

УДК 524.77:520.82

# МЕТАЛЛИЧНОСТЬ МОЛОДЫХ И СТАРЫХ ЗВЕЗД ИРРЕГУЛЯРНЫХ ГАЛАКТИК<sup>1</sup>

© 2018 Н. А. Тихонов\*

*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 18 октября 2017 года; принята в печать 1 декабря 2017 года

На основе архивных снимков космического телескопа Хаббла проведена звездная фотометрия 105 иррегулярных галактик. На полученных диаграммах Герцшпрунга-Рессела 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  $M_I = -7$ . Для исследуемых галактик получены диаграммы, на которых видна корреляция между светимостью галактик ( $M_B$ ) и металличностью красных гигантов и сверхгигантов. Основным источником дисперсии результатов на полученных диаграммах является, по нашему мнению, неопределенность в измерении светимости галактик и вспышки звездообразования. Зависимость между металличностью молодых и старых звезд показывает, что основное насыщение галактик металлами происходило в далеком прошлом. Отклонения некоторых галактик на полученной зависимости вероятно можно объяснить падением на эти галактики межгалактического газа, но действие этого эффекта на изменение металличности звезд незначительно.

Ключевые слова: *галактики: иррегулярные — галактики: звездное население*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В начале своей эволюции Вселенная состояла из водорода и очень малого количества тяжелых элементов. Поэтому химический состав первичных звезд должен отличаться очень низкой металличностью [1–3]. В процессе эволюции массивных звезд и вспышек сверхновых происходил синтез тяжелых элементов и рассеяние их в пространстве. Межзвездная среда обогащалась металлами и звезды последующих поколений, родившиеся из этой обогащенной среды, имели более высокое содержание тяжелых элементов [4, 5]. Т.е. в процессе эволюции происходит повышение металличности звезд галактик.

В 70-х годах прошлого столетия была открыта зависимость, впоследствии многократно подтвержденная, между массой галактики и металличностью составляющих ее звезд [6–16], что указывало

на влияние массы галактики на процессы обогащения металлами межзвездной среды. Для появления массивных звезд, из которых рождаются сверхновые звезды, в галактиках должны происходить процессы звездообразования, т.е. оказывается, что полученная зависимость между массой галактик и металличностью звезд является частным случаем более общей зависимости между массой, металличностью и уровнем звездообразования [17–20].

Однако, вместе с процессами повышения металличности межзвездной среды в галактиках возможны и противоположные процессы, которые способны понизить металличность. Например, облака низкометаллического межгалактического газа или богатые газом, но бедные металлами карликовые галактики при прохождении вблизи более массивных галактик могут падать на них, что приводит к понижению металличности межзвездной среды у массивных галактик. Звезды, рождающиеся в такой среде, будут иметь пониженную металличность [21–25].

Модели эволюции дисковых галактик, кроме учета указанных выше процессов, должны объяснять и найденный у массивных галактик градиент металличности вдоль радиуса галактик [26, 27]. Таким образом, совместное действие всех названных выше факторов создает непростую схему изменения металличности галактик за время их эволюции.

<sup>1</sup>Работа основана на наблюдениях, полученных на космическом телескопе NASA/ESA Hubble Space Telescope, поддерживаемом Space Telescope Science Institute, который управляется AURA, Inc. по контракту No. NAS5-26555. Используемые наблюдения связаны с заявками 6865, 8122, 8292, 9765, 9771, 10210, 10235, 10605, 10765, 10885, 10905, 10915, 12546 и 13442.

\*E-mail: [ntik@sao.ru](mailto:ntik@sao.ru)

Среди различных методов изучения звездного населения галактик мы выбрали наиболее информативный, с нашей точки зрения, фотометрический метод исследования разрешаемых на звезды галактик. Для таких галактик на основе фотометрии снимков можно построить диаграммы Герцшпрунга—Рессела (СМ-диаграммы), на которых можно выделить звезды разного возраста, измерить металличность этих звезд, определить их функции светимости и законы пространственного распределения в галактиках, а также расстояния до самих галактик.

Мы упростили задачу изучения процесса изменения металличности галактик тем, что в качестве объектов исследования выбрали маломассивные, разрешаемые на звезды, иррегулярные галактики. В галактиках этого типа градиенты металличности малы или отсутствуют [14, 28]. Согласно зависимости, найденной Пилюгиным и др. [29] при изучении спиральных и иррегулярных галактик, чем меньше масса галактики, тем меньше градиент металличности. А значит, карликовые иррегулярные галактики, которые составляют большинство в нашем списке, имеют наименьшие градиенты металличности среди других типов галактик.

Из-за малых масс иррегулярных галактик можно ожидать, что падение на такие галактики даже небольших количеств межгалактического малометаллического газа можно заметить по изменению металличности рождающихся молодых звезд. Иррегулярные галактики были выбраны также из-за того, что в них присутствуют одновременно как молодые, так и старые звезды, что позволяет сравнивать их параметры в каждой отдельной галактике. Понятно, что для выявления предполагаемых эффектов нам необходимо изучить достаточно представительную выборку галактик, чтобы на полученных диаграммах увидеть ожидаемые корреляции.

