

УДК 524.45

© В. А. Марсаков, М. Л. Гожа

**ПРИРОДА РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ГАЛАКТИКЕ <sup>1</sup>**

На основе авторского компилятивного каталога фундаментальных астрофизических параметров для 593 рассеянных скоплений исследованы связи между химическим составом, пространственным положением, элементами галактических орбит и возрастом. Найдено резкое различие химических и кинематических свойств скоплений и звезд поля в тонком диске Галактики. Продемонстрирована неоднородность населения рассеянных скоплений, свидетельствующая о разнообразии причин их образования, в том числе и под воздействием внегалактических объектов.

*Ключевые слова:* рассеянные звездные скопления, цефеиды поля, химический состав, кинематика, Галактика (Млечный Путь).

**Введение**

Рассеянные звездные скопления традиционно считаются типичными представителями тонкого диска Галактики и используются для анализа различных аспектов, относящихся к структуре, химическому составу, динамике, формированию и эволюции этой подсистемы. При этом полагается, что поскольку такие параметры, как расстояния, металличности и возрасты, определяются для скоплений значительно точнее, чем для одиночных звезд поля, постольку рассеянные скопления лучше отслеживают свойства галактического диска. Однако в последнее время рассеянные скопления перестают считать однородным населением, то есть образовавшимися исключительно из межзвездного вещества, генетически связанного с предыдущими поколениями звезд тонкого диска. Многочисленные исследования указывают на отсутствие соответствия между свойствами рассеянных скоплений и звезд поля тонкого диска. Благодаря появлению новых обширных каталогов высокоточных данных Ванде Путте и др. [1], исследуя эксцентриситеты галактических орбит ( $e$ ) и максимальные удаления точек орбит от галактической плоскости ( $Z_{max}$ ) для 481 скопления, а также металличности для полутора сотен скоплений, выявили около десятка объектов «внегалактического происхождения в результате взаимодействия высокоскоростных облаков с газовым диском». Таковыми они посчитали скопления, у которых был аномально велик для объектов тонкого диска хотя бы один из двух исследуемых элементов орбит и низкая металличность ( $[Fe/H] < -0.2$ ). Остальные малометаллические рассеянные скопления, не обнаружившие отличий элементов орбит от средних для основной массы скоплений, они посчитали возникшими из упавшего из внешних частей Галактики (или захваченного из разрушенных галактик-спутников) межзвездного вещества. Кроме того, несколько скоплений с металличностью, близкой к солнечной, но большими эксцентриситетами или  $Z_{max}$  они полагают возникшими в результате «взаимодействия шаровых скоплений с диском». Возможность образования рассеянных скоплений с разными орбитами и металличностями в результате перечисленных механизмов, инициирующих звездообразование, продемонстрирована в нескольких работах и теоретическим моделированием.

Настоящие исследования посвящены комплексному статистическому анализу взаимосвязей между физическими, химическими и пространственно-кинематическими характеристиками рассеянных скоплений и близких звезд поля с целью выявления скоплений различной природы, а также характерных параметров и закономерностей в различных населенных рассеянных звездных скоплениях Галактики.

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (код проекта 11-02-00621а), частичную поддержку оказало также Министерство образования и науки РФ (проекты П 685 и № 14.А18.21.0787).

## § 1. Исходные данные

В качестве основного источника данных рассеянных скоплений мы взяли последнюю версию 3.1 (ноябрь 2010 г.) компилятивного каталога [2]. В нем представлены данные для 2140 скоплений, в том числе для 1309 определены расстояния, а для 485 скоплений известны одновременно и собственные движения, и лучевые скорости. К этим данным мы добавили элементы галактических орбит из работ [1, 3, 4]. Средняя относительная ошибка расстояний для всех скоплений, как находят в [3], равна  $\approx 20\%$ . Мы посчитали среднюю величину ошибки компонентов скоростей, используя данные работы [1], и получили ее равной  $\approx 10.0$  км/с. Анализ приведенных в исходных работах ошибок определения элементов орбит рассеянных скоплений показал, что они главным образом зависят от ошибок определения расстояний до них. Средняя ошибка апогалактических радиусов орбит и ее дисперсия оказались равными:  $\epsilon(R_a)$  и  $\sigma(\epsilon) = (0.35$  и  $0.21)$  кпк. Соответствующие величины для перигалактических радиусов орбит —  $(0.31$  и  $0.06)$  кпк, для максимальных удалений от галактической плоскости —  $(0.09$  и  $0.04)$  кпк и для эксцентриситетов —  $(0.02$  и  $0.01)$ . Согласно оценкам [5], обычно ошибки в определении возрастов скоплений в логарифмической шкале в среднем получают равными  $\epsilon_{lgt} \approx 0.20$ – $0.25$ . В используемой же нами последней версии каталога возрасты определены несколько точнее.

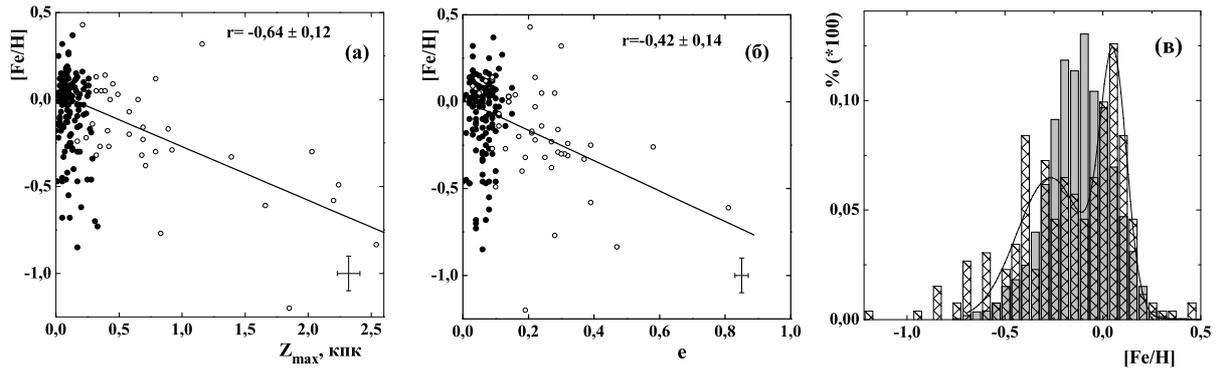
Наибольшее количество определений металличности приведено в работах [2] — 179 и [6] — 188. Определения  $[Fe/H]$  для 110 скоплений приведены в обеих работах и неплохо коррелируют между собой. Полагая спектроскопические определения металличности более надежными, мы включили в свою таблицу в первую очередь спектроскопические значения из [2], во вторую — усредненные фотометрические значения из [6], а затем все значения, попавшие только в один из списков. Всего в нашем списке оказалось 264 скопления с известной металличностью. Вычисленная нами по приведенным в исходных работах неопределенностям средняя ошибка определения металличности составляет  $\epsilon[Fe/H] \approx 0.10$ . Нам удалось найти около 250 определений относительных содержания трех альфа-элементов — магния, кальция и кремния — для 59 скоплений в 47 источниках, опубликованных с 1981 по 2011 год. При этом наиболее вероятное количество звезд в скоплении, для которых определены содержания, оказалось равным 3, тогда как по одной звезде содержания определены только для двух скоплений. Средняя ошибка относительного содержания альфа-элементов, вычисленная по декларируемым в источниках неопределенностям индивидуальных определений, равна  $\epsilon[\alpha/Fe] \approx 0,07 \pm 0.01$ .

Для настоящих исследований мы составили каталог, содержащий 500 скоплений с вычисленными элементами орбит и 264 скопления с найденными металличностями. Поскольку эти списки частично перекрываются, итоговый каталог содержит 593 скопления.

