

УДК 524.7-33+52-323.3:520.82

## ВЛИЯЕТ ЛИ ПАДЕНИЕ МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ НА ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ ГАЛАКТИК?

© 2026 Н. А. Тихонов<sup>1\*</sup>, О. А. Галазутдинова<sup>1</sup>, Г. М. Каратаева<sup>2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 6 августа 2025 года; после доработки 4 ноября 2025 года; принята к публикации 14 ноября 2025 года

На основе архивных снимков космического телескопа им. Хаббла проведена звездная фотометрия 70 иррегулярных галактик. На полученных диаграммах Герцшпрунга—Рассела выделены ветви красных сверхгигантов и гигантов. TRGB-методом определены расстояния до галактик и металличность красных гигантов. В качестве индекса металличности красных сверхгигантов был выбран показатель цвета ( $V - I$ ) ветви сверхгигантов на уровне светимости  $M_I = -7^m0$ . Измерения показали, что ни в одной галактике не наблюдается инверсия металличности молодых и старых звезд, что должно было бы произойти при падении на галактику облаков низкометаллического межгалактического газа. Это означает, что падение межгалактических облаков, если оно происходило, не влияло значимым образом на эволюцию звездного населения галактик в течение последних миллиардов лет. За миллиарды лет эволюции каждая галактика подвергалась случайным процессам, которые могли изменить металличность ее межзвездной среды и звезд. Однако полученная нами линейная зависимость между металличностями молодых и старых звезд галактик разных масс показывает, что основное насыщение галактик металлами происходило в далеком прошлом. Современные процессы повышают металличность галактик, но делают это значительно медленнее, чем это происходило при образовании галактик. В противном случае не наблюдалась бы линейная зависимость между металличностями звезд разного возраста в галактиках разных масс и истории звездообразования.

Ключевые слова: галактики: карликовые — галактики: фотометрия — галактики: эволюция

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Во всех разрешаемых на звезды галактиках присутствуют старые звезды — красные гиганты, что однозначно указывает на большой возраст этих галактик. Возможно, что возраст большинства из них достигает 12 млрд лет, то есть эти галактики образовались сразу после Большого взрыва. За этот огромный интервал времени каждая галактика прошла свой индивидуальный путь эволюции, в течение которого она могла подвергаться действию самых разнообразных процессов, способных сильно изменить ее морфологию, массу, светимость и химический состав. Действие таких процессов, назовем их условно катаклизмами, можно видеть на снимках космического телескопа им. Хаббла (HST). Мы имеем в виду взаимодействия, слияния или поглощения галактик, мощные вспышки звездообразования, процессы, происходящие в активных ядрах галактик и в сверхновых звездах. Возможно также падение на галактики межгалактических облаков водорода, которые видны в

окрестностях галактик при наблюдениях на радио-телескопах.

Результаты действия некоторых катаклизмов оказываются противоположны друг другу. Например, взаимодействие галактик может вызвать мощную вспышку звездообразования, что приведет к появлению массивных звезд. Некоторые из этих звезд пройдут стадию вспышки сверхновой звезды SN II, что обогатит межзвездную среду галактики тяжелыми элементами. После такого обогащения все молодые звезды будут иметь повышенную металличность. Противоположные процессы — падение на галактику малометаллических межгалактических облаков или поглощение малой галактики — вызовут понижение металличности межзвездной среды из-за разбавления ее малометаллическим газом, что приведет к появлению молодых звезд с пониженной металличностью по сравнению со старыми звездами. Наиболее заметные последствия действий названных катаклизмов должны проявляться у самых маломассивных карликовых галактик, для которых вспышка звездообразования, взаимодействие с соседней галактикой или падение относительно небольшого газового облака

\*E-mail: ntik@sao.ru

могут привести к значительным изменениям физических параметров всей галактики.

Мы не имеем возможности изучить подробности процессов давно прошедших катаклизмов, но можем измерить результат их действия на галактику, сравнивая металличность молодых и старых звезд, например красных сверхгигантов и гигантов. Возраст красных сверхгигантов находится в интервале от 3 до 100 млн лет, а красных гигантов — от 1.5 до 12 млрд лет. За период времени от своего рождения и до наших дней галактики могли испытать действия указанных катаклизмов в самых разных комбинациях и совершенно случайным образом, поэтому в галактиках должны наблюдаться значительные различия металличности молодых и старых звезд. Оценки металличности звезд разного возраста можно получить фотометрическим методом для разрешаемых на звезды галактик. Для этого необходимо выполнить звездную фотометрию, построить диаграмму Герцшпрунга—Рассела (СМ-диаграмма) и оценить металличность звезд по показателю цвета ( $V - I$ ) ветвей красных сверхгигантов и гигантов, используя теоретические изохроны (Bertelli et al., 1994 или Bressan et al., 2012) и работу Lee et al. (1993).

## 2. ОБЪЕКТЫ И ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

В нашей прежней работе по измерению металличности молодых и старых звезд (Tikhonov, 2018) выборка состояла из маломассивных спиральных и карликовых иррегулярных галактик. В статье был сделан вывод, что у некоторых галактик, особенно у КК 16, наблюдаются признаки падения межгалактических облаков, но этот процесс не влияет значимым образом на изменение металличности звездного населения большинства галактик за время их эволюции.

Для получения статистически более надежных выводов о возможном влиянии на металличность звезд падения межгалактических облаков мы измерили металличность звезд у 50 новых галактик. В списке присутствуют объекты очень малых масс, поскольку изменение параметров галактики при действии катаклизмов максимально будет проявляться в самых маломассивных галактиках. Кроме того, была более подробно изучена галактика КК 16, в которой металличность молодых звезд не соответствовала общей зависимости между металличностями молодых и старых звезд (Tikhonov, 2018). Большая часть снимков, которые мы использовали в нашей работе, получена из архивов по заявке ID 15922 (R. В. Tully), но некоторые были получены из архивов по другим заявкам. Для фотометрии звезд мы использовали HST-снимки с камерой ACS/WFC в фильтрах  $F606W$  ( $V$ ) и

$F814W$  ( $I$ ). Время экспозиции снимков, выполненных по заявке ID 15922, составляло 760 с.

Для сравнения полученных результатов с результатами прежней работы (Tikhonov, 2018) мы провели фотометрию с пакетом DOLPHOT 2.0 двадцати галактик из нашего старого списка, чтобы все измерения были выполнены единообразным методом. На рис. 1 представлены HST-снимки четырех типичных галактик из нашего списка, имеющих разные размеры и светимости. Отрезок прямой в каждом изображении равен 1 кпк. Размеры всех снимков  $85'' \times 85''$ .