Для изучения изменения металличности галактик в ходе их эволюции, мы использовали измерения этой характеристики у звезд разного возраста. Отклонение какой-либо галактики от средней для всех галактик зависимости между металличностью молодых и старых звезд будет означать проявление для этой галактики внешнего воздействия — падения межгалактического газа или слияние с карликовой галактикой, а также возможное проявление противоположных процессов — усиление звездообразования, ведущее к повышению металличности. В качестве молодых звезд были выбраны красные сверхгиганты с возрастом 20–90 млн лет, а в качестве старых — красные гиганты с возрастом от 1.5 до 13 млрд лет, а в среднем 5–8 млрд лет.

## 2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ И ФОТОМЕТРИЯ ЗВЕЗД

В архиве космического телескопа Хаббла (HST) хранятся снимки нескольких тысяч галактик, из числа которых мы составили список объектов, соответствующих нашим требованиям. У маломассивных галактик процессы звездообразования и молодые звезды чаще всего наблюдаются в центральных областях, а старые красные гиганты, имеющие меньшую яркость, удобнее изучать на периферии галактик, в условиях низкой яркости фона и меньшей численности других типов звезд. Для сравнения металличности звезд в центре и на периферии галактики все выбранные объекты имели относительно небольшие размеры, а на диаграммах Герцшпрунга—Рессела этих галактик видны ветви красных сверхгигантов и красных гигантов. Галактики, не удовлетворяющие этим условиям, были исключены из дальнейших исследований. DSS-изображения типичных представителей галактик нашего списка, имеющих разные светимости, приведены на рис. 1. Список 105 выбранных галактик представлен в таблице 1, где кроме того указаны взятые из базы данных NED<sup>1</sup> координаты галактик, их размеры, звездные величины в фильтре  $B$  и величины поглощения света в направлении на галактики, а также измеренные нами расстояния до галактик и средние металличности красных сверхгигантов и гигантов.

Для изучения звездного населения галактик мы использовали снимки космического телескопа Хаббла с камерой ACS/WFC в фильтрах  $F606W$  ( $V$ ) и  $F814W$  ( $I$ ) полученные ранее по разным программам. Фотометрия звезд проводилась стандартным образом в DAOPHOT II [30, 31]. Для преобразования инструментальных звездных величин в  $V$  и  $I$  величины системы Крона—Казинса использовались уравнения перехода, полученные нами ранее, при сравнении результатов фотометрии одних и тех же звезд близких галактик полученных с различными телескопами [32]:

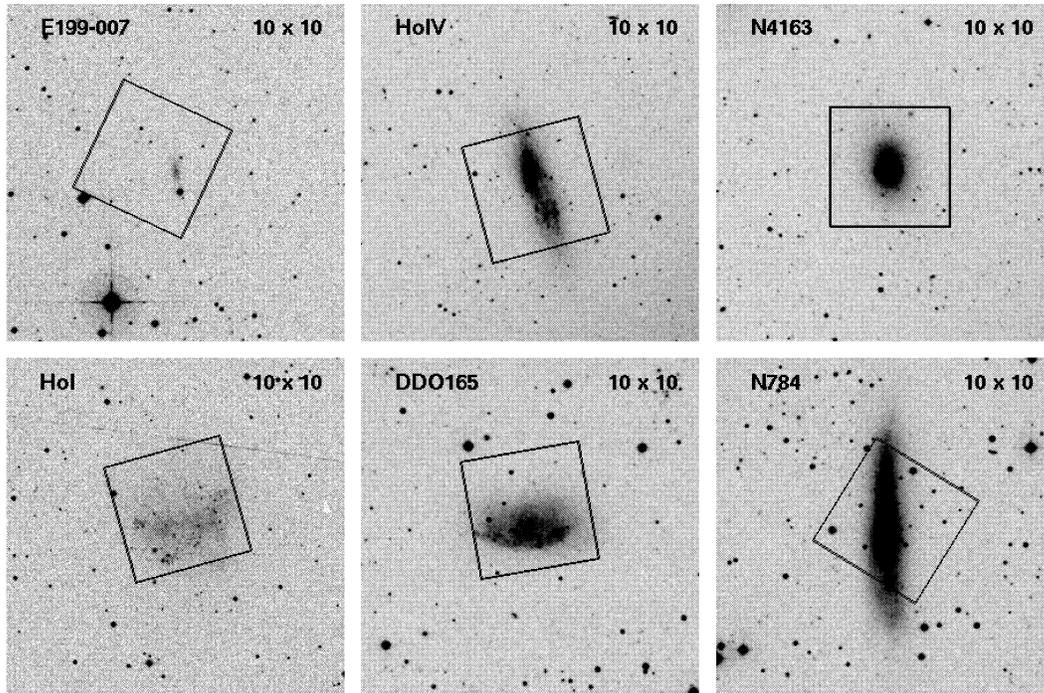
$$(V - I) = 1.3213 \times (v - i) + 1.133$$

$$I = i + 0.0592 \times (V - I) + 25.972,$$

где  $(v - i)$  и  $i$  — инструментальные звездные величины, а  $(V - I)$  и  $I$  — звездные величины в системе Крона—Казинса.

