АНАЛИЗ ТЕСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ ЗВЕЗД С СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ

© 2020 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 18.03.2020 г. После доработки 30.03.2020 г.; принята к публикации 31.03.2020 г.

Рассмотрены 36 кандидатов на тесные (менее 1 пк) сближения с Солнечной системой. Отбор этих звезд осуществлен в соответствии с результатами анализа их движения, полученными различными авторами. Для большинства звезд данного списка кинематические характеристики взяты из каталога Gaia DR2. Параметры сближения этих звезд с Солнечной системой вычислены с использованием трех методов: (1) линейного, (2) эпициклического, а также с помощью (3) интегрирования орбит в осесим-метричном потенциале. Сделан вывод о том, что эпициклический метод неплохо работает только на интервале времени, не превышающем ± 1 млн лет. Для звезды Gaia DR2 3130033734235815424 на основе третьего метода, в хорошем согласии с первым методом, впервые получены следующие оценки параметров сближения: $t_{\rm min} = -0.62 \pm 0.12$ млн лет и $d_{\rm min} = 0.30 \pm 0.10$ пк.

Ключевые слова: сближение звезд с Солнечной системой, кинематика, Солнечная система, облако Оорта.

DOI: 10.31857/S032001082004004X

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к тесному (менее 1–2 пк) сближению звезды поля с Солнечной системой связан с возможностью возникновения так называемого кометного ливня от внешних границ облака Оорта (Оорт, 1950) в сторону больших планет и Земли в частности. Как показывает моделирование (Дыбжиньский, 2002; 2005; Мартинес-Барбоса и др., 2017), помимо звездных пролетов, кометное облако Оорта подвержено возмущениям от гигантских молекулярных облаков, а также испытывает воздействие от притяжения Галактики.

Практический поиск тесных сближений звезд с Солнечной системой выполнялся, например, в работах Ревиной (1988), Мэтьюса (1994), Мюлляри, Орлова (1996). Используемые наземные каталоги не отличались в то время высокой точностью параллаксов и собственных движений звезд. Тем не менее, благодаря этим авторам, были выявлены некоторые кандидаты, подтвержденные позже по более точным данным. Это, например, Проксима Центавра, система α Центавра или звезда GJ 905.

По данным каталога HIPPARCOS (1997), такую задачу решали Гарсиа-Санчес и др. (1999; 2001), Бобылев (2010а; 2010b), Андерсон, Фрэнсис (2012), Дыбжиньский, Берский (2015), Байлер-Джонс (2015), Фенг, Байлер-Джонс (2015). По данным каталога Gaia (Прусти и др., 2016), по первому его релизу — Gaia TGAS (Тусho-Gaia Astrometric Solution, Линдегрен и др., 2016), поиск тесных сближений осуществляли Берский, Дыбжиньский (2016), Бобылев, Байкова (2017), Фуенте Маркос и Фуенте Маркос (2018). В результате этих усилий были обнаружены несколько кандидатов на очень тесный пролет, а именно на попадание внутрь облака Оорта (до расстояний менее 0.5 пк). Рекордсменом является звезда GJ 710 (Гарсиа-Санчес и др., 2001; Бобылев, 2010а, Берский, Дыбжиньский, 2016, Байлер-Джонс, 2018). Другим примером является двойная маломассивная (M9.5+T5) система WISE J072003.20-084651.2, обнаруженная в работе Мамаека и др. (2015).

Наконец, по еще более точным данным второго релиза — Gaia DR2 (Браун и др., 2018; Линдегрен и др., 2018) такой анализ проведен, например, в работах Байлера-Джонса и др. (2018), Дармы и др. (2019), Торреса и др. (2019) и Высочаньской и др. (2020). В результате имеем — сближения с Солнечной системой до расстояний менее 5 пк на временном интервале ±5 млн лет могут иметь около 3000 кандидатов, менее 1 пк — около 30 звезд и 5-6 звезд могут иметь сближения до расстояний менее 0.25 пк. В частности, в работе Высочаньской и др. (2020) найдена звезда ALS 9243, которая 2.5 млн лет назад могла сблизиться с орбитой Солнца до расстояния 0.25 пк. А звездарекордсмен GJ 710, согласно оценке Байлера-

^{*}Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

Джонса и др. (2018), через 1.2 млн лет может сблизиться с Солнечной системой до расстояния около 0.05 пк.

Звездные траектории строятся различными методами. Обычно применяются следующие: а) линейный метод, б) эпициклическое приближение или в) использование подходящей модели гравитационного потенциала Галактики. Стимулом для написания настоящей работы послужили большие (более 1 пк) расхождения между результатами анализа параметров сближений ALS 9243 (Высочаньская и др., 2020) и еще нескольких звезд из работы Дармы и др. (2019), которые мы получили, применяя различные подходы.

Целью настоящей работы является применение трех этих методов для анализа около 30 звезд, имеющих, согласно различным авторам, сближения с Солнечной системой до расстояний менее 1 пк. Понашему мнению, такая работа является актуальной в преддверии выхода версии каталога Gaia DR3.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ОРБИТ

В прямоугольной системе координат с центром в Солнце ось x направлена в сторону галактического центра, ось y — в сторону галактического вращения и ось z — в 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 звезды в кпк, которое мы вычисляем через параллакс звезды π в мсд. Ометим, что в настоящей работе используются звезды с относительными ошибками параллаксов менее 10%, поэтому нет необходимости в учете эффекта Лутца—Келкера (Лутц, Келкер, 1973).