## § 2. Неоднородность населения рассеянных скоплений

Обычно полагается, что рассеянные звездные скопления рождаются из межзвездного вещества, распределенного тонким слоем в галактической плоскости. Шкала высоты этого слоя в окрестностях Солнца, по разным оценкам, находится в диапазоне (50–75) пк. Поскольку эта материя движется вокруг галактического центра практически по круговым орбитам, следует ожидать, что и рассеянные скопления будут им следовать. Однако ряд скоплений находится на очень вытянутых орбитах, нередко высоко поднимающихся над галактической плоскостью, что свидетельствует об их «необычном» происхождении [1]. Для того чтобы отделить друг от друга скопления разной природы, предположим, что только скопления с круговыми низкими орбитами образовались из межзвездного вещества тонкого диска Галактики под действием, например, спиральных волн плотности, формирующих ударную волну, движущуюся параллельно галактической плоскости. Тогда как скопления с вытянутыми высокими орбитами образовались в результате одновременного воздействия на это вещество и других механизмов.

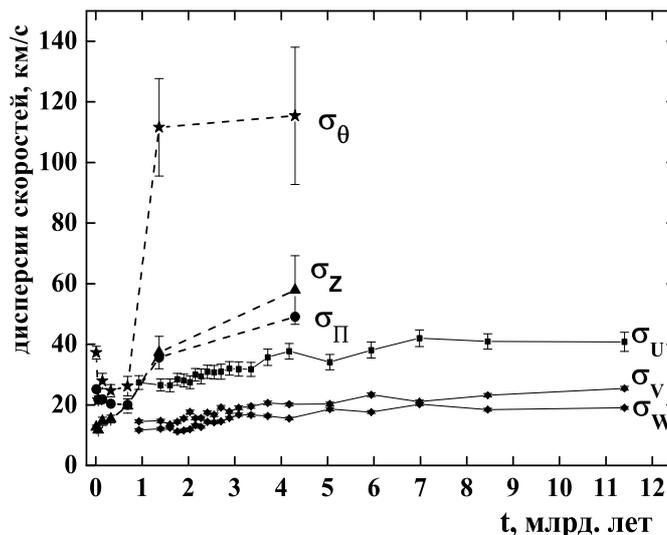
Звезды тонкого диска, как известно, характеризуются малыми остаточными скоростями относительно локального центроида и практически круговыми орбитами, все точки которых невысоко поднимаются над галактической плоскостью. Рассеянные скопления удается довольно уверенно стратифицировать по подсистемам Галактики по элементам галактических ор-



**Рис. 1.** Зависимость металличности скоплений от максимального удаления точек орбит от галактической плоскости (а) и от эксцентриситетов орбит (б); распределение по металличности рассеянных скоплений (заштриховано) и звезд поля (серый цвет) тонкого диска (в); закрытые кружки — скопления, удовлетворяющие критерию  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 0.35$ , открытые кружки — остальные скопления каталога, линии — прямые регрессии для открытых кружков, указаны коэффициенты корреляции; кривая на панели (в) — аппроксимация распределения рассеянных скоплений по  $[Fe/H]$  суммой двух нормалей

бит. Очень удобным оказался показатель, предложенный Граттоном и приведенный в работе [7] —  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2}$ , где  $Z_{max}$  измеряется в килопарсеках. Функция распределения скоплений по этому параметру демонстрирует резкое уменьшение плотности вероятности до величины  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} \approx 0.35$ , а при дальнейшем увеличении показателя вплоть до величин  $> 2$  плотность вероятности падает значительно медленнее. Более 80% рассеянных скоплений имеют меньшие значения этого параметра, и мы полагаем, что только они должны отражать типичные для объектов галактического диска кинематические свойства. И действительно, проверка показала, что шкала высоты у этой подвыборки скоплений примерно такая же, как и у межзвездной среды в окрестностях Солнца ( $Z_0 = (65 \pm 5)$  пк). Условия отбора предполагают, что скопления этой подгруппы образовались из кинематически довольно холодной межзвездной среды. Однако таким ограничениям удовлетворяют как все звезды Пояса Гулда, так и сравнительно молодого звездного потока Гиады–Плеяды, который, как полагают, возник в результате возмущения межзвездной среды спиральными волнами. Другими словами, критерий  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 0.35$  оказывается вполне соответствующим молодому звездному населению тонкого диска, и скопления, удовлетворяющие ему, мы полагаем типичными для галактического диска. Поэтому представляется естественным предположить, что все скопления этой кинематически холодной группы образовались из вещества, прошедшего переработку исключительно в генетически связанных звездах Галактики, то есть из вещества единого протогалактического облака. Однако из рисунков 1, а и 1, б следует, что это не совсем так. На этих рисунках приведены диаграммы « $Z_{max} - [Fe/H]$ » и « $e - [Fe/H]$ » соответственно. Заполненными кружками выделены «кинематически холодные» скопления, удовлетворяющие критерию  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 0.35$ . Видно, что на обеих панелях такие скопления заполняют широкий диапазон по металличности, то есть получается, что даже среди скоплений с плоскими круговыми орбитами имеются такие, низкие металличности которых нехарактерны для локальных звезд поля тонкого диска.

На рисунке 1, в приведена функция металличности для 264 скоплений. Сплошная кривая линия — аппроксимация гистограммы суммой двух гауссиан. Видно, что и по металличности население рассеянных скоплений оказывается неоднородным и его можно разделить на две группы значением  $[Fe/H] \approx -0.12$ . Для сравнения на той же панели нанесена гистограмма и для близких звезд поля тонкого диска с фотометрическими металличностями из работы [8]. Видно, что общий вид функции металличности скоплений и звезд поля различается. В частности, диапазон металличности у скоплений в отрицательную сторону несколько больше. Однако главный максимум на распределении по металличности у скоплений тем не менее правее и на-



**Рис. 2.** Зависимости от возраста дисперсий  $\sigma_{\pi}$ ,  $\sigma_{\theta}$ ,  $\sigma_z$  компонент скоростей скоплений: штриховые ломаные линии — ход дисперсий для скоплений нашего каталога, сплошные тонкие ломаные — для звезд поля тонкого диска; бары — ошибки определения дисперсий

ходится в окрестности  $[Fe/H] = +0.05$ , тогда как у звезд поля  $[Fe/H] = -0.12$  (то есть там, где у скоплений наблюдается провал). Но у скоплений, как видим, наблюдается и второй, менее металличный максимум в окрестности  $[Fe/H] = -0.27$ . Таким образом, население рассеянных скоплений в Галактике демонстрирует крайнюю неоднородность не только по кинематике, но и по металличности.

### § 3. Зависимость параметров рассеянных скоплений от возраста

**Дисперсии пространственных скоростей.** Известно, что дисперсии скоростей у звезд поля галактического диска увеличиваются с возрастом. Причем для всех компонент остаточной скорости звезд относительно локального центроида эта зависимость хорошо описывается степенным законом вида  $\sigma_v \sim t^{0.25}$  (см., например, [9]). Наиболее вероятной причиной такого увеличения считается «разогревание» звезд дисковой подсистемы спиральными волнами плотности. Оценим степень зависимости от возраста дисперсий скоростей более массивных объектов, каковыми являются рассеянные скопления. В отличие от близких звезд для анализа свойств столь удаленных от Солнца объектов, как рассеянные скопления, корректнее использовать компоненты пространственных скоростей в цилиндрических координатах.

На рисунке 2 приведены зависимости от возраста компонентов пространственных скоростей звезд поля из [9] и наших скоплений. Видно, что дисперсии скоростей скоплений быстро увеличиваются с возрастом, достигая для наиболее старых скоплений очень больших величин, тогда как у значительно более старых близких звезд поля тонкого диска предельные значения дисперсий существенно меньше. Обычно полагают, что рост дисперсии скоростей с возрастом у скоплений вызван или эффектами релаксации (см., например, [3]), или уменьшающейся со временем степенью турбулизированности межзвездной среды в тонком диске. Однако, как показал анализ зависимостей от возраста всех компонентов пространственных скоростей скоплений, к увеличению их дисперсий приводит прогрессивное уменьшение количества скоплений с компонентами скоростей, имеющих наиболее вероятные значения (то есть вблизи максимумов на их функциях распределения). Причиной этого является, скорее всего, интенсивное разрушение скоплений с орбитами, близкими к круговым, в результате длительного нахождения их вблизи массивных облаков межзвездного вещества и спиральных волн плотности, концентрирующихся в галактической плоскости.

