

## КИНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ RAVE5, UCAC4, PRMXL И GAIA TGAS

В.В.ВИТЯЗЕВ<sup>1</sup>, А.С.ЦВЕТКОВ<sup>1</sup>, В.В.БОБЫЛЕВ<sup>2</sup>, А.Т.БАЙКОВА<sup>2</sup>

Поступила 14 мая 2017

Принята к печати 3 октября 2017

Рассмотрены пространственные скорости звезд с высокоточными положениями, собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia TGAS и лучевыми скоростями из каталога RAVE5. По выборке из 92395 звезд с оценками возраста найлены следующие кинематические параметры:  $(U, V, W) = (9.42, 20.34, 7.21) \pm (0.12, 0.10, 0.09)$  км/с,  $\Omega = 26.29 \pm 0.39$  км/с/кпк и  $\Omega' = -3.89 \pm 0.08$  км/с/кпк<sup>2</sup>, где  $V_0 = 210 \pm 6$  км/с (для принятого  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк), а также постоянные Оорта  $A = 15.57 \pm 0.31$  км/с/кпк и  $B = -10.72 \pm 0.50$  км/с/кпк. Показано, что значения параметров  $\Omega$  и  $\Omega'$  имеют хорошую устойчивость в зависимости от возраста звезд. Произведен сравнительный анализ параметров модели Боттингера, полученных отдельно по лучевым скоростям каталога RAVE5 и по собственным движениям звезд каталогов Gaia TGAS, UCAC4 и PRMXL. Показано, что эти параметры хорошо согласуются между собой при их определении как по собственным движениям звезд наземных каталогов, так и по данным каталога Gaia TGAS, полученных с помощью измерения, выполненных в космосе с помощью аппарата HIPPARCOS и Gaia. В то же самое время было установлено, что значения параметров модели Боттингера, вычисленные с помощью лучевых скоростей, могут отличаться от соответствующих параметров, полученных по собственным движениям звезд. Предложена редукция лучевых скоростей звезд каталога RAVE5, устраняющая эти отличия.

Ключевые слова: *лучевые скорости звезд; собственные движения; RAVE5; Gaia DR1; кинематика Галактики*

1. *Введение.* В преддверии завершения полной научной программы космической миссии Gaia [1] успешно развивается проект RAVE (Radial Velocity Experiment, [2]), посвященный массовому определению лучевых скоростей слабых звезд. Наблюдения в южном полушарии на 1.2-м телескопе системы Шмидта Англо-Австралийской обсерватории стартовали в 2003г. С тех пор были опубликованы пять выпусков этого каталога. Средняя ошибка определения лучевой скорости составляет около 3 км/с. Сочетание высокоточных собственных движений и тригонометрических параллаксов звезд проекта Gaia с лучевыми скоростями звезд проекта RAVE позволит анализировать трехмерные движения звезд в Галактике.

На базе данных RAVE1 [2], RAVE2 [3] и RAVE3 [4] получен ряд важных звездно-астрономических результатов. Например, осуществлен поиск новых звездных потоков и группировок [5-7], уточнены характеристики эллипсоида скоростей различных выборок звезд из окрестности Солнца [8,9],

получено новое значение пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя [10], уточнены кинематические характеристики звезд тонкого и толстого дисков [11,12], изучены свойства спиральной волны плотности в области Солнца [13], уточнены параметры асимметричного дрейфа [14]. Для этого привлекались различные каталоги собственных движений звезд, использовались оценки их возраста, полученные различными способами по спектральным данным программы RAVE [15-18].

Каталог RAVE4 [19] уже является обширной базой данных, в которую помимо измеренных лучевых скоростей звезд включены собственные движения звезд из нескольких каталогов: инфракрасная фотометрия в нескольких полосах, фотометрические расстояния, возрасты, эффективные температуры, значения ускорения силы тяжести и некоторые другие оценки. Каталог RAVE4 был использован в работе [20] для переопределения средних лучевых скоростей большой выборки рассеянных скоплений звезд. По данным этого каталога было оценено новое значение скорости убегания звезд из Галактики [21], а также новое значение вириальной массы Галактики. В работе [22] были получены новые оценки параметров вращения Галактики. Для этого были использованы лучевые скорости RAVE4 в сочетании с собственными движениями и фотометрическими расстояниями из каталога UCAC4 [23]. Было показано, что по звездам из околосолнечной окрестности радиусом 3 кпк неплохо определяются значения пекулярной скорости Солнца  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , значение угловой скорости вращения Галактики  $\Omega$  и ее первая производная  $\Omega'$ , при этом вторая производная  $\Omega''$  уже определяется плохо. Каталог RAVE5 [24] содержит данные уже о 457588 звездах. Наиболее интересным в этой версии является наличие более 200000 звезд, общих с каталогом Gaia, для которых имеются не только высокоточные собственные движения, но и тригонометрические параллаксы.

С опубликованием в 2016г. первых результатов космического эксперимента Gaia появились новые возможности для изучения структуры и кинематики Галактики. Собственные движения звезд были получены из сравнения положений, полученных спутником Gaia в качестве вторых эпох и положений этих звезд, измеренных в эксперименте Tycho [25] в качестве первых эпох, при этом средняя разность эпох составила около 26 лет. Эта версия каталога обозначается как TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution [26,27]), и содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 2 млн звезд. Наибольшую ценность представляют собственные движения звезд Gaia DR1. Примерно для 90000 звезд, общих с каталогом HIPPARCOS, средняя случайная ошибка их собственных движений составляет около 0.06 миллисекунд дуги в год (мсд/год), для остальных звезд эта ошибка составляет около 1мсд/год [26]. Результаты измерения лучевых скоростей будут публиковаться позже,

при этом они будут иметь низкую точность, ожидаемая средняя случайная ошибка составит около 15 км/с.

Отметим некоторые важные кинематические результаты, полученные на основе данных каталога Gaia DR1. Новые значения параметров вращения Галактики с использованием собственных движений из каталога Gaia DR1 около 250 классических цефеид из широкой окрестности Солнца (<3-4 кпк) были найдены Бобылевым [28]. В работе [29] для этих же целей использовались примерно 230 OB-звезд с тремя разными шкалами расстояний и собственными движениями из каталога Gaia DR1 (<3-4 кпк). По собственным движениям примерно 300000 близких (<250 пк) звезд Главной последовательности из каталога Gaia DR1 Бови [30] оценил значения постоянных Оорта  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $K$ , описывающих локальную кинематику. Кинематические параметры ряда близких рассеянных скоплений звезд были уточнены с использованием собственных движений звезд из каталога Gaia DR1 в работе [31].

Настоящая статья является продолжением исследований, начатых в работе Бобылева, Байковой [22]. В ней решаются две задачи. Первая из них посвящена уточнению параметров вращения Галактики при совместном использовании лучевых скоростей звезд из каталога RAVE5, собственных движений и параллакс звезд каталога Gaia DR1. Вторая задача, наоборот, преследует цель проведение кинематических исследований поля скоростей звезд на основе отдельных решений основных кинематических уравнений по лучевым скоростям и собственным движениям звезд. Поскольку определение лучевых скоростей и собственных движений звезд выполняется принципиально различными методами, полученные отдельные решения основных кинематических уравнений позволяют исследовать непротиворечивость этих данных друг другу с кинематической точки зрения.

**2. Совместный анализ лучевых скоростей и собственных движений звезд.** Из наблюдений нам известны лучевая скорость  $V_r$  и две проекции 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 км/с. Коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а  $r$  - гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$ , выражены в мсд/год.

Для определения параметров кривой галактического вращения мы используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых произведено разложение угловой скорости  $\Omega$  в ряд по членам второго порядка малости  $r/R_l$ :

$$V_r = -U \cos b \cos l - V \cos b \sin l - W \sin b + \\ + \Omega' R_0 (R - R_0) \sin l \cos b + 0.5 \Omega'' R_0 (R - R_0)^2 \sin l \cos b + Kr \cos^2 b, \quad (1)$$

$$V_l = U \sin l - V \cos l - \Omega r \cos b + \\ + \Omega' (R - R_0) (R_0 \cos l - r \cos b) + 0.5 \Omega'' (R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b), \quad (2)$$

$$V_b = U \cos l \sin b + V \sin l \sin b - W \cos b - \\ - \Omega' R_0 (R - R_0) \sin l \sin b - 0.5 \Omega'' R_0 (R - R_0)^2 \sin l \sin b + Kr \cos b \sin b, \quad (3)$$

где  $R$  - расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2 R_0 r \cos b \cos l + R_0^2, \quad (4)$$

здесь  $\Omega$  является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии  $R_0$ , параметры  $\Omega'$  и  $\Omega''$  - первая и вторая производные угловой скорости,  $V_0 = R_0 \Omega$ ,  $K$  - одна из постоянных Оорта, описывающая эффекты расширения/сжатия звездной системы, еще две постоянные можно найти из следующих выражений:

$$A = -0.5 \Omega' R_0, \quad B = -\Omega + A. \quad (5)$$

В настоящей работе принято значение  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк, которое Валли [32] нашел как наиболее вероятное.