Из наблюдений 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. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год.

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 и W на северный галактический полюс:

$$U = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \quad (1)$$

$$V = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$

$$W = V_r \sin b + V_b \cos b.$$

Для анализа тесных сближений звезд поля с Солнечной системой используем три метода. Первый основан на применении линейного приближения,

ми ме- модели гравитационного потенциала Галактики. а) лише или

Линейный метод

второй заключается в анализе эпициклических ор-

бит звезд, а в третьем методе орбиты звезд и Солн-

ца строятся с использованием осесимметричной

Согласно работе Мэтьюса (1994) минимальное расстояние между траекторией звезды и Солнца d_{\min} на момент сближения t_{\min} можно найти на основе следующих соотношений:

$$d_{\min} = r/\sqrt{1 + (V_r/V_t)^2},$$

$$t_{\min} = rV_r/(V_t^2 + V_r^2),$$
(2)

где $V_t = \sqrt{V_l^2 + V_b^2}$ — скорость звезды, перпендикулярная лучу зрения.

Эпициклическое приближение

Эпициклическое приближение (Линдблад, 1927) позволяет построить орбиты звезд в системе координат, вращающейся вокруг центра Галактики. Мы применяем метод в форме, которая дана в работе Фухса и др. (2006):

$$x(t) = x_{0} + \frac{U_{0}}{\kappa} \sin(\kappa t) +$$
(3)
+ $\frac{V_{0}}{2B} (1 - \cos(\kappa t)),$
 $y(t) = y_{0} + 2A \left(x_{0} + \frac{V_{0}}{2B} \right) t -$
 $\frac{\Omega_{0}}{B\kappa} V_{0} \sin(\kappa t) + \frac{2\Omega_{0}}{\kappa^{2}} U_{0} (1 - \cos(\kappa t)),$
 $z(t) = \frac{W_{0}}{\nu} \sin(\nu t) + z_{0} \cos(\nu t),$

где t — время в млн. лет (исходим из соотношения пк/млн. лет = 0.978 км/с), A и B — постоянные Оорта; $\kappa = \sqrt{-4\Omega_0 B}$ — эпициклическая частота; Ω_0 — угловая скорость галактического вращения местного стандарта покоя, $\Omega_0 = A - B$; $\nu = \sqrt{4\pi G \rho_0}$ — частота вертикальных колебаний, где G — гравитационная постоянная, а ρ_0 — звездная плотность в околосолнечной окрестности.

Параметры x_0, y_0, z_0 и U_0, V_0, W_0 в системе уравнений (3) обозначают современные положения и скорости звезд. Возвышение Солнца над галактической плоскостью принято равным $h_{\odot} =$ = 16 пк (Бобылев, Байкова, 2016а). Скорости U, V, W вычисляем относительно местного стандарта покоя с использованием значений ($U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$) = = (11.1, 12.2, 7.3) км/с, полученных в работе Шонриха и др. (2010).

Таблица 1. Значения параметров модели галактического потенциала, согласно работе Байковой, Бобылева (20166), $M_{\rm gal} = 2.325 \times 10^7 M_{\odot}$

Параметры	Модель III
$M_b(M_{ m gal})$	443 ± 27
$M_d(M_{ m gal})$	2798 ± 84
$M_h(M_{\rm gal})$	12474 ± 3289
b_b (кпк)	0.2672 ± 0.0090
a_d (кпк)	4.40 ± 0.73
b_d (кпк)	0.3084 ± 0.0050
a_h (кпк)	7.7 ± 2.1

Мы приняли $\rho_0 = 0.1 \ M_{\odot}/пк^3$ (Холмберг, Флинн, 2004), что дает $\nu = 74 \ кm/c/кпк$. Использованы следующие значения постоянных Оорта $A = 18.5 \ km/c/кпк$ и $B = -11.0 \ km/c/кпк$, близкие к современным оценкам (Расторгуев и др., 2017). Отметим, что гравитационным взаимодействием звезды и Солнца мы пренебрегаем.

Для каждой звезды вычисляется параметр сближения между орбитами звезды и Солнца $d(t) = \sqrt{\Delta x^2(t) + \Delta y^2(t) + \Delta z^2(t)}$. Далее, по этим данным определяем параметры d_{\min} на момент сближения t_{\min} .

Модель гравитационного потенциала

Осесимметричный потенциал Галактики представляется в виде суммы трех составляющих центрального сферического балджа $\Phi_b(r(R, Z))$, диска $\Phi_d(r(R, Z))$ и массивного сферического гало темной материи $\Phi_h(r(R, Z))$:

$$\Phi(R, Z) = \Phi_b(r(R, Z)) +$$
(4)
+ $\Phi_d(r(R, Z)) + \Phi_h(r(R, Z)).$

Здесь используется цилиндрическая система координат (R, ψ, Z) с началом координат в центре Галактики. В прямоугольной системе координат (X, Y, Z) расстояние до звезды (сферический радиус) будет $r^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 + Z^2$, при этом ось X направлена от Солнца к галактическому центру, ось Y — перпендикулярно к оси X в сторону вращения Галактики, ось Z — перпендикулярно к галактической плоскости XY в сторону северного галактического полюса. Гравитационный потенциал выражается в единицах 100 км²/с², расстояния — в кпк, массы — в единицах галактической массы $M_{\rm gal} = 2.325 \times 10^7 M_{\odot}$, соответствующей гравитационной постоянной G = 1.

