УДК 524.47+524.6-36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ В НАШЕЙ ГАЛАКТИКЕ

© 2019 г. В. А. Марсаков^{1*}, В. В. Коваль^{1**}, М. Л. Гожа^{1***}

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия Поступила в редакцию 08.10.2018 г.; после доработки 27.11.2018 г.; принята к публикации 27.11.2018 г.

Данные составленного компилятивного каталога шаровых звездных скоплений Галактики использованы для анализа связей между химическими и кинематическими параметрами этих объектов. Каталог содержит положения, расстояния, светимости, металличности и морфологические индексы строения горизонтальных ветвей для 157 известных шаровых скоплений, а также пространственные скорости для 72 скоплений. Для 69 шаровых скоплений эти данные дополнены относительными содержаниями 28 химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, из 101 статьи с 1986 г. по 2018 г. Обсуждается феномен покраснения горизонтальных ветвей у малометалличных аккрецированных шаровых скоплений. Рассматривается противоречие между критериями принадлежности скоплений к подсистемам толстого диска и гало по химическим и кинематическим свойствам. Заключается оно в том, что независимо от принадлежности по кинематике к подсистемам Галактики все металличные ([Fe/H] > -1.0) скопления располагаются близко к центру и плоскости Галактики. Исключение составляют три аккрецированных скопления, потерянных карликовой галактикой Стрельца (Sgr). Тогда как среди менее металличных любой кинематически отобранной подсистемы Галактики высок процент более удаленных скоплений. Причем все металличные, генетически связанные с единым протогалактическим облаком скопления лежат на диаграмме "[Fe/H]–[a/Fe]" значительно выше полосы, занимаемой звездами поля. Все малометалличные скопления (среди которых большинство аккрецированных) занимают всю ширину полосы, образуемую высокоскоростными (то есть предположительно аккрецированными) звездами поля. Звезды современных карликовых галактикспутников (все они малометалличные) лежат на диаграмме значительно ниже даже аккрецированных звезд поля. Сказанное выше свидетельствует, что все звездные объекты аккрецированного гало являются остатками галактик более высокой массы, чем нынешнее окружение Галактики. Различия в относительных содержаниях α -элементов у звездных объектов Галактики и окружающих ее менее массивных карликовых галактик-спутников подтверждают известный вывод о том, что последние не оставили заметного звездного следа в ней, кроме, возможно, малометалличного скопления Rup 106 с низкими относительными содержаниями α -элементов.

DOI: 10.1134/S0004629919040042

1. ВВЕДЕНИЕ

Шаровые звездные скопления являются одними из старейших объектов в Галактике и поэтому вызывают сильнейший интерес в связи с возможностью понять с их помощью, как происходили формирование и ранняя эволюция Млечного Пути. До недавнего времени все шаровые скопления принято было считать типичными представителями собственного галактического гало, то есть образовавшимися из единого протогалактического облака на начальных этапах формирования Галактики. Впоследствии оказалось, что часть звездных объектов в разное время были захвачены Галактикой из распавшихся галактик-спутников.

Согласно современным представлениям массивные галактики, подобные нашей, на ранних этапах эволюции формируются в результате непрерывной аккреции карликовых галактик. Часть таких галактик содержит шаровые скопления, которые впоследствии становятся полноправными членами нашей Галактики. Численное моделирование такого сценария показывает, что при переходе через галактоцентрический радиус 15–20 кпк в Галактике доминируют аккрецированные скопления [1]. Эпоха массовой аккреции внегалактических объектов происходила, по-видимому, на самых ранних этапах формирования Галактики, но отдельные эпизоды аккреции происходят и сейчас. В частности, в настоящее время мы наблюда-

^{*}E-mail: marsakov@sfedu.ru

^{**}E-mail: vvkoval@sfedu.ru

^{****}E-mail: gozha_marina@mail.ru

ем разрушение карликовой галактики в созвездии Стрельца (Sgr) приливными силами Галактики [2, 3]. Как показано в работе [4], с этой галактикой уверенно ассоциируются пространственно и кинематически пять шаровых скоплений: М 54, Arp 2, Ter 8, Whiting 1 и NGC 5634. Еще четыре скопления принадлежат системе Стрельца с несколько меньшей вероятностью: Berkeley 29 (рассеянное скопление), NGC 5053, Pal 12 и Ter 7, а два скопления (NGC 4147 и Pal 2) ассоциируются с ней с довольно низкой вероятностью. Согласно той же работе, скопления M 53, NGC 288, Pal 5 и Pal 15, скорее всего, ей не принадлежат, хотя в более ранних работах [5, 6] предполагается обратное.

В недавно опубликованной работе [7] авторы восстановили орбиту малометалличного скопления NGC 5053 на основе собственных движений, полученных по данным космического телескопа Хаббла на протяжении 11 лет, и опровергли возможность физической связи между этим скоплением и галактикой Sgr. (Кроме того, согласно работам [5, 6] этой системе могут принадлежать также скопления M 2, M 5, NGC 5824, NGC 6356, NGC 6426 и Ter 3, однако в дальнейшем подтверждения не последовало.)

Ядром системы обычно полагают очень массивное шаровое скопление М 54 [8]. В работе [9] авторы исследовали орбиту скопления NGC 2419 и посчитали, что оно тоже потеряно галактикой Sgr. Элементы галактических орбит скоплений Rup 106, Pal 13, NGC 5466, NGC 6934 и NGC 7006 также указывают на то, что они, скорее всего, были захвачены из различных галактик-спутников [10, 11]. Авторы работы [12] нашли, что скопления NGC 1851, NGC 1904, NGC 2298, NGC 2808, АМ 2 и Тот 2 уверенно ассоциируются с карликовой галактикой Большого Пса (СМа), тогда как скопления NGC 4590, Pal 1 и Rup 106 считаются лишь возможными членами этой галактики. Фриман [13] предположил, что даже ω Центавра $(\omega$ Cen), крупнейшее из известных шаровых скоплений Галактики, находящееся довольно близко к галактическому центру и имеющее ретроградную орбиту, в свое время было ядром карликовой галактики. А авторы работы [14] путем численного моделирования показали, что разрушение приливными силами Галактики карликового спутника и появление его центрального скопления в Галактике на очень вытянутой орбите с малым апогалактическим радиусом вполне возможны.

Аккрецированные скопления достаточно надежно удается идентифицировать, лишь исследовав их положения и галактические орбиты. Но полные скорости измерены не для всех скоплений, особенно далеких. Зачастую полагают, что все скопления, находящиеся далее 15 кпк от галактического центра, являются аккрецированными. Именно поэтому всех их часто выделяют в отдельную подсистему, называя ее "внешнее гало". В частности, в работе [15] доказывается двойственность природы внутреннего и внешнего гало Галактики, поскольку во внешнем гало больше объектов на ретроградных орбитах, указывающих на аккрецию маломассивных галактик. С другой стороны, обнаружена и другая закономерность: скопления гало, имеющие аномально покрасневшие горизонтальные ветви, не соответствующие их малой металличности, находятся преимущественно вне солнечного круга, тогда как скопления с экстремально голубыми горизонтальными ветвями концентрируются внутри солнечного круга [16]. (Заметим, что избыток звезд на красной части горизонтальной ветви при малой металличности появляется в случае более молодого возраста скопления, поэтому их вначале посчитали "молодыми".) Такое различие было объяснено тем, что подсистема старых скоплений формировалась вместе со всей Галактикой, тогда как более молодые скопления были захвачены ею из межгалактического пространства на более поздних стадиях эволюции [17]. Именно по этим признакам их выделяли, когда хотели исследовать подробнее. Принято считать, что такие скопления образуют подсистему, которую согласно выбираемому доминантному признаку называют "молодое гало", "внешнее гало" или "аккрецируемое гало" (см., напр., [18] и ссылки в ней). Но и оставшиеся генетически связанные скопления, образовавшиеся, как полагают, из единого протогалактического облака, разделяют на две подсистемы: толстый диск и собственное гало. Разделение провоцируется формой распределения скоплений по металличности, которое обнаруживает резкий провал в окрестности [Fe/H]≈ ≈ -1.0 (см., напр., [18, 19]). При этом более богатые металлами скопления считают представителями подсистемы толстого диска Галактики. Подробное исследование положений и элементов орбит богатых металлами скоплений показало, что большинство из них скорее принадлежат галактическому балджу (см., напр., [20]). И только остальные шаровые скопления можно считать типичными представителями собственного гало Галактики.