3. *Данные.* Выборка состоит из звезд, для которых имеются оценки тригонометрических параллаксов и собственных движений из каталога Gaia DR1, лучевые скорости RAVE5 и оценки возрастов из версии RAVE4. Методика определения индивидуальных возрастов звезд описана в работах [17,33]. Эти оценки получены путем сравнения с подходящими изохронами на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, как звезд Главной последовательности, так и красных гигантов.

Оказалось, что в каталоге RAVE5 имеется довольно большой процент ( $\approx 10\%$ ) звезд, для которых лучевая скорость измерялась несколько раз. Поэтому мы сформировали выборку, в которой каждая звезда представлена один раз. В том случае, когда звезда имеет несколько измерений лучевой скорости, мы не проводили усреднения, а брали измерение с наименьшей ошибкой определения лучевой скорости. Всего в эту выборку вошли около 200000 звезд.

В каталоге RAVE5 имеются звезды с очень большими значениями  $|V_r| > 600$  км/с. Такие значения обычно получены по спектрам низкого качества, с малым значением отношения сигнал/шум. Поэтому мы не используем звезды с такими скоростями. Не используем и звезды с большими случайными ошибками определения лучевой скорости  $\sigma_{V_r}$ . В итоге, для отбора кандидатов без значительных случайных ошибок наблюдений были взяты звезды,

удовлетворяющие следующим критериям:

$$\begin{aligned} |V_r| < 600 \text{ км/с}, \quad \sigma_1 < 5 \text{ км/с}, \quad |\mu_\alpha \cos \delta| < 400 \text{ мсд/год}, \\ |\mu_\delta| < 400 \text{ мсд/год}, \quad |z| < 0.3 \text{ кпк}, \quad \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} < 300 \text{ км/с}, \end{aligned} \quad (6)$$

где скорости  $U$ ,  $V$ ,  $W$  освобождены от дифференциального вращения Галактики, т.е. являются остаточными, для выполнения этой процедуры подходит любая известная кривая вращения Галактики, например, из работы [29]. Ограничение на значение координаты  $z$  использовано для исключения влияния звезд гало при поиске параметров вращения Галактики.

4. *Результаты и обсуждения.* В случае анализа выборки звезд с оценками возраста системы условных уравнений вида (1)–(3) решалась методом наименьших квадратов с шестью неизвестными  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $\Omega$ ,  $\Omega'$  и  $\Omega''$ , т.е. без  $K$ -члена. Разбивка на площадки равной площади не использовалась, таким образом, каждая звезда давала три уравнения. В табл. 1 даны значения кинематических параметров, найденных по звездам с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR1, указано значение ошибки единицы веса,  $\sigma_0$ , полученное при решении условных уравнений вида (1)–(3) методом мнк. Параметры в этой таблице вычислены при различных значениях относительной ошибки параллакса. Эти результаты представляют большой интерес с той точки зрения, что при малых относительных ошибках определения тригонометрических параллаксов ( $\sigma_\pi/\pi = 10 + 15\%$ ) пренебрежимо мало влияние известного эффекта Лутца-Келкера [34]. При больших значениях

Таблица 1

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОПИСЫВАЮЩИХ ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ, НАЙДЕННЫЕ ПО ЗВЕЗДАМ С СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ И ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАЛЛАКСАМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA TGAS ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ЗНАЧЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОШИБКИ ПАРАЛЛАКСОВ

Параметры	$\sigma_\pi/\pi < 10\%$	$\sigma_\pi/\pi < 15\%$	$\sigma_\pi/\pi < 20\%$	$\sigma_\pi/\pi < 25\%$
$U$ , км/с	$9.10 \pm 0.19$	$9.24 \pm 0.15$	$9.44 \pm 0.13$	$9.49 \pm 0.12$
$V$ , км/с	$20.55 \pm 0.17$	$20.44 \pm 0.13$	$20.40 \pm 0.12$	$20.33 \pm 0.11$
$W$ , км/с	$7.79 \pm 0.13$	$7.68 \pm 0.11$	$7.54 \pm 0.10$	$7.35 \pm 0.09$
$\Omega$ , км/с/кпк	$26.81 \pm 1.53$	$26.67 \pm 0.89$	$25.88 \pm 0.60$	$26.03 \pm 0.46$
$\Omega'$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$-3.76 \pm 0.25$	$-3.90 \pm 0.15$	$-3.81 \pm 0.11$	$-3.87 \pm 0.09$
$\Omega''$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$2.77 \pm 1.84$	$1.09 \pm 0.83$	$0.68 \pm 0.51$	$0.35 \pm 0.35$
$\sigma_0$ , км/с	27.68	27.73	27.70	27.65
$N$ ,	43813	63926	76966	86060
$A$ , км/с/кпк	$15.05 \pm 0.99$	$15.59 \pm 0.61$	$15.23 \pm 0.45$	$15.49 \pm 0.36$
$B$ , км/с/кпк	$-11.76 \pm 1.83$	$-11.08 \pm 1.08$	$-10.65 \pm 0.75$	$-10.55 \pm 0.59$

$\sigma_n/\pi$  необходим учет этого эффекта [35].

Из табл.1 видно, что при использовании различных ограничений на ошибку  $\sigma_n/\pi$  от 10% до 25% имеется хорошее согласие в значениях всех определяемых параметров кроме второй производной угловой скорости вращения  $\Omega'$ , значение которой всегда определяется с большими ошибками.

В табл.2 даны значения кинематических параметров, найденные как с использованием фотометрических расстояний из каталога RAVE5, так и тригонометрических параллаксов из каталога Gaia TGAS. Здесь при использовании фотометрических расстояний применялось ограничение  $\sigma_r/r < 30\%$ , а при использовании тригонометрических параллаксов -  $\sigma_\pi/\pi < 30\%$ . Из таблицы видно, что звезд с фотометрическими расстояниями примерно в 2.5 раза меньше, чем звезд с тригонометрическими параллаксами. С увеличением возраста звезд возрастают дисперсии их скоростей. Мы постарались сделать разбивку на возрастные группы таким образом, чтобы в итоге получить для каждой группы сопоставимые по уровню случайные ошибки определяемых параметров. При этом из табл.2 видно, что самые старые звезды дают наибольшие случайные ошибки, несмотря на их многочисленность. Значения практически всех кинематических параметров, находящихся как в верхней, так и в нижней части таблицы, находятся между собой в хорошем согласии. Кроме того, тригонометрические параллаксы более надежны с идеологической точки зрения. Все сказанное позволяет сделать выбор в пользу применения тригонометрических параллаксов. Отметим результат из нижней части табл.2, полученный с использованием наибольшего количества звезд:

$$(U, V, W) = (9.42, 20.34, 7.21) \pm (0.12, 0.10, 0.09) \text{ км/с},$$

$$\Omega = 26.29 \pm 0.39 \text{ км/с/кпк}, \quad \Omega' = -3.89 \pm 0.08 \text{ км/с/кпк}^2. \quad (7)$$

Здесь значение линейной скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики составляет  $V_0 = 210 \pm 6 \text{ км/с}$  (для  $R_0 = 8.0 \pm 0.2 \text{ кпк}$ ).

Найденные в настоящей работе значения параметров вращения Галактики интересно сравнить, например, с оценками Расторгуева и др. [36], полученными по данным о 136 мазерах с измеренными тригонометрическими параллаксами, покрывающих широкий диапазон расстояний  $R$ : 0-16 кпк. Например, для модели С1 (модель постоянной радиальной дисперсии скоростей), компоненты скорости Солнца составили  $(U, V, W) = (10.98, 19.62, 8.93) \pm (1.40, 1.15, 1.05) \text{ км/с}$ ,  $\Omega = 28.35 \pm 0.45 \text{ км/с/кпк}$ ,  $\Omega' = -3.83 \pm 0.08 \text{ км/с/кпк}^2$  и  $\Omega'' = 1.17 \pm 0.05 \text{ км/с/кпк}^3$ ,  $V_0 = 235 \pm 7 \text{ км/с}$  (для найденного значения  $R_0 = 8.27 \pm 0.13 \text{ кпк}$ ). Ранее из анализа мазеров в работе [37] была получена оценка скорости Солнца  $V_1 = 238 \pm 14 \text{ км/с}$  (при найденном  $R_0 = 8.05 \pm 0.45 \text{ кпк}$ ), а в работе Рида и др. [38] определена скорость  $V_0 = 240 \pm 8 \text{ км/с}$  (при найденном  $R_0 = 8.34 \pm 0.16 \text{ кпк}$ ).