Для того, чтобы из списка звезд удалить диффузные объекты: звездные скопления, далекие или компактные галактики, к полученным результатам фотометрии мы применили селекцию по параметрам «CHI» и «SHARP» [30], которые определяют отклонения профиля объекта от профиля стандартных звезд. Обычно выбирались значения

<sup>1</sup><http://ned.ipac.caltech.edu/>



**Рис. 1.** Изображения шести галактик из нашего списка на снимках DSS обзора в фильтре  $B$  с разметкой границ снимков космического телескопа Хаббла. Представленные галактики имеют разные светимости и различаются металличностью звезд и размерами звездных подсистем. Размер снимков  $10' \times 10'$ , север вверху.

$0.6 < \text{CH1} < 1.3$  и  $-0.3 < \text{SHARP} < 0.3$ . Поглощение света в нашей Галактике учитывалось на основе работы [33].

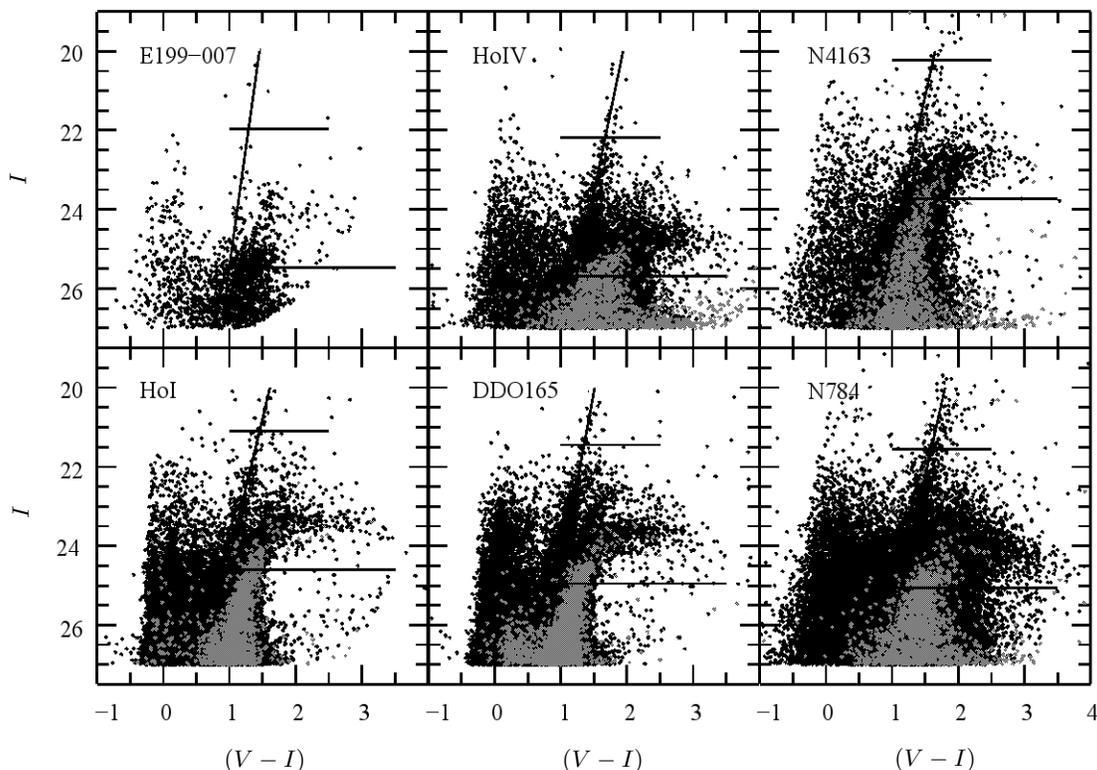
В качестве примера, на рис. 2 показаны диаграммы Герцшпрунга–Рессела (СМ-диаграммы) тех галактик, снимки которых представлены на рис. 1. На этих диаграммах прямыми линиями отмечены ветви красных сверхгигантов, а ветви красных гигантов выделены серым цветом. Несмотря на большие различия в расстояниях до галактик нашего списка, в каждой из них видны сверхгиганты и красные гиганты, по положению ветвей которых на СМ-диаграммах измерялись металличности этих звезд.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ ДО ГАЛАКТИК

На СМ-диаграмме каждой галактики можно выделить ветвь красных гигантов, что позволило нам определить точные расстояния до галактик, используя TRGB-метод Ли и др. [34]. Положение верхней границы ветви красных гигантов определялось применением фильтра Собея [35] к функции светимости красных гигантов и AGB-звезд. Функция Собея показывает место резкого изменения функции светимости, что наблюдается при переходе от AGB-звезд к началу ветви красных гигантов. Светимость красных гигантов