Потенциалы балджа $\Phi_b(r(R,Z))$ и диска $\Phi_d(r(R,Z))$ представляются в форме, предложенной Миямото, Нагаи (1975):

$$\Phi_b(r) = -\frac{M_b}{(r^2 + b_b^2)^{1/2}},\tag{5}$$

$$\Phi_d(R,Z) = -\frac{M_d}{\left[R^2 + \left(a_d + \sqrt{Z^2 + b_d^2}\right)^2\right]^{1/2}}, \quad (6)$$

где M_b , M_d — массы компонент, b_b , a_d , b_d — масштабные параметры компонент в кпк. Компонента гало представляется согласно работе Наварро и др. (1997):

$$\Phi_h(r) = -\frac{M_h}{r} \ln\left(1 + \frac{r}{a_h}\right). \tag{7}$$

Значения параметров модели галактического потенциала (5)–(7) даны в табл. 1. В работе Байковой, Бобылева (2016б) модель (5)–(7) обозначена как модель III. Общая масса Галактики во вмещающей сфере радиусом 200 кпк в этой модели составляет $M_{200} = (0.75 \pm 0.19) \times 10^{12} M_{\odot}$.

Уравнения движения пробной частицы в галактическом потенциале выглядят следующим образом:

$$\dot{X} = p_X, \qquad (8)$$
$$\dot{Y} = p_Y, \\\dot{Z} = p_Z, \\\dot{p}_X = -\partial \Phi / \partial X, \\\dot{p}_Y = -\partial \Phi / \partial Y, \\\dot{p}_Z = -\partial \Phi / \partial Z,$$

где p_X , p_Y , p_Z — канонические моменты, точка означает производную по времени. Для интегрирования уравнений (8) использован алгоритм Рунге— Кутты четвертого порядка.

В прямоугольной галактической системе координат начальные значения положений и скоростей пробной частицы определяются по формулам:

$$X = R_0 - x_0, \quad Y = y_0, \quad Z = z_0 + h_{\odot}, \quad (9)$$
$$U = -(U_0 + U_{\odot}),$$
$$V = V_0 + V_{\odot} + V_{\text{circ}},$$
$$W = W_0 + W_{\odot},$$

где $(x_0, y_0, z_0, U_0, V_0, W_0)$ — начальные положения и пространственные скорости пробной частицы в гелиоцентрической системе координат, а круговая скорость вращения солнечной окрестности в нашем потенциале составляет $V_{\rm circ} = 244$ км/с.

Так же как и раньше, для каждой звезды вычисляется параметр сближения между орбитами звезды и Солнца $d(t) = \sqrt{\Delta X^2(t) + \Delta Y^2(t) + \Delta Z^2(t)}$. Затем определяем параметры d_{\min} на момент сближения t_{\min} .

Ошибки определения d_{\min} и t_{\min} оцениваем с использованием метода Монте-Карло. Здесь предполагается, что ошибки параметров звезд распределены по нормальному закону с дисперсией σ . Ошибки добавляются в экваториальные координаты, компоненты собственного движения, параллакс и лучевую скорость звезды.

ДАННЫЕ

Такие исходные данные о 36 звездах, как тригонометрический параллакс, компоненты собственного движения и лучевая скорость даны в табл. 2. Выборка была сформирована следующим образом.

1. Из табл. 2 работы Байлера-Джонса и др. (2018) были взяты 26 звезд, которые сближаются с Солнечной системой до расстояния менее 1 пк на временном интервале от -3 млн лет до +3 млн лет.

2. В список кандидатов добавлена звезда ALS 9243 на основе анализа Высочаньской и др. (2020).

3. Маломассивная двойная звезда WISE J072003.20-084651.2AB (звезда Шольца) в качестве интересного кандидата на тесные сближения была впервые выявлена в работе Мамаека и др. (2015). Она отсутствует в каталоге Gaia DR2. Новая оценка ее динамического параллакса и абсолютного собственного движения взята нами из работы Дупуя и др. (2019).

4. Данные о четырех хорошо известных звездах Proxima Cen, α Cen AB, GJ 905 и AC+79 3888 добавлены нами на основе предыдущих работ различных авторов (Мэтьюс 1994; Мюлляри, Орлов 1996; Гарсиа-Санчес и др. 1999; Бобылев 2010а,6).

DR2 звезды Gaia 5. Еще четыре 52952724810126208, DR2 Gaia 3130033734235815424, DR2 Gaia 969867803725057920 DR2 Gaia И 365942724131566208 добавлены в наш список по данным работы Дармы и др. (2019), где для них даны следующие индексы: ID 298, ID 291, ID 299 и ID 300. Здесь мы столкнулись с отсутствием номеров звезд из каталога Gaia DR2 в работе Дармы и др. (2019). Хотя список кандидатов состоит из 11 звезд, мы взяли только те, которые удалось отождествить с каталогом Gaia DR2 по их координатам. Звезды Gaia DR2 3130033734235815424, Gaia DR2 969867803725057920 и Gaia DR2 365942724131566208 представляют большой интерес тем, что в работе Дармы и др. (2019) для них впервые даны значения лучевых скоростей из программы LAMOST.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. З даны параметры сближения звезд с Солнечной системой, полученные тремя методами — 1) линейным (2), 2) эпициклическим (3) и 3) интегрированием орбит в осесимметричном потенциале (4). В последней колонке даны ошибки определения параметров (их можно отнести ко всем трем методам), которые оценены с применением метода Монте-Карло.