По скоростям 260 цефеид с собственными движениями из каталога Gaia

DR1 в работе [28] были найдены  $(U, V, W) = (7.90, 11.73, 7.39) \pm (0.65, 0.77, 0.62)$  км/с и следующие значения параметров кривой вращения Галактики:  $\Omega = 28.84 \pm 0.33$  км/с/кпк,  $\Omega' = -4.05 \pm 0.10$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega'' = 0.805 \pm 0.067$  км/с/кпк<sup>3</sup> (для  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк),  $V_0 = 231 \pm 6$  км/с,  $A = 16.20 \pm 0.38$  км/с/кпк и  $B = -12.64 \pm 0.51$  км/кпк.

В работе [29] по 238 OB-звездам с собственными движениями из каталога Gaia DR1 были найдены следующие значения:  $(U, V, W) = (8.19, 9.28, 8.79) \pm (0.74, 0.92, 0.74)$  км/с,  $\Omega = 31.53 \pm 0.54$  км/с/кпк,  $\Omega' = -4.44 \pm 0.12$  км/с/кпк<sup>2</sup>,  $\Omega'' = 0.706 \pm 0.100$  км/с/кпк<sup>3</sup>,  $A = 17.77 \pm 0.46$  км/с/кпк и  $B = -13.76 \pm 0.71$  км/с/кпк, а линейная круговая скорость Солнца  $V_0 = 252 \pm 8$  км/с (для принятого значения расстояния  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк).

В работе [22] проанализированы звезды с лучевыми скоростями из каталога RAVE4 и собственными движениями из каталога UCAC4. По выборке

Таблица 2

### ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ОПИСЫВАЮЩИХ ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ

Параметры	Все звезды	$\log t < 9.5$	$\log t 9.5-9.7$	$9.7 < \log t$
$\bar{U}$ , км/с	$9.34 \pm 0.16$	$9.68 \pm 0.27$	$9.63 \pm 0.33$	$8.99 \pm 0.25$
$\bar{V}$ , км/с	$17.81 \pm 0.15$	$14.20 \pm 0.25$	$17.02 \pm 0.29$	$20.26 \pm 0.24$
$\bar{W}$ , км/с	$7.73 \pm 0.13$	$7.42 \pm 0.23$	$7.56 \pm 0.25$	$8.05 \pm 0.22$
$\Omega$ , км/с/кпк	$26.71 \pm 0.48$	$25.07 \pm 0.94$	$26.61 \pm 0.69$	$27.86 \pm 1.16$
$\Omega'$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$-4.09 \pm 0.10$	$-3.37 \pm 0.19$	$-3.95 \pm 0.15$	$-4.28 \pm 0.24$
$\Omega''$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$0.65 \pm 0.26$	$3.00 \pm 0.40$	$-1.80 \pm 0.46$	$0.06 \pm 0.51$
$\sigma_u$ , км/с	25.87	22.92	26.44	27.15
$N$	36858	10256	11125	15477
$A$ , км/с/кпк	$16.38 \pm 0.41$	$13.49 \pm 0.75$	$15.78 \pm 0.58$	$17.13 \pm 0.94$
$B$ , км/с/кпк	$-10.33 \pm 0.63$	$-11.58 \pm 1.20$	$-10.83 \pm 0.90$	$-10.73 \pm 1.50$
$\bar{U}$ , км/с	$9.42 \pm 0.12$	$9.85 \pm 0.21$	$9.88 \pm 0.27$	$9.09 \pm 0.17$
$\bar{V}$ , км/с	$20.34 \pm 0.10$	$14.75 \pm 0.18$	$20.14 \pm 0.21$	$22.66 \pm 0.16$
$\bar{W}$ , км/с	$7.21 \pm 0.09$	$6.85 \pm 0.15$	$6.39 \pm 0.18$	$7.82 \pm 0.14$
$\Omega$ , км/с/кпк	$26.29 \pm 0.39$	$25.55 \pm 0.58$	$25.86 \pm 0.65$	$27.00 \pm 0.98$
$\Omega'$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$-3.89 \pm 0.08$	$-3.68 \pm 0.11$	$-3.87 \pm 0.12$	$-3.99 \pm 0.18$
$\Omega''$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$0.39 \pm 0.27$	$-0.33 \pm 0.38$	$-1.70 \pm 0.40$	$-3.29 \pm 0.80$
$\sigma_u$ , км/с	27.66	22.93	27.24	29.97
$N$	92395	24286	22960	45149
$A$ , км/с/кпк	$15.57 \pm 0.31$	$14.70 \pm 0.45$	$15.48 \pm 0.50$	$15.95 \pm 0.71$
$B$ , км/с/кпк	$-10.72 \pm 0.50$	$-10.85 \pm 0.73$	$-10.38 \pm 0.82$	$-11.05 \pm 1.21$

В верхней части таблицы даны значения параметров, найденные при условии  $\sigma_u/\pi < 30\%$  по звездам с собственными движениями из каталога GAIA TGAS и фотометрическими расстояниями из каталога RAVE5, а в нижней части таблицы даны значения параметров, вычисленные с использованием тригонометрических параллаксов из каталога GAIA TGAS.

из 145 000 звезд были найдены следующие параметры:  $(U, V, W) = (9.12, 20.80, 7.66) \pm (0.10, 0.10, 0.08)$  км/с,  $\Omega = 28.71 \pm 0.63$  км/с/кпк и  $\Omega' = -4.28 \pm 0.11$  км/с/кпк<sup>2</sup>, где  $V_0 = 230 \pm 12$  км/с (для  $R_0 = 8.0 \pm 0.4$  кпк), а также значения постоянных Оорта  $A = 17.12 \pm 0.45$  км/с/кпк и  $B = -11.60 \pm 0.77$  км/с/кпк. Когда же рассматривались выборки звезд различного возраста (табл.2 в работе [22]), то были найдены довольно низкие значения угловой скорости вращения  $\Omega \sim 24$  км/с/кпк. Можем заключить, что использование собственных движений звезд из каталога Gaia TGAS позволяет оценивать кинематические параметры нашей модели в хорошем согласии с результатами анализа независимых данных.

**5. Раздельный анализ лучевых скоростей и собственных движений звезд.** Вторая часть нашей работы посвящена сравнительному анализу поля скоростей, выполняемому раздельно по лучевым скоростям и собственным движениям звезд. Как уже отмечалось выше, определение лучевых скоростей и собственных движений звезд выполняется принципиально различными методами, поэтому полученные нами раздельные решения основных кинематических уравнений по лучевым скоростям и собственным движениям звезд позволяют исследовать непротиворечивость этих данных друг другу с кинематической точки зрения. Сравнение результатов, полученных по собственным движениям звезд разных каталогов, является одним из способов сравнения систем этих каталогов. В свою очередь, сравнение результатов, полученных по лучевым скоростям и собственным движениям звезд одних и тех же каталогов, можно считать сравнением систем лучевых скоростей и собственных движений относительно выбранной кинематической модели. Обнаруженные различия в этом случае могут свидетельствовать либо о систематических ошибках наблюдательных данных, либо о неполноте используемой кинематической модели.

В отличие от задачи, решенной выше, сходимость результатов, полученных по лучевым скоростям и собственным движениям звезд имеет смысл рассматривать для выборок звезд, удаленных от Солнца на различные расстояния. Кинематический анализ лучевых скоростей и собственных движений звезд каталога RAVE5 будем выполнять с помощью формул Боттлингера (1)-(3), приведенных к виду, когда в левых частях уравнений (2)-(3) стоят  $4.74\mu_l \cos b$  и  $4.74\mu_b$ , вместо  $V_l = 4.74 r \mu_l \cos b$  и  $V_b = 4.74 r \mu_b$ .

Это требование приводит к необходимости формирования выборок звезд, принадлежащих узким сферическим оболочкам. Распределение звезд каталога RAVE5 по небу показывает две особенности. Во-первых, основная часть этих звезд расположена в южном экваториальном полушарии, во-вторых, это распределение не является равномерным, так как области, через которые

проходит Млечный путь, не содержат звезд (рис.1).