Долгое время полагали, что образование всех звезд в каждом скоплении происходило одновременно, и поэтому содержания всех химических элементов в их звездах должны соответствовать содержаниям в первичных протооблаках этих скоплений. Но потом выяснилось, что во всех скоплениях происходило самообогащение, что изменяло содержания некоторых химических элементов (см., напр., [21] и ссылки в ней). Известно, что, по крайней мере, в двух самых массивных скоплениях, ω Сеп и М 54, происходило даже обогащение элементами, выброшенными вспышками сверхновых, что привело к образованию в них более молодого населения звезд с более высоким содержанием элементов группы железа. Но сверхмассивных скоплений немного, тогда как в остальных искажены в основном содержания только тех химических элементов, которые участвуют в реакциях протонных захватов, происходящих в гидростатических процессах горения гелия в центре или в слоевых источниках гигантов асимптотической ветви. Главным образом, эти процессы уменьшили в гигантах асимптотической ветви относительные содержания первичных α -элементов (кислорода и в меньшей степени магния) и увеличили натрия и алюминия. При сбросе оболочки такой звездой на более поздних стадиях эволюции эти элементы попадают в межзвездную среду скопления, в итоге новые поколения звезд в нем оказываются с измененным химическим составом. Средние содержания остальных химических элементов в звездах скоплений остались практически первичными (см., напр., [22] и ссылки в ней). Это позволяет нам использовать их для восстановления эволюции Галактики на ранних этапах ее формирования. Поскольку принадлежащие разным подсистемам шаровые скопления образовывались из межзвездного вещества, испытавшего различные истории химической эволюции, можно ожидать, что и относительные содержания химических элементов в скоплениях разной природы окажутся различными.

Данная работа посвящена сравнительному анализу связей относительных содержаний *α*элементов с пространственно-кинематическими характеристиками шаровых звездных скоплений, принадлежащих разным подсистемам Галактики, с целью выяснения их природы. Для работы мы составили компилятивный каталог, включающий найденные в литературе относительные содержания химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза, а также компоненты пространственных скоростей и морфологические индексы строения горизонтальных ветвей для как можно большего количества шаровых скоплений Галактики.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

За основу нашего каталога взята последняя версия (2010) компилятивного каталога Харриса [23], в который включены все измеряемые величины для 157 шаровых звездных скоплений Галактики. Эти данные мы дополнили относительными содержаниями 28 химических элементов в звездах 69 шаровых скоплений, взятых из 101 работ, опубликованных в 1986–2018 гг. Содержания химических элементов в звездах скоплений практически во всех использованных источниках определены по спектрам высокого разрешения, полученным в основном для атмосфер красных гигантов. Анализ спектров проведен в приближении локального термодинамического равновесия. Для работы мы скомпилировали опубликованные в разных работах содержания следующих химических элементов: α -элементов (O, Mg, Si, Ca и Ti), углерода, элементов железного пика (Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn), элементов медленных и быстрых нейтронных захватов (Sr, Y, Zr, Mo, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Dy), а также трех элементов с нечетным числом протонов (Na, Al, K). При этом отношения [el/Fe] находились для скоплений по содержаниям [el/H] и [Fe/H] из первоисточников, а не по приведенным в настоящей работе их средним металличностям.

Среднее количество исследованных в одной работе звезд в скоплении — 12, а наиболее вероятное — 10. И это без учета статей с наибольшим количеством исследованных звезд в скоплениях ω Cen (855 звезд), NGC 104 (181) и NGC 2808 (123). В нескольких работах содержания в скоплениях определены по одной-двум звездам (таких определений 46), но только в 8 случаях определений содержаний для этих же скоплений нет в других работах. В частности, в единственной статье по одной звезде определены содержания для NGC 2419 и Pal 6, по двум звездам для NGC 5024, NGC 5897, NGC 6362, М 71, Агр 2 и Rup 106, а по трем для NGC 5466 и NGC 6352. Для 30 скоплений из 69 содержания определены в нескольких работах. Так, для звезд ω Cen имеется 2334 определения содержаний химических элементов, которые приведены в 5 работах, а 232 определения для звезд NGC 104 — в 9 работах. Большое количество исследуемых звезд внутри скоплений существенно увеличивает точность определения в них средних содержаний химических элементов. Усредненные по всем звездам металличности и величины относительных содержаний химических элементов в шаровых скоплениях приведены в табл. 1, фрагмент которой дан в статье, а полностью таблица доступна только в электронном виде. Если содержание какого-либо химического элемента в скоплении определялось в нескольких статьях, то мы вычисляли среднее взвешенное значение с весовыми коэффициентами, пропорциональными количеству исследованных в каждой статье звезд в скоплении. К сожалению, не во всех работах приведены данные, необходимые для сведения всех определений в единую шкалу, поэтому все авторские содержания мы использовали без изменения.

Благодаря наличию статей с определениями содержаний в одних и тех же скоплениях, мы оценили внешнюю сходимость определений. Для оценки внешней сходимости определений содержаний каждого элемента, полученных разными авторами,

Имя	Альт. имя	[F	Fe/H]	σ	[C/Fe] σ	[0/	/Fe]	σ		[Na/	/Fe]	σ	[[Mg/Fe]	σ	[Al/Fe]	σ	[Si/Fe]	σ	
1	2		3	4	5	6	1	7			9)	10		11	12	13	14	15	16	
NGC 104	47 Tuc	: -	0.75	0.08	_	-	- 0.18		0.08		0.33		0.18	3	0.43	0.11	0.37	0.21	0.29	0.06	
NGC 288		_	1.37	0.04	_	_	0.	34 0.1		4	0.24		0.06	5	0.44	0.01	0.45	0.06	0.40	0.04	
NGC 362		-	-1.2	0.08	_	-	0.	76	0.5	3	0.1	11	0.08	3	0.33	0.02	0.27	0.05	0.26	0.07	
NGC 1261			_	_	_	_	-	_	-		_	-		- –		_	_	-	—	_	
NGC 1851		_	1.25	0.07	_	_	0.	0.03 0.		.21 0		20	0.04		0.38	0.02	0.38	0.20	0.39	0.01	
Имя	[K/Fe]	σ	[Ca/Fe	e] σ	[Sc/	Fe]	σ	[Ti,	/Fe]	σ	· [\	V/Fe] σ		[Cr/Fe]	σ	[Mn/Fe]	σ	[Co/Fe]	σ	
1	17	18	19	20	21		22	2	23	24	4	25	26	5	27	28	29	30	31	32	
NGC 104	-0.6	_	0.26	0.12	0.1	5	0.11	0.	32	0.0)8	0.12	0.0	8	-0.03	0.11	-0.24	0.06	0.00	0.07	
NGC 288	_	_	- 0.34		0.0	0.02		0.	28	0.0)9	0.00	0.0	5	_	_	_	-	_	_	
NGC 362	_	_	- 0.32 0.0		-0.	07	0.03	0.	18	0.0	07 -	-0.05	6 0.0	1	-0.03	0.01	-0.33	0.04	-0.11	0.16	
NGC 1261	-			-	· _		-		- -		-								_	—	
NGC 1851	_	—	0.33	0.02	2 0.0	3	0.03	0.	15	0.0)1 –	-0.12	2 0.0	5	-0.02	0.06	-0.34	0.08	-0.07	0.15	
Имя	[Ni/Fe]	σ	[Cu	/Fe]	σ [2	Zn/F	Fe]	σ	[Sr/]	Fe]	σ	[Y/F	e]	σ	[Zr/Fe	e] σ	[Mo/Fe	e] σ	[Ba/Fe]	σ	
1	33	34	t 3	5	36	37	ст.) С	38	39)	40	41	4	42	43	44	45	46	47	48	
NGC 104	-0.01	0.0	9 -0	.14 0	0.13	0.22	2 0.	.06	0.3	2	_	0.1	4 0	.23	3 0.16	0.3	5 0.51	0.39	0.19	0.25	
NGC 288	0.01	0.0	7 -0	.40 0	0.03	_		_	_		-	_		_	_	_	_	—	0.40	0.10	
NGC 362	-0.09	0.0	3 -0	.51 0	0.02	0.26	6 0.	.05	_		-	0.0	7 0	.11	0.50	0.1	2 –	—	0.21	0.06	
NGC 1261				-	_	—	. _		- -		-	_	-	_	—	—	_	-	_	—	
NGC 1851	0.01	0.0	8 -0	.46 0	0.07	_	-	_	_		—	0.2	7 0	.15	5 0.26	0.0	0 —	—	0.49	0.01	
Имя	[La/Fe]	σ [Ce/Fe	-] σ	[Nd/F		e]	σ	<i>σ</i> [Ει		Fe]	σ		[Dy/Fe] σ		Ссылк		лка		
1	49		50	51	52		53	53			55		56		57 58		59				
NGC 104	0.20	0	0.10 -		-		0.04		0.24		0.42	2	0.11		0.70 0.10		31, 5, 37, 65, 67, 82, 83, 3			3, 39	
NGC 288	-			_	_	-		-			0.55	2	0.12		- -			26, 67, 18			
NGC 362	0.33	0.33 0.09		0.14	14 0.12		0.35		0.10	.10 0		5 0.11			0.68 0.13		26, 65, 75, 18				
NGC 1261	-	—		_			—		-		_	-				_	-				
NGC 1851	0.38 0.12) 12	0.69	0.2	0.20		0.67		0.15		1	0.03	.03 0.67		0.12	68.60				

Таблица 1. Средние относительные содержания химических элементов и дисперсии (σ) определений содержаний в звездах шаровых скоплений (фрагмент)