**Металличности.** В работе [10] было показано, что на диаграмме «возраст–металличность»

близкие звезды поля тонкого диска и рассеянные скопления занимают слабо перекрывающиеся области и, в отличие от звезд поля, среди скоплений любого возраста наблюдается значительная доля объектов с металличностью в несколько раз меньше солнечной. Проверим справедливость этого результата по современным данным. Поскольку находящиеся в настоящее время в окрестностях Солнца звезды родились на разных галактоцентрических расстояниях, они отражают химические свойства звезд поля тонкого диска в довольно широком диапазоне расстояний. Наиболее вероятными местами их рождения чаще всего полагают или средние, или апогалактические радиусы их орбит. Диапазон средних радиусов орбит близких звезд поля нашей выборки (6–10) кпк, а апогалактические радиусы у некоторых из них достигают 13 кпк, то есть сравнимы с расстояниями до исследуемых рассеянных скоплений. Поэтому мы имеем возможность сравнивать химические свойства близких звезд и далеко находящихся от Солнца рассеянных скоплений. На рисунке 3, *a* приведены распределения на плоскости «возраст–металличность» рассеянных скоплений нашего каталога и близких (в пределах 70 пк от Солнца) *F–G*-карликов поля тонкого диска, отобранных в эту подсистему из каталога [11] по кинематическим критериям работы [9]. Сплошная кривая на диаграмме — аппроксимация зависимости металличности звезд поля от возраста полиномом третьей степени (подробное обоснование и интерпретацию кривой см. в [8]). Кривая демонстрирует, что последние 4–5 миллиардов лет металличность в тонком диске заметно возросла, тогда как на начальных этапах эволюции этой подсистемы средняя металличность в пределах ошибок не зависела от возраста. Ломаной линией нанесена нижняя пятипроцентная огибающая для звезд поля, то есть при любом возрасте ниже ее на диаграмме находится примерно 5% звезд. Эта ломаная практически параллельна средней зависимости. Как видно из рисунка 3, *a*, значительная часть скоплений (открытые кружки) занимает на диаграмме верхний левый угол, то есть они являются молодыми и богатыми металлами. При этом возрасты трех самых старых скоплений и старейших звезд поля тонкого диска сравнимы по величине. Из рисунка также видно, что при любом возрасте значительная доля скоплений занимает на диаграмме область, почти полностью свободную от звезд поля. Причем, как видим, даже в настоящее время образуются скопления с металличностью в диапазоне  $[Fe/H] = (-0.4 \div -1.0)$ , характерном, скорее, для звезд толстого диска (см., например, [12]). (Нижнюю огибающую на рисунке мы продлили в сторону малого возраста, основываясь на анализе металличности молодых (<100 млн лет) звезд — цефеид.) Мы полагаем, что именно скопления, лежащие на диаграмме «возраст–металличность» ниже ломаной линии, а не скопления с фиксированным пределом  $[Fe/H] < -0.2$ , как принято в работе [1], образовались из межзвездной среды с заметной примесью вещества с иной историей обогащения тяжелыми элементами. Из 264 скоплений с известными возрастными и металличностями в нашем каталоге нашлось 90 скоплений, удовлетворяющих этому критерию.

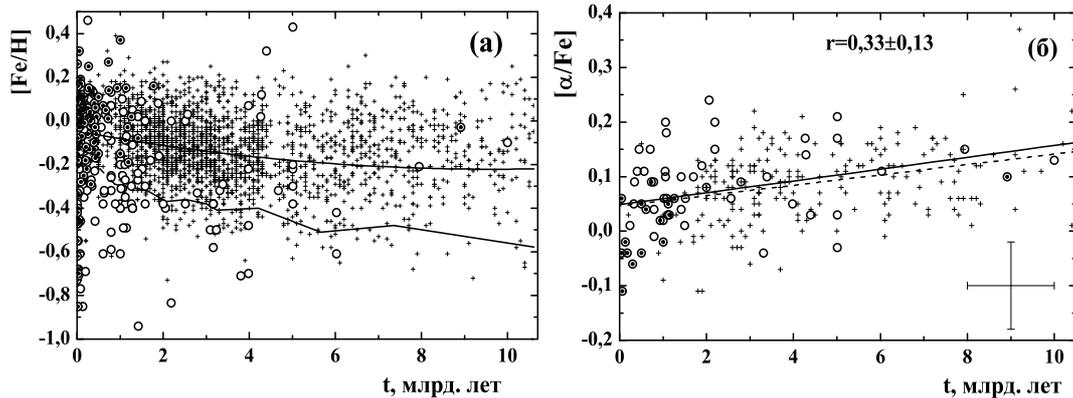
**Относительные содержания альфа-элементов.** Для анализа различий химического состава между скоплениями мы использовали три наиболее надежно определяемых альфа-элемента — магний, кальций и кремний. На диаграмме «возраст– $[\alpha/Fe]$ » (рис. 3, *б*) открытыми кружками нанесены наши рассеянные скопления, а крестиками — *F–G*-звезды поля тонкого диска из каталога [13], в который дополнительно к приведенным в нем содержаниям магния добавлены еще кальций и кремний. Налицо заметные различия в распределениях на диаграмме звезд поля и скоплений, хотя и те и другие объекты оккупируют примерно один и тот же диапазон по  $[\alpha/Fe]$ . Звезды поля, как видим, демонстрируют хорошо прослеживаемую последовательность зависимости относительных содержаний альфа-элементов от возраста. Коэффициент корреляции для рассеянных скоплений в пределах ошибок несколько отличается от нуля, но при этом, как видим, самые высокие отношения  $[\alpha/Fe] > 0.15$  наблюдаются у скоплений моложе 4 млрд лет, тогда как у более старых скоплений эти отношения значительно ниже и все они лежат в полосе, занимаемой звездами поля. Несмотря на то что на диаграмме всего 7 скоплений с такими завышенными относительными содержаниями альфа-элементов, они составляют заметную долю от всех скоплений с известными определениями  $[\alpha/Fe]$ . Поэтому можно предположить, что они вполне могли образоваться из вещества, испытавшего иную историю химической эволюции, чем межзвездное вещество тонкого диска. Из рисунка также

видно, что все «кинематически холодные» скопления (кроме очень старого Col 261) лежат на диаграмме в области, являющейся как бы продолжением последовательности  $F-G$ -звезд поля в сторону меньшего возраста (обозначены на диаграмме точками внутри открытых кружков).