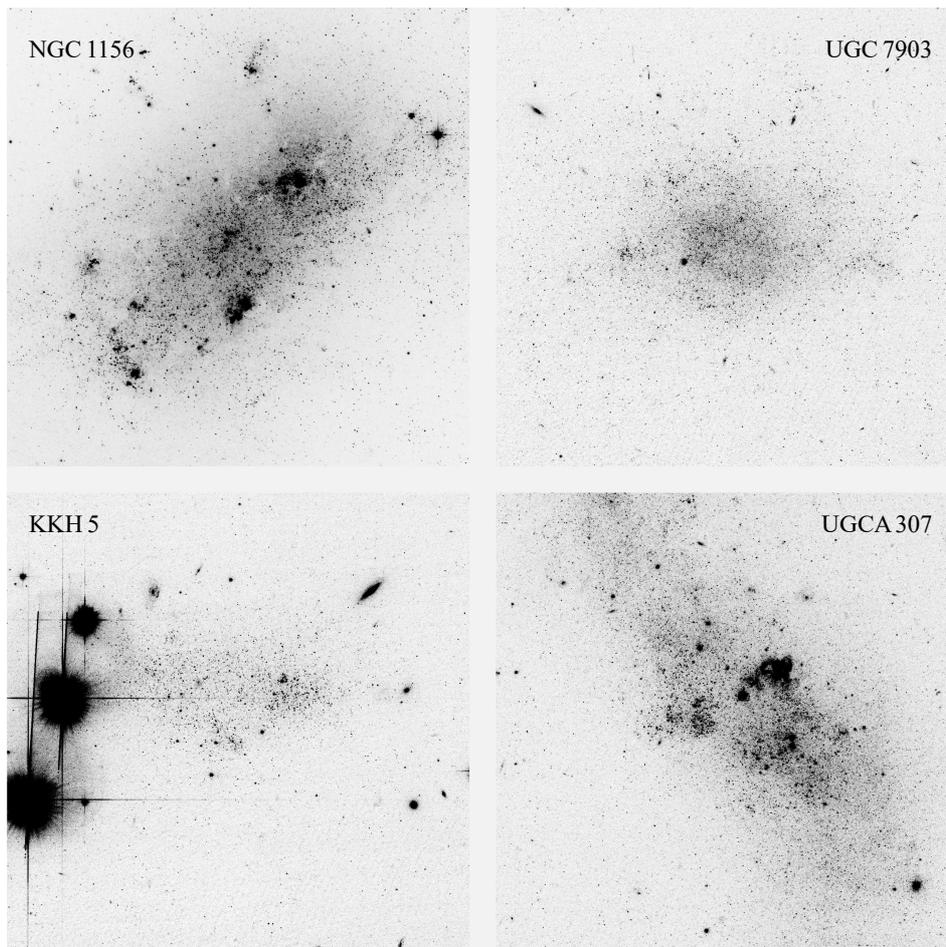
Звездная фотометрия галактик проводилась стандартным образом в соответствии с рекомендациями Долфина и выполнялась пакетом программ DOLPHOT 2.0 (Dolphin, 2016)<sup>1</sup>. У всех галактик на СМ-диаграммах видны ветви красных сверхгигантов и гигантов, по показателю цвета которых мы определяли значения металличности этих звезд. Положение TRGB-скачка на ветви красных гигантов мы использовали для определения расстояний до тех галактик, которые не вошли в списки ранее измеренных объектов (Tikhonov and Galazutdinova, 2022; Karachentsev and Tikhonov, 2023; Tikhonov et al., 2024). Фотометрия звезд и техника измерения расстояний более подробно описаны в нашей работе Tikhonov and Galazutdinova (2022). Величина поглощения света в направлении на каждую галактику бралась из работы Schlafly and Finkbeiner (2011). Список из 70 галактик приведен в таблице 1. Параметры галактик — координаты и лучевые скорости — взяты из базы данных NED<sup>2</sup>) и HyperLEDA<sup>3</sup>). В таблице 1 указаны также результаты наших оценок расстояний до галактик и средние значения металличностей красных сверхгигантов и гигантов. Пример результатов фотометрии показан на рис. 2, где представлены СМ-диаграммы четырех галактик, изображенных на рис. 1.

Отдельные области звездообразования и группы молодых звезд в иррегулярных галактиках могут располагаться как в центре, так и на краю галактик, но распределение численной плотности звезд разного возраста вдоль радиуса иррегулярных галактик показывает, что молодые звезды концентрируются к центру существенно сильнее, чем другие, более старые звезды. Пространственное звездное строение галактик напоминает своего рода игрушку матрешку: чем старше звезды, тем больший объем они занимают (Tikhonov, 2012).

<sup>1</sup><http://americano.dolphinim.com/dolphot/dolphot.pdf>

<sup>2</sup>NASA/IPAC Extragalactic Database: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

<sup>3</sup>Hyper-Linked Extragalactic Databases and Archives: <http://atlas.obs-hp.fr/hyperleda/>



**Рис. 1.** Изображения четырех типичных для нашего списка галактик, имеющих разную морфологию, размеры и светимость. Снимки получены на HST-телескопе в фильтре  $F6006W$  ( $V$ ). Горизонтальный отрезок в нижней части каждого снимка равен 1 кпк. Из-за различия в поверхностных яркостях галактик на снимке NGC 1156 понижен контраст изображений для наглядного представления внутренней морфологии галактики. Размер каждого снимка  $85'' \times 85''$ .

Из этого следует, что выборку молодых звезд для измерения их металличности следует проводить в центральных областях галактик. Однако, если в центре галактики были видны газопылевые облака, мы не использовали красные сверхгиганты в этой области для измерения их показателя цвета из-за возможного дополнительного покраснения света при прохождении через эти газопылевые облака. В таких случаях молодые звезды выбирались в удалении от центра галактики, а красные гиганты — на периферии галактик, в гало и на окраине толстого диска. Поэтому наша выборка состояла из старых красных гигантов и небольшого числа AGB-звезд.

### 3. МЕТАЛЛИЧНОСТЬ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ

Положение ветви красных гигантов на CM-диаграмме обусловлено металличностью и возрастом этих объектов. На рис. За показана CM-диаграмма теоретических изохрон с возрастом

от 3.5 до 10 млрд лет и металличностью  $Z = 0.001$  и 0.008 (Bertelli et al., 1994). Видно, что показатель цвета ветви красных гигантов ( $V - I$ ) сильно зависит от металличности звезд, в то время как изменение возраста вызывает значительно меньшее изменение показателя цвета. Таким образом, показатель цвета ( $V - I$ ) ветви красных гигантов на CM-диаграмме можно использовать для оценки металличности этих звезд. В TRGB-методе при вычислении расстояния до галактики (Lee et al., 1993) определяется положение TRGB-скачка, но кроме этого учитывается поправка за металличность красных гигантов  $[Fe/H]$ , которая рассчитывается по показателю цвета ( $V - I$ ) ветви красных гигантов на уровне  $M_I = -3^m5$ , то есть на  $0^m5$  слабее, чем край ветви гигантов (TRGB-скачок). Такие измерения металличности красных гигантов были проведены нами для всех галактик списка. Полученные значения  $[Fe/H]$  приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Металличности старых и молодых звезд. В колонках таблицы указаны следующие параметры: (2) — название, (3) и (4) — прямое восхождение и склонение, (5) — модуль расстояния, (6) — полученные нами расстояния до галактик в Мпс, (7) — металличность красных гигантов, (8) — показатель цвета красных сверхгигантов на уровне  $M_I = -7^m$ , (9) и (10) — коэффициенты экстинкции в фильтрах  $V$  и  $I$