Непосредственное решение уравнений Огородникова-Милна и Боттлингера по такому множеству звезд, принадлежащих сферическим оболочкам, у которых

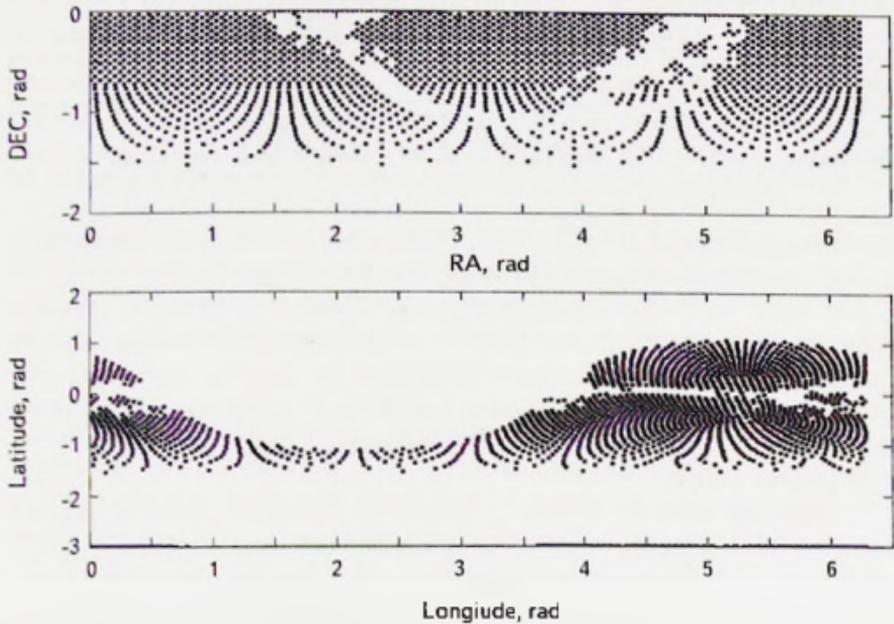


Рис.1. Заполненность Near- $\nu$ -площадок ( $N_{\text{star}} = 20$ ) звездами каталога RAVE5 в диапазоне расстояний  $100 < r < 300$  пк. Вверху - экваториальная система координат, внизу - галактическая система координат.

ширина оболочки значительно меньше ее среднего радиуса, приводит к необходимости решать плохо обусловленные системы уравнений с сильными корреляциями оценок искомых параметров. Для примера в табл.3 и 4 показаны числа обусловленности (вычисленные с помощью бесконечной нормы матриц) и наибольшие коэффициенты корреляции для выборки 52640 звезд из

Таблица 3

ЧИСЛА ОБУСЛОВЛЕННОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ  
ДЛЯ СОВМЕСТНЫХ РЕШЕНИЙ УСЛОВНЫХ УРАВНЕНИЙ.

Выборка из RAVE5  $100 < r < 300$  пк

Модель	Решение по собственным движениям и лучевым скоростям
ОМ	cond = 488, corr( $V$ , $M_{Z_2}$ ) = 0.803
Боттлингер	cond = 1349, corr( $\Omega$ , $\Omega'$ ) = 0.732

ЧИСЛА ОБУСЛОВЛЕННОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ  
ДЛЯ РАЗДЕЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ УСЛОВНЫХ УРАВНЕНИЙ.

Выборка из RAVES  $100 < r < 300$  пк

Модель	Решение по с. движениям	Решение по лучевым скоростям
ОМ	cond = 1185, corr( $W, \Omega'$ ) = 0.784	cond = 5038, corr( $V, M_{21}$ ) = 0.972
Боттлингер	cond = 1383, corr( $\Omega, \Omega'$ ) = 0.734	cond = 2243, corr( $\Omega, \Omega'$ ) = 0.856

диапазона расстояний  $100 < r < 300$  пк. Значения собственных движений и лучевых скоростей осреднены на сетке HealPix с  $N_{\text{side}} = 20$ .

Для того, чтобы не иметь дело с подобной ситуацией, используем двухступенчатую процедуру, основанную на предварительном представлении лучевых скоростей и собственных движений по системе ортогональных сферических функций с последующим получением параметров используемой модели. Опишем основные шаги этого метода.

Исходные данные:

1. Выборка звезд из RAVES, содержащая средние значения лучевых скоростей  $V(h) = V(\alpha_h, \delta_h)$  и собственных движений звезд  $\mu_\alpha^*(h) = \mu_\alpha^*(\alpha_h, \delta_h)$ ,  $\mu_\delta(h) = \mu_\delta(\alpha_h, \delta_h)$ , отнесенных к центрам  $(\alpha_h, \delta_h)$  HealPix-площадок с номерами  $h = 0, 1, \dots, N - 1$ . В нашем случае строилась сетка с параметром  $N_{\text{side}} = 20$  с 4800 площадками (пикселями). Для площадок с отрицательными склонениями  $h = 2440, \dots, 4779$ . В дальнейшем принадлежность индекса  $h$  этому множеству будем обозначать как  $h \in H$ .

2. Веса пикселей  $w_h$ . Вес пикселя с номером  $h$  равен единице, если в этот пиксель попала хотя бы одна звезда, в противном случае вес пикселя полагается равным нулю. Очевидно, что число заполненных площадок равно  $\sum_h w_h$ .

3. Галактические координаты  $l_h, b_h$  центров всех площадок.

4. Галактические собственные движения  $\mu_\alpha^*(h) = \mu_\alpha^*(\alpha_h, \delta_h)$ ,  $\mu_\delta(h) = \mu_\delta(\alpha_h, \delta_h)$ , полученные по исходным экваториальным компонентам:

1. Представим сначала лучевые скорости в виде разложения по системе векторных сферических функций, ортогональных в южном экваториальном полушарии. Для пикселя с номером  $h$  имеем:

$$V_h = \sum_{nkp} v_{nkp} K_{nkp}(x_h, \alpha_h), \quad (8)$$

где  $v_{nkp}$  - коэффициенты разложения по сферическим функциям  $K_{nkp}(x_h, \alpha_h)$ , ортогональных в зоне склонений  $\delta_1 \leq \delta \leq \delta_2$ . Явный вид и формулы для вычисления этих функций даны в работе Витязева, Цветкова [39].

Введя для всех троек индексов сплошную нумерацию  $i = (nkp)$ , перепишем

равенство (8) в следующем виде:

$$V_h = \sum_{i=0}^{l_h} v_i f_i(\hat{x}_h, \alpha_h) = \bar{v} f, \quad (9)$$

где вектор  $\bar{v}$  и вектор-функция  $f$  имеют следующие компоненты:

$$\bar{v} = (v_0, v_1, \dots, v_{l_h}), \quad (10)$$

$$f = (f_0, f_1, \dots, f_{l_h}) = (K_0, K_1, \dots, K_{l_h}). \quad (11)$$

Искомый вектор  $v$  определится методом наименьших квадратов:

$$\bar{v} = z^{-1} \bar{a}, \quad (12)$$

где компоненты матрицы  $z$  и вектора  $a$  имеют вид:

$$z_{ij} = \sum_{h \in H} f_i(\hat{x}_h, \alpha_h) f_j(\hat{x}_h, \alpha_h) w_h, \quad (13)$$

$$a_j = \sum_{h \in H} F_h f_j(\hat{x}_h, \alpha_h) w_h. \quad (14)$$

2. Разложение собственных движений звезд по векторным сферическим функциям. Используя орты  $\bar{e}_j$  и  $\bar{e}_b$  вдоль направлений изменения галактических долгот и широт, образуем вектор Галактических собственных движений звезд

$$\bar{\mu} = \mu_j \bar{e}_j + \mu_b \bar{e}_b. \quad (15)$$

Представим этот вектор в виде разложения по ВСФ

$$\bar{\mu} = \sum_{i=0}^{l_m} m_i \bar{F}(\hat{\delta}_h, \alpha_j) = \bar{m} \bar{F}, \quad (16)$$

где

$$\bar{m} = (s_1, s_2, \dots, s_n; r_1, r_2, \dots, r_n), \quad (17)$$

$$\bar{F} = (\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_n; \bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots, \bar{T}_n). \quad (18)$$

Здесь  $\bar{S}_i$  и  $\bar{T}_i$  - соответственно сферические и тороидальные векторные функции, ортогональные в южном полушарии экваториальной системы координат, описание которых дано в работе [39].

Искомый вектор  $m$  определится методом наименьших квадратов:

$$\bar{m} = Z^{-1} A, \quad (19)$$

где компоненты матрицы  $Z$  и вектора  $A$  имеют вид:

$$Z_{ij} = \sum_{h \in H} \bar{F}_i(\hat{\delta}_h, \alpha_h) \bar{F}_j(\hat{\delta}_h, \alpha_h) w_h, \quad i, j = 1, 2, \dots, I_m, \quad (20)$$

$$A_j = \sum_{h \in H} \bar{\mu}_j \bar{F}_j(\hat{\delta}_h, \alpha_h) w_h, \quad j = 1, 2, \dots, I_m. \quad (21)$$

3. Определение параметров физических моделей лучевых скоростей и

собственных движений звезд.