зависит от их металличности, поэтому при использовании ветви красных гигантов в качестве индикатора расстояния необходимо знать металличность этих звезд. В TRGB-методе [34] при определении металличности требуются две величины:  $(V - I)_{\text{TRGB}}$  — показатель цвета вершины ветви гигантов и  $(V - I)_{-3.5}$  — показатель цвета ветви гигантов на уровне  $M_I = -3.5$ . Используя найденные показатели цвета ветви гигантов, положение вершины ветви красных гигантов на СМ-диаграммах ( $I_{\text{TRGB}}$ ) и зависимости из работы [34], а также учитывая поглощение света в направлении на каждую галактику на основе работы [33], мы определили расстояние до каждой галактики и металличность ее красных гигантов. Полученные результаты представлены в таблице 1. Влияние ошибок фотометрии на точность определения расстояния до галактики и металличности ее красных гигантов очень мало, поскольку точность фотометрии одной звезды на уровне  $I_{\text{TRGB}}$  не хуже  $0^{\text{m}}05$ , а для определения границы ветви красных гигантов и показателя цвета всегда используется несколько десятков звезд со своими случайными ошибками фотометрии.

Со времени установки ACS/WFC камеры на космический телескоп Хаббла прошло много лет и действие космических лучей привело к деградации светоприемных матриц и появлению неэффективности переноса заряда. Из-за этого результат фо-



**Рис. 2.** Диаграммы Герцшпрунга-Рессела для звезд галактик, представленных на рис. 1. Наклонные линии отмечают положения ветвей красных сверхгигантов. Красные гиганты выделены серым цветом. На уровне  $M_I = -7$  определяется показатель цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов, а на уровне  $M_I = -3.5$  показатель цвета  $(V - I)$  ветви красных гигантов и их металличности.

тометрии звезды зависит от места ее положения на матрице [36], а максимальная ошибка фотометрии достигает 0.15 звездной величины. Чтобы избежать процедур по коррекции результатов фотометрии, при определении расстояний мы использовали только те звезды, которые расположены на краю матрицы, где действие этого эффекта незначительно. Поскольку большинство снимков получено в ранний период работы космического телескопа Хаббла, когда неэффективность переноса заряда отсутствовала, то только немногие галактики потребовали координатной селекции звезд при определении расстояния и металличности звезд.

Особенность наших измерений расстояний до галактик заключалась в том, что, как правило, мы использовали красные гиганты на периферии галактик, избегая центральные области. Это связано с тем, что в irregулярных галактиках наряду с красными гигантами наблюдается большое количество AGB-звезд, которые имеют более высокие светимости, чем красные гиганты, но такие же показатели цвета. При определении границы ветви красных гигантов эти AGB-звезды искажают результаты измерений, что ведет к ошибочной оценке расстояний до галактик. Поскольку уменьшение численной плотности AGB-звезд от центра галактики

к периферии происходит более резко, чем у красных гигантов [37], то чем дальше от центра галактики проводится выборка звезд, тем больший процент в этой выборке будут составлять красные гиганты. Такой уход на периферию галактики обеспечивает регистрацию вершины ветви красных гигантов (TRGB-скачок) с лучшей точностью. Кроме того, из-за наличия дисперсии металличности звезд в галактиках и зависимости между металличностью и светимостью красных гигантов, наблюдается расширение ветви красных гигантов и размытие TRGB-скачка, что снижает точность измерений TRGB-скачка и расстояния до галактики. Красные гиганты на периферии галактик характеризуются меньшей дисперсией металличности и меньшей шириной ветви [38], что позволяет уменьшить ошибки определения расстояний.

Полученные нами результаты измерения металличности звезд и расстояний до галактик представлены в таблице 1. Внешняя точность измерения расстояния до галактики определяется главным образом точностью калибровки TRGB-метода. По данным авторов метода [34] точность калибровки равна 0.1 звездной величины. Влияние остальных причин существенно меньше. Можно считать, что с учетом всех возможных ошибок внешняя точность

определения модуля расстояния равна 0.15 звездной величины. С внутренней точностью метода дело обстоит сложнее. Если у галактики присутствует узкая и населенная ветвь красных гигантов, то точность измерения модуля расстояния равна 0.02–0.03 звездной величины. Если же галактика удалена, имеет слабонаселенную ветвь красных гигантов разной металличности и большую числен-

ность AGB-звезд, то точность определения модуля расстояния будет не лучше 0.10–0.15 звездной величины. Кроме измеренных расстояний и металличности, в таблице 1 приведены яркости галактик и медианные значения расстояний, взятые нами из базы данных NED.