мы исследовали распределения отклонений авторских относительных содержаний в данном скоплении от вычисленных по ним средневзвешенных значений. Средние дисперсии этих распределений (которые отражают внешние сходимости определений разных авторов) лежат в диапазоне $\langle \sigma[el/Fe] \rangle =$ = (0.06–0.16). Для скоплений с определениями относительных содержаний химических элементов в нескольких работах величины внешних сходимостей приведены в табл. 1, в том же столбце таб-

лицы приведены и дисперсии содержаний в звездах скоплений, заявленные авторами источников. Отличить такие скопления в нашей табл. 1 можно по последнему столбцу — у таких скоплений только одна ссылка. Сравнительный анализ показывает, что в среднем величины внешних сходимостей определений относительных содержаний химических элементов в скоплениях оказались лишь немногим больше величин дисперсий содержаний в звездах скоплений, заявленных авторами первоисточников. Это свидетельствует об отсутствии

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019

Имя	Альт. имя	<i>х</i> , кпк	y,кпк	<i>z</i> , кпк	$R_C,$ кпк	$R_{ m GC},$ кпк	$U_R,$ KM c ⁻¹	<i>V</i> ⊖, км с ^{−1}	$U_Z,$ km c ⁻¹	HBR	M_V , mag	под- система	ген. связь
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
NGC 104	47 Tuc	1.9	-2.6	-3.1	6.6	7.4	55	184	22	-0.99	-9.42	2	G
NGC 288		-0.1	0.0	-8.9	8.6	12	24	-74	51	0.98	-6.74	3	_
NGC 362		3.1	-5.1	-6.2	5.4	9.4	71	-35	-68	-0.87	-8.41	3	_
NGC 1261		0.1	-10.0	-12.9	8.4	18.1	_	_	_	-0.71	-7.81	—	_
NGC 1851		-4.2	-8.9	-6.9	12.7	16.6	191	142	-102	-0.32	-8.33	3	_

Таблица 2. Кинематические параметры шаровых скоплений (фрагмент)

значительных расхождений в определениях содержаний между разными авторами и возможности использования наших компилятивных содержаний для статистического анализа химического состава скоплений, принадлежащих разным подсистемам Галактики.

Для всех 157 шаровых скоплений мы вычислили прямоугольные координаты, а для 72 из них цилиндрические компоненты скоростей по собственным движениям, лучевым скоростям и расстояниям из работы [24]. В их число попали и 45 скоплений с определенными содержаниями химических элементов. При этом движение Солнца относительно локального центроида принято равным $(U, V, W)_{\odot} = (11.1, 12.24, 7.25)$ км/с [25], солнечное галактоцентрическое расстояние — 8.0 кпк, а скорость вращения локального центроида — 220 км/с. В табл. 2 приведен фрагмент полной таблицы, доступной только в электронном виде, в которой приведены найденные для этих скоплений пространственно-кинематические параметры. В первом и втором столбцах таблицы даны имя и альтернативное имя скопления, в столбцах с третьего по пятый приведены координаты (x, y, z) в правосторонней прямоугольной системе. Затем идут расстояние скопления от оси вращения Галактики (R_C) и галактоцентрическое расстояние (R_{GC}) . Следующие три столбца содержат вычисленные компоненты пространственных скоростей ($V_R, V_{\Theta},$ V_Z) в цилиндрической системе координат, где компонента V_R направлена на антицентр Галактики, V_{Θ} — в сторону галактического вращения, V_Z — к северному полюсу Галактики. Далее приведен морфологический индекс (или цвет) горизонтальной ветви HBR = (B - R)/(B + V + R), где B, V, R соответственно количество звезд на голубом конце горизонтальной ветви, в полосе нестабильности и на красном конце. Далее следует столбец с обозначением подсистем, где 1 — тонкий диск, 2 — толстый диск, 3 — гало. В последнем столбце литерой "G" обозначены скопления, генетически связанные с единым протогалактическим облаком.

у шаровых скоплений только четырех химических элементов — магния, кремния, кальция и титана, как наиболее информативных в плане диагностики эволюции ранней Галактики. При этом особое внимание будет уделено содержаниям кальция и титана. В видимом диапазоне спектра линий этих двух химических элементов много, и их содержания довольно надежно определяются. Выбор этих элементов обусловлен тем, что средние относительные содержания обоих первичных *а*-элементов (кислорода и магния) в процессе эволюции скопления уменьшаются по сравнению с содержаниями их в первичных протооблаках. А содержания еще одного а-элемента — кремния — определены для меньшего количества скоплений и совсем не определены для звезд поля и карликовых галактикспутников, которые мы используем для сравнения.

В настоящей работе мы рассмотрим поведение

На рис. 1 приведены зависимости относительных содержаний всех четырех *α*-элементов от металличности у наших шаровых скоплений. Для сравнения на диаграммах нанесены аналогичные зависимости для звезд поля. Причем для [Mg/Fe], [Ca/Fe] и [Ti/Fe] звезды взяты из каталога [26], в котором приведены металличности и содержания этих элементов для 785 звезд Галактики во всем интересующем нас диапазоне металличности. Отношения [Si/Fe] для этих звезд в каталоге не приведены, поэтому на панели рис. 16 нанесены звезды из каталога [27], содержащего для 714 F-G карликов поля металличности и относительные содержания всех α -элементов. К сожалению, в последнем каталоге исследованы звезды, принадлежащие в основном дисковым населениям Галактики, поэтому малометалличные звезды здесь в дефиците. На всех панелях барами нанесены дисперсии всех определений относительных содержаний химических элементов в звездах скоплений (напомним, что для получения ошибки среднего для каждого скопления эту величину следует разделить на *n*^{0.5}, где *n* — количество определений содержаний в звездах скопления). При этом средние величины



Рис. 1. Зависимость относительных содержаний магния (а), кремния (б), кальция (в) и титана (г) от металличности для шаровых скоплений нашего каталога и звезд поля из каталога [26] (а, в, г) и [27] (б). Черные кружки — шаровые скопления, серые снежинки — звезды поля.

сходимостей (то есть дисперсий расхождений между разными авторами) для этих элементов получились следующие: $\langle \sigma[Si/Fe] \rangle = 0.06$, $\langle \sigma[Mg/Fe] \rangle =$ = 0.10, $\langle \sigma[Ca/Fe] \rangle = 0.08$, $\langle \sigma[Ti/Fe] \rangle = 0.09$. Из рисунков видно, что для всех четырех химических элементов скопления в целом неплохо ложатся на звезды поля, что свидетельствует об отсутствии у них систематических ошибок определения содержаний, несмотря на значительные случайные ошибки для отдельных скоплений. Подробнее поведение α -элементов будет описано ниже.

Чтобы не перегружать наш каталог, мы не стали в него включать элементы галактических орбит и возрасты скоплений, и при необходимости пользовались соответствующими данными из работ [28– 30].

3. СТРАТИФИКАЦИЯ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ПОДСИСТЕМАМ ГАЛАКТИКИ

В работе [22] впервые была сделана попытка определения принадлежности шаровых скоплений к той или иной подсистеме Галактики, используя не традиционные вышеописанные критерии по металличности и морфологии горизонтальной ветви, а по компонентам их остаточных скоростей, как это давно делается для звезд поля. В компилятивном каталоге [22] для 45 скоплений найдены содержания некоторых химических элементов, причем для 29 из них имеется кинематическая информация. Авторы нашли, что большинство скоплений по кинематике принадлежит галактическому гало, однако значительное количество скоплений оказалось с дисковой кинематикой или принадлежащими балджу. В аккрецированное гало они включили более десятка скоплений, для которых по положениям, лучевым скоростям, а иногда и по элементам их галактических орбит разными авторами было показано, что с высокой вероятностью скопления были захвачены из нескольких галактик-спутников, то есть имеют внегалактическое происхождение.

Понятно, что единого и достаточного критерия стратификации шаровых скоплений по подсистемам Галактики не существует. Для надежного отнесения скопления к той или иной подсистеме следует учитывать многие характерные для каждой подсистемы параметры, в частности, положение, кинематику, металличность, содержания разных химических элементов, возраст и морфологию горизонтальной ветви. Поскольку мы собираемся исследовать различия химического состава у скоплений разных подсистем, мы воспользовались кинематическим критерием, в котором по компонентам скоростей V_R , V_Θ , V_Z вычисляются вероятности принадлежности скоплений подсистемам тонкого диска, толстого диска, и гало, по методике, описанной в работе [31]. Данная методика подобна той, что используется в [22], только с несколько отличающимися дисперсиями скоростей в подсистемах. В обеих методиках подразумевается, что компоненты пространственных скоростей звезд в каждой подсистеме подчиняются нормальным распределениям. Как показало последующее сравнение, принадлежности у одноименных скоплений получились отличающимися в основном изза различия во входных скоростях — у нас они более точные. Поскольку принадлежности к подсистемам вычисляются по остаточным скоростям, мы привели азимутальные компоненты скоростей скоплений к скорости вращения центроида на том галактоцентрическом расстоянии, на котором оно находится. Кривую вращения мы взяли из модели Галактики [32]. Принимая во внимание большую удаленность скоплений, приводящую к большим неопределенностям определения тангенциальных скоростей, при вычислении вероятностей попадания скоплений в ту или иную подсистему мы проделали рекуррентную процедуру. При втором шаге мы присвоили дисперсиям скоростей и численностям скоплений в подсистемах в формулах вычисления вероятностей такие значения, какие получились у нас после первого шага. При этом уменьшилась задаваемая доля объектов в подсистемах тонкого и толстого дисков. Хотя перерасчет несколько и перераспределил принадлежности небольшого количества скоплений, находящихся по кинематике в промежуточных зонах между тонким и толстым дисками, а также между толстым диском и гало, в целом же состав подсистем изменился несущественно. Изменения в основном коснулись скоплений, находящихся вблизи галактического центра, поскольку там кривая вращения очень изменчива. Результаты именно рекуррентной процедуры стратификации мы и оставили.