Модели (9) и (16) формальны, поэтому смысл коэффициентов  $v_i$  и  $m_i$  может быть выяснен только в рамках конкретных физических моделей лучевых скоростей звезд и собственных движений звезд. Зададим физические модели в виде линейных комбинаций некоторых функций  $\varphi_j(r, l, b)$  и  $\bar{\psi}_j(r, l, b)$ :

$$V(r, l, b) = \sum_{j=1}^{J_v} p_j \varphi_j(r, l, b), \quad (22)$$

$$\bar{m}(r, l, b) = \sum_{j=1}^{J_m} q_j \bar{\psi}_j(r, l, b). \quad (23)$$

Очевидно, что такой вид имеют многие модели, использующиеся в кинематическом анализе поля скоростей звезд - модель Огородникова-Милна, Модель Линдблада-Оорта, обобщенная модель Оорта и т.д. В нашем случае (модель Боттлингера) смысл коэффициентов  $p_j$ ,  $q_j$ , а также вид функций  $\varphi_j(r, l, b)$  и  $\bar{\psi}_j(r, l, b)$  легко устанавливается из сравнения (22)-(23) с уравнениями (1)-(3).

Для определения параметров  $p_j$  через полученные коэффициенты  $v_i$ , используем равенства (22) и (9):

$$\sum_{j=1}^{J_v} p_j \varphi_j(r, l, b) = \sum_{i=0}^{I_v} v_i f_i(x_h, \alpha_h). \quad (24)$$

Решая это уравнение методом наименьших квадратов, получим:

$$z \bar{v} = \Phi \bar{p}, \quad (25)$$

где матрица  $z$  имеет компоненты (20), а компоненты матрицы  $\Phi$  имеют вид:

$$\sum_{h \in H} \varphi_j(r, l_h, b_h) f_i(\bar{x}_h, \alpha_h) w_h, \quad i = 0, 1, \dots, I_v; \quad j = 1, 2, \dots, J_v. \quad (26)$$

Отсюда имеем важное соотношение:

$$\bar{v} = z^{-1} \Phi \bar{p}. \quad (27)$$

Это равенство связывает физические параметры  $p_j$  с формальными параметрами  $v_i$  и позволяет интерпретировать физику явлений по коэффициентам формального представления лучевых скоростей  $v_i$ .

Для решения обратной задачи, т.е. для определения физических параметров  $p_j$  через коэффициенты  $v_i$ , следует из матрицы  $z^{-1} \Phi$  выбрать квадратную матрицу  $N_v$  размером  $J_v \times J_v$ . В этом случае искомые параметры определяются следующим образом:

$$\bar{p} = N_v^{-1} \bar{v}. \quad (28)$$

Здесь вектор  $\bar{v}$  состоит из  $J_v$  элементов, индексы которых согласованы с номерами строчек матрицы  $z^{-1} \Phi$ , отобранными для формирования матрицы

$N_{ij}$ . Очевидно, что таким образом можно выбрать несколько квадратных матриц. При их выборе нужно руководствоваться критерием минимизации числа обусловленности. Несколько квадратных матриц (на практике обычно две) позволяют тестировать модель с помощью основного и альтернативного решений [39].

Рассуждая аналогичным образом, запишем равенство

$$\sum_{j=1}^{J_m} q_j \bar{\psi}_j(r, l, b) = \sum_{i=0}^{I_m} \bar{F}_i(\bar{\delta}, \alpha) m_i. \quad (29)$$

Решение этого уравнения по МНК имеет вид:

$$Z \bar{m} = \Psi \bar{q}, \quad (30)$$

где коэффициенты матрицы  $\Psi$  вычисляются по формуле

$$\Psi_{ij} = \sum_{l=0}^{I_m} \bar{\psi}_j(r, l, b_h) \bar{F}_i(\bar{x}, \alpha_h) w_h, \quad i=0, 1, \dots, I_m; \quad j=1, 2, \dots, J_m. \quad (31)$$

Отсюда получаем

$$\bar{m} = (Z^{-1} \Psi) \bar{q}. \quad (32)$$

Это равенство позволяет интерпретировать коэффициенты  $\Psi$ , разложения собственных движений звезд через параметры физической модели.

Для определения коэффициентов  $q_1, q_2, \dots, q_{J_m}$  нужно из матрицы  $Z^{-1} \Psi$  выбрать квадратную матрицу  $N_m$  размером  $J_m \times J_m$ . Аналогично случаю с лучевыми скоростями выбор матрицы  $N_j$  не однозначен. При этом следует выбирать матрицы с минимальным числом обусловленности. Решение имеет вид:

$$\bar{q} = N_m^{-1} \bar{m}. \quad (33)$$

Если построить хотя бы две такие матрицы, то можно проверять адекватность модели наблюдательным данным.

Комментарии к методу.

1. Уравнения (27) и (32) представляют собой избыточные системы уравнений. Поэтому их можно решать методом наименьших квадратов по всей совокупности значимых коэффициентов  $v_i$  и  $m_i$ . Перепишем их в виде

$$\bar{v} = X \bar{p}, \quad X = z^{-1} \Phi, \quad (34)$$

$$\bar{m} = Y \bar{p}, \quad Y = Z^{-1} \Psi, \quad (35)$$

тогда получим

$$\bar{p} = (X^T X)^{-1} (X^T \bar{v}), \quad (36)$$

$$\bar{q} = (Y^T Y)^{-1} (Y^T \bar{m}). \quad (37)$$

Однако такой подход вновь приводит к решению плохо обусловленных

систем уравнений.

2. Матрицы  $z^{-1}\Phi$  и  $Z^{-1}\Psi$  можно вычислить один раз, если все ячейки заполнены. Индивидуальные неравномерности заполнения пикселей, свойственные каждой выборке, а также их изменения в процессе фильтрации при обработке данных приводят к необходимости вычисления этих матриц для каждого конкретного набора пропусков. Этим самым результаты защищаются от искажений, обусловленных незаполненными площадками.

3. Описанный метод можно использовать для исследования кинематики звезд отдельно в северном и южном полушариях. В этом случае нам известны галактические координаты пикселей в обоих полушариях и средние значения лучевых скоростей, а также галактические собственные движения звезд, отнесенные к центрам пикселей. Теперь у нас нет необходимости использовать экваториальную систему координат, поэтому во всех формулах следует формально заменить координаты  $(\bar{x}, \alpha)$  и  $(\bar{\delta}, \alpha)$  на их аналоги в галактической системе координат.

4. Явным преимуществом описанного метода перед стандартным МНК является отсутствие сильных корреляций искоемых параметров, а также решение хорошо обусловленных систем уравнений.

5. Недостатками нашего метода по сравнению с МНК являются: невозможность получения совместного решения кинематических уравнений по лучевым скоростям и собственным движениям звезд, а также необходимость получения решения по звездам, расположенным в сравнительно узких диапазонах расстояния. Это делается для того, чтобы уменьшить влияние различных расстояний на результаты определения кинематических параметров. Численные эксперименты показали, что интервалы расстояний длиной до 200 пк вносят искажения в значения искоемых параметров не более чем на 5%.

6. *Численные результаты и обсуждение.* Использование описанного метода проводилось для звезд Главной последовательности, граница которой на диаграмме Герцшпрунга-Рессела (ГР) показана на рис.2. При построении диаграммы ГР применялась фотометрия из каталога 2MASS, а оценки расстояний были взяты из каталога TGAS. Характеристики выборок приведены в табл.5. Поскольку в наших выборках для 95% звезд среднее значение ошибки параллакса к параллаксу не превышает 0.15, то при выполнении кинематического анализа мы пренебрегли эффектом Лутца-Келкера.

Данные наблюдений (лучевые скорости и собственные движения) усреднялись по Neapix площадкам с параметром  $N_{site} = 20$ . Помимо решений по лучевым скоростям были выполнены решения по собственным движениям звезд из каталогов TGAS, UCAC4 и PPMXL. Аппроксимация данных по сферическим функциям проводилась дважды. На первом шаге определялась

Таблица 5

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫБОРОК ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Границы выборки, пк	Среднее расстояние, пк	Число звезд	Среднее значение относительной погрешности параллаксов
100-200	155	21737	0.061
200-300	249	26541	0.099
300-400	346	19161	0.136
400-500	444	10137	0.168
500-700	574	6914	0.213
700-900	776	1243	0.296

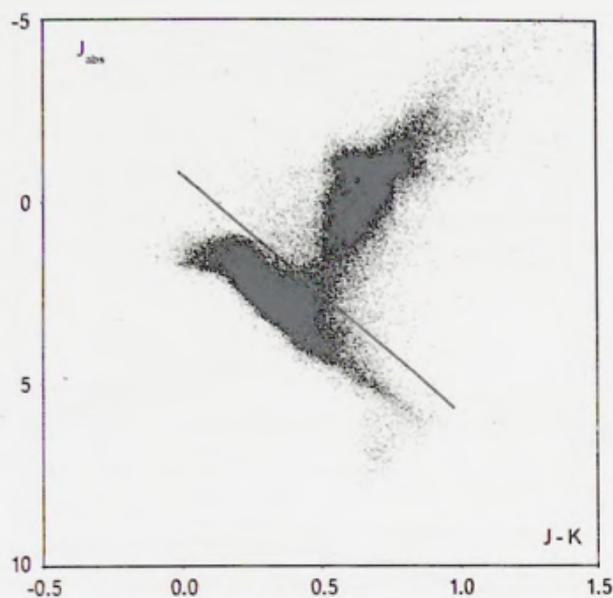


Рис.2. Главная последовательность и ветвь красных гигантов на диаграмме Гершпрунга-Рессела. Разделяющая линия  $J_{2000} = 7(J - K) - 1$ .