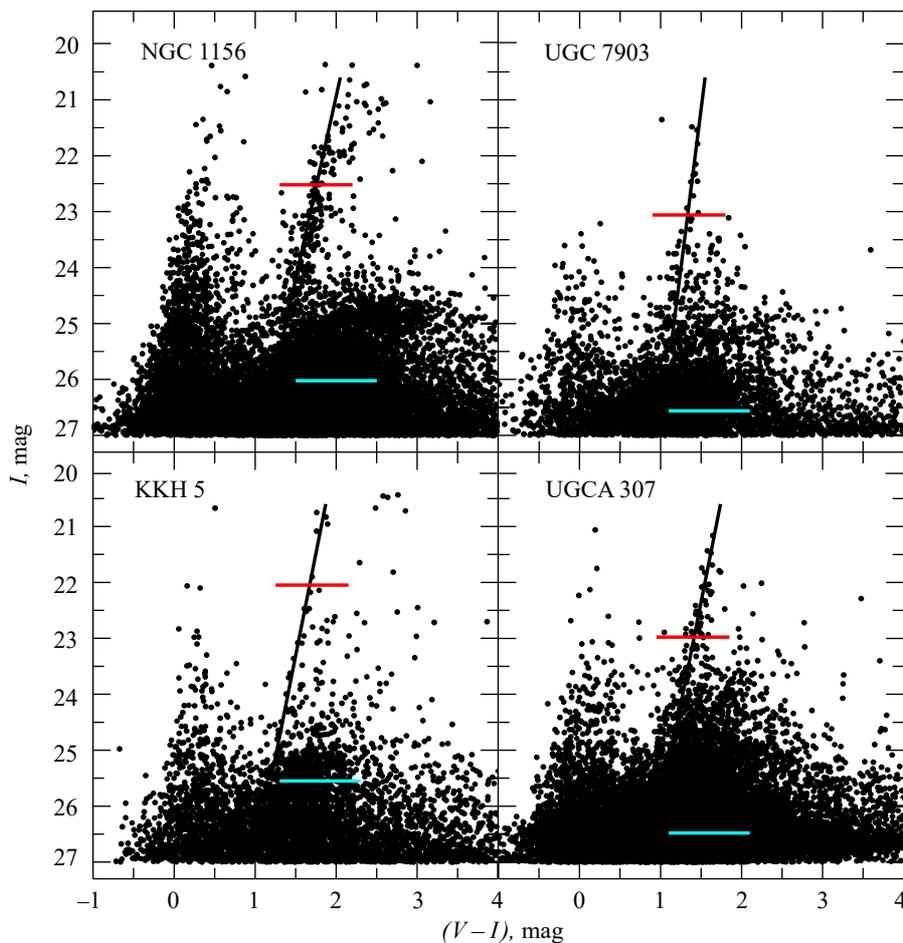
$N$	Название галактики	RA (J2000) hh mm ss.s	Dec (J2000) dd mm ss	$(m - M)_0$ , mag	$D$ , Мпс	[Fe/H]	$(V - I)$ , mag	$A_V$ , mag	$A_I$ , mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	UGC 64	00 07 43.9	+40 52 33	29.51	07.99	-2.27	1.36	0.220	0.121
2	UGC 685	01 07 22.4	+16 41 04	28.27	04.51	-1.31	1.51	0.157	0.086
3	KKH 5	01 07 32.4	+51 26 25	28.54	05.11	-2.42	1.34	0.777	0.426
4	KK 16	01 55 20.2	+27 57 14	28.67	05.42	-1.76	1.31	0.192	0.106
5	KK 17	02 00 10.2	+28 49 52	28.30	04.57	-2.09	1.43	0.155	0.082
6	ESO 199-007	02 58 04.1	-49 22 57	28.95	06.18	-2.56	1.20	0.059	0.032
7	NGC 1156	02 59 42.3	+25 14 16	29.07	06.53	-1.88	1.48	0.614	0.337
8	ESO 300-016	03 10 10.6	-40 00 08	29.81	09.17	-2.18	1.36	0.049	0.027
9	UGC 2684	03 20 23.5	+17 17 45	29.23	07.00	-2.18	1.34	0.388	0.213
10	UGC 2716	03 24 07.3	+17 45 12	29.02	06.38	-1.96	1.47	0.380	0.208
11	ESO252-001	04 57 01.3	-42 48 05	29.11	06.63	-2.54	1.30	0.035	0.019
12	HIPASS J0517-32	05 17 21.5	-32 45 34	29.85	09.32	-2.13	1.32	0.051	0.028
13	KKH 34	05 59 40.3	+73 25 37	29.31	07.29	-2.32	1.27	0.658	0.361
14	ESO 364-029	06 05 45.2	-33 04 51	29.70	08.72	-2.32	1.39	0.124	0.068
15	UGC 3476	06 30 28.4	+33 18 03	29.48	07.87	-1.43	1.52	0.652	0.358
16	KK 65	07 42 32.0	+16 33 40	29.49	07.90	-1.57	1.44	0.088	0.049
17	ESO 006-001	08 19 22.5	-85 08 34	27.07	02.59	-1.61	1.49	0.525	0.288
18	DDO52	08 28 28.4	+41 51 24	30.09	10.42	-1.76	1.50	0.099	0.054
19	UGC 4459	08 34 06.8	+66 10 52	27.70	03.47	-1.76	1.42	0.103	0.057
20	KKH 46	09 08 36.5	+05 17 27	29.60	08.31	-1.69	1.43	0.123	0.068
21	ESO 373-007	09 32 45.4	-33 14 44	29.95	09.77	-1.19	1.65	0.362	0.199
22	PGC 807172	09 44 20.1	-22 54 59	30.10	10.46	-1.80	1.42	0.208	0.114
23	MCG-01-26-011	10 01 38.8	-08 14 56	29.99	09.94	-1.54	1.54	0.161	0.089
24	UGCA 193	10 02 36.1	-06 00 49	29.96	09.82	-1.92	1.46	0.105	0.057
25	UGC 5427	10 04 41.0	+29 21 52	30.14	10.67	-1.96	1.45	0.063	0.035
26	AGC 208477	10 09 19.8	+27 56 44	30.05	10.22	-2.46	1.28	0.450	0.247
27	UGC 5829	10 42 41.9	+34 26 56	30.09	10.42	-1.96	1.49	0.065	0.036
28	ESO 376-016	10 43 27.3	-37 02 38	29.66	08.55	-2.23	1.23	0.160	0.088
29	UGC 5918	10 49 36.5	+65 31 50	29.41	07.63	-2.00	1.39	0.030	0.016
30	NGC 3432	10 52 31.0	+36 37 07	30.07	10.33	-0.97	1.98	0.035	0.019
31	KKH 68	11 30 53.2	+14 08 45	30.12	10.57	-1.64	1.50	0.105	0.058
32	UGC 6541	11 33 28.9	+49 14 13	27.89	03.79	-1.72	1.45	0.052	0.028
33	KKH 69	11 34 53.3	+11 01 13	29.80	09.12	-1.72	1.51	0.068	0.037
34	NGC 4068	12 04 00.8	+52 38 18	28.06	04.10	-1.82	1.43	0.059	0.032
35	ESO 379-024	12 04 56.7	-35 44 35	28.44	04.87	-2.72	1.22	0.204	0.112
36	NGC 4242	12 17 30.2	+45 37 09	29.47	07.85	-1.28	1.63	0.033	0.018
37	UGC 7408	12 21 15.2	+45 48 43	29.29	07.20	-2.05	1.43	0.032	0.018
38	UGCA 281	12 26 15.7	+52 38 18	28.73	05.58	-2.13	1.40	0.040	0.022