Как можно видеть из табл. 3, имеется очень хорошее согласие между параметрами сближения, полученными первым и третьим методом. Оценки же параметров, полученные эпициклическим методом, иногда имеют очень сильные отклонения от найденных двумя другими методами. Легко также видна корреляция отклонений с периодом интегрирования: на интервале времени, превышающем ±1 млн лет, эпициклический метод работает плохо.

По данным табл. З вычислены разности параметров сближения трех следующих видов: "метод 1 минус метод 2", "метод 2 минус метод 3" и "метод 1 минус метод 3". На рис. 1 даны гистограммы, построенные по этим разностям.

На всех трех левых панелях, а это графики (а), (в) и (д) один и тот же масштаб оси абсцисс (Δt_{\min}). Можно легко видеть, что разности вида "метод 1 минус метод 3" имеют наименьшую дисперсию. На панелях (б) и (г) масштаб оси абсцисс (Δd_{\min}) на порядок превышает масштаб панели (е). Такие длинные хвосты распределений на панелях (б) и (г) возникли благодаря эпициклическому методу.

Можем заключить, что параметры сближения, найденные методами 1 и 3, находятся между собой в хорошем согласии. Вполне оправдана стратегия поиска тесных сближений, в которой на первом, поисковом этапе, применяется линейный метод, а на втором, более детальном, применяется метод интегрированием орбит в потенциале. Такой стратегии придерживается, например, Байлер-Джонс (2015). Причем модель потенциала может быть очень сложной и содержать неосесимметричные компоненты, учитывающие вклады спиральной волны или центрального бара (см., например, Гарсиа-Санчес и др., 2001).

Для двух нижних гистограмм на рис. 1 ((д) и (е)) получены следующие значения среднего и его ошибки: $\overline{\Delta t_{\min}} = -0.001 \pm 0.005$ млн лет и $\overline{\Delta d_{\min}} =$ $= 0.037 \pm 0.125$ пк. Тогда ошибка каждого из этих методов будет в $\sqrt{2}$ меньшей, $\overline{\sigma_{t_{\min}}} = 0.003$ млн лет и $\overline{\sigma_{d_{\min}}} = 0.09$ пк. Эти значения меньше средних ошибок, вызванных вкладом измерительных ошибок. Так, по данным последних двух колонок табл. 3, найдены следующие средние значения измерительных ошибок: $\overline{\sigma_t} = 0.085$ млн лет и $\overline{\sigma_d} =$ = 0.168 пк.