**Таблица 1.** Расстояния до галактик и металличности звезд

Галактика	RA Dec	[Fe/H]	V-I	$(m - M)_0$	$D$	$D_{\text{med}}$	$A_B$	$B_t$	$M_B$	$a/b$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
U288	002903.6+432554	-1.63	1.46	29.17	6.82	6.82	0.28	16.00	-13.5	1.6
IC1613	010447.8+020704	-1.57	1.45	24.48	0.79	0.75	0.09	9.82	-14.7	1.1
U685	010722.4+164104	-1.57	1.45	28.27	4.51	4.75	0.21	13.97	-14.3	1.3
KKH6	013451.6+520530	-1.48	1.55	27.91	3.81	3.75	1.27	17.40	-11.8	1.4
U1281	014932.3+323533	-1.22	1.60	28.57	5.17	5.25	0.17	11.79	-16.8	9.2
KK16	015520.3+275714	-1.45	1.35	28.67	5.42	5.66	0.26	16.80	-12.1	2.7
KK17	020010.2+284953	-1.92	1.37	28.30	4.57	4.92	0.20	17.90	-10.6	2.0
N784	020116.9+285014	-1.28	1.58	28.53	5.09	5.27	0.21	11.11	-17.4	4.4
PGC9962	023747.3-612012	-1.37	1.51	28.43	4.85	5.17	0.09	12.16	-16.4	9.2
E154-023	025650.4-543417	-1.47	1.51	28.75	5.62	5.87	0.06	11.88	-16.9	4.7
E199-007	025804.2-492259	-1.84	1.33	28.95	6.18	6.03	0.08	16.44	-12.6	2.5
N1311	032006.9-521108	-1.43	1.50	28.59	5.22	5.42	0.08	12.72	-16.0	3.8
KK27	032102.4-661909	-2.00	1.30	27.98	3.95	4.19	0.30	17.60	-10.7	3.0
II959	033312.6-502451	-1.41	1.48	28.87	5.95	6.40	0.04	12.58	-16.3	4.0
N1569	043049.2+645053	-1.92	1.29	27.40	3.03	3.30	2.52	9.42	-18.0	2.0
E252-001	045658.7-424814	-2.07	1.33	29.11	6.63	7.21	0.05	15.22	-14.0	3.2
E553-046	052705.7-204041	-1.21	1.53	29.11	6.64	6.70	0.16	14.60	-14.7	1.5
E364-029	060545.2-330451	-1.84	1.47	29.75	8.92	9.02	0.16	13.60	-16.3	1.3
PGC18431	060719.7-341216	-1.74	1.51	29.87	9.41	9.64	0.13	14.09	-15.9	1.1
E121-020	061554.5-574335	-1.88	1.41	28.68	5.44	6.04	0.15	15.85	-13.0	1.3
E489-056	062617.5-261557	-1.68	1.45	28.99	6.29	6.31	0.23	15.60	-13.6	1.5
E490-017	063757.1-260001	-1.64	1.52	28.90	6.03	6.34	0.28	12.96	-16.2	1.3
U3600	065540.0+390543	-1.61	1.60	30.19	10.92	10.30	0.34	18.00	-12.5	2.2
U3698	070918.8+442248	-1.76	1.58	30.34	11.69	11.25	0.35	17.00	-13.7	1.7
U3755	071351.6+103119	-1.76	1.37	29.38	7.51	7.40	0.32	13.23	-16.5	1.7
N2366	072854.1+691254	-1.88	1.48	27.60	3.34	3.27	0.13	10.95	-16.7	2.7
E059-001	073118.4-681115	-1.23	1.55	28.31	4.60	4.53	0.54	13.74	-15.1	1.2

Таблица 1. (Продолжение)