Таблица 1. (Продолжение)

<i>N</i>	Название галактики	RA (J2000) hh mm ss.s	Dec (J2000) dd mm ss	$(m - M)_0$ , mag	<i>D</i> , Mpc	[Fe/H]	$(V - I)$ , mag	$A_V$ , mag	$A_I$ , mag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
39	MCG+09-20-182	12 26 52.8	+53 06 19	28.99	06.27	-2.13	1.34	0.054	0.030
40	MCG+00-32-016	12 31 03.8	+01 40 34	29.89	09.50	-1.84	1.50	0.048	0.026
41	MCG+07-26-024	12 33 52.8	+39 37 34	29.85	09.32	-2.09	1.36	0.041	0.023
42	KUG 1234+299	12 37 14.0	+29 37 51	29.53	08.07	-1.88	1.45	0.043	0.024
43	UGCA 290	12 37 21.8	+38 44 38	28.84	05.85	-1.91	1.37	0.038	0.021
44	KKsg 30	12 37 35.5	-08 52 04	29.87	09.45	-1.84	1.51	0.087	0.047
45	UGC 7827	12 39 38.9	+44 49 14	29.75	08.90	-1.64	1.49	0.050	0.027
46	KDG 178	12 40 10.0	+32 39 32	29.72	08.79	-1.76	1.49	0.041	0.022
47	UGC 7903	12 43 45.0	+53 57 32	29.85	09.35	-1.61	1.42	0.039	0.022
48	UGCA 307	12 43 45.0	+53 57 32	29.70	08.73	-2.28	1.38	0.039	0.022
49	ESO 381-018	12 44 42.2	-35 58 02	28.50	05.01	-1.92	1.38	0.172	0.095
50	DDO 165	13 06 24.9	+67 42 25	28.31	04.59	-2.09	1.37	0.065	0.036
51	UGC 8215	13 08 03.5	+46 49 40	28.15	04.27	-1.76	1.50	0.029	0.016
52	SDSS J132831.21+493737.9	13 28 31.2	+49 37 38	29.39	07.54	-1.92	1.39	0.025	0.014
53	NGC 5229	13 34 02.9	+47 54 54	29.48	07.88	-1.92	1.46	0.049	0.027
54	NGC 5238	13 34 42.5	+51 36 49	28.15	04.25	-1.72	1.47	0.027	0.015
55	LEDA 2576103	13 43 07.1	+58 13 40	28.72	05.55	-1.96	1.39	0.021	0.011
56	ESO 384-016	13 57 01.4	-35 19 59	28.25	04.47	-1.51	1.55	0.203	0.111
57	NGC 5585	14 19 48.2	+56 43 46	29.08	06.54	-1.72	1.56	0.043	0.024
58	ESO 222-010	14 35 02.6	-49 25 14	27.34	02.95	-2.27	1.36	0.739	0.406
59	ESO 272-025	14 43 25.5	-44 42 19	27.90	03.80	-1.64	1.53	0.450	0.247
60	NGC 6744	19 09 46.2	-63 51 27	29.70	08.73	-1.68	1.41	0.118	0.065
61	IC 4951	20 09 31.6	-61 51 00	29.73	08.84	-2.27	1.39	0.109	0.060
62	UGC 11583	20 30 15.1	+60 26 26	29.44	07.73	-1.40	1.60	0.840	0.461
63	AGC 322463	22 59 35.5	+16 45 57	29.98	09.92	-2.42	1.28	0.181	0.099
64	ESO 347-017	23 26 56.2	-37 20 49	29.54	08.10	-1.68	1.45	0.046	0.025
65	UGC 12588	23 24 42.4	+41 20 48	30.15	10.70	-1.34	1.61	0.404	0.221
66	UGC 12632	23 29 58.7	+40 59 25	29.69	08.68	-1.92	1.46	0.390	0.214
67	DDO 68	23 24 42.4	+41 20 48	30.38	11.93	-2.72	1.18	0.404	0.221
68	IC 5332	23 34 27.6	-36 06 04	30.02	10.09	-2.18	1.35	0.046	0.025
69	NGC 7713	23 36 15.0	-37 56 17	29.59	08.28	-1.84	1.55	0.045	0.025
70	PGC 704814	23 58 40.7	-31 28 03	27.86	03.73	-2.96	1.14	0.043	0.024

В таблице 1 для каждой галактики мы указываем одно значение [Fe/H], но это не означает, что все красные гиганты имеют одинаковую металличность. На CM-диаграммах рис. 2 видно, что на уровне измерения металличности (отмечено голубым отрезком) ветви красных гигантов имеют значительную ширину по оси показателя цвета  $(V - I)$ . Причин, ведущих к уширению ветви гигантов, может быть несколько, но основная состоит

в действительном различии металличностей звезд. То есть металличность красных гигантов каждой галактики находится в некотором интервале значений, размер которого определяется историей звездообразования и физическими параметрами галактики. Одни галактики имеют очень узкую ветвь красных гигантов, у других она может быть широкой. Независимо от ширины ветви гигантов, мы определяли максимум в распределении их показа-



**Рис. 2.** CM-диаграммы галактик, которые показаны на рис. 1. Положение ветвей красных сверхгигантов показано наклонными линиями. Горизонтальные красные отрезки линий отмечают места измерения показателей цвета красных гигантов, а голубые — места измерения показателей цвета красных сверхгигантов. Из-за различной численной плотности ярких и слабых звезд невозможно наглядно представить ветви гигантов и сверхгигантов на одной CM-диаграмме. Для примера на рис. 4 показана наиболее населенная ветвь красных гигантов галактики NGC 1156, которая на этом рисунке видна как сплошное черное облако.

теля цвета ( $V - I$ ) на уровне  $M_I = -3^m5$ . Значение показателя цвета этого максимума мы использовали для вычисления металличности красных гигантов. Его можно считать средним значением показателя цвета, и он определяет среднее значение металличности красных гигантов. Точность измерения положения указанного максимума находится в интервале  $0^m01 - 0^m03$ , что в переводе на значения металличности звезд  $[Fe/H]$  соответствует величине  $0.03 - 0.1$ .