Таблица 2. Исходные данные о звездах

Gaia DR2/alternative	π , мсд	$\mu_{lpha}\cos\delta,$ мсд/год	μ_{δ} , мсд/год	V_r , км/с
GJ 710	52.52 ± 0.05	-0.46 ± 0.08	-0.03 ± 0.07	-14.5 ± 0.0
955098506408767360	34.51 ± 0.61	0.11 ± 0.92	0.82 ± 0.79	38.5 ± 2.1
5700273723303646464	15.67 ± 1.08	0.16 ± 1.39	-0.21 ± 1.36	38.0 ± 0.9
ALS 9243	10.56 ± 0.40	-0.11 ± 0.58	-0.10 ± 0.63	40 ± 8
2946037094755244800	25.63 ± 1.12	-0.33 ± 1.47	-1.30 ± 1.21	42.1 ± 3.2
5571232118090082816	10.20 ± 0.02	0.10 ± 0.04	0.41 ± 0.04	82.18 ± 0.47
WISE J07200	147.1 ± 1.2	-46.0 ± 4.0	-116.5 ± 2.2	82.4 ± 0.3
154460050601558656	11.26 ± 0.67	-2.08 ± 0.81	-0.55 ± 0.44	-233 ± 9
4071528700531704704	50.40 ± 0.89	-0.71 ± 1.45	-8.88 ± 1.25	-45 ± 17
4472507190884080000	10.34 ± 0.61	0.10 ± 0.86	0.50 ± 0.63	-52 ± 15
3376241909848155520	27.15 ± 1.09	-2.04 ± 1.89	5.60 ± 1.75	79.9 ± 5.6
1791617849154434688	11.46 ± 0.04	-0.38 ± 0.06	-0.79 ± 0.07	$56.29 \pm .48$
510911618569239040	13.20 ± 0.04	0.56 ± 0.04	0.01 ± 0.05	$26.45\pm.35$
4265426029901799552	32.02 ± 0.88	-5.30 ± 1.41	-2.65 ± 1.27	$6.58\pm.19$
4252068750338781824	38.84 ± 0.61	-4.47 ± 0.94	-3.60 ± 0.79	28 ± 14
5261593808165974784	15.29 ± 0.02	-0.20 ± 0.03	-2.32 ± 0.05	71.05 ± 0.88
1949388868571283200	3.93 ± 0.04	-0.33 ± 0.04	-0.73 ± 0.06	347 ± 7
3105694081553243008	35.69 ± 0.97	6.16 ± 1.60	4.19 ± 1.39	38.4 ± 1.9
3996137902634436480	39.68 ± 1.07	2.41 ± 1.96	-10.23 ± 2.10	-38.4 ± 2.3
3260079227925564160	32.16 ± 0.06	-3.41 ± 0.10	-4.94 ± 0.06	-33.4 ± 0.4
5231593594752514304	15.32 ± 0.03	-29.87 ± 0.06	-0.01 ± 0.05	-716 ± 1
3458393840965496960	13.17 ± 1.05	1.50 ± 1.47	-2.36 ± 1.29	87 ± 20
Proxima Cen	771.64 ± 2.60	-3775.7 ± 1.6	765.5 ± 2.0	-25.1 ± 0.9
α Cen AB	754.81 ± 4.11	-3643.0 ± 2.0	697.0 ± 2.0	-24.7 ± 0.4
3972130276695660288	59.94 ± 0.05	-21.03 ± 0.11	6.52 ± 0.10	31.80 ± 0.73
GJ 905	316.95 ± 0.12	112.69 ± 0.15	-1592.1 ± 0.1	-78.0 ± 0.4
2926732831673735168	8.72 ± 0.04	-0.81 ± 0.06	0.57 ± 0.06	66.49 ± 0.25
6724929671747826816	17.04 ± 0.49	2.89 ± 0.76	1.20 ± 0.66	-54.8 ± 1.1
AC+79 3888	190.26 ± 0.05	748.11 ± 0.10	480.60 ± 0.08	-111.6 ± 0.2
939821616976287104	19.02 ± 0.07	-45.67 ± 0.10	-1.91 ± 0.10	568.3 ± 0.8
2924378502398307840	6.07 ± 0.03	0.74 ± 0.03	0.11 ± 0.05	86.9 ± 1.0
6608946489396474752	7.87 ± 0.05	-0.62 ± 0.07	-0.25 ± 0.08	44.2 ± 0.57
52952724810126208	47.86 ± 1.82	0.04 ± 1.50	-4.60 ± 1.48	37.8 ± 3.4
3130033734235815424	38.37 ± 0.90	3.25 ± 1.43	-2.34 ± 1.25	42 ± 7
969867803725057920	50.74 ± 1.30	8.93 ± 1.95	9.21 ± 1.80	41 ± 4
365942724131566208	56.29 ± 1.96	-10.06 ± 1.97	12.41 ± 2.00	-29 ± 5

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 4 2020

АНАЛИЗ ТЕСНЫХ СБЛИЖЕНИЙ ЗВЕЗД

Gaia DP9/alternative	t_{\min} , млн лет	d_{\min} , пк	t_{\min} , млн лет	d_{\min} , пк	t_{\min} , млн лет	d_{\min} , пк	а, млн лет	
	(1)		(2)		(3)			O_d , IIK
GJ 710	1.316	.055	1.344	.052	1.320	.016	.040	.009
955098506408767360	752	.085	754	.105	755	.070	.046	.064
5700273723303646464	-1.677	.134	-1.633	2.052	-1.678	.195	.168	.938
ALS 9243	-2.367	.154	-2.272	1.218	-2.370	.211	.521	.798
2946037094755244800	927	.230	911	.286	928	.227	.091	.234
5571232118090082816	-1.193	.231	-1.177	2.856	-1.193	.171	.007	.030
WISE J07200	082	.333	082	.328	083	.370	.001	.012
154460050601558656	.381	.345	.380	.351	.382	.329	.032	.146
4071528700531704704	.446	.374	.447	.316	.447	.377	.151	.135
4472507190884080000	1.852	.434	1.905	.806	1.854	.331	.470	.625
3376241909848155520	461	.479	459	.373	462	.467	.043	.156
1791617849154434688	-1.549	.562	-1.521	3.692	-1.549	.599	.015	.073
510911618569239040	-2.863	.576	-3.009	3.391	-2.863	.420	.041	.087
4265426029901799552	670	.588	663	.638	672	.596	.025	.172
4252068750338781824	.930	.652	.943	.671	.932	.652	.532	.391
5261593808165974784	920	.664	927	.874	920	.650	.011	.019
1949388868571283200	732	.709	730	5.948	733	.699	.017	.235
3105694081553243008	730	.722	720	.740	731	.711	.046	.126
3996137902634436480	.655	.822	.656	.808	.656	.801	.037	.179
3260079227925564160	.931	.823	.934	.803	.931	.817	.010	.014
5231593594752514304	.091	.842	.091	.976	.092	.813	.002	.017
3458393840965496960	876	.882	881	1.333	878	.824	.291	.544
Proxima Cen	.027	.889	.027	.889	.028	.877	.015	.001
α Cen AB	.028	.909	.028	.909	.028	.889	.000	.011
3972130276695660288	523	.912	522	.981	523	.898	.011	.022
GJ 905	.037	.923	.037	.924	.037	.908	.000	.004
2926732831673735168	-1.725	.925	-1.674	3.431	-1.725	.970	.013	.075
6724929671747826816	1.071	.932	1.066	1.295	1.073	.869	.043	.173
AC+79 3888	.045	1.023	.045	1.025	.046	1.003	.000	.002
939821616976287104	092	1.054	093	1.067	093	1.108	.001	.019
2924378502398307840	-1.893	1.098	-1.833	4.629	-1.892	.917	.023	.103
6608946489396474752	-2.875	1.161	-2.818	2.152	-2.845	.456	.042	.154
52952724810126208	553	.252	554	.323	553	.205	.060	.086
3130033734235815424	618	.306	613	.301	620	.299	.116	.096
969867803725057920	482	.578	484	.590	484	.576	.057	.102
365942724131566208	.619	.834	.615	.913	.619	.829	.089	.182

