических уравнений, об отсутствии значимого собственного вращения ассоциации ТУ Нуа вокруг какой-либо из осей.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен полноценный трехмерный кинематический анализ молодой звездной ассоциации ТУ Нуа. Выборка сформирована из наиболее вероятных членов этой ассоциации согласно списку из работы Luhman (2023). Она состоит из 67 звезд с тригонометрическими параллаксами, собственными движениями из каталога Gaia DR3, а также лучевыми скоростями, собранными по литературным источникам. При этом значения лучевых

скоростей известны только для 58 звезд. Luhman (2023) собрал измерения лучевых скоростей для 53 звезд. В настоящей работе список звезд ассоциации с измеренными лучевыми скоростями был расширен до 58 путем добавления измерений из работ Nagananda et al. (2024), а также Olivares et al. (2025).

Задачей изучения кинематики звезд ассоциации TW Нуа являлась оценка значений девяти членов матрицы смещений в линейной модели Огородникова–Милна. Такая задача была решена двумя способами — графическим и путем совместного решения основных кинематических уравнений. При этом был найден ряд отличий, но в большинстве случаев наблюдалось хорошее согласие в оценках модельных параметров.

Результаты, полученные двумя методами, позволили прийти к заключению о том, что коэффициент объемного расширения ассоциации TW Нуа уверенно определяется с использованием любого из них. С наименьшей ошибкой он найден из решения системы кинематических уравнений с использованием лучевых скоростей звезд, измеренных с ошибками менее  $3 \text{ км с}^{-1}$ . В этом случае значение коэффициента  $K_{xyz}$  составляет  $103 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ . Полученная на его основе динамическая оценка возраста ассоциации равна  $9.7 \pm 0.8$  млн лет. В каждой плоскости имеется плоский эффект расширения со значениями, свидетельствующими о расширении ассоциации, близком к изотропному.

Таким образом, использование в работе ряда дополнительных измерений лучевых скоростей звезд позволило получить новые оценки коэффициента  $K_{xyz}$ : графическим методом —  $K_{xyz} = 107 \pm 10 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$  ( $t = 9.1 \pm 1.1$  млн лет); еще точнее — из решения кинематических уравнений —  $K_{xyz} = 103 \pm 9 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$  ( $t = 9.7 \pm 0.8$  млн лет). Полученные значения имеют меньшие ошибки по сравнению с результатами работы Bobylev and Bajkova (2024):  $K_{xyz} = 103 \pm 12 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$  ( $t = 9.5 \pm 1.1$  млн лет). При этом основной интерес в настоящей работе связан с оценкой параметров вращения ассоциации.

Имеется полное согласие методов в вопросе об отсутствии собственного вращения ассоциации TW Нуа вокруг галактической оси  $z$ . На основе графического метода мы впервые обнаружили значимо отличающиеся от нуля параметры, описывающие эффекты твердотельного вращения  $\omega$  ассоциации TW Нуа вокруг галактических осей  $x$  и  $y$ . Конкретные значения этих скоростей составляют  $50\text{--}70 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ , а ошибки их определения —  $14\text{--}19 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ . Однако эти величины не подтверждаются другим методом. На-

пример, при решении кинематических уравнений вида (13) все три найденные компоненты твердотельного вращения не отличаются значимо от нуля:  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (4, 7, 11) \pm (5, 5, 5) \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ . Возможно, для применения графического метода при анализе кинематики ассоциации TW Нуа требуются еще более точные лучевые скорости звезд, от которых главным образом зависит точность пространственных скоростей  $U, V, W$ .