ошибка единицы веса  $\sigma_0$ , после чего данные фильтровались, т.е. из дальнейшей обработки исключались те трапеции, содержимое которых превышало порог  $3\sigma_0$ . Результатами являлись значения параметров модели Ботлингера как функции среднего расстояния до звезд выборки. Эти кривые получены путем сглаживания по трем точкам. При этом данные, полученные по наземным каталогам UCAC4 и PRMXL, осреднялись, и для них строилась отдельная

кривая, которую мы будем обозначать как UCPP. В дальнейшем кривые, полученные по собственным движениям звезд, будем называть " $\mu$ -кривые". Соответственно, для кривых, полученных по лучевым скоростям, будем использовать термин " $V_r$ -кривые".

На рис.3-4 показаны результаты определения параметров модели Боттлингера, полученных по лучевым скоростям каталога RAVES и по собственным движениям каталогов TGAS и UCPP. Анализ этих рисунков

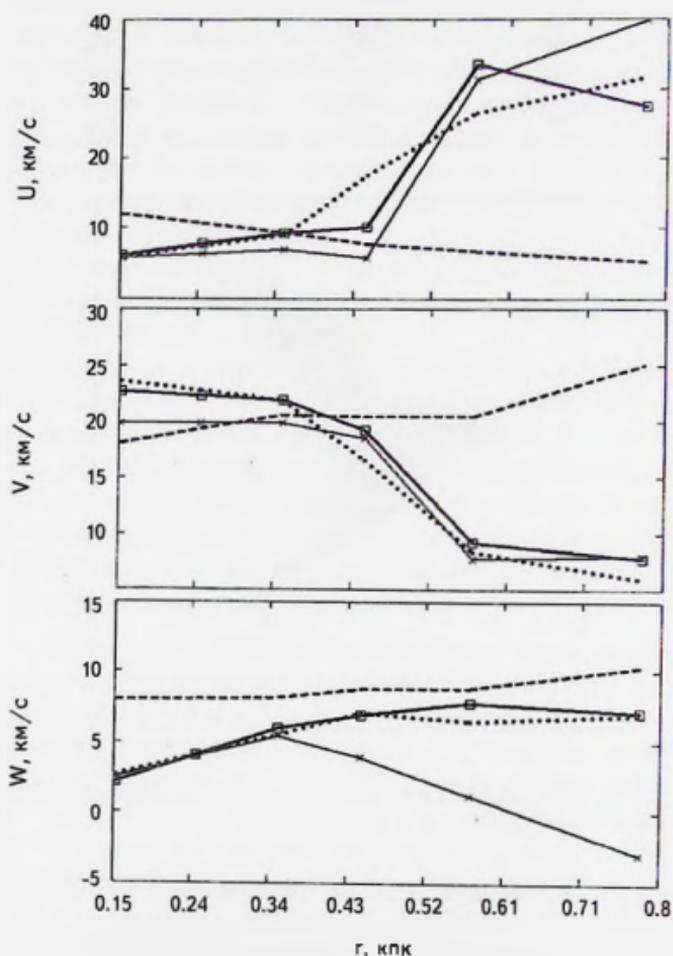


Рис.3. Зависимость от расстояния параметров  $U$ ,  $V$ ,  $W$ , полученных по лучевым скоростям (штриховая линия) и собственным движениям звезд Главной последовательности каталогов TGAS (квадраты) и UCPP (кресты). Точками проведены кривые для лучевых скоростей, редуцированных на систему собственных движений звезд каталога TGAS.

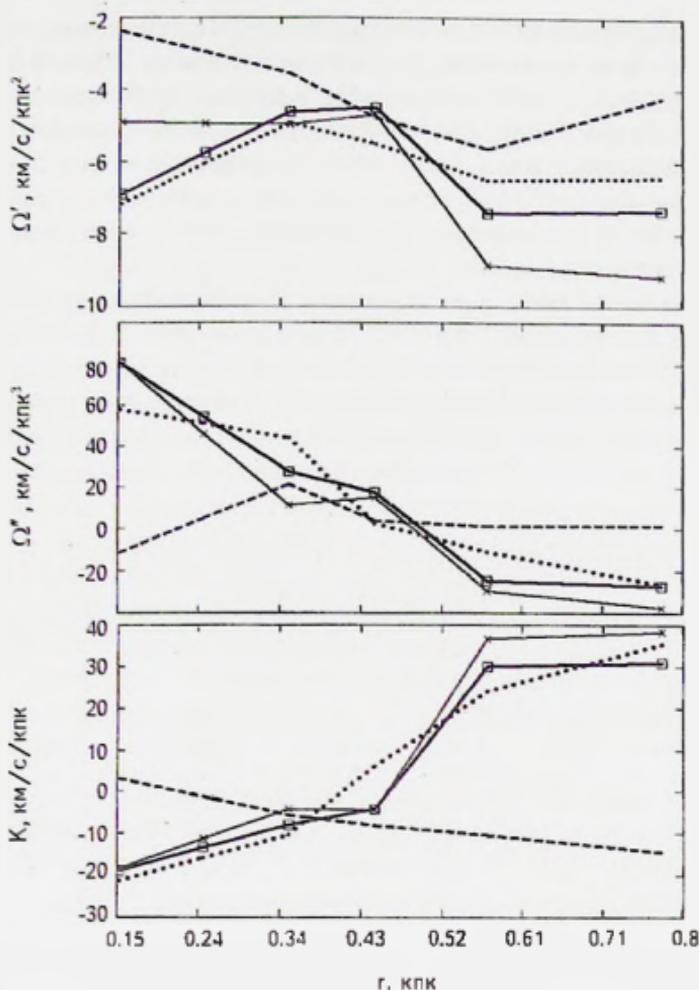


Рис.4. Зависимость от расстояния параметров  $\Omega'$ ,  $\Omega''$ ,  $K$ , полученных по лучевым скоростям (штриховая линия) и собственным движениям звезд Главной последовательности каталогов TGAS (квадраты) и UCSP (кресты). Точками проведены кривые для лучевых скоростей, редуцированных на систему собственных движений звезд каталога TGAS.

позволяет сформулировать очень важный вывод: за исключением параметра  $W'$  при  $r > 0.35$  кпк значения всех остальных параметров очень хорошо совпадают при их определении по собственным движениям космического каталога TGAS и по собственным движениям наземных каталогов UCSP. В то же самое время значения параметров, определенных по лучевым скоростям каталога RAVE5, не всегда близки к результатам, полученным по собственным

движениям звезд. Поскольку мы используем собственные движения звезд из наземных каталогов и не зависящего от них космического каталога TGAS, то в случае хорошего согласия хода всех  $\mu$ -кривых и отличия от него  $V_r$ -кривых, мы должны отдать предпочтение результатам, полученным по собственным движениям звезд. Более того, поскольку наземные каталоги подтверждают результаты TGAS, нужно признать значения, полученные в системе TGAS, более надежными, чем значения, полученные из анализа лучевых скоростей звезд.