На рис. 2а приведена диаграмма Тумре " $V_{\Theta}^2 - (V_R^2 + V_Z^2)^{0.5}$ ", для шаровых скоплений и звезд поля из [26]. Из рисунка видно, что объекты, демонстрирующие кинематику одноименных подсистем, занимают на диаграмме примерно одинаковые площади, хотя в работе [26] для звезд поля использовалась методика, несколько отличающаяся от нашей. Применение нашей методики

показало, что по кинематическим параметрам у 41 скопления вероятность принадлежности к гало больше, чем к другим подсистемам. Толстому диску с большей вероятностью принадлежит 28 скоплений. а 4 скопления оказались с кинематикой тонкого диска. (Заметим, что в работе [22] из 29 скоплений по кинематическим параметрам в тонком диске оказалось три скопления.) Среди скоплений с кинематикой толстого диска оказалось значительное число со скоростями вращения вокруг галактического центра даже больше, чем у Солнца. Но самую большую азимутальную скорость имеет скопление NGC 6553 с кинематикой гало: $V_{\Theta} = 383$ км/с. Видно также, что более половины скоплений гало демонстрируют ретроградное вращение вокруг галактического центра. Мы полагаем, что такие скопления с высокой вероятностью могут оказаться внегалактического происхождения. Действительно, согласно гипотезе монотонного коллапса протогалактики от гало к диску, предложенной Эггеном и др. [33], звезды поля и шаровые скопления, генетически связанные с Галактикой, не могут находиться на ретроградных орбитах.

На рис. 26 приведены распределения скоплений в координатах "удаление от галактической плоскости (z)-металличность [Fe/H]". На диаграммах, где не используются спектроскопические определения других химических элементов, величины [Fe/H] мы брали из каталога [23], поскольку в нем приведены металличности для всех скоплений. Большими кружками на рисунке обозначены скопления, принадлежащие по кинематическим признакам тонкому диску (светло-серые), толстому диску (серые) и гало (темно-серые), а небольшими темными кружками — нестратифицированные скопления, то есть скопления с неизвестными скоростями. Наиболее заметная деталь на рисунке — высокая концентрация металличных ([Fe/H] > -1.0) скоплений вблизи галактической плоскости, причем независимо от принадлежности к подсистеме Галактики, определенной по кинематическим критериям. Как показала проверка, максимальные удаления точек орбит у всех металличных скоплений оказались менее 5 кпк, тогда как у значительной части малометалличных скоплений $Z_{\rm max} > 10$ кпк. (Исключением являются три металличных скопления, Pal 12, Whiting 1 и Terzan 7, которые с высокой вероятностью принадлежали в прошлом распавшейся карликовой галактике Sgr (см. выше).) Именно этот факт вместе с выраженным провалом на функции металличности в районе $[Fe/H] \approx -1.0$ и провоцирует выделение металличных скоплений в дисковую подсистему. Но с другой стороны, из рисунка видно, что половина (два из четырех) скоплений с кинематикой тонкого диска,



Рис. 2. Диаграмма Тумре для шаровых скоплений и звезд поля из [26] (а), зависимость металличности от расстояния до галактической плоскости (б), от абсолютной величины удаления от галактической плоскости (в) и от удаления от оси вращения Галактики для шаровых скоплений (г). Обозначены звезды поля, расположенные в тонком диске — светлосерыми снежинками, серыми крестиками — в толстом диске, темными снежинками — в гало. Шаровые скопления обозначены заполненными кружками соответствующего цвета для каждой подсистемы. Кружком обведены скопления, известные как потерянные карликовыми галактиками. Маленькие темные кружки — нестратифицированные скопления. Величины [Fe/H] взяты из каталога [23].

а также подавляющая часть скоплений с кинематикой толстого диска демонстрируют [Fe/H] < -1.0. что входит в противоречие с описанной выше практикой выделения дисковых скоплений по высокой металличности. Обращает на себя внимание, что в северном полушарии (т.е. при z > 0) три малометалличных скопления с кинематикой толстого диска расположены от галактической плоскости далее, чем на 10 кпк. Два из них (М 53 и Pal 5) ранее подозревали в принадлежности к распавшейся карликовой галактике Sgr (см. выше). В южной полусфере столь далеких скоплений в этой подсистеме нет. Зато там наблюдается большое количество далеких малометалличных скоплений с кинематикой гало, а также скоплений с неизмеренными скоростями. Значит, наблюдаемая асимметрия положений в кинематически выделенных подсистемах не является наблюдательным селекционным эффектом.

Концентрация металличных скоплений к галактической плоскости формирует давно известный вертикальный градиент металличности. Из диаграммы "удаление от галактической плоскости (|z|) - металличность" на рис. 2в видно, что металличные скопления даже с кинематикой гало обнаруживают более высокую концентрацию к галактической плоскости, чем менее металличные скопления с кинематикой толстого диска. Аналогичная ситуация и с радиальным градиентом металличности, проиллюстрированном на диаграмме "расстояние от оси вращения Галактики (*R_C*)-металличность" на рис. 2г. Среднее галактоцентрическое расстояние по всем 47 богатым металлами скоплениям примерно 5.0 кпк, а по 110 бедным металлами в три раза больше — 15.5 кпк. При этом внутри каждой группы по металличности значимых корреляций не наблюдается (см. подробнее [18]). Из рис. 2г видно, что на расстоянии $x \ge 5$ кпк расположена основная часть скоплений, потерянных галактикамиспутниками. А у таких скоплений пространственные скорости отражают не динамические условия звездообразования в сжимающемся протогалактическом облаке, а лишь конечные орбиты скоплений, захваченных из распавшихся под действием приливных сил Галактики карликовых галактикспутников. При этом, чем массивнее родительская галактика-спутник, тем на более плоской и вытянутой орбите она теряет свои скопления и звезды [1].

СВОЙСТВА ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ РАЗНЫХ ПОДСИСТЕМ И ПРИРОДЫ

На рис. За приведена диаграмма "азимутальная скорость (V_{Θ})-металличность [Fe/H]" для шаровых скоплений и звезд поля. Разными значками обозначены объекты разных подсистем Галактики. В отличие от аналогичной диаграммы в работе [22], на ней в диапазоне ([Fe/H] > -1) появились скопления с азимутальными скоростями, значительно отличающимися от солнечной. Причем все 4 металличных скопления с ретроградными орбитами находятся в пределах 3 кпк от галактического центра, тогда как у 18 малометалличных скоплений с $V_{\Theta} < 0$ среднее галактоцентрическое расстояние около 10 кпк. На диаграмме " V_{Θ} -[Fe/H]" мы обозначили также скопления, которые в разное время различные авторы посчитали принадлежащими в прошлом распавшимся карликовым галактикамспутникам (см. выше). Дополнительно отмечены и скопления, лежащие или имеющие точки орбит $(R_{\rm max})$ далее 15 кпк от галактического центра. Как можно увидеть, только два аккрецированных скопления (NGC 2808 и ω Cen) не отмечены, то есть лежат ближе этого радиуса. Тогда как шесть других скоплений хотя и лежат далеко, но их внегалактическое происхождение не доказано.

Можно заметить, что все аккрецированные и далекие скопления (кроме NGC 4590 и NGC 5024, у которых V_{Θ} больше солнечной) демонстрируют на рис. За значимую корреляцию между металличностью и азимутальной компонентой скорости (коэффициент корреляции $r = 0.66 \pm 0.02$). Похожую тенденцию демонстрирует и полная выборка скоплений, правда, статистически незначимую изза значительного разброса у скоплений азимутальных скоростей при любой металличности. Возникает она из-за того, что верхний предел скорости у скоплений при любой металличности остается примерно постоянным ($V_{\Theta} \approx 350$ км/с, тогда как с уменьшением [Fe/H] доля скоплений с меньшими скоростями увеличивается и все больше заходит в область отрицательных значений. Особенно резко это происходит при переходе через $[Fe/H] \approx$ $pprox -1.0.~{
m B}$ итоге у металличных скоплений скачком

уменьшается дисперсия скоростей, что также провоцирует отделять этим значением металличности подсистему толстого диска от гало. У близких звезд поля эта зависимость высокозначима, более крутая и отражает классический асимметричный сдвиг Стремберга, вызванный вращением Галактики, только на данной диаграмме вместо координаты полной скорости звезды относительно Солнца выступает металличность. Получилось так потому, что и полная скорость, и металличность являются статистическими индикаторами возраста звездных объектов в Галактике [33]. (Заметим, что сравнивать звезды поля и скопления на такой диаграмме не вполне корректно, поскольку между ними есть принципиальное различие, заключающееся в том, что первые в настоящее время все находятся практически на одинаковых расстояниях от галактического центра и близко к ее плоскости, тогда как скопления на разных расстояниях.) Можно предположить, что увеличение металличности у аккрецированных скоплений с ростом скорости обращения вокруг галактического центра получилось из-за того, что более металличные скопления в карликовых галактиках-спутниках рождаются ближе к их центру. Поэтому эти скопления теряют со своими родительскими галактиками связь на финальном этапе, когда орбиты последних сильнее "улягутся" в галактическую плоскость, а их азимутальные скорости приблизятся к скорости вращения галактического диска в результате приливных взаимодействий с возмущениями гравитационного потенциала Галактики, как это предсказывает численное моделирование [1]. Однако наличие обнаруженной на рис. За корреляции и высказанного предположения требует дополнительной проверки ввиду недостаточной статистики и значительных неопределенностей пространственных скоростей и элементов галактических орбит скоплений.