Галактика	RA Dec	[Fe/H]	V-I	$(m - M)_0$	$D$	$D_{\text{med}}$	$A_B$	$B_t$	$M_B$	$a/b$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
A174585	073610.3+095911	-1.34	1.56	29.48	7.86	7.89	0.14	16.90	-12.7	2.0
UGC3966	074126.0+400644	-1.88	1.47	30.13	10.64	10.40	0.18	13.68	-16.6	1.0
UGC3974	074155.4+164809	-2.00	1.38	29.50	7.93	8.10	0.12	13.50	-16.1	1.0
KK65	074232.0+163340	-1.34	1.56	29.49	7.90	8.01	0.12	15.60	-14.0	2.0
U4115	075701.8+142327	-1.28	1.56	29.36	7.46	7.73	0.10	15.20	-14.3	1.8
IC2233	081358.9+454434	-1.34	1.58	30.13	10.61	11.70	0.19	11.70	-18.6	8.9
HoII	081904.4+704318	-1.54	1.49	27.59	3.28	3.38	0.12	10.89	-16.7	1.3
DDO52	082828.5+415124	-1.31	1.60	29.95	9.78	10.30	0.16	14.63	-15.5	2.0
DDO53	083406.5+661045	-2.07	1.26	27.69	3.46	3.64	0.14	14.41	-13.4	1.2
HoI	094035.1+711046	-1.96	1.40	28.00	3.99	3.93	0.18	13.01	-15.0	1.2
N2976	094715.5+675459	-0.64	2.00	27.76	3.57	3.57	0.26	10.30	-17.8	2.2
UGC5288	095117.0+074939	-1.61	1.59	30.27	11.34	11.45	0.12	14.62	-15.8	1.5
6DF0956	095637.6-092911	-1.34	1.59	29.90	9.54	9.54	0.23	16.00	-14.1	1.3
UGC5427	100440.9+292152	-1.57	1.59	30.27	11.29	7.69	0.08	14.42	-15.9	2.0
UGC5423	100530.5+702155	-1.92	1.39	29.82	9.21	8.79	0.30	14.86	-15.3	1.5
UGC5456	100719.7+102144	-1.16	1.55	30.08	10.38	10.65	0.15	13.15	-17.1	2.0
DDO82	103035.0+703707	-1.06	1.82	28.00	3.99	3.84	0.15	13.24	-14.9	1.8
UGC5797	103925.2+014307	-1.31	1.76	29.99	9.97	10.40	0.12	14.19	-15.9	1.1
E376-016	104327.0-370233	-1.92	1.28	29.20	6.93	6.92	0.21	15.44	-13.9	1.3
E318-013	104741.6-385113	-1.50	1.50	29.17	6.83	6.92	0.28	13.53	-14.4	7.3
E215-009	105729.9-481043	-2.09	1.23	28.44	4.88	5.25	0.80	16.03	-13.2	1.2
H1133-32	113311.0-325743	-2.08	1.34	28.80	5.74	5.60	0.23	16.30	-12.8	2.0
N3738	113548.8+543126	-1.01	1.76	28.60	5.25	4.94	0.04	11.93	-16.7	1.3
E320-014	113753.2-391313	-1.37	1.48	28.57	5.18	5.96	0.52	15.85	-13.2	1.2
E379-007	115443.5-333366	-1.65	1.46	28.61	5.27	5.21	0.27	16.60	-12.3	1.2
E572-034	115858.3-190141	-0.97	1.77	30.19	10.91	8.51	0.14	13.84	-16.5	2.0
N4068	120400.8+523518	-1.40	1.51	28.15	4.27	4.34	0.08	12.78	-15.5	2.0
N4144	120958.6+462726	-0.91	1.82	29.28	7.17	7.12	0.05	11.10	-18.2	4.6
N4163	121209.1+361009	-1.14	1.61	27.28	2.85	2.94	0.07	13.46	-13.9	1.1
U7242	121408.4+660541	-1.28	1.60	28.55	5.14	5.43	0.07	14.60	-14.0	2.4
N4244	121729.6+374826	-0.89	1.78	28.16	4.29	4.40	0.08	9.28	-19.0	9.1
U7408	122115.0+454841	-1.50	1.53	29.44	7.75	7.28	0.04	13.26	-16.2	2.1
N4395	122548.9+333249	-1.61	1.52	28.56	5.17	4.76	0.06	10.57	-18.0	1.2

Таблица 1. (Продолжение)

Галактика	RA Dec	[Fe/H]	V-I	$(m - M)_0$	$D$	$D_{\text{med}}$	$A_B$	$B_t$	$M_B$	$a/b$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
UA281	122615.7+482938	-1.92	1.42	28.62	5.30	5.75	0.05	14.94	-13.7	1.3
PGC41093	122852.2+421041	-1.61	1.54	29.63	8.42	8.51	0.09	15.54	-14.2	1.5
PGC42134	123721.8+384438	-1.88	1.36	29.23	7.01	6.70	0.05	15.36	-13.9	1.5
E381-018	124442.4-355800	-2.13	1.30	28.37	4.72	5.33	0.23	15.79	-12.8	1.7
E381-020	124600.7-335013	-1.57	1.47	28.68	5.44	5.43	0.24	13.63	-15.3	2.5
N4789a	125405.3+270859	-1.43	1.61	27.94	3.87	4.04	0.03	13.76	-14.2	1.4
E443-009	125454.0-282027	-1.64	1.40	28.72	5.55	5.89	0.23	17.01	-11.9	1.1
GR8	125840.4+141304	-1.64	1.43	26.65	2.14	2.15	0.09	14.62	-12.0	1.1
KK182	130502.1-400458	-1.61	1.45	28.77	5.66	5.86	0.37	16.90	-12.1	1.8
DDO165	130624.9+674225	-1.57	1.48	28.31	4.59	4.82	0.09	12.78	-15.5	1.9
U8215	130803.6+464941	-2.31	1.23	27.88	3.76	4.56	0.04	16.20	-11.7	1.4
U8245	130836.2+785614	-1.37	1.48	28.35	4.68	4.72	0.12	14.50	-13.9	2.4
E269-058	131032.9-465927	-1.06	1.90	27.89	3.78	3.77	0.39	12.17	-16.1	1.7
N5023	131212.6+440228	-1.50	1.63	29.02	6.38	6.55	0.07	11.59	-17.5	9.3
N5011C	131311.9-431556	-1.31	1.69	27.90	3.80	3.73	0.44	13.73	-14.6	1.5
U8331	131530.3+472956	-1.25	1.54	28.06	4.10	4.20	0.03	14.31	-13.8	3.0
KK196	132147.1-450348	-1.72	1.57	27.86	3.74	3.96	0.30	16.14	-12.0	1.3
IC4247	132644.4-302145	-1.34	1.50	28.50	5.01	4.97	0.24	13.58	-15.2	2.6
N5238	133442.7+513650	-1.37	1.57	28.15	4.25	4.51	0.04	13.80	-14.4	1.7
E444-078	133631.1-291406	-1.31	1.53	28.62	5.30	5.27	0.19	15.00	-13.8	2.4
N5237	133739.0-425049	-1.31	1.56	27.60	3.31	3.35	0.36	12.84	-15.1	1.2
U8638	133919.4+244632	-1.37	1.61	28.03	4.03	4.29	0.05	14.33	-13.8	1.5
U8651	133953.8+404421	-1.64	1.49	27.44	3.07	3.09	0.02	14.46	-12.9	1.8
N5253	133955.9-313824	-1.43	1.75	27.83	3.68	3.55	0.20	10.47	-17.6	2.6
N5264	134136.7-295447	-0.93	1.91	28.46	4.92	4.74	0.18	12.23	-16.4	1.7
U8760	135050.6+380109	-2.05	1.37	27.41	3.04	3.26	0.06	14.12	-13.4	3.1
H1351-47	135122.0-470000	-1.68	1.36	28.57	5.17	5.65	0.52	17.20	-11.4	1.7
HoIV	135445.7+535403	-0.91	1.69	29.24	7.06	7.22	0.05	13.40	-15.9	3.3
U8833	135448.7+355015	-1.80	1.37	27.44	3.08	3.19	0.04	15.30	-12.2	1.1
E384-016	135701.6-352002	-1.28	1.63	28.25	4.47	4.45	0.27	14.75	-13.8	1.5
DDO187	141556.4+230319	-1.34	1.69	26.73	2.22	2.27	0.08	14.28	-12.5	1.3
DDO190	142443.5+443134	-1.22	1.62	27.22	2.78	2.79	0.05	13.35	-14.0	1.0
E223-009	150108.6-481731	-1.34	1.50	28.96	6.20	6.28	0.94	12.28	-17.6	1.1