Для количественной оценки согласия  $\mu$  - и  $V_r$ -кривых мы вычислили ход по расстояниям разностей одноименных параметров модели Боттлингера, полученных по лучевым скоростям и собственным движениям звезд каталога TGAS. Для каждой кривой были найдены диапазоны гелиоцентрических расстояний, в которых модули указанных разностей не превосходили некоторых наперед заданных допусков. Эти допуски, диапазоны найденных расстояний,

Таблица 6

### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ БОТТЛИНГЕРА. ГЛАВНАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

Параметр	Допуск	Диапазон осреднения, клк	Лучевые скорости	UCPP	TGAS
$U$ , км/с	$ \Delta U  < 2$	0.3 - 0.5	$8.48 \pm 0.11$	$6.27 \pm 0.07$	$9.68 \pm 0.11$
$V$ , км/с	$ \Delta V  < 2$	0.2 - 0.5	$20.09 \pm 0.06$	$19.38 \pm 0.03$	$21.12 \pm 0.05$
$W$ , км/с	$ \Delta W  < 3$	0.3 - 0.4	$8.10 \pm 0.03$	$5.38 \pm 0.14$	$5.96 \pm 0.22$
$\Omega$ , км/с/кпк		0.7 - 0.8	-	$34.88 \pm 2.58$	$34.66 \pm 4.46$
$\Omega'$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$ \Delta \Omega'  < 2$	0.3 - 0.4	$-3.56 \pm 0.14$	$-4.98 \pm 0.11$	$-4.63 \pm 0.16$
$\Omega''$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$ \Delta \Omega''  > 4$	0.1 - 0.9	-	-	-
$K$ , км/с/кпк	$ \Delta K  < 2$	0.3 - 0.5	$-6.86 \pm 0.29$	$-4.36 \pm 0.44$	$-6.14 \pm 0.40$
$A$ , км/с/кпк			$14.24 \pm 0.56$	$19.92 \pm 0.44$	$21.44 \pm 0.64$
$B$ , км/с/кпк			-	$-14.96 \pm 2.62$	$-13.22 \pm 4.51$

а также значения кинематических параметров, полученных по лучевым скоростям, собственным движениям TGAS и UCPP в зонах согласия, показаны в табл.6. Изучение рис.3-4 и табл.6 позволяет сделать следующие выводы:

- Параметры  $U$ ,  $V$ ,  $W$ . Результаты по лучевым скоростям и собственным движениям совпадают в пределах 2-3 км/с в диапазонах расстояний 0.2 + 0.5 клк.
- Параметр  $\Omega$ . Он определяется только по собственным движениям звезд. Значения, полученные по UCPP и TGAS, показывают хорошее согласие (на уровне 5 км/с/кпк) в диапазоне расстояний от 0.3 до 1.1 клк.
- Параметр  $\Omega'$ . Результаты по лучевым скоростям и собственным движениям различаются не более чем на 3 км/с/кпк<sup>2</sup> в диапазоне расстояний

$0.2 \pm 0.7$  кпк. Это обстоятельство представляет большой интерес с точки зрения метода контроля использованной шкалы расстояний. Этот метод основан на том, что ошибки лучевых скоростей (см. левую часть уравнения (1)) не зависят от ошибок расстояний, а ошибки тангенциальных компонент (см. левые части уравнений (2)-(3)) - зависят. Поэтому сравнение найденных различными способами значений  $\Omega'$  (наиболее чувствительной к принятой шкале расстояний) позволяет найти коэффициент шкалы расстояний  $p$  ([40,29]). По данным табл.6 коэффициент  $p$  можем вычислить дважды  $p_1 = (-3.56)/(-4.98) = 0.72$  и  $p_2 = (-3.56)/(-4.63) = 0.77$ . Оба значения  $p$  получены для близких расстояний ( $0.2 \pm 0.7$  кпк) и существенно отличаются от значения 0.96, полученного в указанных работах для далеких звезд. Отметим, что из анализа лучевых скоростей и собственных движений красных гигантов каталога RAVE5, проведенного нашим методом, коэффициент шкалы расстояний оказался также равным 0.96 на интервале расстояний  $0.7 \pm 1.5$  кпк.

· Параметр  $\Omega^*$ . Оценки значений этого параметра по лучевым скоростям и собственным движениям звезд не согласуются даже на уровне  $4 \text{ км/с/кпк}^1$  нигде в пределах диапазона  $0.1 \pm 1.1$  кпк. Это обстоятельство делает невозможным нахождение сколько-нибудь близких значений этого параметра по лучевым скоростям и собственным движениям звезд.

· Параметр  $K$ . На уровне  $2 \text{ км/с/кпк}$  для Главной последовательности результаты по лучевым скоростям и собственным движениям согласуются в диапазоне  $0.3 \pm 0.5$  кпк.

7. *Редукция лучевых скоростей на систему собственных движений звезд каталога TGAS.* Оценим расстояние, на котором точности тангенциальной  $V_t$  и радиальной  $V_r$  скорости равны. Используя верхнюю границу оценки точности тангенциальной компоненты, из равенства  $\sigma_{V_t} = 4.7 + r \sqrt{\sigma_{\mu_{\alpha \cos \delta, \mu_\delta}}^2 - \sigma_{\mu_\delta}^2}$  находим значение критического расстояния, ближе которого тангенциальные скорости более точны, чем радиальные. Исходя из того, что  $\sigma_{V_r} = 3 \text{ км/с}$ , а  $\sigma_{\mu_{\alpha \cos \delta, \mu_\delta}} = 1 \text{ мсд/год}$ , для звезд TGAS ( $\sigma_{\mu_{\alpha \cos \delta, \mu_\delta}} = 0.1 \text{ мсд/год}$  для подмножества звезд HIPPARCOS), получаем  $r = 0.45$  кпк для всех звезд TGAS и  $r = 1.4$  кпк для подмножества звезд HIPPARCOS. В силу того, что наши выборки находятся в пределах этих расстояний, следует признать, что в рамках кинематической модели Боттлингера лучевые скорости Главной последовательности каталога RAVE5 могут иметь и систематические смещения относительно собственных движений тех же самых звезд каталога TGAS. Устранить эти смещения можно с помощью исправленных лучевых скоростей, вычисленных по следующей формуле:

$$V_r^{corr} = V_r + \Delta U \cos l \cos b + \Delta V \sin l \cos b + \Delta W \sin b - \Delta \Omega' R_0 (R - R_0) \sin l \cos b - \\ - 0.5 \Delta \Omega'' R_0 (R - R_0)^2 \sin l \cos b - \Delta K r \cos^2 b. \quad (38)$$

Входящие сюда коэффициенты  $\Delta U$ ,  $\Delta V$ , ... имеют смысл разностей вида " $V_r - \mu_{TGAS}$ ". Их численные значения приведены в табл.7.

Таблица 7

### КОЭФФИЦИЕНТЫ ФОРМУЛЫ (38) ДЛЯ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

$r$ кпк	$\Delta U$ км/с	$\Delta V$ км/с	$\Delta W$ км/с	$\Delta \Omega'$ км/с/кпк <sup>2</sup>	$\Delta \Omega''$ км/с/кпк <sup>3</sup>	$\Delta K$ км/с/кпк
0.15	5.9 ± 0.4	-4.6 ± 0.3	5.8 ± 0.5	4.5 ± 0.8	-92.1 ± 6.8	22.1 ± 2.2
0.25	3.0 ± 0.2	-2.9 ± 0.1	4.0 ± 0.2	2.8 ± 0.4	-49.1 ± 3.3	12.2 ± 1.1
0.35	0.1 ± 0.2	-1.3 ± 0.1	2.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2	-6.1 ± 1.6	2.4 ± 0.7
0.44	-2.5 ± 0.3	1.2 ± 0.2	1.9 ± 0.3	-0.3 ± 0.2	-13.7 ± 1.2	-3.9 ± 0.6
0.57	-26.8 ± 2.2	11.3 ± 1.2	1.0 ± 0.9	1.8 ± 0.3	25.6 ± 3.4	-40.4 ± 3.2
0.78	-22.3 ± 6.1	17.2 ± 1.9	3.2 ± 2.2	3.1 ± 0.9	28.8 ± 4.2	-45.5 ± 5.2
0.98	-17.8 ± 12.3	23.2 ± 3.0	5.4 ± 4.5	4.5 ± 1.8	32.0 ± 9.0	-50.5 ± 10.8

На рис.3-4 точечными линиями показаны параметры модели Боттингера, вычисленные по скорректированным лучевым скоростям (38). Теперь мы видим, что значения этих параметров существенно лучше согласуются с параметрами, полученными по TGAS. Очевидно, что на тех расстояниях, на которых точность тангенциальных скоростей оказывается ниже лучевых скоростей звезд, следует применять обратную процедуру, т.е. редуцировать собственные движения звезд на систему их лучевых скоростей. Общие причины, вызывающие значительные различия  $V_r$ - и  $\mu$ -кривых, требуют специального изучения.

8. *Заключение.* Рассмотрены пространственные скорости звезд с высокоточными положениями, собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia TGAS и лучевыми скоростями из каталога RAVE5. По выборке из 92395 звезд с оценками возраста найдены следующие  $(U, V, W) = (9.42, 20.34, 7.21) \pm (0.12, 0.10, 0.09)$  км/с,  $\Omega = 26.29 \pm 0.39$  км/с/кпк и  $\Omega' = -3.89 \pm 0.08$  км/с/кпк<sup>2</sup>, где  $V_0 = 210 \pm 6$  км/с (для принятого  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк), а также постоянные Орта  $A = 15.57 \pm 0.31$  км/с/кпк и  $B = -10.72 \pm 0.50$  км/с/кпк. Мы нашли, что значения параметров  $\Omega$  и  $\Omega'$  показывают хорошую устойчивость в зависимости от возраста звезд.