Диаграмма "морфология горизонтальной ветви (HBR)-металличность" для наших скоплений приведена на рис. Зб. Из нее видно, что большинство скоплений (но не все), находящихся в настоящее время внутри солнечного круга, действительно имеют в основном экстремально красные или экстремально голубые горизонтальные ветви. Но между этими экстремальными позициями часть скоплений оказалась в тонком слое вдоль верхней огибающей на диаграмме. При этом большинство известных аккрецированных скоплений лежат в основном ниже этой огибающей (см. наклонную линию на рис. Зб, проведенную "на глаз"). Однако, как видно из диаграммы, такое расположение не абсолютно, и встречаются исключения. Вероятными аккрецированными скоплениями являются, скорее всего, также далекие скопления ($R_{\rm GC}$ или $R_{\rm max} > 15$ кпк) и скопления с ретроградным вращением ($V_{\Theta} < 0$). Двенадцать из 22 скоплений с



Рис. 3. Связь спектроскопической металличности со скоростью вращения вокруг галактического центра для звезд поля и шаровых скоплений (a); связь металличности из каталога [23] с цветом горизонтальной ветви скоплений (б); связь абсолютной звездной величины с галактоцентрическим расстоянием скоплений с экстремально голубыми ГВ (в) и связь относительных содержаний α -элементов со скоростью вращения вокруг галактического центра для скоплений (г). На панелях (a, б, г) обозначены: большие темные шестиугольники вокруг кружков — далекие скопления (R_G или $R_{max} > 15$ кпк); светло-серые треугольники вокруг кружков — скопления на ретроградных орбитах; белые треугольники вокруг кружков — скопления, лежащие внутри солнечного круга ($R_G < 8$ кпк). Пунктирные горизонтальные линии проведены через [Fe/H] = -1.0 (a, б) и [α /Fe] = 0.0 (г); пунктирные вертикальные линии соответствуют $V_{\Theta} = 0$ и 220 км/с (a, г) и HBR = 0.85 (б); наклонная штриховая линия проведена "на глаз" и разделяет положения внутренних и внешних скоплений (б). Другие обозначения как на рис. 2. Нанесены имена скоплений, далеко отклоняющиеся от средних для соответствующих подсистем.

ретроградными орбитами лежат внутри солнечного круга. Одиннадцать скоплений с ретроградными орбитами имеют экстремально голубые горизонтальные ветви, три — экстремально красные, а у восьми ветви оказались избыточно покрасневшими для их малой металличности. Как видно из диаграммы на рис. Зб, в диапазоне между экстремальными значениями HBR все они действительно лежат на диаграмме ниже верхней огибающей. А среди далеких скоплений все (кроме трех) оказались малометалличными, тогда как цвет горизонтальной ветви у них может быть любым. Обычно полагают, что все малометалличные скопления, лежащие ниже узкой верхней полосы, можно с высокой долей вероятности зачислить кандидатами в аккрецированные (см. [34]). Похоже, что такое предположение весьма правдоподобно, и причине покраснения горизонтальных ветвей аккрецированных скоплений можно попытаться дать объяснение.

Как мы уже отмечали, исследования последних лет показывают, что внутри наиболее массивных шаровых скоплений происходит несколько эпизодов звездообразования со вспышками сверхновых, обогащающих межзвездную среду скопления элементами группы железа. Например, несколько населений, различающихся металличностью, обнаружено в крупнейшем скоплении ω Центавра. Однако и в менее массивных скоплениях находят популяции звезд, различающиеся содержанием гелия и СNO-элементов (см., напр., [35]). Предполагают, что новые, более молодые популяции звезд в таких скоплениях образуются из химически загрязнен-

ного вещества, выброшенного гигантами асимптотической ветви промежуточных масс, быстровращающимися массивными звездами, а также вращающимися АГВ-звездами первого поколения [36, 37]. Со временем в таких скоплениях формируются протяженные горизонтальные ветви, в результате чего их цвет перестает соответствовать первичному малометалличному химическому составу доминирующего по численности звездного населения. Авторы работы [38] численным моделированием показали, что в скоплениях с вторичным более молодым населением, обогащенным в основном CNOэлементами, цвет горизонтальной ветви действительно становится более красным. Одновременно меняется и тип скопления по Оостерхоффу. Как показывает моделирование, все это происходит на начальных этапах эволюции скопления в течение одного миллиарда лет после последней вспышки звездообразования.

Из нашей диаграммы на рис. Зб можно увидеть, что из 41 скопления с экстремально голубыми горизонтальными ветвями (HBR > 0.85) только 8 расположены или имеют точки орбит далее 15 кпк от галактического центра. Тогда как 29 скоплений находятся в настоящее время внутри солнечного круга ($R_{\rm GC} < 8$ кпк), а четыре скопления оказались между этими границами. Причем среди далеких скоплений практически все по абсолютной величине довольно слабые, то есть массы у них небольшие. Это хорошо иллюстрирует рис. Зв, где приведена диаграмма "расстояние от центра Галактики (R_{GC}) -абсолютная звездная величина (M_V) " для скоплений с экстремально голубыми горизонтальными ветвями. Видим, что все скопления, находящиеся в настоящее время далее 15 кпк от галактического центра, имеют $M_V \ge -8.0^m$ (исключением является далекое яркое скопление NGC 2419 из Sgr, имеющее пограничную величину HBR = 0.86), тогда как все более яркие скопления оказались близкими. (Впрочем, о преобладании маломассивных скоплений среди далеких давно известно (см. [39] и ссылки в ней), но для экстремально голубых скоплений эта закономерность проявляется наиболее отчетливо.) В итоге получается, что у малометалличных скоплений экстремально голубые горизонтальные ветви наблюдаются в основном у близких к галактическому центру и у небольшого числа далеких, сравнительно маломассивных, скоплений. Мы полагаем, что это могло получиться из-за того, что у обоих типов скоплений вещество, выбрасываемое проэволюционировавшими звездами, не остается в скоплениях, а выметается возмущениями гравитационного потенциала Галактики. Причем у первых это происходит из-за частых приближений к галактическому балджу и диску, тогда как у вторых — из-за их малой массы,

неспособной удержать это вещество даже на значительном расстоянии от галактического центра. В итоге вторичное население у них или не образуется, или образуется в небольшом количестве. У малометалличных скоплений с покрасневшими горизонтальными ветвями все точки орбит зачастую находятся за пределами солнечного круга, где возмущения гравитационного потенциала Галактики менее сказываются. Возможно, поэтому в них и успевает образоваться население более молодых звезд, искажающих цвет их горизонтальных ветвей. Описанная картина не вполне однозначна, поскольку третья и последующие популяции в некоторых скоплениях переобогащены гелием, что приводит к появлению звезд на горизонтальной ветви с высокотемпературной стороны от полосы нестабильности. В итоге цвет ветви смещается в голубую сторону. Характерным примером является скопление М 15, у которого в дополнение к нормальному голубому участку горизонтальной ветви имеется еще и так называемый "голубой хвост" [40]. Проверка предлагаемого объяснения существования корреляции между цветом горизонтальной ветви и потерей газа скоплением требует подробного анализа орбитальных треков скоплений, а также привлечения уже опубликованных многочисленных данных по индивидуальному химическому составу звезд в скоплениях.