Таблица 1. (Продолжение)

Галактика	RA Dec	[Fe/H]	V-I	$(m - M)_0$	$D$	$D_{\text{med}}$	$A_B$	$B_t$	$M_B$	$a/b$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
E274-001	151413.8–464829	–1.50	1.65	27.30	2.89	3.05	0.91	9.64	–18.6	9.9
E137-018	162058.4–602928	–1.11	1.63	28.89	5.99	6.17	0.89	12.24	–17.5	2.9
IC4662	174708.8–643830	–1.64	1.44	26.74	2.23	2.47	0.25	11.29	–15.7	1.8
N6503	174927.6+700841	–1.01	1.72	28.95	6.16	6.25	0.12	10.11	–19.0	3.0
E104-022	185541.2–644839	–1.76	1.49	29.82	9.19	8.95	0.30	15.19	–14.9	1.5
U11411	190842.3+701702	–1.40	1.57	28.90	6.03	6.58	0.43	14.40	–14.9	1.3
E104-044	191123.1–641309	–1.31	1.61	29.86	9.36	9.73	0.14	14.70	–15.3	1.2
N6789	191641.9+635816	–1.64	1.45	27.86	3.74	3.60	0.25	13.76	–14.4	1.3
I5052	205205.6–691206	–1.19	1.62	28.78	5.70	5.60	0.18	10.52	–18.4	7.4
E238-005	222230.0–482418	–1.31	1.53	29.58	8.24	8.02	0.05	15.01	–14.6	2.2
UA438	232627.9–322319	–1.72	1.49	26.73	2.21	2.20	0.05	13.89	–12.8	1.2
E149-003	235202.8–523440	–1.72	1.46	29.05	6.46	7.01	0.05	14.44	–14.7	5.5

В представленной таблице 1 в колонке (2): RA и Dec — восхождение и склонение, (3): [Fe/H] — металличность красных гигантов, (4):  $(V - I)$  — показатель цвета красных сверхгигантов на уровне  $M_I = -7$ , (5):  $(m - M)_0$  — модуль расстояния, (6):  $D$  — полученные нами расстояния до галактик в мегапарсеках, (7):  $D_{\text{med}}$  — медианное значение расстояний, взятых из базы данных NED, (8):  $A_B$  — коэффициент экстинкции в фильтре  $B$ , (9):  $B_t$  — полная яркость галактики в фильтре  $B$  по NED, (10):  $M_B$  — вычисленная светимость галактики, (11):  $a/b$  — отношение осей галактики.