Получены отдельные решения основных кинематических уравнений как по лучевым скоростям каталога RAVE5, так и по собственным движениям

звезд каталогов Gaia TGAS, UCAC4 и PPMXL. Это позволило проследить взаимную непротиворечивость данных с кинематической точки зрения. Не использовались собственные движения звезд из трех каталогов - Gaia TGAS, UCAC4 и PPMXL. При этом были получены следующие результаты:

- с помощью лонных скалярных и векторных сферических функций построен метод решения уравнений Боттлингера по звездам южного экваториального полушария, позволяющий избежать появления сильных корреляций искоемых параметров и не приводящий к решению плохо обусловленных систем нормальных уравнений;

- вычислены зависимости параметров модели Боттлингера от среднего расстояния до звезд выборки при получении этих параметров раздельно по лучевым скоростям и собственным движениям звезд для звезд Главной последовательности

- найдены диапазоны расстояний, в которых значения параметров модели Боттлингера хорошо согласуются между собой при их получении по лучевым скоростям каталога RAVE5 и по собственным движениям звезд UCAC4, PPMXL и Gaia TGAS;

- в диапазонах согласия получены оценки параметров модели Боттлингера для звезд Главной последовательности;

- сделан вывод о том, что в случае разногласий между оценками кинематических параметров, полученных по собственным движениям и лучевым скоростям звезд, следует отдавать предпочтение результатам, найденным по собственным движениям звезд, так как собственные движения звезд наземных каталогов UCAC4, PPMXL и каталога Gaia TGAS, дающие согласующиеся результаты, являются полностью независимыми;

- произведена редукция лучевых скоростей на систему собственных движений звезд каталога Gaia TGAS, устраняющая отличия значений параметров модели Боттлингера, выведенных из анализа лучевых скоростей и собственных движений звезд.

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение рукописи и за сделанные ценные замечания. В.В.Витязев и А.С.Цветков благодарны за поддержку гранту СПбГУ 6.37.343.2015, а В.В.Бобылев и А.Т.Байкова благодарны программе Президиума РАН П-7 "Переходные и взрывные процессы в астрофизике".

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
e-mail: vityazev@list.ru

<sup>2</sup> Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково

## THE GALAXY KINEMATICS DERIVED FROM THE RAVE5, UCAC4, PPMXL AND GAIA TGAS CATALOGS

V.V.VITYAZEV<sup>1</sup>, A.S.TSVETKOV<sup>1</sup>, V.V.BOBYLEV<sup>2</sup>, A.T.BAJKOVA<sup>3</sup>

The spatial velocities of the stars with high-precision positions, proper motions and parallaxes from the Gaia TGAS catalog and line-of-sight velocities from the RAVE5 catalog are considered. From the sample of 92395 stars with the age estimates we have obtained the following kinematic parameters:  $(U, V, W) = (9.42, 20.34, 7.21) \pm (0.12, 0.10, 0.09) \text{ km s}^{-1}$ ,  $\Omega = 26.29 \pm 0.39 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  and  $\Omega' = -3.89 \pm 0.08 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$ , where  $V_0 = 210 \pm 6 \text{ km s}^{-1}$  (for adopted  $R_0 = 8.0 \pm 0.2 \text{ kpc}$ ), and the Oort constants  $A = 15.57 \pm 0.31 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  and  $B = -10.72 \pm 0.50 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ . It is shown that the parameters  $\Omega$  and  $\Omega'$  are stable to the star age. A comparative analysis of the Bottlinger model parameters obtained separately from the RAVE5 catalog line-of-sight velocities and the Gaia TGAS, UCAC4 and PPMXL catalogs proper motion has been made. It is shown that these parameters are in good agreement with each other when derived from the proper motions of both the terrestrial catalogs and catalog Gaia TGAS. At the same time, it was established that the values of the Bottlinger model parameters obtained from the line-of-sight velocities can differ from the corresponding parameters obtained from the proper motions. The reduction of the line-of-sight velocities from the RAVE5 catalog is proposed for eliminating these differences.

Key words: *line-of-sight velocities: star proper motions: RAVE5: Gaia DRI: Galaxy kinematics*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gaia Collaboration, T.Prusti, J.H.J. de Bruijne et al.*, *Astron. Astrophys.*, 595. A1, 2016.
2. *M.Steinmetz, T.Zwitter, A.Siebert et al.*, *Astron. J.*, 132, 1645, 2006.
3. *T.Zwitter, A.Siebert, U.Munari et al.*, *Astron. J.*, 136, 421, 2008.
4. *A.Siebert, M.E.K.Williams, A.Siviero et al.*, *Astron. J.*, 141, 187, 2011.
5. *R.Klement, B.Fuchs, H.-W.Rix*, *Astrophys. J.*, 685, 261, 2008.
6. *G.M.Seabroke, G.Gilmore, A.Siebert et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 384. 11, 2008.
7. *T.Antoja, A.Helmi, O.Bienayme et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 426. L1, 2012.

8. *A.Sieber, O.Bienayme, J.Binney et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **391**, 793, 2008.
9. *D.I.Casetti-Dinescu, T.M.Girard, V.I.Korchagin et al.*, *Astrophys. J.*, **728**, 7, 2011.
10. *B.Cochkunoglu, S.Ak, S.Bilir et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **412**, 1237, 2011.
11. *S.Pasetto, E.K.Grebel, T.Zwitter et al.*, *Astron. Astrophys.*, **547**, A70, 2012.
12. *S.Pasetto, E.K.Grebel, T.Zwitter et al.*, *Astron. Astrophys.*, **547**, A71, 2012.
13. *A.Sieber, B.Famaey, J.Binney et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **425**, 2335, 2012.
14. *O.Golubov, A.Just, O.Bienayme et al.*, *Astron. Astrophys.*, **557**, A92, 2013.
15. *M.A.Breddels, M.C.Smith, A.Helmi et al.*, *Astron. Astrophys.*, **511**, A90, 2010.
16. *T.Zwitter, G.Matijevic, M.A.Breddels et al.*, *Astron. Astrophys.*, **522**, A54, 2010.
17. *B.Burnett, J.Binney*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **407**, 339, 2010.
18. *B.Burnett, J.Binney, S.Sharma et al.*, *Astron. Astrophys.*, **532**, A113, 2011.
19. *G.Kordopatis, G.Gilmore, M.Steinmetz et al.*, *Astron. J.*, **146**, A134, 2013.
20. *C.Conrad, R.-D.Scholz, N.V.Khurchenko et al.*, *Astron. Astrophys.*, **562**, A54, 2014.
21. *T.Piffl, C.Scannapieco, J.Binney et al.*, *Astron. Astrophys.*, **562**, A91, 2014.
22. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Astron. Lett.*, **42**, 2, 90, 2016.
23. *N.Zacharias, C.Finch, T.Girard et al.*, *Astron. J.*, **145**, 44, 2013.
24. *A.Kunder, G.Kordopatis, M.Steinmetz et al.*, *Astron. J.*, **153**, 75, 2017.
25. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues. ESA SP-1200, 1997.
26. *Gaia Collaboration, A.G.A.Brown, A.Vallenari et al.*, *Astron. Astrophys.*, **595**, A2, 2016.
27. *L.Lindegren, U.Lammers, U.Bastian et al.*, *Astron. Astrophys.*, **595**, A4, 2016.
28. *V.V.Bobylev*, *Astron. Lett.*, **43**, 3, 152, 2017.
29. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Astron. Lett.*, **43**, 3, 159, 2017.
30. *J.Bovy*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **468**, L63, 2017.
31. *Gaia Collaboration, F.van Leeuwen, A.Vallenari et al.*, arXiv: 1703.01131, 2017.
32. *J.P.Vallee*, *Astrophysics and Space Science*, **362**, 79, 2017.
33. *J.Binney, B.Burnett, G.Kordopatis et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **437**, 351, 2014.
34. *T.E.Lutz, D.H.Kelker*, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, **85**, 573, 1973.
35. *T.L.Astraatmadja, C.A.L.Bailer-Jones*, *Astrophys. J.*, **833**, 119, 2017.
36. *A.S.Rastorguev, M.V.Zabolotskikh, A.K.Dambis et al.*, *Astrophysical Bulletin*, **72**, 122, 2017.
37. *M.Honma, T.Nagayama, K.Ando et al.*, *PASJ*, **64**, 136, 2012.
38. *M.J.Reid, K.M.Menten, A.Brunthaler et al.*, *Astrophys. J.*, **783**, 130, 2014.
39. *V.V.Vityazev, A.S.Tsvetkov*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **442**, 1249, 2014.
40. *M.V.Zabolotskikh, A.S.Rastorguev, A.K.Dambis*, *Astron. Lett.*, **28**, 454, 2002.