На рис. Зг приведены диаграммы "азимутальная скорость (V_{Θ})-отношения [Ca, Ti/Fe]" для шаровых скоплений нашей выборки, для которых определены эти параметры, и звезд поля. Дополнительно на диаграмме отмечены скопления, внегалактическое происхождение которых доказано, то есть считающиеся аккрецированными, и скопления, имеющие точки орбит (R_{\max}) или находящиеся далее 15 кпк от галактического центра. Вертикальной линией $V_{\Theta} = 0$ отделены звезды поля и скопления с ретроградным вращением. Для звезд поля характерны высокие, в среднем, значения отношений $[\alpha/Fe]$, но с большим разбросом при малых и отрицательных значениях скорости и быстрое их уменьшение с приближением к скорости вращения галактического диска на солнечном галактоцентрическом расстоянии. У шаровых скоплений с любой кинематикой отношения $[\alpha/Fe]$ мало отличаются друг от друга и вообще не коррелируют с азимутальной компонентой скорости, как металличность на рис. За. Причем при всех значениях $V_{\Theta} < V_{\odot}$ дисперсия у них небольшая ($\sigma[\alpha/\text{Fe}] \approx 0.1$), однако при скорости обращения вокруг галактического центра больше солнечной разброс резко увеличивается (правда таких скоплений только пять, но среди них есть скопления с кинематикой всех трех подсистем). Высокие относительные содержания α -элементов свидетельствуют о том, что практически все скопления образовались из межзвездного



Рис. 4. Зависимость относительных содержаний, усредненных по двум α -элементам (Са и Ті) (а, в, г), и по четырем α -элементам (Mg, Ca, Si и Ti) (б) от металличности для звезд поля из [26] и шаровых скоплений (ввиду отсутствия содержаний кремния у звезд поля они усреднены по трем элементам). Звезды поля и скоплений разных подсистем обозначены как на рис. 2a, б; темные снежинки — генетически связанные звезды поля с $V_{\text{ост}} < 240$ км/с, светлосерые крестики — более высокоскоростные звезды поля (в, г); внешние, внутренние и скопления на ретроградных орбитах обозначены как на рис. 3в. Большие серые пятиугольники — скопления, потерянные галактикой СМа; большие серые звезды — скопления, потерянные галактикой Sgr; ромбики — звезды карликовых галактик-спутников из [42–44], большие косые крестики — звезды потока Центавра (г). Ломаная кривая линия — проведенная "на глаз" нижняя огибающая для генетически связанных звезд поля (а-г).

вещества, еще не обогащенного элементами группы железа от вспышек сверхновых типа Ia.

5. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ СОДЕРЖАНИЯ АЛЬФА-ЭЛЕМЕНТОВ В ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЯХ РАЗНЫХ ПОДСИСТЕМ И ПРИРОДЫ

На рис. 4а приведена диаграмма "[Fe/H]– [Ca,Ti/Fe]" для шаровых скоплений разных галактических подсистем и звезд поля разной природы (подробности ниже). Из рисунка видно, что скопления, принадлежащие по кинематическому критерию каждой из подсистем, в отличие от звезд поля могут иметь не только любую металличность, но и любые относительные содержания α -элементов. Из рис. 4б, где такая же диаграмма построена для усредненных по четырем α элементам (магнию, кремнию, кальцию и титану) видим, что в целом положение области, занимаемое шаровыми скоплениями, относительно звезд поля не изменилось, но численность скоплений уменьшилась. В отличие от остальных диаграмм рисунка, здесь для сравнения разными значками обозначены звезды поля разных галактических подсистем, выделенные по кинематическому критерию из [31]. Видно, что скопления и звезды поля одноименных подсистем имеют существенно различающийся химический состав. Для генетически связанных звезд поля, то есть образовавшихся из единого протогалактического облака, металличность может служить статистическим индикатором их возраста, поскольку в замкнутой звездно-газовой системе (каковой в первом приближении можно считать нашу Галактику) общее содержание тяжелых элементов со временем неуклонно увеличивается. Такими мы полагаем звезды поля с остаточной скоростью

279

 $V_{\rm oct} < 240$ км/с (см. [41]), которые обозначены на диаграмме маленькими темными снежинками. Подавляющее число звезд поля с более высокими остаточными скоростями (обозначены серыми крестиками) имеют ретроградное вращение (см. рис. За). Все более высокоскоростные звезды можно считать кандидатами в аккрецированные. Обратим внимание, что малометалличные ([Fe/H] < -1.0) генетически связанные звезды поля располагаются вдоль верхней половины полосы на рис. 4а, в, г. Для ориентировки на рисунках ломаной кривой, проведенной "на глаз", нанесены нижние огибающие для генетически связанных звезд поля. Положение нашей линии хорошо согласуется с проведенной в работе [42], где авторы выделили два населения среди малометалличных звезд поля не по кинематике, а по относительным содержаниям α -элементов примерно по границе $[\alpha/Fe] \sim 0.3$ и нашли, что звезды этих населений различаются не только химическим составом, но и кинематикой, и возрастом. Причем они изначально искали свидетельства того, что население с меньшим относительным содержанием α -элементов имеет внегалактическое происхождение. Из рис. 4а, в, г видно, что у генетически связанных звезд отношения $[\alpha/Fe]$ начинают резко уменьшаться с увеличением металличности, начиная с $[Fe/H] \approx -1.0$, из-за начала вспышек в Галактике SNe Ia. У шаровых скоплений такого не наблюдается, и подавляющее число богатых металлами скоплений лежат выше полосы, занимаемой звездами поля. Хотя для них и заметно некоторое уменьшение отношений $[\alpha/Fe]$ с ростом металличности, но их позиции на диаграмме в основном остаются в диапазоне отношений $[\alpha/Fe] > 0.15$, как и у малометалличных скоплений. При этом скопления, принадлежащие по кинематике двум наиболее многочисленным галактическим подсистемам — толстому диску и гало, не обнаруживают статистически значимых различий положений на диаграмме.

На рис. 4в приведена та же диаграмма "[Fe/H]-[Ca, Ti/Fe]", но скопления выделены по другим признакам: аккрецированные скопления, принадлежность которых в прошлом распавшимся галактикам-спутникам обоснована их положением и пространственным движением, далекие скопления ($R_{
m GC}$ или $R_{
m max} > 15$ кпк) и скопления с ретроградными орбитами. Видно, что в диапазоне ([Fe/H] < -1.0) отмеченные скопления располагаются на диаграмме так, что нижняя огибающая для генетически связанных звезд поля для них близка к медиане. Видно также, что в целом все население аккрецированных скоплений вместе с кандидатами в аккрецированные (далекими скоплениями и скоплениями на ретроградных орбитах) демонстрируют на рис. 4в большой разброс отношений

 $[\alpha/Fe]$. (Причем 5 из 9 скоплений с ретроградными орбитами оказались внутри солнечного круга.) Разброс у них значительно больше, чем у генетически связанных звезд поля. Обратим внимание, что примерно такой же большой разброс демонстрируют на рис. 4 и высокоскоростные ($V_{oct} > 240 \text{ км/c}$) малометалличные звезды поля, которые генетически не связаны с единым протогалактическое происхождение. Возможно, что большой разброс отношений [α/Fe] у таких скоплений и звезд поля мог получиться из-за различия максимальных масс сверхновых II типа, обогативших вещество их многочисленных родительских карликовых галактик.

На рис. 4г черными кружками нанесены скопления, которые ни по каким признакам мы не можем отнести к кандидатам в аккрецированные. Мы полагаем такие скопления генетически связанными, то есть образовавшимися из единого протогалактического облака. По определению все 32 таких скопления нашей выборки расположены ближе 15 кпк от галактического центра. Причем 27 из них, как видно, лежат вообще внутри солнечного круга (R_{GC} < 8 кпк), они отмечены белыми треугольниками внутри темного кружка. И среди них все богатые скопления с высокими отношениями [Ca,Ti/Fe], часть из которых, скорее всего, принадлежит галактическому балджу. На этой диаграмме, кроме генетически связанных скоплений, нанесены и те, для которых принадлежности к двум весьма массивным карликовым галактикам — Sgr и СМа — считаются надежно установленными (см. выше). Из рисунка видно, что 24 из 28 аккрецированных и генетически связанных скоплений в диапазоне [Fe/H] < -1.0 образуют на диаграмме довольно узкую полосу, причем нижняя огибающая для генетически связанных звезд поля и для них может служить таковой. Но при этом все указанные скопления теснее концентрируются к этой линии, чем генетически связанные звезды поля. (Очень низкие отношения [Ca, Ti/Fe] демонстрируют всего два малометалличных скопления из Sgr — это очень далекое скопление с единственной исследованной звездой в одной работе NGC 2419 и Ter 8, правда, относительные содержания магния у обоих высокие, 0.30 и 0.52 соответственно, да и содержание кремния у Ter 8 составляет 0.38, то есть при учете всех *а*-элементов и эти скопления оказываются вблизи нижней огибающей.) Зато в более металличном диапазоне оба захваченных из карликовой галактики-спутника Sgr металличных скопления (Pal 12 и Ter 7) лежат ниже звезд поля. Аномально низко на диаграмме лежит и малометалличное скопление Rup 106, потерянное, как полагают, карликовой галактикой. Напомним, что в работе [12] его с некоторой долей вероятности посчитали принадлежащим в прошлом довольно массивной галактике СМа, однако очень низкое относительное содержание в нем α -элементов при малой металличности противоречит этому предположению. Можно допустить, что оно было потеряно одной из маломассивных карликовых галактиксиртников при условии, конечно, что содержания α -элементов всего в двух звездах Rup 106 в одной статье определены правильно. Заметим, что это скопление является одним из наименее массивных ($M_V = -6.35^m$) малометалличных скоплений в Галактике и вполне могло образоваться в такой карликовой галактике.