#### § 4. Связь между химическим составом и положением в Галактике

**Радиальный градиент металличности.** Рассмотрим теперь, как изменяется средняя металличность скоплений с удалением от галактического центра, то есть проследим радиальный градиент металличности. На рисунке 4, *a* приведена диаграмма «галактоцентрическое расстояние ( $R_G$ ) – металличность» для всех скоплений каталога. Штриховая линия, построенная по всем наблюдаемым рассеянным скоплениям, является прямой регрессией и дает величину градиента  $d[Fe/H]/dR_G = (-0,043 \pm 0.006)$  кпк $^{-1}$  ( $r = -0,40 \pm 0,05$ ,  $P_N \ll 1\%$ ), которая согласуется с определениями других авторов. Большими кружками обозначены средние значения металличности в узких диапазонах по  $R_G$ , а барами — их среднеквадратичные отклонения. Соединяющая эти точки ломаная кривая демонстрирует более детально, чем прямая регрессия, ход изменения металличности с удалением от галактического центра. Видно, что при переходе через  $R_G \approx 9.5$  кпк средняя металличность скачком уменьшается на  $\Delta[Fe/H] \approx -0.25$ , тогда как до и после этого расстояния металличность в пределах ошибок можно считать неизменной. Точками внутри кружков выделены скопления, подчиняющиеся условию  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 0.35$ , то есть «кинематически холодные» скопления. Видно, что ступенчатый характер зависимости «галактоцентрическое расстояние – металличность» возникает из-за того, что большая часть таких скоплений оказывается металличной ( $[Fe/H] > -0.2$ ) и лежит к центру Галактики ближе 9 кпк (см. сгущение на диаграмме), тогда как далекие скопления оказываются в основном менее металличными. (Следует, однако, заметить, что, поскольку все «кинематически холодные» скопления находятся вблизи галактической плоскости, они могут из-за сильного межзвездного поглощения просто не идентифицироваться за пределами этого радиуса.) Для сравнения крестиками на диаграмме нанесены далеко видимые молодые звезды тонкого диска — цефеиды — из нескольких работ одного коллектива авторов. Из диаграммы видно, что цефеиды поля образуют узкую последовательность и демонстрируют несколько большую, чем скопления, величину радиального градиента:  $(d[Fe/H]/dR_G) = (-0,056 \pm 0.003)$  кпк $^{-1}$ . Однако радиальный градиент у «кинематически холодных» скоплений, лежащих, как и цефеиды, в столь же узком слое вблизи галактической плоскости, оказался за пределами ошибок больше, чем у цефеид:  $d[Fe/H]/dR_G = (-0,10 \pm 0.02)$  кпк $^{-1}$  ( $r = -0,37 \pm 0,08$ ,  $P_N \ll 1\%$ ). Заметим, что практически все рассеянные скопления с возрастом менее 300 млн лет, то есть столь же молодые, как и цефеиды, находятся в пределах  $\approx 11$  кпк от галактического центра. Они демонстрируют практически такую же величину градиента, как и «кинематически холодные» скопления:  $d[Fe/H]/dR_G = (-0,09 \pm 0.02)$  кпк $^{-1}$  ( $r = -0,37 \pm 0,08$ ,  $P_N \ll 1\%$ ). При этом более старые скопления показывают градиент меньше, чем молодые:  $d[Fe/H]/dR_G = (-0,05 \pm 0.01)$  кпк $^{-1}$  ( $r = -0,49 \pm 0,07$ ,  $P_N \ll 1\%$ ). Обратим внимание, что этот результат противоречит обычно получаемому по старым рассеянным скоплениям более высокому значению радиального градиента, чем у молодых (см., например, [14] и ссылки в ней). Высокая величина градиента получается в результате ограничения диапазона галактоцентрических расстояний величиной  $< 12$  кпк, то есть если игнорируется то обстоятельство, что более далекие скопления демонстрируют более высокую металличность, чем скопления, лежащие в диапазоне  $(9 \div 12)$  кпк (см. рис. 4, *a*).

**Вертикальный градиент металличности.** Рассмотрим ситуацию с вертикальным градиентом металличности для тех же объектов. На рис. 4, *b* приведены их диаграммы «расстояние от галактической плоскости (взятые по абсолютной величине) — металличность». Прямая регрессия указывает на наличие сильного отрицательного вертикального градиента металличности у скоплений:  $d[Fe/H]/dz = (-0,17 \pm 0.05)$  кпк $^{-1}$  ( $r = -0.23 \pm 0.06$ ,  $P_N \ll 1\%$ ). Примерно такие же, в пределах ошибок, величины градиентов получаются как у цефеид поля, так и у «кинематически холодных» скоплений (соответствующие регрессии не нанесены). Средняя же линия указывает на наличие скачкообразного уменьшения металличности на  $\Delta[Fe/H] \approx -0.10$  при переходе через  $|z| \approx 180$  пк (хотя скачок здесь значительно меньше по величине, чем в слу-



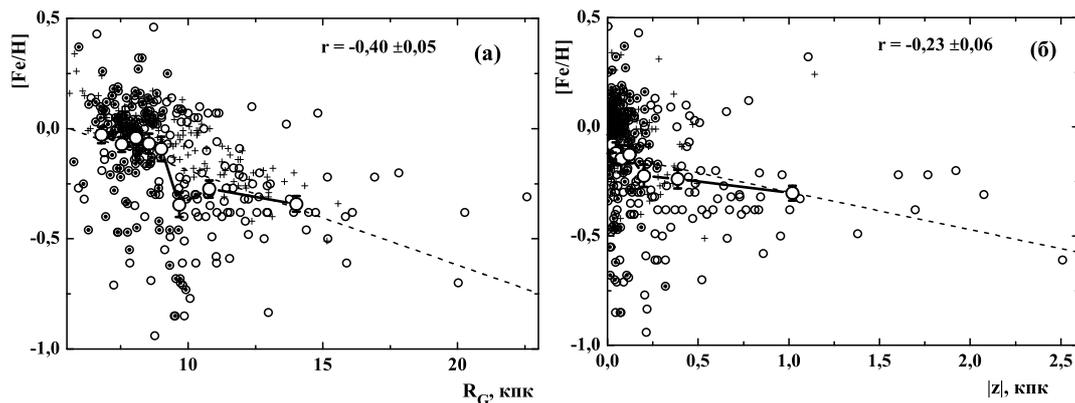
**Рис. 3.** Диаграмма «возраст–металличность» для рассеянных скоплений и звезд поля тонкого диска (а) и диаграмма «возраст –  $[\alpha/Fe]$ » (б): открытые кружки — рассеянные скопления, точки внутри открытых кружков — «кинематически холодные» скопления, крестики — звезды поля тонкого диска; на панели (а) кривая линия — аппроксимация зависимости металличности от возраста звезд поля полиномом третьей степени, ломаная линия — нижняя огибающая для звезд поля; на панели (б) сплошная линия — прямая регрессия для скоплений, штриховая линия — регрессия для звезд поля; указаны бары средних ошибок параметров.

чае радиального градиента, но, как видно из рисунка, проявляется он также за пределами ошибок определения значений средних точек). Как и на соседней диаграмме, здесь явно выделяется сгущение точек ( $[Fe/H] > -0.2$ ,  $|z| < 100$  пк), практически полностью образуемое «кинематически холодными» скоплениями.

Итак, диаграммы « $R_G - [Fe/H]$ » и « $|z| - [Fe/H]$ » демонстрируют одинаковую морфологическую структуру, заключающуюся в наличии на них сгущений металличных точек и скачкообразных уменьшений металличности при переходе от этих сгущений к более далеким расстояниям. Это, скорее всего, свидетельствует, что оба отрицательных градиента металличности обусловлены существованием среди рассеянных скоплений двух типов населений с различающимися металличностями и пространственными распределениями. Проверка показала, что результаты и выводы остаются справедливыми и в случае, если в качестве удалений скоплений от центра и плоскости Галактики использовать не их настоящие местоположения, а максимальные удаления точек их орбит от центра и плоскости Галактики. Напомним, что в работах [14,15] указывается на уменьшение наклона радиального градиента металличности при переходе через 12 кпк, однако мы полагаем, что корректнее всё же говорить о скачке металличности, причем на более близком расстоянии, равном  $\approx 9.5$  кпк. Это следует из того, что, во-первых, аналогичный ступенчатый характер наблюдается и у вертикального градиента металличности, а во-вторых, оба скачка естественно объясняются одной причиной — существованием двух примерно равных по численности населений рассеянных скоплений (см. ниже).

## § 5. Стратификация рассеянных скоплений по населением

Как известно, звезды галактического поля демонстрируют корреляции между пространственным положением, элементами орбит, химическим составом и возрастом. Эти корреляции возникли из-за значительных различий между всеми перечисленными параметрами у четырех подсистем Галактики: тонким диском, толстым диском, собственным гало и аккрецированным гало (см., например, [12, 16, 17]). Причем первые три подсистемы являются генетически связанными, то есть их объекты образовались из межзвездного вещества единого протогалактического облака. Различия параметров между этими подсистемами обусловлены химической и динамической эволюцией межзвездного вещества этого коллапсирующего протооблака. Звезды же четвертой подсистемы родились в карликовых галактиках-спутниках, распавшихся впо-



**Рис. 4.** Диаграмма (а) «галактоцентрическое расстояние – металличность», (б) «расстояние до галактической плоскости – металличность»; обозначения как на рис. 3; штриховые линии — прямые регрессии для скоплений, открытые кружки с барами, соединенные ломаной линией, — средние значения металличности и их ошибки в узких диапазонах по расстояниям

следствии под действием приливных сил Галактики. Эти звезды образовались из вещества, испытавшего отличную от галактической химическую эволюцию [17].