Так же как у красных гигантов, положение ветви красных сверхгигантов на CM-диаграмме зависит от металличности звезд. На рис. 3b на CM-диаграмме теоретических изохрон Bertelli et al. (1994) показаны положения ветвей красных сверхгигантов с  $Z = 0.001$  и  $0.02$ . Видно, что при увеличении металличности звезд ветвь красных сверхгигантов сдвигается в сторону увеличения показателя цвета ( $V - I$ ). Как и в методе Lee et al. (1993), в

качестве параметра металличности красных сверхгигантов мы выбрали значение показателя цвета ( $V - I$ ) на уровне  $M_I = -7^m0$ . Изменение металличности сверхгигантов соответствует изменению этого показателя цвета. На CM-диаграмме рис. 3 видно, что с увеличением яркости сверхгигантов увеличивается разность показателей цвета ( $V - I$ ) у звезд разной металличности. Кажется, что можно выбирать звезды очень высокой светимости для получения максимального различия показателей цвета звезд разной металличности, однако это неверно. При измерении реальных карликовых галактик часто оказывается, что самые яркие сверхгиганты в галактике отсутствуют или их недостаточно для измерения показателя цвета, в то время как более слабые, но более многочисленные красные сверхгиганты позволяют выполнить такие измерения. Поэтому мы выбрали компромиссное решение — измерения показате-

ля цвета ветви красных сверхгигантов проводить на уровне  $M_I = -7^m0$ . Пример таких измерений представлен на CM-диаграммах четырех галактик (рис. 2). Положение ветви красных сверхгигантов каждой галактики указано прямой линией, пересечение которой с горизонтальным отрезком прямой при  $M_I = -7^m0$  дает значение показателя цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов каждой галактики. Полученные таким образом значения мы использовали как параметр металличности звезд. На этих же CM-диаграммах (рис. 2) показаны уровни при  $M_I = -3^m5$ , по которым определялись показатели цвета красных гигантов в TRGB-методе (Lee et al., 1993) и измерялась металличность этих звезд.

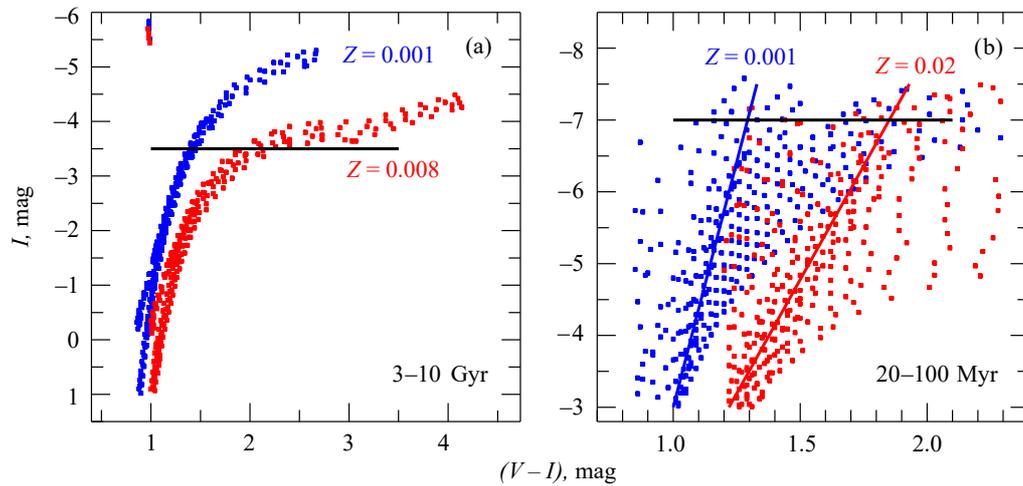
На снимках галактик молодые и старые звезды имеют разную численную плотность на единицу площади, поэтому невозможно представить CM-диаграмму всех звезд таким образом, чтобы одновременно было хорошо видно строение ветвей красных гигантов и сверхгигантов. На диаграмме рис. 2 ветвь красных гигантов галактики NGC 1156 похожа на сплошное облако точек. Чтобы показать ее реальную форму, мы оставили только часть звезд из всей выборки и на рис. 4а представили CM-диаграмму этой галактики с уменьшенным числом звезд. На этой диаграмме хорошо различима ветвь красных гигантов и место пересечения ее прямой линией при  $M_I = -3^m5$ . Показатель цвета точки пересечения используется в методе Lee et al. (1993) для вычисления металличности. На рис. 4б дано распределение числа звезд вдоль показателя цвета  $(V - I)$  на уровне  $M_I = -3^m5$ . Два вертикальных отрезка отстоят друг от друга на  $0^m02$ , и ни один из них не соответствует максимуму, положение которого находится между указанными отрезками. Диаграмма наглядно демонстрирует, что точность измерения максимума равна  $0^m01$ . Точно так же можно показать, что точность измерения максимума в распределении показателя цвета у красных сверхгигантов равна  $0^m01 - 0^m03$ .

Полученные значения показателей цвета  $(V - I)$  для красных сверхгигантов разных галактик уже сами по себе являются индикаторами металличности молодых звезд и могут использоваться в этом качестве. Для перевода этих величин в обычные, стандартные значения металличности ( $Z$  или  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ) можно использовать теоретические изохроны (Bertelli et al., 1994; Bressan et al., 2012) с разной металличностью, добиваясь наиболее точного совпадения изохрон с ветвью красных сверхгигантов. Однако следует помнить, что любой перевод величин из одной системы измерения в другую добавляет ошибки перевода к ошибкам измерений. В данной работе такой перевод не требуется, поэтому мы будем использовать значения показателя цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов как параметр их металличности.

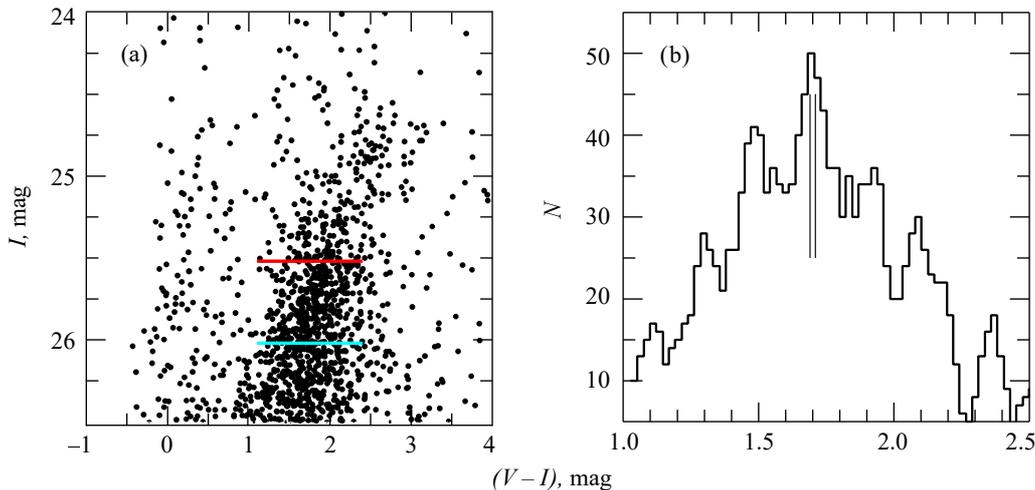
#### 4. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ МОЛОДЫХ И СТАРЫХ ЗВЕЗД

Металличность звезд нашей Галактики можно измерить по оптическим спектрам, которые получают на многих наземных телескопах. Если необходимо определить металличность звезд в галактиках Местной группы, то только большие телескопы могут выполнить такие измерения, особенно если нужно определить металличность слабых звезд — красных гигантов. В еще более удаленных галактиках одиночные красные гиганты недоступны для спектральных наблюдений, поэтому получают спектры не одиночных звезд, а звездных скоплений, например шаровых. Но измеренная металличность шаровых скоплений ничего не говорит о металличности одиночных звезд других типов. Выход состоит в том, что можно фотометрическим методом измерять металличность молодых и старых звезд в удаленных, но разрешаемых на звезды галактиках. Естественно, необходимо проводить соответствующие калибровки, чтобы получить значения металличности в знакомом нам виде.