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет бюджета организации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. J. Armstrong, J. C. Tan, N. J. Wright, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **543** (3), 2349 (2025). DOI:10.1093/mnras/staf1490
2. A. Blaauw, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **2**, 213 (1964). DOI:10.1146/annurev.aa.02.090164.001241
3. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astronomy Letters* **49** (7), 410 (2023). DOI:10.1134/S1063773723070010
4. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astrophysical Bulletin* **79** (3), 473 (2024). DOI:10.1134/S1990341324600443
5. R. de la Reza, E. Jilinski, and V. G. Ortega, *Astron. J.* **131** (5), 2609 (2006). DOI:10.1086/501525
6. R. de la Reza, C. A. O. Torres, G. Quast, et al., *Astrophys. J.* **343**, L61 (1989). DOI:10.1086/185511
7. J. K. Donaldson, A. J. Weinberger, J. Gagné, et al., *Astrophys. J.* **833** (1), article id. 95 (2016). DOI:10.3847/1538-4357/833/1/95
8. C. Ducourant, R. Teixeira, P. A. B. Galli, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, id. A121 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201322075
9. J. Gagné, O. Roy-Loubier, J. K. Faherty, et al., *Astrophys. J.* **860** (1), article id. 43 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aac2b8
10. J. Gregorio-Hetem, J. R. D. Lepine, G. R. Quast, et al., *Astron. J.* **103**, 549 (1992). DOI:10.1086/116082
11. K. L. Luhman, *Astron. J.* **165** (6), id. 269 (2023). DOI:10.3847/1538-3881/accf19

12. V. V. Makarov and C. Fabricius, *Astron. and Astrophys.* **368**, 866 (2001). DOI:10.1051/0004-6361:20010084
13. E. E. Mamajek, *Astron. and Astrophys. J.* **634** (2), 1385 (2005). DOI:10.1086/468181
14. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **472** (4), 3887 (2017). DOI:10.1093/mnras/stx2225
15. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, *Astronomy Reports* **62** (12), 998 (2018). DOI:10.1134/S1063772918120089
16. N. Miret-Roig, J. Alves, S. Ratzenböck, et al., *Astron. and Astrophys.* **694**, id. A60 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202452558
17. N. Nagananda, L. Vican, B. Zuckerman, et al., *Open Journal of Astrophysics* **7**, id. 80 (2024). DOI:10.33232/001c.123873
18. K. F. Ogorodnikov, *Dynamics of Stellar Systems* (Pergamon, Oxford, 1965).
19. J. Olivares, N. Miret-Roig, P. A. B. Galli, and H. Bouy, *Astron. and Astrophys.* **699**, id. A122 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202554754
20. L. Posch, J. Alves, N. Miret-Roig, et al., *Astron. and Astrophys.* **693**, id. A175 (2025). DOI:10.1051/0004-6361/202451312
21. T. Preibisch and H. Zinnecker, *Astron. J.* **117** (5), 2381 (1999). DOI:10.1086/300842
22. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403** (4), 1829 (2010). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.16253.x
23. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
24. N. J. Wright, *New Astronomy Reviews* **90**, article id. 101549 (2020). DOI:10.1016/j.newar.2020.101549
25. B. Zuckerman and E. E. Becklin, *Astron. J.* **406**, L25 (1993). DOI:10.1086/186778

## Kinematic Properties of the TW Hya Association

V. V. Bobylev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

A kinematic analysis of the young stellar association TW Hya has been performed. The components of the displacement matrix in the Ogorodnikov–Milne linear model have been estimated both graphically and by solving the basic kinematic equations. The association's volume expansion with the coefficient  $K_{xyz} = 103 \pm 9 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  was confirmed, which yields a dynamical age estimate of  $t = 9.7 \pm 0.8 \text{ Myr}$ . Using the graphical method, estimates of the association proper rigid-body rotation parameters  $\omega$  around the galactic axes  $x$  and  $y$  have been obtained for the first time, with velocity values in the range of  $50\text{--}70 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  and errors in their determination of  $14\text{--}19 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ . However, these values are not confirmed by another method. For example, when solving kinematic equations using only proper motions, all three components of the rigid body rotation do not differ significantly from zero,  $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (4, 7, 11) \pm (5, 5, 5) \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ .

Keywords: *Galaxy: open clusters and associations: general; (Galaxy:) open clusters and associations: individual: TW Hya; Galaxy: kinematics and dynamics*