В отличие от звезд поля все рассеянные скопления образовались из межзвездного вещества тонкого галактического диска, и, таким образом, все они изначально состоят (по крайней мере частично) из вещества единого протогалактического облака. Однако описанные выше свойства рассеянных скоплений однозначно указывают на неоднородность этого населения в Галактике. Так, с одной стороны, среди них можно выделить две группы согласно пространственно-кинематическим параметрам. Первая группа — это скопления с орбитами, близкими к круговым и недалеко отходящими от галактической плоскости (как у молодого населения тонкого диска). Тогда как вторая — скопления с весьма вытянутыми и высокими орбитами, характерными для объектов толстого диска и даже гало. А с другой стороны, скопления можно разделить на две группы и по общему содержанию в их звездах тяжелых элементов. Главными предпосылками к такому разделению являются бимодальность их распределения по металличности и их положение на диаграмме «возраст–металличность» выше и ниже нижней огибающей для звезд поля (см. рис. 1, а). Хотя группы по металличности и элементам галактических орбит взаимно перекрываются, но полного соответствия между ними нет, поэтому скопления с проблемным происхождением мы будем выделять независимо по этим двум параметрам. Назовем скопления с низкими круговыми орбитами (то есть удовлетворяющие критерию  $(Z_{max}^2 + 4e^2)^{1/2} < 0.35$ ) и одновременно лежащие на диаграмме «возраст – металличность» выше нижней огибающей для звезд поля галактическими или «тонким диском». И наоборот, скопления с нехарактерной для звезд тонкого диска малой металличностью, а также скопления с вытянутыми высокими орбитами назовем пекулярными. К этой группе мы добавили 31 скопление, для которых не определены элементы орбит, но в настоящее время они находятся на удалении  $|z| > 0.35$  кпк от галактической плоскости, заведомо удовлетворяя используемому выше кинематическому критерию. По принятому определению, в пекулярную группу попадают и скопления, для которых не найдены или элементы орбит, или металличности.

Из 264 рассеянных скоплений с известной металличностью 90 оказались с нехарактерно низкой для звезд тонкого диска величиной  $[Fe/H]$ . При этом 30 таких малометалличных скоплений имеют кинематику как у звезд тонкого диска, тогда как 17 скоплений имеют орбиты, характерные для толстого диска и гало Галактики. У 43 малометалличных скоплений элементов орбит нет, но 13 из них имеют  $|z| > 0.35$  кпк. 27 скоплений с высокой металличностью имеют вытянутые высокие орбиты, и еще 18 лежат далеко от галактической плоскости. Всего в пекулярную группу попадает 182 скопления. Разброс орбитальных параметров среди пеку-

Таблица 1. Характерные параметры трех населений рассеянных скоплений

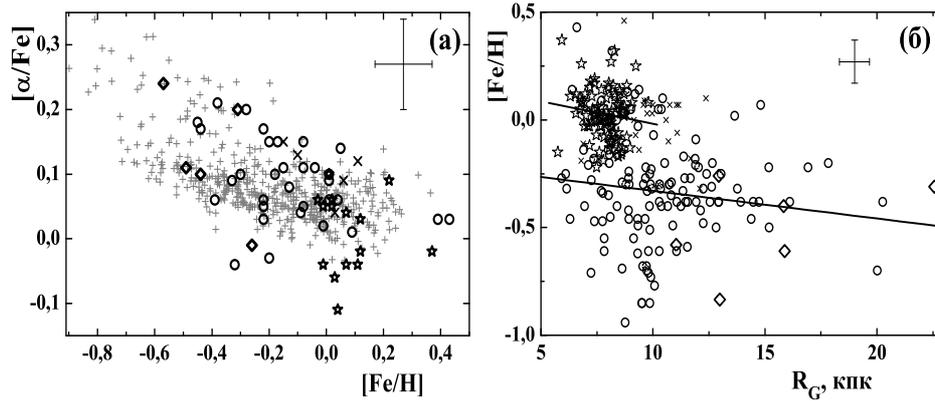
Параметры	Галактические	Пекулярные скопления		Ближние скопления ( $d_{\odot} < 1$ кпк)	
	«тонкий диск»	«толстый диск»	«гало»	«тонкий диск»	«толстый диск»
$\langle [Fe/H] \rangle$	$0.03 \pm 0.01(96)$	$-0.33 \pm 0.02(129)$	$-0.50 \pm 0.09(6)$	$0.03 \pm 0.02(55)$	$-0.36 \pm 0.10(7)$
$\sigma[Fe/H]$	$0.12 \pm 0.01$	$0.26 \pm 0.02$	$0.22 \pm 0.06$	$0.12 \pm 0.01$	$0.27 \pm 0.07$
$\langle [\alpha/Fe] \rangle$	$0.01 \pm 0.01(16)$	$0.09 \pm 0.01(33)$	$0.13 \pm 0.04(5)$	$0.01 \pm 0.02(10)$	$0.06(1)$
$\sigma[\alpha/Fe]$	$0.06 \pm 0.01$	$0.06 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.03$	$0.06 \pm 0.01$	—
$t$ , млрд лет	$0.40 \pm 0.10(95)$	$0.91 \pm 0.11(173)$	$2.55 \pm 0.78(6)$	$0.33 \pm 0.05(54)$	$0.72 \pm 0.38(11)$
$\sigma(t)$ , млрд лет	$0.95 \pm 0.07$	$1.40 \pm 0.08$	$1.90 \pm 0.55$	$0.38 \pm 0.04$	$1.25 \pm 0.27$
$\langle e \rangle$	$0.07 \pm 0.01(96)$	$0.16 \pm 0.01(115)$	$0.46 \pm 0.09(6)$	$0.06 \pm 0.01(55)$	$0.14 \pm 0.03(10)$
$\sigma(e)$	$0.032 \pm 0.002$	$0.11 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.06$	$0.03 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.02$
$\langle Z_{\max} \rangle$ , кпк	$0.11 \pm 0.01(96)$	$0.39 \pm 0.04(115)$	$7.71 \pm 2.72(6)$	$0.10 \pm 0.01(55)$	$0.15 \pm 0.04(10)$
$\sigma(Z_{\max})$ , кпк	$0.07 \pm 0.01$	$0.42 \pm 0.03$	$6.65 \pm 1.92$	$0.06 \pm 0.01$	$0.13 \pm 0.03$
$\langle R_G \rangle$ , кпк	$7.86 \pm 0.08(96)$	$9.97 \pm 0.18(176)$	$15.14 \pm 1.65(6)$	$7.98 \pm 0.06(55)$	$8.01 \pm 0.17(12)$
$\sigma(R_G)$ , кпк	$0.74 \pm 0.05$	$2.45 \pm 0.13$	$4.03 \pm 1.16$	$0.45 \pm 0.04$	$0.60 \pm 0.12$
$Z_0$ , кпк	$0.07 \pm 0.01(99)$	$0.27 \pm 0.03(173)$	—	—	—

лярных скоплений оказался столь велик, что мы выделили в отдельную группу скопления, у которых характеристическая величина  $(Z_{\max}^2 + 4e^2)^{1/2} > 2.3$ , то есть почти на  $3\sigma$  превышает среднее значение для группы пекулярных скоплений. Основная часть пекулярных скоплений составляет группу «толстого диска», тогда как в отдельную группу «гало» были выделены шесть скоплений. При этом оказалось, что одно скопление вообще имеет ретроградное вращение вокруг галактического центра, а это однозначно указывает на внегалактическую природу объекта. Понятно, что разнесение скоплений по подсистемам Галактики чисто условное в том смысле, что эти три группы только оккупируют в пространстве Галактики соответствующие ее одноименным подсистемам области. Но на самом деле все они, конечно же, образовались в разное время в тонком диске главным образом из его межзвездного вещества, получившего примесь вещества с иным химсоставом и дополнительный импульс, который, с одной стороны, привел к звездообразованию, а с другой — придавал начальную скорость образовавшемуся скоплению. В зависимости от природы источника этого импульса орбиты и химический состав скоплений будут различаться. Характерные параметры для населений рассеянных скоплений «тонкого диска», «толстого диска» и «гало» приведены в таблице 1, где в скобках указано число скоплений, по которым параметры определялись.