Таблица 3. Параметры сближения звезд с Солнечной системой

Примечание. (1) — линейный метод, (2) — эпициклический метод, (3) — осесимметричный потенциал.



Рис. 1. Разности параметров сближения вида "метод 1 минус метод 2" (а) и (б), "метод 2 минус метод 3" (в) и (г), "метод 1 минус метод 3" (д) и (е).

Отметим, что значения параметров сближения, найденные нами первым и третьим методом, находятся в согласии с аналогичными величинами, полученными в работе Байлера-Джонса и др. (2018). Это мы установили по 26 общим звездам. Для этого были вычислены разности параметров вида "метод 1 минус Байлер-Джонс" "метод 3 минус Байлер-Джонс". Результаты даны в табл. 4. Наша модель потенциала отличается от модели Байлера-Джонса (2015) выражением для гало (7). Кроме того, для совпадающих выражений гало и диска отличающиеся значения параметров (табл. 1). Тем не менее, разности "метод 3 минус Байлер-Джонс", как Δt_{min} , так и Δd_{\min} малы. Исключение составляют 3–4 звезды, например, Gaia DR2 3458393840965496960. Есть и пример существенного уменьшения разностей Δd_{\min} в случае применения третьего метода по сравнению с первым методом — звезда Gaia DR2 6608946489396474752.

Гистограммы, построенные по разностям параметров сближения вида "метод 1 минус Байлер-Джонс" и "метод 3 минус Байлер-Джонс", даны на рис. 2. Для разностей вида "метод 1 минус Байлер-Джонс" получены следующие значения среднего и его ошибки: $\overline{\Delta t_{\min}} = 0.002 \pm 0.066$ млн лет и $\overline{\Delta d_{\min}} = 0.162 \pm 0.141$ пк. Для разностей вида "метод 3 минус Байлер-Джонс" получены следующие



Рис. 2. Разности параметров сближения вида "метод 1 минус Байлер-Джонс" (а) и (б), "метод 3 минус Байлер-Джонс" (в) и (г).

значения среднего и его ошибки: $\overline{\Delta t_{\min}} = 0.069 \pm \pm 0.070$ млн лет и $\overline{\Delta d_{\min}} = 0.103 \pm 0.124$ пк. Здесь при оценке $\overline{\Delta t_{\min}}$ и ее дисперсии три больших "оскока" были отброшены. В целом можем заключить, что наш метод 3 немного лучше согласуется с подходом Байлера-Джонса по сравнению с линейным, а именно:

1. Из табл. З видно, что для звезды ALS 9243 имеется хорошее согласие между тремя методами в определении момента сближения $t_{\rm min} \sim -2.3$ млн лет. Плохое согласие с другими методами имеет эпициклический подход в оценке расстояния $d_{\rm min}$. В целом можем подтвердить вывод Высочаньской и др. (2020) о том, что звезда ALS 9243 является интересным кандидатом на очень тесные сближения с Солнечной системой. Фактически она является кандидатом на пролет в прошлом через значительную часть облака Оорта.

2. В работе Дупуя и др. (2019) для звезды WISE J072003.20-084651.2AB на основе линейного метода были получены следующие оценки параметров сближения $t_{\rm min} = -0.081 \pm 0.001$ млн лет и $d_{\rm min} = 0.333 \pm 0.010$ пк. Наш третий метод дает близкие значения $t_{\rm min} = -0.083 \pm 0.001$ млн лет и $d_{\rm min} = 0.370 \pm 0.012$ пк, а линейным методом, как видно из табл. 3, мы получили параметры, практически совпадающие со значениями Дупуя и др. (2009).

3. В работе Дармы и др. (2019) для звезды Gaia DR2 52952724810126208 (там обозначена как ID 298) получены оценки $t_{\min} = -0.48 \pm 0.05$ млн лет и $d_{\min} = 0.58 \pm 0.11$ пк путем интегрирования орбит в осесимметричном потенциале. Согласно нашему решению, найденному третьим методом, имеем $t_{\min} = -0.553 \pm 0.060$ млн лет и $d_{\min} = 0.205 \pm 0.086$ пк. Таким образом, эти результаты находятся между собой в хорошем согласии. Значение лучевой скорости этой звезды взято из каталога Gaia DR2, где для этой звезды также указаны $T_{\rm eff} = 6500^{\circ}$ K и $\log g = 3.5$ см/с². А в каталоге LAMOST DR4 (Луо и др., 2018) указан ее спектральный класс F0.