6. АККРЕЦИРОВАННЫЕ ШАРОВЫЕ СКОПЛЕНИЯ И МАССЫ ИХ РОДИТЕЛЬСКИХ ГАЛАКТИК

В работе [6] для 235 выделенных ими звезд ядра разрушаемой в настоящее время карликовой галактики Sgr построена зависимость [Mg, Ca/Fe] от [Fe/H]. Подчеркивается, что в малометалличном диапазоне ([Fe/H] < -1.0) последовательность звезд из этой галактики совпадает с последовательностью звезд поля Галактики, а при большей металличности она лежит несколько ниже, чем у звезд поля. Причем авторы работы [6] отмечают, что в области [Fe/H] > -1.0 зависимость относительных содержаний *α*-элементов от металличности в галактике Sgr очень похожа на ту, которая наблюдается у звезд самого массивного спутника Галактики — Большого Магелланова Облака. Это, по их мнению, предполагает и у галактики Sgr также большую массу. И действительно, моделирование кинематики приливного хвоста звезд галактики Sgr в работе [7] показало, что для того чтобы воспроизвести дисперсию скоростей в потоке от этой галактики, масса ее темного гало должна быть $M = 6 \times 10^{10} \ M_{\odot}$. Авторам работы [6] удалось воссоздать наблюдаемые химические закономерности в родительской карликовой галактике Sgr в модели, подразумевающей именно такую большую ее начальную массу и значительную ее потерю несколько миллиардов лет назад в период, начиная с первого ее пересечения перигалактия нашей Галактики.

На рис. 4г среди звезд поля большими серыми косыми крестиками выделены звезды поля так называемого потока Центавра. Предполагается, что все эти звезды были потеряны карликовой галактикой-спутником, центральным ядром которой было самое массивное шаровое скопление ω Центавра, принадлежащее в настоящее время нашей Галактике (см. [8] и ссылки в ней). Численное моделирование динамических процессов, происходящих при взаимодействии галактики-спутника с диском и балджем нашей Галактики, показало, что захват ядра карликовой галактики на вытянутую ретроградную орбиту с малым апогалактическим радиусом вполне возможен, при этом галактика должна быть довольно массивной, $\approx 10^9 M_{\odot}$ [14]. В частности, результаты численного моделирования Абади и др. [49] показали, что орбиты достаточно массивных галактик-спутников постоянно уменьшаются в размерах и перемещаются в галактическую плоскость динамическим трением. Со временем такие галактики, приобретя очень эксцентричные орбиты, практически параллельные галактическому диску, начинают интенсивно разрушаться приливными силами Галактики при каждом своем прохождении перигалактического расстояния, теряя звезды с четко детерминированными орбитальными энергиями и угловыми моментами. Поэтому, если наблюдатель находится между апогалактическим и перигалактическим радиусами такой орбиты, то приливный "хвост" от разрушаемой галактики будет наблюдаться в виде "движущейся группы" звезд с малыми вертикальными компонентами скоростей и широким, симметричным и часто двухвершинным распределением радиальных компонентов пространственных скоростей.

Основываясь на рекомендациях из статьи [50], в работе [41] из авторского сводного каталога спектроскопических определений содержаний магния (представителя α -элементов) в ≈ 800 близких F-К карликах поля [51] были выделены звезды, потерянные карликовой галактикой, центром которой было скопление ω Cen, по азимутальным и вертикальным компонентам скоростей в диапазонах $-50 \le V_{\Theta} \le 0$ км/с и $|V_Z| < 65$ км/с соответственно. Оказалось, что выявленные 18 звезд потока действительно демонстрируют довольно узкую последовательность на диаграмме "[Fe/H]-[Mg/Fe]", характерную для генетически связанных звезд. Причем положение "точки излома" относительного содержания магния на $[Fe/H] \approx -1.3$ dex указывает на то, что скорость звездообразования в их родительской галактике была ниже, чем в нашей Галактике. Звездообразование в этой галактике, похоже, продолжалось так долго, что самые ее металличные звезды достигли величины отношения [Mg/Fe] < 0.0 dex, то есть даже меньше, чем у Солнца. Однако низкое значение максимальной металличности звезд данной группы (всего $[Fe/H] \approx -0.7$) указывает на прекращение последующего звездообразования в их родительской галактике. Скорее всего, это произошло из-за начала распада карликовой галактики. Другими словами, химический состав звезд этой бывшей галактики свидетельствует о том, что она действительно довольно долго эволюционировала (но меньше, чем наша Галактика) прежде, чем разрушиться. В данной работе по тем же критериям мы выделили звезды потока Центавра из используемого здесь каталога звезд поля [26]. Таких звезд оказалось также 18 и на рис. 4г они обозначены большими косыми крестиками. Видим, что поведение двух других α -элементов (кальция и титана) соответствует описанию поведения магния по данным другого каталога. В итоге получается, что зависимость [α /Fe] от [Fe/H] у звезд потока Центавра неплохо согласуется с зависимостью аккрецированных скоплений в диапазоне [Fe/H] > -1.5. То есть подтверждает предположение о внегалактическом происхождении, по крайней мере, некоторых высокоскоростных звезд поля, причем попавшим к нам из галактик-спутников довольно большой массы.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наша Галактика обладает сложной многокомпонентной структурой, состоящей из нескольких подсистем, которые как бы вложены друг в друга. Четкие границы у подсистем отсутствуют, поэтому оценить их размеры можно лишь приблизительно. Геометрические границы предполагают определенные дисперсии скоростей объектов, принадлежащих данной подсистеме. Использование кинематических параметров считается наиболее надежным методом стратификации объектов по подсистемам. Именно таким способом разделяют звезды поля по подсистемам Галактики. Как показывают результаты данной работы, для шаровых скоплений этот метод вряд ли подходит, поскольку выделенные по кинематике скопления разных подсистем демонстрируют химические свойства, кардинально отличающиеся от свойств звезд поля одноименных подсистем, и наоборот. В частности, все металличные ([Fe/H] > -1.0) скопления, принадлежащие по кинематике любой подсистеме, оказываются заключенными в довольно ограниченных пределах относительно центра и плоскости Галактики. Зато в менее металличном диапазоне среди скоплений всех выделенных по кинематике подсистем имеются и весьма удаленные. Это проявляется в хорошо известных радиальном и вертикальном градиентах металличности у генеральной совокупности шаровых скоплений Галактики. Получается, что традиционно используемая процедура отделения скоплений толстого диска от гало по металличности оказывается более приемлемой. (Заметим, что аналогичное противоречие между критериями принадлежности к подсистемам толстого диска и гало по химическим и кинематическим признакам наблюдается и у звезд типа RR Лиры поля (см., в частности, [52]).) Напомним, что вероятности принадлежности скоплений к галактическим подсистемам вычисляются на основе их остаточных скоростей на галактоцентрических расстояниях, соответствующих нынешним положениям. При этом

совершенно не учитывается, насколько высоко над галактической плоскостью скопления сейчас находятся. В итоге вертикальные составляющие остаточных скоростей высоко расположенных скоплений могут занижаться, поскольку вблизи апогалактия они уменьшаются. А это, в свою очередь, может привести к ошибочному отнесению таких скоплений к дисковой подсистеме. В очередной работе мы планируем учесть это обстоятельство и заново провести стратификацию всех скоплений.

Если считать, что все шаровые скопления образованы из вещества единого протогалактического облака, то можно предположить, что ответственным за такое выделенное положение богатых металлами скоплений является существование активных фаз в эволюции Галактики (см. [19]). Период активной фазы наступает после массовых вспышек сверхновых в гало, разогревающих межзвездное вещество, в результате чего происходит задержка звездообразования. В период этой задержки уже загрязненное тяжелыми элементами межзвездное вещество протогалактики перемешивается, остывает и коллапсирует до меньших размеров, после чего в Галактике формируются дисковые подсистемы. Однако такому сценарию образования подсистем у шаровых скоплений противоречат, как видно из рис. 4а-г, относительные содержания в них α -элементов, которые практически у всех исследованных металличных скоплений (кроме трех аккрецированных скоплений Ter 7, Pal 12 и Rup 106 и двух скоплений балджа NGC 6528 и NGC 6553) оказались высокими: $[\alpha/Fe] > 0.15$. Отсутствие надежно прослеживаемого "излома" на зависимости [lpha/Fe] от [Fe/H], как у звезд поля, свидетельствует о том, что все исследованные скопления образовались до начала вспышек SNe Ia, то есть в течение первого миллиарда лет после начала звездообразования в протогалактическом облаке. Эти сверхновые обогащают межзвездную среду исключительно атомами элементов группы железа, в результате чего отношения $[\alpha/Fe]$ в замкнутой звездно-газовой системе начинают уменьшаться. Как демонстрируют звезды поля на рис. 4а−г, в Галактике это происходит при [Fe/H] ≈ ≈ -1.0 . Из того же рисунка видно, что в пределах металличного диапазона у скоплений также наблюдается уменьшение относительных содержаний α -элементов с ростом металличности, но отношения $[\alpha/Fe]$ при любой металличности остаются у них выше, чем у звезд поля толстого диска. В итоге, зависимость $[\alpha/Fe]$ от [Fe/H] у них лежит выше и параллельно аналогичной зависимости звезд поля. Причем среди них имеются скопления всех выделенных по кинематике подсистем. Как видно из рис. 4г, объединяет богатые металлами скопления то, что все они лежат внутри солнечного круга. Причем даже самые удаленные точки их орбит практически не выходят за пределы этого радиуса. Возрасты скоплений, ввиду своей неопределенности, не позволяют сделать окончательный вывод об их природе. В частности, согласно возрастам из работы [29], все они моложе 12 млрд. лет. Зато по определениям [30] они старше этого возраста и возникли одновременно с самыми старыми наименее металличными скоплениями. То есть нет непротиворечивого объяснения, почему при переходе через [Fe/H] ≈ -1.0 скопления скачком изменяют занимаемый объем в Галактике.