В таблице 1 нас в первую очередь интересуют не абсолютные значения приведенных параметров, а лишь сравнительные характеристики населений рассеянных скоплений, поскольку некоторые из этих величин могут быть искажены эффектами наблюдательной селекции. Чтобы иметь представление, насколько они влияют на величины средних параметров, мы в двух крайних столбцах приводим соответствующие величины для скоплений «тонкого» и «толстого» дисков, лежащих ближе 1 кпк от Солнца, поскольку в этих пределах селекция минимальна. Принимая во внимание селекцию для далеких скоплений и очень низкую надежность средних значений для близких пекулярных скоплений (из-за их малой численности), мы приводим ниже лишь качественное описание различий. Обратим внимание, что согласно предложенной схеме стратификации в нашем каталоге количество пекулярных рассеянных скоплений получилось более чем в полтора раза больше, чем галактических. Однако столь высокий процент пекулярных скоплений в нашей выборке получился из-за селекции в пользу скоплений, расположенных на высоких галактических широтах, поскольку для них легче определяются расстояния и металличности. Действительно, среди более 2000 уже обнаруженных в оптическом диапазоне рассеянных скоплений подавляющая их доля лежит вблизи галактической плоскости. В итоге реальная доля пекулярных скоплений вряд ли превышает треть от их общей численности.

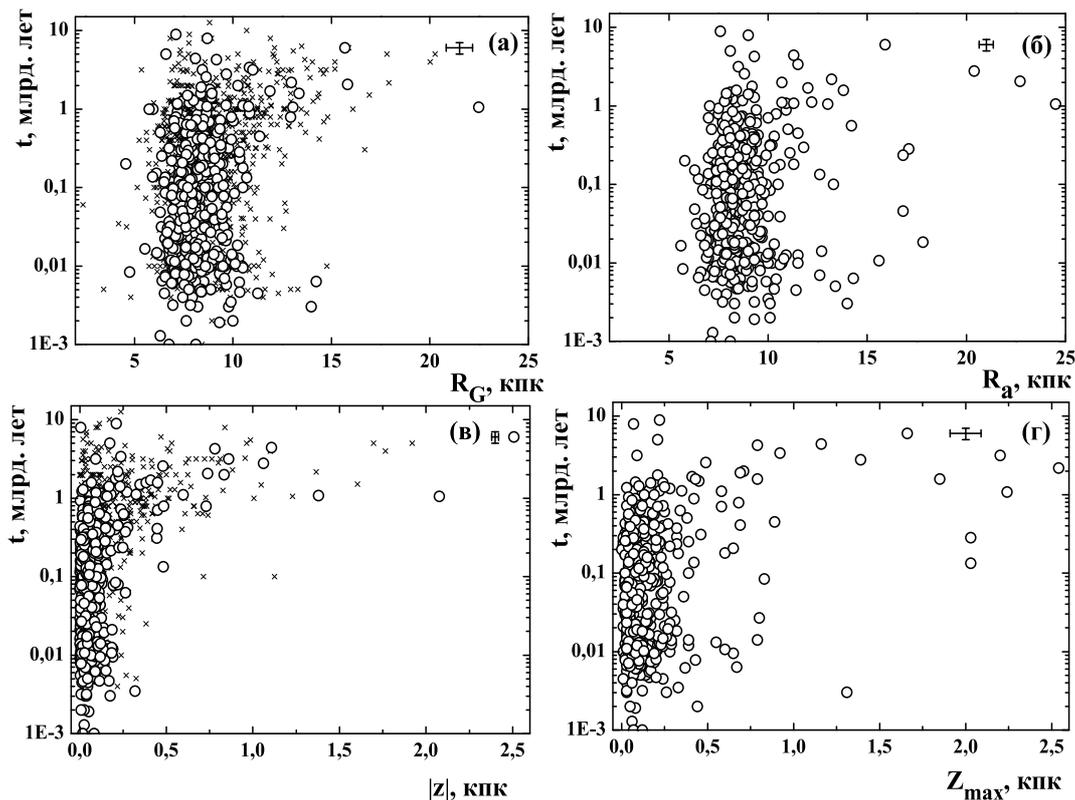
## § 6. Свойства разных населений рассеянных скоплений

На рисунке 5, а приведены распределения на плоскости  $\langle [Fe/H] \rangle - \langle [\alpha/Fe] \rangle$  рассеянных скоплений «толстого диска», «тонкого диска» и «гало», а также звезд поля галактического диска



**Рис. 5.** Диаграмма «металличность – относительное содержание магния» (а), «галактоцентрическое расстояние – металличность» (б) для рассеянных скоплений; открытые звездочки — скопления «тонкого диска», открытые кружки — скопления «толстого диска», открытые ромбики — скопления «гало», косые крестики — скопления без элементов орбит; на панели (а) прямые крестики — звезды поля тонкого диска

из каталога [13]. Звезды поля, как видим, демонстрируют довольно узкую последовательность, свидетельствующую об их генетической связанности (подробнее см. [16]). Примерно такую же полосу занимают и скопления, но демонстрируют при этом несколько больший разброс. В частности, скопления «тонкого диска» в среднем имеют солнечное относительное содержание альфа-элементов, но при этом некоторые из них демонстрируют значительно более низкие содержания. Это и понятно, поскольку значительная часть скоплений оказывается много моложе исследуемой выборки звезд поля. Поэтому вполне можно полагать, что они состоят в основном из вещества, прошедшего переработку в прежних поколениях звезд тонкого диска, то есть эти звездные объекты являются генетически связанными. Заметим, что в данную группу мы отбирали скопления по элементам орбит и металличности, а здесь обсуждается содержание альфа-элементов. При образовании же этих скоплений из вещества, испытавшего отличную химическую историю, отношения  $[\alpha/Fe]$  у них могли бы значительно выходить за пределы описываемой последовательности. Скопления «толстого диска», как видим, лежат в несколько более широкой полосе, чем подавляющая часть звезд поля, и расположены в среднем немного выше последней. Именно так ведут себя звезды поля так называемого «металличного крыла» ( $[Fe/H] > -0.4$ ) толстого диска. Возрасты и металличности у этих звезд поля такие же, как у звезд тонкого диска, тогда как кинематика — как у толстого диска. Поэтому до сих пор ведутся дискуссии по поводу их происхождения. Совпадение и химических, и кинематических характеристик соответствующих населений скоплений и звезд поля позволяет предположить, что звезды поля «металличного крыла» толстого диска могут быть остатками распавшихся рассеянных скоплений «толстого диска». Совсем по-другому ведут себя на диаграмме скопления «гало» — мало того, что они в среднем менее металличные, даже чем скопления «толстого диска», но и демонстрируют очень высокий разброс относительных содержаний альфа-элементов, причем только два из пяти скоплений находятся в пределах полосы, занимаемой звездами поля. Это с высокой вероятностью свидетельствует, что они родились из вещества, генетически слабо связанного с веществом, из которого образовалось большинство звезд тонкого диска. Исследовав содержание некоторых химических элементов в пяти далеких старых рассеянных скоплениях, Йонг и др. [15] сделали вывод, что они возникли как результат стимуляции звездообразования серией захватов межзвездного вещества из карликовых галактик-спутников, произошедших во внешнем диске Галактики в разное время. Заметим, что четыре из этих скоплений по кинематическому критерию попали у нас в «гало», а одно, с несколько избыточным по сравнению со звездами поля тонкого диска относительным содержанием альфа-элементов, — в «толстый диск».



**Рис. 6.** Диаграмма «галактоцентрическое расстояние – возраст» (а), «апогалактический радиус орбиты – возраст» (б), «расстояние от галактической плоскости – возраст» (в), «максимальное удаление точек орбит от галактической плоскости – возраст» (г) для рассеянных скоплений; крестики — все рассеянные скопления, открытые кружки — скопления с элементами орбит.