Для звезды Gaia DR2 3130033734235815424 (там обозначена как ID 291) Дарма и др. (2019) нашли $t_{\min} = 0.49 \pm 0.05$ млн лет и $d_{\min} = 1.56 \pm \pm 0.21$ пк. Наш третий метод, в согласии с линейным, дает совершенно другой результат $t_{\min} = -0.620 \pm 0.116$ млн лет и $d_{\min} = 0.299 \pm 0.096$ пк. Здесь видим плохое согласие с результатами работы Дармы и др. (2019). По-видимому, в работе Дармы и др. (2019) даны ошибочные значения параметров сближения для этой звезды.

Отметим, что значение ее лучевой скорости взято из каталога LAMOST DR4 (Луо и др., 2018).

БОБЫЛЕВ, БАЙҚОВА

T

Gaia DR2/alternative	$\Delta t_{ m min}$, млн лет	$\Delta d_{ m min}$, пк	$\Delta t_{ m min}$, млн лет	$\Delta d_{ m min}$, пк	
Gala Di(2) alternative	(1)-Б	Д	(3)-БД		
GJ 710	.095	029	.100	036	
955098506408767360	.064	.042	.060	027	
5700273723303646464	.169	093	.168	032	
2946037094755244800	.127	.129	.116	126	
5571232118090082816	020	.132	020	026	
154460050601558656	.049	.120	.050	104	
4071528700531704704	.178	.160	.179	.164	
4472507190884080000	.642	.220	.644	.117	
3376241909848155520	.055	.205	.054	.141	
1791617849154434688	016	.059	016	.096	
510911618569239040	010	.208	010	.052	
4265426029901799552	.016	.220	.014	.228	
4252068750338781824	.478	.300	.470	.300	
5261593808165974784	004	.056	004	.042	
1949388868571283200	.006	.181	.005	.108	
3105694081553243008	.060	.216	.059	.195	
3996137902634436480	.011	.275	.012	.254	
3260079227925564160	.041	.025	.041	.019	
5231593594752514304	002	.035	003	.006	
3458393840965496960	.543	.476	.541	.428	
3972130276695660288	.007	.057	.007	.037	
2926732831673735168	027	.105	027	.150	
6724929671747826816	.085	.420	.087	.357	
939821616976287104	001	.080	002	.119	
2924378502398307840	013	.294	012	.114	
6608946489396474752	049	.860	021	.155	

Таблица 4. Разности параметров вида "метод 1 минус Байлер-Джонс" и "метод 3 минус Байлер-Джонс"

Τ

Τ

Раньше значение лучевой скорости не было известно, поэтому звезда представляет большой интерес для нашей задачи. Там также для этой звезды указаны следующие параметры: спектральный класс F0, $T_{\rm eff} = 7150^{\circ} K$, $\log g = 3.948 \, {\rm cm/c^2}$.

Можем заключить, что две звезды спектрального класса F0 Gaia DR2 52952724810126208 и Gaia DR2 3130033734235815424 представляют большой интерес в качестве кандидатов на тесные сближения с Солнечной системой. Каждая из них обладает значительной массой, поэтому их пролет через облако Оорта мог вызвать заметные возмущения кометного облака.

Параметры сближения других общих звезд не отличаются хорошим согласием. Мы больше доверяем своим результатам. А расхождения, повидимому, связаны с ошибками или опечатками в работе Дармы и др. (2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена выборка из 36 кандидатов на тесные (менее 1 пк) сближения с Солнечной системой. Параметры сближения этих звезд вычислены с использованием (1) линейного и (2) эпициклического методов, а также с помощью (3) интегрирования орбит в осесимметричном потенциале. Сделан вывод о том, что эпициклический метод неплохо работает только на интервале времени, не превышающем ±1 млн лет. Значения же параметров, найденные методами 1 и 3, находятся между собой в очень хорошем согласии. Сделан вывод о том, что в задаче поиска звездных сближений на первом, поисковом этапе, можно применять простой линейный метод, а на втором, более детальном, можно применять более сложный метод, основанный на интегрировании звездных орбит в потенциале.

Подтвержден вывод Высочаньской и др. (2020) о том, что звезда ALS 9243 является интересным кандидатом на очень тесные сближения с Солнечной системой. На основе третьего метода мы нашли следующие параметры: $t_{\min} = -2.37 \pm 0.52$ млн лет и $d_{\min} = 0.21 \pm 0.80$ пк.

Представляют интерес параметры сближения у двух звезд из списка Дармы и др. (2019). Так, для звезды Gaia DR2 52952724810126208 на основе третьего метода, в согласии с линейным, найдены следующие оценки: $t_{\min} = -0.55 \pm 0.06$ млн лет и $d_{\min} = 0.21 \pm 0.09$ пк, а для звезды Gaia DR2 3130033734235815424 впервые получены $t_{\min} = -0.62 \pm 0.12$ млн лет и $d_{\min} = 0.30 \pm 0.10$ пк.