В большинстве случаев измерение современного значения металличности галактик проводят по спектрам ярких H II-областей, населенных молодыми голубыми сверхгигантами. Считается, что полученное таким образом значение металличности ( $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ ) определяет металличность всей галактики при условии отсутствия градиента металличности вдоль радиуса галактики. Среди объектов таблицы 1 для немногих галактик спектрально определены значения  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ , поэтому мы обратились к нашим данным 2018 года (Tikhonov, 2018), где имеется много известных галактик с измерениями  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ . Поскольку красные сверхгиганты, для которых мы определили показатели цвета  $(V - I)$ , также являются молодыми звездами, то их показатель цвета  $(V - I)$  должен коррелировать со значением металличности  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ . На основании полученных нами в 2018 году и литературных данных (van Zee and Haynes, 2006; Pilyugin et al., 2004, 2014; Berg et al., 2012) была построена зависимость между показателем цвета  $(V - I)$  и значением  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  для 18 галактик. На рис. 5 показан результат сравнения этих величин. Слабая корреляция видна, но разброс точек на диаграмме очень большой. Трудно сказать, в чем причина такой несогласованности этих двух параметров. На измерение показателя цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов могла бы повлиять неучтенная экстинкция, но соответствие положения ветви голубых сверхгигантов (также молодых звезд) ожидаемому значению с учетом табличного показателя экстинкции не позволяет



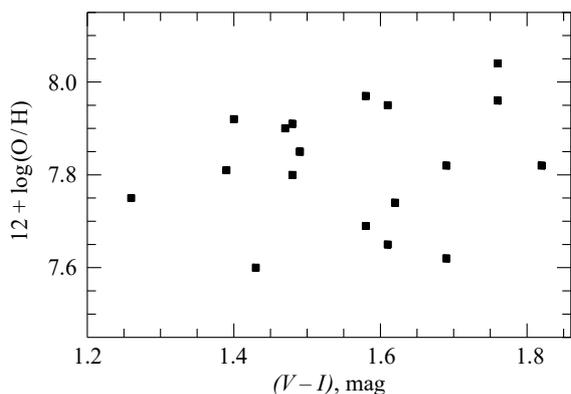
**Рис. 3.** CM-диаграммы теоретических изохрон Bertelli et al. (1994) для красных гигантов и сверхгигантов разной металличности. Панель (а): изохроны возраста от 3 до 10 млрд лет с металличностью  $Z = 0.001$  (синие точки) и  $0.008$  (красные точки). Панель (б): изохроны возраста от 7 до 100 млн лет с металличностью  $Z = 0.001$  (синие точки) и  $0.02$  (красные точки). Видно, что изменение металличности смещает ветви красных гигантов и сверхгигантов по оси  $(V - I)$  сильнее, чем изменение возраста звезд. Горизонтальные линии проведены на уровне  $M_I = -3^m.5$  для красных гигантов и  $M_I = -7^m.0$  для красных сверхгигантов. По показателям цвета на этих уровнях измерялась металличность гигантов и сверхгигантов.



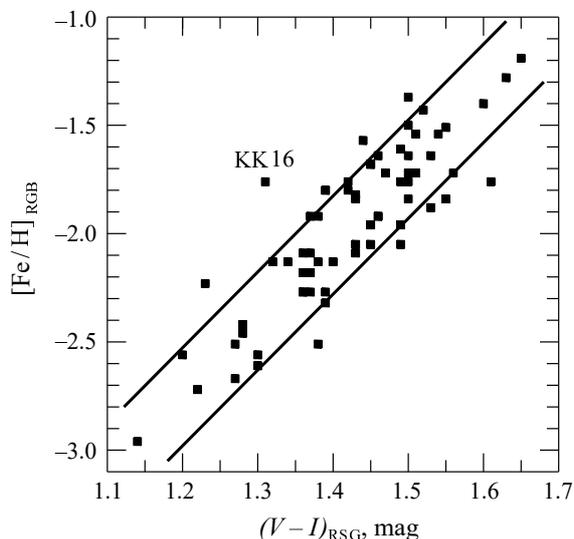
**Рис. 4.** Панель (а): CM-диаграмма звезд небольшого участка периферии галактики NGC 1156. Красным горизонтальным отрезком отмечено положение TRGB-скачка, а голубым — значение светимости, при котором измеряется показатель цвета красных гигантов для определения их металличности Lee et al., 1993). Панель (б): распределение показателей цвета  $(V - I)$  на уровне  $M_I = -3^m.5$  (голубой отрезок). Две тонкие вертикальные линии вблизи максимума распределения расположены на расстоянии  $0^m.02$  друг от друга для наглядности точности измерения положения максимума.

принять эту гипотезу. Возможно, что в местах бурного звездообразования существует повышенная металличность газа, истекающего в виде ветра из атмосфер звезд, в связи с чем сама звезда эволюционирует как объект более низкой металличности. Ввиду большого рассеяния точек на диаграмме рис. 5 мы отказались от сравнения этих значений  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  с металличностью старых звезд  $[\text{Fe}/\text{H}]$ , которая получена не спектральным, а фотометрическим методом по показателю цвета ветви красных гигантов.

На основе результатов измерений (см. таблицу 1) мы построили диаграмму зависимости между металличностями старых и молодых звезд для галактик всего списка (рис. 6). На полученной диаграмме видна линейная зависимость между  $[\text{Fe}/\text{H}]$  и  $(V - I)$  ветви сверхгигантов. То есть в галактиках с малометалличными старыми звездами мы также видим и молодые звезды с низким содержанием металлов. И наоборот, если имеется высокометалличное старое население, то и молодое население будет иметь высокое содержание металлов. На



**Рис. 5.** Сравнение показателей цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов на уровне  $M_I = -7^m0$  (Tikhonov, 2018) с параметром металличности  $12 + \lg(O/H)$  в этих же галактиках (Pilyugin et al., 2004, 2014; van Zee and Hayes, 2006). Корреляция между указанными величинами существует, но на диаграмме наблюдается большое рассеяние точек.



**Рис. 6.** Зависимость между металличностью красных гигантов и показателем цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов. Две наклонные линии отмечают границы возможных отклонений результатов измерений металличности при ошибке измерения показателей цвета  $(V - I)$ , равной  $0^m03$ . При возможных процессах падения масс малометаллического газа на галактики точки показанной зависимости сдвинутся на диаграмме, как это наблюдается у галактики КК 16. Однако измерение металличности звезд КК 16 показывает, что причину сдвига можно объяснить низким уровнем звездообразования в этой галактике за время эволюции.