Исходя из гипотезы двойственной природы происхождения рассеянных скоплений, получает вполне естественное объяснение возникновение описанного выше скачка металличности при переходе к более удаленным скоплениям. На рис. 5, б приведена диаграмма « $R_G - [Fe/H]$ », на которой разными значками отмечены галактические и пекулярные скопления. На диаграмме проведены две прямые регрессии: одна по галактическим скоплениям, а другая по пекулярным. Обе корреляции незначимы, поскольку для обеих  $P_N > 10\%$ . Из сравнения с рис. 4, а видим, что примерно одинаковые наклоны регрессий для каждого населения оказались много меньше, чем для всей совокупности скоплений, и разнесены они по металличности на  $\Delta[Fe/H] \approx -0.3$ . Похожая картина получается и для вертикального градиента металличности, причем там оба наклона вообще в пределах ошибок равны нулю, а разнесены регрессии друг от друга по металличности даже несколько больше (соответствующий рисунок не приведен в целях экономии места, поэтому см. рис. 4, б). Образованию скачкообразного характера радиального и вертикального градиентов металличности способствовали, по-видимому, два момента: существование коротационной зоны, приведшей к независимости химической эволюции внутренней и внешней областей Галактики (см. [18]), а главное — активное взаимодействие внегалактических фрагментов (таких как высокоскоростные облака, шаровые скопления или карликовые галактики) с межзвездной средой тонкого диска.

Описанное выше уменьшение отрицательного радиального градиента металличности с увеличением возраста скоплений также находит естественное объяснение в рамках существования двух групп населений рассеянных скоплений. Действительно, как видно из рис. 3, а, с увеличением возраста относительное количество «кинематически холодных» скоплений (к которым принадлежат все наши галактические скопления) прогрессивно уменьшается, и всё больший

процент составляют в среднем в два раза менее металличные пекулярные скопления. Поэтому при большом возрасте регистрируется градиент металличности только пекулярной группы скоплений, величина которого заметно меньше, чем получаемого по обеим группам вместе. При интерпретации эволюции градиента металличности следует иметь в виду, что возраст любого пекулярного скопления связан с индивидуальным случаем захвата Галактикой внегалактического фрагмента, возбудившего локальное звездообразование, а не с существованием регулярного звездообразования, вызываемого движением спиральных волн плотности. Поэтому временной тренд радиального градиента металличности, демонстрируемый рассеянными скоплениями, является аддитивной функцией нескольких факторов: скорости звездообразования на разных галактоцентрических расстояниях, времени воздействия внегалактических объектов на межзвездную среду, скоростей распада рассеянных скоплений на разных расстояниях от центра и плоскости Галактики, а также наблюдательной селекции.

Подтверждением гипотезы о том, что пекулярные скопления образуются в результате воздействия на межзвездную среду быстро движущихся внегалактических фрагментов, может служить сравнительный анализ связей с возрастом настоящих положений и апогалактических радиусов орбит скоплений. В самом деле, из диаграммы « $R_G$  – возраст» на рисунке 6, *a* видно, что среди скоплений моложе, скажем, 15 млн лет дальше  $\approx 10.5$  кпк от галактического центра в каталоге имеется всего три скопления. Молодые скопления, яркие в оптическом диапазоне, далеко видны, поэтому такое может получиться только в том случае, если на далеких расстояниях скопления в последнее время совсем не образуются. При этом те скопления, которые образовались вблизи солнечного круга, получив при рождении значительное ускорение, еще не успели далеко отойти. Такие молодые скопления должны иметь большие апогалактические радиусы орбит, что мы и видим на рисунке 6, *b*, где таких скоплений в каталоге больше полутора десятков. Поскольку средний период обращения рассеянных скоплений вокруг галактического центра  $\approx 230$  млн лет, а для некоторых пекулярных скоплений он вообще достигает 600 млн лет и более (см. [3]), то за 15 млн лет скопления никак не в состоянии заполнить правый нижний угол диаграммы « $R_G$ –возраст». Если бы скопления рождались на апогалактических радиусах своих орбит, то на панели « $R_G$ –возраст» молодые скопления наблюдались бы вблизи именно своих  $R_a$ . Наибольшая вероятность обнаружить их вблизи апогалактических радиусов орбит будет и при уже установленном случайном распределении этих объектов по фазам орбит.

Аналогичная ситуация наблюдается и при сравнении наблюдаемых положений скоплений с максимальными удалениями от галактической плоскости точек их орбит. На рисунке 6, *b* мы видим, что среди скоплений моложе 15 млн лет лишь одно расположено выше  $\approx 180$  пк над плоскостью Галактики, тогда как примерно у двадцати из этих молодых скоплений величины  $Z_{max}$  значительно превышают эту высоту (см. рис. 6, *z*). При этом, согласно данным каталога [3], среднее время прохождения пекулярным скоплением галактической плоскости между противоположными точками  $Z_{max}$  и  $Z_{min}$  равно  $\approx 46$  млн лет (при максимальном периоде 125 млн лет), то есть в несколько раз больше принятого здесь ограничения 15 млн лет. Выжить, рождаясь внутри солнечного круга, где плотность межзвездной среды особенно велика вблизи галактической плоскости, помогает таким скоплениям высокая скорость прохождения их мимо массивных межзвездных облаков и спиральных ветвей, сокращающая время длительности их разрушающего воздействия. Большую же часть времени пекулярные скопления проводят высоко над галактической плотностью и далеко от галактического центра, где неоднородностей гравитационного потенциала много меньше. Итак, сравнительный анализ зависимостей от возраста настоящих положений рассеянных скоплений и их максимальных удалений от центра и плоскости Галактики указывает на то, что основная масса скоплений образовалась внутри галактоцентрического радиуса  $\approx 10.5$  кпк и ближе  $\approx 180$  пк от галактической плоскости и только со временем часть из них удалилась на значительные расстояния.

Таким образом, причины образования того или иного рассеянного скопления весьма индивидуальны, что привело к большому разнообразию среди них как внешних пространственно-кинематических характеристик, так и внутренних химических и физических параметров. Более того, различие в условиях существования привело к неодинаковому времени жизни скоплений,

зависящему от элементов их галактических орбит. В итоге все наблюдаемые у них зависимости между возрастом, химическим составом и пространственно-кинематическими характеристиками оказываются в значительной степени несовпадающими с одноименными зависимостями для звезд поля тонкого диска. Другими словами, моделировать химическую и динамическую эволюцию тонкого диска Галактики на основе исследования интегральных свойств рассеянных скоплений, звезды которых составляют лишь небольшую часть от звезд поля, без учета конкретных условий их образования и разрушения некорректно.