В целом показано, что имеется 15 кандидатов на сближение с Солнечной системой до расстояний менее 0.5 пк, т.е. кандидатов на прохождение через облако Оорта. Рекордсменом, по-прежнему, остается звезда GJ 710. Для нее на основе, например, третьего метода найдены следующие оценки параметров сближения: $t_{\min} = 1.320 \pm 0.040$ млн лет и $d_{\min} = 0.016 \pm 0.009$ пк.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон Э., Фрэнсис Ч., Письма в Астрон. журн. 38, 374 (2012) [Е. Anderson, et al., Astron. Lett. 38, 331 (2012)].
- 2. Байлер-Джонс (С.А.L. Bailer-Jones), Astron. Astrophys. **575**, 35 (2015).
- Байлер-Джонс (С.А.L. Bailer-Jones), Astron. Astrophys. 609, 8 (2018).
- 4. Байлер-Джонс и др. (C.A.L. Bailer-Jones, J. Rybizki, R. Andrae, and M. Fouesneau), Astron. Astrophys. **616**, 37 (2018).
- Берский, Дыбжиньский (F. Berski and P.A. Dybczyński), Astron. Astrophys. 595, L10 (2016).
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. 36, 230 (2010а). [V.V. Bobylev, Astron. Lett. 36, 220 (2010а)].
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. 36, 862 (2010b). [V.V. Bobylev, Astron. Lett. 36, 816 (2010b)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 42, 3 (2016а) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 42, 1 (2016а)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 42, 3 (20166) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 42, 1 (2016b)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 43, 616 (2017) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 43, 559 (2017)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 44, 739 (2018) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 44, 676 (2018)].
- 12. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
- Высочаньска и др. (R. Wysoczańska, P.A. Dybczyński, and M. Polińska), arXiv: 2003.02069 (2020).
- Гарсиа-Санчес и др. (J. Garcia-Sánchez, R.A. Preston, D.L. Jones, P.R. Weissman, J.-F. Lestrade, D.W. Latham, and R.P. Stefanik), Astron. J. 117, 1042 (1999).
- Гарсиа-Санчес и др. (J. Garcia-Sánchez, P.R. Weissman, R.A. Preston, D.L. Jones, J.-F. Lestrade, D.W. Latham, R.P. Stefanik, and J.M. Paredes), Astron. Astrophys. **379**, 634 (2001).

- 16. Дарма и др. (R. Darma, W. Hidayat, and M.I. Arifyanto), J. Phys.: Conf. Ser. **1245**, 012028 (2019).
- 17. Дыбжиньский (P.A. Dybczyński), Astron. Astrophys. **396**, 283 (2002).
- Дыбжиньский (P.A. Dybczyński), Astron. Astrophys. 441, 783 (2005).
- 19. Дыбжиньский, Берский (P.A. Dybczyński and F. Berski), MNRAS **449**, 2459 (2015).
- 20. Дупуй и др. (Т.J. Dupuy, M.C. Liu, W.M.J. Best, A W. Mann, M.A. Tucker, Z. Zhang, I. Baraffe, G. Chabrier et al.), Astron. J. **158**, 174 (2019).
- 21. Линдблад (B. Lindblad), Arkiv för Mat., Astron., och Fysik, Bd. **20**, A, No 17 (1927).
- Линдегрен и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, U. Lammers, U. Bastian, J. Hernandez, S. Klioner, D. Hobbs, A. Bombrun, D. Michalik, et al.), Astron. Astrophys. 595, A4 (2016).
- 23. Линдегрен и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmuller, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 2 (2018).
- 24. Луо и др. (A.-L. Luo, Y.-H. Zhao, G. Zhao, et al.), VizieR On-line Data Catalog: V/153 (2018).
- 25. Лутц, Келкер (T.E. Lutz and D.H. Kelker), PASP **85**, 573 (1973).
- Мартинес-Барбоса и др. (С.А. Martinez-Barbosa, L. Jýlková, S. Portegies Zwart, and A.G.A. Brown), MNRAS 464, 2290 (2017).
- 27. Миямото, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), Publ. Astron. Soc. Japan 27, 533 (1975).
- 28. Мэтьюс (R.A.J. Matthews), Royal Astron. Soc. Quart. Jorn. **35**, 1 (1994).
- Мюлляри, Орлов (A.A. Mülläri and V.V. Orlov), Earth, Moon, and Planets, 72 (Kluwer, Netherlands, 1996), p. 19.

- 30. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
- 31. Оорт (J.H. Oort), Bull. Astron. Inst. Netherland 11, No 408, 91 (1950).
- Прусти и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, et al.), Astron. Astrophys. 595, A1 (2016).
- Ревина (I.A. Revina), Analysis of motion of celestial bodies and estimation of accuracy of their observations (Latvian University, Riga, 1988), p. 121.
- 34. Торрес и др. (S. Torres, M.X. Cai, A.G.A. Brown, and S. Portegies Zwart), Astron. Astrophys. **629**, 139 (2019).
- 35. Фенг, Байлер-Джонс (F. Feng and C.A.L. Bailer-Jones), MNRAS **454**, 3267 (2015).
- 36. Фуенте Маркос и Фуенте Маркос (R. de la Fuente Marcos and C. de la Fuente Marcos), Res. Not. Am. Astron. Soc. **2**, 30 (2018).
- 37. Фухсидр. (B. Fuchs, D. Breitschwerdt, M.A. Avilez, C. Dettbarn, and C. Flynn), MNRAS **373**, 993 (2006).
- 38. Холмберг, Флинн (J. Holmberg and C. Flinn), MNRAS **352**, 440 (2004).
- 39. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), MNRAS **403**, 1829 (2010).
- 40. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).