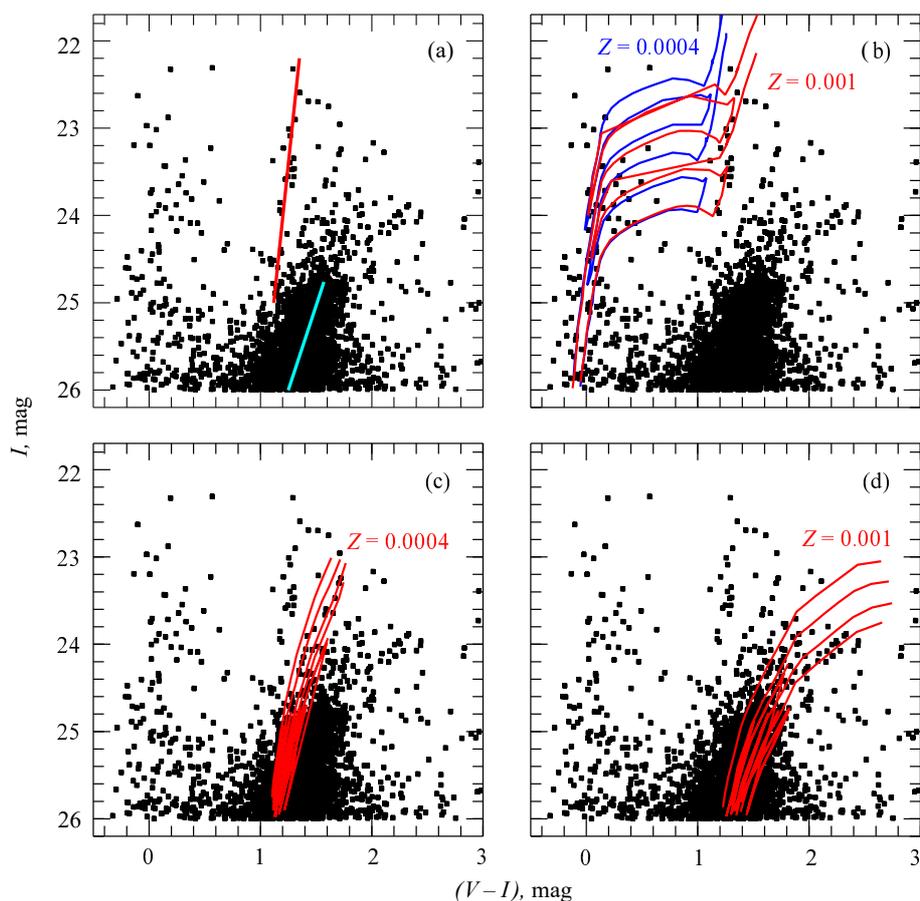
рис. 6 две линии отмечают границы возможных отклонений результатов измерений металличности при ошибке измерения показателей цвета  $(V - I)$ , равной  $0^m03$ . Точки, расположенные выше верхней линии, соответствуют галактикам с пониженной металличностью молодых звезд, а точки внизу — с повышенной. На диаграмме рис. 6 галактика

КК 16 имеет максимальное отклонение от общей зависимости в сторону пониженной металличности молодых звезд. Анализ результатов по этой галактике приведен ниже. Следует отметить, что на диаграмме рис. 6 используются результаты измерения металличности звезд, а не межзвездной газовой среды, поэтому мы считаем, что полученные нами значения дают более реальное представление о металличности галактик.

Как говорилось в начале этой работы, падение межгалактического газа может изменить металличность молодых звезд. Молодые звезды таких галактик должны иметь меньшую металличность, чем это следует из общей зависимости на рис. 6. Данный эффект максимально наблюдается у галактики КК 16. Для выяснения причины такого отклонения мы провели измерения металличности старых и молодых звезд этой галактики. На рис. 7а показана СМ-диаграмма КК 16, на которой красной линией отмечена ветвь красных сверхгигантов, а голубой — красных гигантов. На рис. 7b показана эта же СМ-диаграмма и система изохрон Bertelli et al. (1994) с возрастом  $t = 10-30$  млн лет и металличностью  $Z = 0.0004$  и  $Z = 0.001$ . На диаграмме видно, что положение молодых красных сверхгигантов соответствует изохроне с металличностью  $Z = 0.001$ . На рис. 7с и 7d в СМ-диаграмму КК 16 вписаны изохроны возраста 2–12 млрд лет с металличностью  $Z = 0.0004$  и  $Z = 0.001$ . Красные гиганты с показателем цвета  $(V - I)$  от 1.5 до 1.6 находятся за пределами изохрон  $Z = 0.0004$ , а изохроны с металличностью  $Z = 0.001$  немного выходят за пределы СМ-диаграммы и не описывают положения красных гигантов с  $(V - I) = 1.2$ . Значит, для красных гигантов КК 16 наилучшим образом соответствует значение металличности  $Z = 0.0008$ . Полученный результат показывает, что в галактике КК 16 металличность молодых звезд выше, чем у старых, то есть инверсия металличности отсутствует, и нет причины для принятия гипотезы падения на эту галактику межгалактических облаков. Причина отклонения КК 16 на диаграмме рис. 6 заключается в медленном накоплении металлов из-за слабых процессов звездообразования за прошедшие миллиарды лет. Отклонения других галактик на диаграмме рис. 6 не столь велики, и эти отклонения также можно объяснить слабым темпом звездообразования. Важно, что ни одна галактика не имеет инверсии металличности молодых и старых звезд, то есть процессы падения на галактики межгалактических облаков, если они происходят, не влияют значимым образом на результаты звездообразования.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе архивных снимков космического телескопа им. Хаббла проведена звездная фотомет-



**Рис. 7.** CM-диаграммы галактики КК 16 и системы изохрон Bertelli et al. (1994). На первой панели (а) красной линией отмечено положение ветви красных сверхгигантов, а голубой — красных гигантов. На панели (b) в CM-диаграмму вписаны изохроны молодых звезд разной металличности. Видно, что изохроны с  $Z = 0.001$  наилучшим образом описывают положение красных сверхгигантов. На панелях (с) и (d) изохроны вписаны в ветвь красных гигантов. Изохроны с  $Z = 0.0004$  не описывают красную часть ветви гигантов, а изохроны с  $Z = 0.001$  — ее голубую часть. Наиболее точное значение металличности для красных гигантов —  $Z = 0.0008$ ; то есть в галактике КК 16 за время эволюции металличность звезд увеличилась очень незначительно: с  $Z = 0.0008$  до  $Z = 0.001$ .

рия 50 маломассивных галактик и TRGB-методом измерены расстояния до всех галактик. Выделены ветви красных гигантов и сверхгигантов, а также определены их показатели цвета на уровне  $M_I = -3^m5$  и  $M_I = -7^m0$ . На основе работы Lee et al. (1993) рассчитаны средние значения металличности красных гигантов, и построена диаграмма зависимости между металличностью красных гигантов  $[Fe/H]$  и показателем цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов. Ни у одной галактики не найдена инверсия металличности старых и молодых звезд, что могло бы произойти при падении малометаллических межгалактических облаков на карликовые маломассивные галактики. То есть для изучения эволюции звездного населения этих галактик не требуется гипотеза о падении межгалактических облаков на галактики, по крайней мере за последние миллиарды лет.