Из нашего рис. 4 видно, что вся совокупность малометалличных ([Fe/H] < -1.0) шаровых скоплений Галактики занимает на диаграмме "[Fe/H]- $[\alpha/Fe]$ " практически одну и ту же полосу вместе с быстрыми ($V_{\Theta} > 240$ км/с), то есть аккрецированными звездами поля. При этом, как видно из той же диаграммы, звезды карликовых галактикспутников нашей Галактики при такой же низкой металличности имеют существенно меньшие величины [α /Fe] [42-44]. Сказанное выше свидетельствует, что все звездные объекты аккрецированного гало являются остатками галактик более высокой массы, чем нынешнее окружение Галактики. Различия в содержаниях *α*-элементов у звездных объектов Галактики и окружающих ее менее массивных карликовых галактик-спутников указывают на то, что последние не оставили заметного звездного следа в ней. Этот вывод согласуется с заключением, полученным по меньшему количеству шаровых скоплений в работе [22]. В недавней работе [53] на основании обнаружения высокой радиальной анизотропии поля скоростей у большой выборки карликов гало из окрестности ~10 кпк от Солнца также сделан вывод об аккреции на Галактику спутника большой массы примерно (8-11) млрд. лет назад.

БЛАГОДАРНОСТИ

В.А. Марсаков и М.Л. Гожа благодарят за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание № 3.5602.2017/БЧ), а В.В. Коваль благодарит за поддержку Минобрнауки РФ (госзадание № 3.858.2017/4.6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. M. G. Abadi, J. F. Navarro, and M. Steinmetz, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **365**, 747 (2006).
- 2. R. Ibata, G. Gilmore, and M. Irvin, Nature. **370**, 194 (1994).
- 3. M. Mateo, in *Formation of the Galactic Halo*. *Inside and Out*, edited by H. Morrison and A. Sarajedini, ASP Conf. Ser. **92**, 434 (1996).
- D. R. Law and S. R. Majewski, Astrophys. J. 718, 1128 (2010).

- 5. C. Palma, S. R. Majewski, and K. V. Jonston, Astrophys. J. **564**, 736 (2002).
- M. Bellazzini, F. R. Ferraro, and R. Ibata, Astron. J. 125, 188 (2003).
- B. Tang, J. G. Fernández-Trincado, D. Geisler, O. Zamora, *et al.*, Astrophys. J. 855, id. 38 (2018).
- 8. R. B. Larson, in *Formation of the Galactic Halo. Inside and Out*, edited by H. Morrison and A. Sarajedini, ASP Conf. Ser. **92**, 241 (1996).
- 9. D. Massari, L. Posti, A. Helmi, G. Fiorentino, and E. Tolstoy, Astron. and Astrophys. **598**, id. L9 (2017).
- D. Dinescu, S. R. Majewski, T. M. Girard, and K. M. Cudworth, Astron. J. **120**, 1892 (2000).
- 11. D. Dinescu, S. R. Majewski, T. M. Girard, and K. M. Cudworth, Astron. J. **122**, 1916 (2001).
- 12. D. A. Forbes and T. Bridges, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **404**, 1203 (2010).
- K. Freeman, in *Galactic Bulges*, Proc. of the 153rd Symp. of the IAU held in Ghent, Belgium, August 17–22, 1992, edited by H. Dejonghe and H. J. Hobiug (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993), p. 263.
- 14. T. Tshuchiya, D. Dinescu, and V. I. Korchagin, Astrophys. J. 589, L29 (2003).
- 15. D. Carollo, T. C. Beers, Y. S. Lee, M. Chiba, *et al.*, Nature. **450**, 1020 (2007).
- G. S. Da Costa and T. E. Armandroff, Astron. J. 109, 253 (1995).
- R. Zinn, in *The Globular Cluster-Galaxy Connection*, edited by H. Smith and J. Brodee, ASP Conf. Ser. 48, 38 (1993).
- Т. В. Боркова, В. А. Марсаков, Астрон. журн. 77, 750 (2000).
- В. А. Марсаков, А. А. Сучков, Астрон. журн. 54, 1232 (1977).
- 20. В. В. Бобылев, А. Т. Байкова, Астрон. журн. **94**, 557 (2017).
- E. Carretta, in *The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution*, edited by A. Bragaglia, M. Arnaboldi, M. Rejkuba, and D. Romano, Proc. of the IAU Symp. **317**, 97 (2016).
- 22. J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin, Astron. J. 130, 2140 (2005).
- 23. W. E. Harris, Astron. J. 112, 1487 (1996).
- 24. M. Eadie and W. E. Harris, Astrophys. J. **829**, id. 108 (2016).
- 25. R. Schonrich, J. Binney, and W. Dehnen, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **403**, 1829 (2010).
- 26. K. A. Venn, M. Irwin, M. D. Shetrone, C. A. Tout, V. Hill, and E. Tolstoy, Astron. J. **128**, 1177 (2004).
- 27. T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey, Astron. and Astrophys. **562**, id. A71 (2014).
- 28. E. Moreno, B. Pichardo, and H. Velázquez, Astrophys. J. **793**, id. 110 (2014).
- 29. D. A. VandenBerg, Astrophys. J. Suppl. **129**, 315 (2000).
- 30. M. Salaris and A. Weiss, Astron. and Astrophys. **388**, 492 (2002).
- 31. T. Bensby, S. Feldzing, and I. Lungstrem, Astron. and Astrophys. **410**, 527 (2003).

- 32. C. Allen and A. Santillan, Revista Mexicana Astron. Astrof. **25**, 39 (1993).
- 33. O. J. Eggen, D. Linden-Bell, and A. Sandage, Astrophys. J. **136**, 748 (1962).
- 34. Y.-W. Lee, H. B. Gim, and D. I. Casetti- Dinescu, Astrophys. J. **661**, L49 (2007).
- 35. R. G. Gratton, E. Carretta, and A. Bragaglia, Astron. and Astrophys. Rev. **20**, 50 (2012).
- 36. P. Ventura and F. D'Antona, Astron. and Astrophys. **499**, 835 (2009).
- T. Decressin, G. Meynet, C. Charbonnel, N. Prantzos, and S. Ekström, Astron. and Astrophys. 464, 1029 (2007).
- S. Jang, Y.-W. Lee, S.-J. Joo, and C. Na, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 443, L15 (2014).
- T. V. Borkova and V. A. Marsakov, Bull. SAO 54, 61 (2002).
- Y.-W. Lee, P. Demarque, and R. Zinn, Astrophys. J. 423, 248 (1994).
- 41. В. А. Марсаков, Т. В. Боркова, Письма в Астрон. журн. **32**, 545 (2006).
- M. Shetrone, P. Cote, and W. L. W. Sargent, Astrophys. J. 548, 592 (2001).
- 43. M. Shetrone, K. A. Venn, E. Tolstoy, F. Primas, V. Hill, and A. Kaufer, Astron. J. **125**, 684 (2003).
- 44. D. Geisler, V. V. Smith, G. Wallerstein, G. Gonzalez, and C. Charbonnel, Astron. J. **129**, 1428 (2005).

- 45. P. E. Nissen and W. J. Schuster, Astron. and Astrophys. **511**, L10 (2010).
- 46. A. Mucciarelli, M. Bellazzini, R. Ibata, D. Romano, S. C. Chapman, and L. Monaco, Astron. and Astrophys. **605**, id. A46 (2017).
- 47. S. L. J. Gibbons, V. Belokurov, and N. W. Evans, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **464**, 794 (2017).
- V. Marsakov, T. Borkova, and V. Koval' in Variable stars, the Galactic halo and Galaxy formation, Proc. of an Intern. Conf. held in Zvenigorod, Russia, 12–16 October 2009, edited by C. Sterken, N. Samus, and L. Szabodos (Moscow: University Press, 2010), p. 133.
- 49. M. G. Abadi, J. F. Navarro, M. Steinmetzand, and V. R. Eke, Astrophys. J. **591**, 499 (2003).
- A. Meza, J. F. Navarro, M. G. Abadi, and M. Steinmetz, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 359, 93 (2005).
- 51. Т. В. Боркова, В. А. Марсаков, Астрон. журн. **82**, 453 (2005).
- 52. В. А. Марсаков, М. Л. Гожа, В. В. Коваль, Астрон. журн. **95**, 54 (2018).
- 53. V. Belokurov, D. Erkal, N. W. Evans, S. E. Koposov, and A. J. Deason, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 478, 611 (2018).