Подробнее с результатами исследования можно познакомиться в статьях [19, 20].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vande Putte D., Garnier T.P., Ferreras I., Mignani R.P., Cropper M. A kinematic study of open clusters: implications for their origin // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. Vol. 407. P. 2109–2121.
2. Dias W.S., Alessi B.S., Moutinho A., Lépine J.R.D. New catalogue of optically visible open clusters and candidates // *Astron. Astrophys.* 2002. Vol. 389. P. 871–873.
3. Wu Z.-Yu., Zhou X., Ma J., Du C.-H. The orbits of open clusters in the Galaxy // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2009. Vol. 399. P. 2146–2164.
4. Magrini L., Randich S., Zoccali M., Jilkova L., Carraro G., Galli D., Maiorca E., Busso M. Open clusters towards the Galactic centre: chemistry and dynamics. A VLT spectroscopic study of NGC 6192, NGC 6404, NGC 6583 // *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 523. A11.
5. Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Roser S., Schilbach E., Scholz R.-D. Astrophysical parameters of Galactic open clusters // *Astron. Astrophys.* 2005. Vol. 438. P. 1163–1173.
6. Paunzen E., Heiter U., Netopil M., Soubiran C. On the metallicity of open clusters. I. Photometry // *Astron. Astrophys.* 2010. Vol. 517. A32.
7. Chiappini C., Matteucci F., Gratton R.G. The chemical evolution of the Galaxy: the two-infall model // *Astrophys. J.* 1997. Vol. 477. P. 765–780.
8. Марсаков В.А., Коваль В.В., Боркова Т.В., Шаповалов М.В. Зависимость «возраст–металличность» в тонком диске Галактики // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. С. 726–742.
9. Коваль В.В., Марсаков В.А., Боркова Т.В. Связь параметров эллипсоидов скоростей звезд галактического диска с возрастом и металличностью // *Астрон. журн.* 2009. Т. 86. С. 844–860.
10. Marsakov V.A., Shevelev Iu.G., Suchkov A.A. F stars: Evidence for “two-dimensional” age-metallicity relation and a new light on the enrichment history of the solar neighbourhood // *Astrophys. Space Sci.* 1990. Vol. 172. P. 51–75.
11. Holmberg J., Nordström B., Andersen J. The Geneva–Copenhagen survey of the solar neighbourhood. III. Improved distances, ages, and kinematics // *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 501. P. 941–947.
12. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Толстый диск // *Письма в астрон. журн.* 2005. Т. 31. С. 577–591.
13. Боркова Т.В., Марсаков В.А. Сводный каталог спектроскопических определений содержаний химических элементов в звездах с точными параллаксами. Магний // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 453–465.
14. Magrini L., Sestito P., Randich S., Galli D. The evolution of the Galactic metallicity gradient from high-resolution spectroscopy of open clusters // *Astron. Astrophys.* 2009. Vol. 494. P. 95–108.
15. Yong D., Carney B.W., Teixeira de Almeida M.L. Elemental abundance ratios in stars of the outer galactic disk. I. Open clusters // *Astron. J.* 2005. Vol. 130. P. 597–625.
16. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Тонкий диск // *Письма в астрон. журн.* 2006. Т. 32. С. 419–437.
17. Марсаков В.А., Боркова Т.В. Формирование подсистем Галактики в свете содержания магния в звездах поля. Гало // *Письма в астрон. журн.* 2006. Т. 32. С. 545–556.
18. Lépine J.R.D., Cruz P., Scarano S. Jr., Barros D.A., Dias W.S., Pompéia L., Andrievsky S.M., Carraro G., Famaey B. Overlapping abundance gradients and azimuthal gradients related to the spiral structure of the Galaxy // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2011. Vol. 417. P. 698–708.
19. Гожа М.Л., Боркова Т.В., Марсаков В.А. Неоднородность населения рассеянных звездных скоплений в Галактике // *Письма в астрон. журн.* 2012. Т. 38. С. 571–583.
20. Гожа М.Л., Коваль В.В., Марсаков В.А. Два населения рассеянных звездных скоплений в Галактике // *Письма в астрон. журн.* 2012. Т. 38. С. 584–596.

Марсаков Владимир Андреевич, д. ф.-м. н., профессор, Южный федеральный университет, 344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105.  
E-mail: marsakov@mail.ru

Гожа Марина Львовна, старший преподаватель, Южный федеральный университет, 344006, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105.  
E-mail: gozha\_marina@mail.ru

**V. A. Marsakov, M. L. Gozha**

### The nature of open star clusters in the Galaxy

*Keywords:* open star clusters, field Cepheids, chemical composition, kinematics, the Galaxy (the Milky Way).

Mathematical Subject Classifications: 85A05

Based on our compiled catalogue of fundamental astrophysical parameters for 593 open clusters, we analyze the relations between the chemical composition, spatial positions, Galactic orbital elements, and age of open star clusters. Distinctions of the chemical and kinematical properties of the open clusters and field thin-disk stars are shown. We provide evidence for the heterogeneity of the population of open star clusters, which demonstrates the diversity of reasons of their birth, including under the influence of extragalactic objects.

#### REFERENCES

1. Vande Putte D., Garnier T.P., Ferreras I., Mignani R.P., Cropper M. A kinematic study of open clusters: implications for their origin, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2010, vol. 407, pp. 2109–2121.
2. Dias W.S., Alessi B.S., Moinzinho A., Lépine J.R.D. New catalogue of optically visible open clusters and candidates, *Astron. Astrophys.*, 2002, vol. 389, pp. 871–873. <http://www.astro.iag.usp.br/wilton>
3. Wu Z.-Yu., Zhou X., Ma J., Du C.-H. The orbits of open clusters in the Galaxy, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2009, vol. 399, pp. 2146–2164.
4. Magrini L., Randich S., Zoccali M., Jilkova L., Carraro G., Galli D., Maiorca E., Busso M.. Open clusters towards the Galactic centre: chemistry and dynamics. A VLT spectroscopic study of NGC 6192, NGC 6404, NGC 6583, *Astron. Astrophys.*, 2010, vol. 523, A11. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201015395>
5. Kharchenko N.V., Piskunov A.E., Roser S., Schilbach E., Scholz R.-D. Astrophysical parameters of Galactic open clusters, *Astron. Astrophys.*, 2005, vol. 438, pp. 1163–1173.
6. Paunzen E., Heiter U., Netopil M., Soubiran C. On the metallicity of open clusters. I. Photometry, *Astron. Astrophys.*, 2010, vol. 517, A32. <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201014131>
7. Chiappini C., Matteucci F., Gratton R.G. The chemical evolution of the Galaxy: the two-infall model, *Astrophys. J.*, 1997, vol. 477, pp. 765–780.
8. Marsakov V.A., Koval' V.V., Borkova T.V., Shapovalov M.V. The age–metallicity relation in the thin disk of the galaxy, *Astronomy Reports*, 2011, vol. 55, pp. 667–682.
9. Koval' V.V., Marsakov V.A., Borkova T.V. Evolution of the velocity ellipsoids in the thin disk of the Galaxy and the radial migration of stars, *Astronomy Reports*, 2009, vol. 53, pp. 1117–1126.
10. Marsakov V.A., Shevelev Iu.G., Suchkov A.A. F stars: Evidence for “two-dimensional” age-metallicity relation and a new light on the enrichment history of the solar neighbourhood, *Astrophys. Space Sci.*, 1990, vol. 172, pp. 51–75.
11. Holmberg J., Nordström B., Andersen J. The Geneva–Copenhagen survey of the solar neighbourhood. III. Improved distances, ages, and kinematics, *Astron. Astrophys.*, 2009, vol. 501, pp. 941–947.
12. Marsakov V.A., Borkova T.V. Formation of Galactic subsystems in light of the magnesium abundance in field stars: the thick disk, *Astronomy Letters*, 2005, vol. 31, pp. 515–527.
13. Borkova T.V., Marsakov V.A. A compiled catalog of spectroscopically determined elemental abundances for stars with accurate parallaxes; magnesium, *Astronomy Reports*, 2005, vol. 49, pp. 405–416.
14. Magrini L., Sestito P., Randich S., Galli D. The evolution of the Galactic metallicity gradient from high-resolution spectroscopy of open clusters, *Astron. Astrophys.*, 2009, vol. 494, pp. 95–108.
15. Yong D., Carney B.W., Teixeira de Almeida M.L. Elemental abundance ratios in stars of the outer galactic disk. I. Open clusters, *Astron. J.*, 2005, vol. 130, pp. 597–625.

16. Marsakov V.A., Borkova T.V. Formation of galactic subsystems in light of the magnesium abundance in field stars: The thin disk, *Astronomy Letters*, 2006, vol. 32, pp. 376–392.
17. Marsakov V.A., Borkova T.V. Formation of galactic subsystems in light of the magnesium abundance in field stars: The halo, *Astronomy Letters*, 2006, vol. 32, pp. 545–556.
18. Lépine J.R.D., Cruz P., Scarano S. Jr., Barros D.A., Dias W.S., Pompéia L., Andrievsky S.M., Carraro G., Famaey B. Overlapping abundance gradients and azimuthal gradients related to the spiral structure of the Galaxy, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2011, vol. 417, pp. 698–708.
19. Gozha M.L., Borkova T.V., Marsakov V.A. Heterogeneity of the population of open star clusters in the Galaxy, *Astronomy Letters*, 2012, vol. 38, pp. 506–518.
20. Gozha M.L., Koval' V.V., Marsakov V.A. Two populations of open star clusters in the Galaxy, *Astronomy Letters*, 2012, vol. 38, pp. 519–530.

Received 24.12.2012

Marsakov Vladimir Andreevich, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Southern Federal University, ul. Bolshaya Sadovaya, 105, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

E-mail: marsakov@mail.ru

Gozha Marina L'vovna, Senior Lecturer, Southern Federal University, ul. Bolshaya Sadovaya, 105, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

E-mail: gozha\_marina@mail.ru