Каждая галактика эволюционирует индивидуально, и можно было бы ожидать у всей выборки

галактик большого различия между металличностью старых и молодых звезд. Поэтому вызывают удивление малые отклонения галактик от общей линейной зависимости на рис. 6. Наибольшее отклонение видно у галактики КК 16, но и у этой галактики нет инверсии металличности старых и молодых звезд, а отклонение объясняется слабым уровнем звездообразования за все время ее эволюции.

На структуру диаграммы рис. 6 косвенно влияет известная зависимость между светимостью галактики и металличностью ее звезд, найденная первоначально Lequeux et al. (1979), а затем подтвержденная в многочисленных работах (см., например, Mateo, 1998; de Naray et al., 2004; Lamareille et al., 2004; Tremonti et al., 2004; Zhao et al., 2010; Berg et al., 2012; Zahid et al., 2012; Zahid et al., 2014; Blanc et al., 2019). Это влияние можно объяснить зависимостью между светимостью галактик и их ярчайших звезд (Tikhonov et al., 2021; 2024). В

малых галактиках отсутствуют или очень незначительны по численности массивные звезды, поэтому отсутствуют или очень редко взрываются сверхновые звезды SN II. А это означает малый выброс тяжелых элементов в межзвездную среду, в результате чего галактика остается малометаллической. Более яркие галактики имеют большее количество ярких массивных звезд, что увеличивает частоту вспышек сверхновых в этих галактиках. Однако различием одних только масс галактик нельзя объяснить представленную на рис. 6 диаграмму. Например, две галактики — NGC 1156 и KKN 69 — различаются по светимости почти в 100 раз ( $M_V = -18^m1$ ,  $M_V = -13^m5$ ), но имеют сходные показатели цвета красных гигантов и сверхгигантов, то есть примерно одинаковую металличность старых и молодых звезд. Мы предполагаем, что возможно только одно объяснение зависимости рис. 6 — все галактики получили основную порцию металлов сразу после рождения. При дальнейшей эволюции галактики также повышали свою металличность, но делали это существенно медленнее.

Большие надежды в изучении галактик на ранних стадиях их эволюции связаны с работой инфракрасного телескопа JWST. Астрономы получили возможность исследовать самые удаленные галактики, до  $z = 14$ , с возрастом всего лишь сотни миллионов лет. На основе наблюдений измерены металличности некоторых очень молодых галактик, однако необходимо собрать достаточное количество данных, чтобы сделать определенные выводы о начальных этапах звездообразования и накоплении металлов в галактиках разных масс.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на основе наблюдений космического телескопа им. Хаббла (NASA/ESA), полученных в Институте космических телескопов (STSI), который эксплуатируется компанией AURA, Inc. по контракту № NAS5-26555. Данные, которыми мы воспользовались, проведены по заявке ID 15922. Исследование выполнено с использованием баз данных NED (<https://ned.ipac.caltech.edu/>) и HyperLEDA (<http://atlas.obs-hp.fr/hyperleda/>).

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Berg, E. D. Skillman, A. R. Marble, et al., *Astrophys. J.* **754** (2), article id. 98 (2012). DOI:10.1088/0004-637X/754/2/98
2. G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **106**, 275 (1994).
3. G. A. Blanc, Y. Lu, A. Benson, et al., *Astrophys. J.* **877** (1), article id. 6 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab16ec
4. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427** (1), 127 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21948.x
5. R. K. de Naray, S. S. McGaugh, and W. J. G. de Blok, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **355** (3), 887 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.08364.x
6. A. Dolphin, DOLPHOT: Stellar photometry, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1608.013 (2016).
7. I. D. Karachentsev and N. A. Tikhonov, *Astrophysics* **66** (1), 1 (2023). DOI:10.1007/s10511-023-09766-2
8. F. Lamareille, M. Mouhcine, T. Contini, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **350** (2), 396 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07697.x
9. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993). DOI:10.1086/173334
10. J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, et al., *Astron. and Astrophys.* **80**, 155 (1979).
11. M. L. Mateo, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 435 (1998). DOI:10.1146/annurev.astro.36.1.435
12. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and A. Y. Kniazev, *Astron. J.* **147** (6), article id. 131 (2014). DOI:10.1088/0004-6256/147/6/131
13. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, *Astron. and Astrophys.* **425**, 849 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20034522
14. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 103 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/103
15. N. A. Tikhonov, *Astronomy Letters* **38** (8), 497 (2012). DOI:10.1134/S1063773712080063
16. N. A. Tikhonov, *Astrophysical Bulletin* **73** (1), 22 (2018). DOI:10.1134/S1990341318010029
17. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 388 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040150
18. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and G. M. Karataeva, *Astrophysical Bulletin* **79** (3), 361 (2024). DOI:10.1134/S199034132460073X
19. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, G. M. Karataeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 381 (2021). DOI:10.1134/S1990341321040143
20. C. A. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann, et al., *Astrophys. J.* **613** (2), 898 (2004). DOI:10.1086/423264
21. L. van Zee and M. P. Haynes, *Astrophys. J.* **636** (1), 214 (2006). DOI:10.1086/498017

22. H. J. Zahid, F. Bresolin, L. J. Kewley, et al., *Astrophys. J.* **750** (2), article id. 120 (2012). DOI:10.1086/498017
23. H. J. Zahid, G. I. Dima, R.-P. Kudritzki, et al., *Astrophys. J.* **791** (2), article id. 130 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/791/2/130
24. Y. Zhao, Y. Gao, Q. Gu, *Astrophys. J.* **710** (1), 663 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/710/1/663

## Does Intergalactic Clouds Fall Affect the Stellar Population of Galaxies?

N. A. Tikhonov<sup>1</sup>, O. A. Galazutdinova<sup>1</sup>, and G. M. Karataeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, 199034 Russia

Stellar photometry of 70 irregular galaxies was performed using archival Hubble Space Telescope images. The resulting Hertzsprung–Russell diagrams were used to distinguish the red supergiant and giant branches. The distances to the galaxies and the metallicity of the red giants were determined using the TRGB method. The  $(V - I)$  color index of the supergiant branch at the luminosity level  $M_I = -7^m0$  was chosen as the metallicity index of red supergiants. The measurements showed that no galaxy exhibits a metallicity inversion between young and old stars, which would occur if clouds of the low-metallicity intergalactic gas fall onto the galaxy. This means that the infall of intergalactic clouds, if it occurred, did not significantly affect the evolution of the stellar population of galaxies over the past billion years. Over billions of years of evolution, each galaxy underwent random processes that could alter the metallicity of its interstellar medium and stars. However, the linear relationship we have found between the metallicities of young and old stars in galaxies of different masses indicates that the bulk of galaxies' metal accumulation has occurred in the distant past. Modern processes are increasing the metallicity of galaxies but at a significantly slower rate than during galaxy formation. Otherwise, the linear relationship between the metallicities of stars of different ages in galaxies of different masses and star formation histories would not be observed.

Keywords: *galaxies: dwarf; galaxies: photometry; galaxies: evolution; techniques: photometric*