Для всех галактик нашего списка в NED можно найти более ранние измерения расстояний, причем для многих галактик измерения проводились многократно. Мы провели сравнение наших результатов с полученными TRGB-методом медианными значениями расстояний для каждой галактики. Результат сравнения представлен на рис. 3. Видно хорошее соответствие и линейность сравниваемых оценок, за исключением двух галактик: UGC 5427 и ESO 572-034. Для галактики UGC5427 Талли и др. [39] приводят величину расстояния 7.7 Мпс (наша оценка — 11.3 Мпс). По всей видимости авторы [39] ошибочно представили этот результат как измерение TRGB-методом, а в реальности использовали более раннее измерение на основе метода Талли-Фишера, точность которого невысока. Для галактики ESO572-034 известно расстояние только по методу Талли-Фишера [40] —  $D = 8.5$  Мпс, мы же получили 10.8 Мпс. Точности измерения

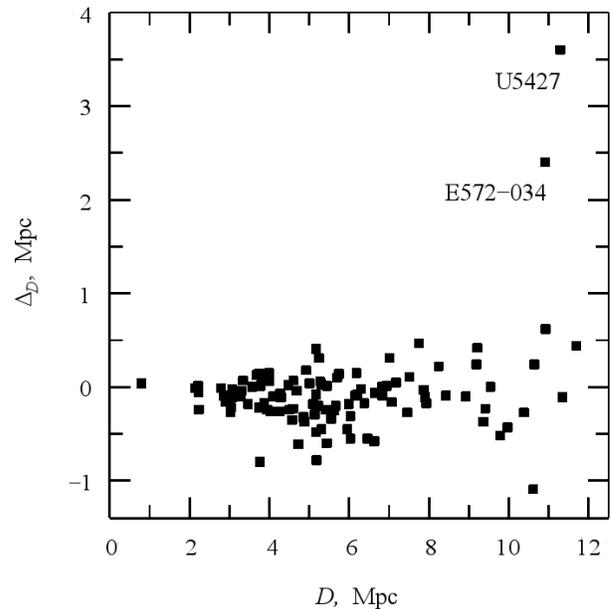
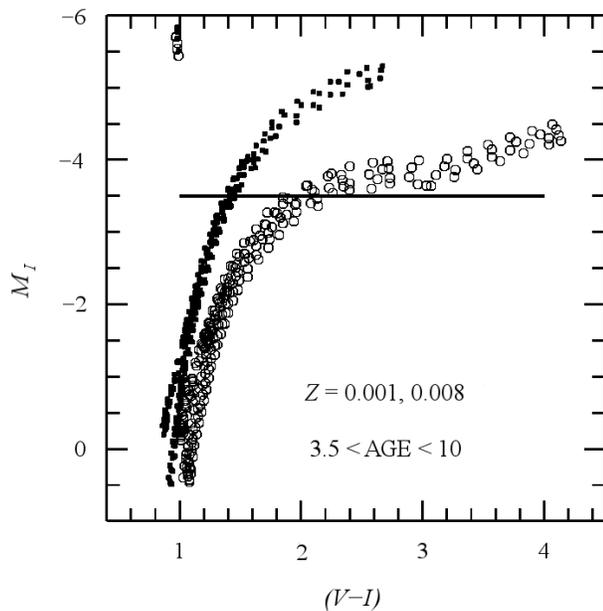


Рис. 3. Сравнение наших оценок расстояний до галактик со взятыми из базы данных NED медианными значениями результатов, полученных также TRGB-методом.

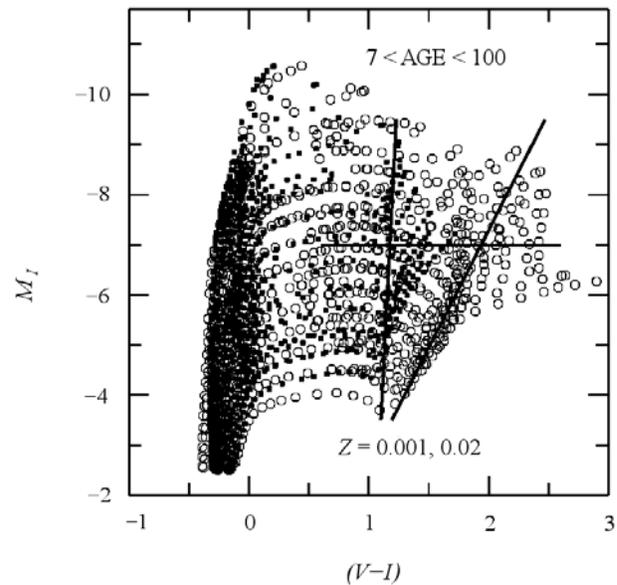
расстояний остальных галактик списка не выходят за пределы взаимных ошибок.



**Рис. 4.** CM-диаграммы теоретических изохрон Бертелли и др. (1994) [41] для красных гигантов разной металличности:  $Z = 0.001$  (точки) и  $0.008$  (кружки) и возраста от 3.5 до 10 млрд. лет. Видно, что изменение металличности смещает ветвь красных гигантов по оси  $(V - I)$  существенно сильнее, чем изменение возраста. Горизонтальная линия проведена на уровне  $M_I = -3.5$ , при котором измеряется показатель цвета ветви красных гигантов и их металличность.

#### 4. МЕТАЛЛИЧНОСТЬ КРАСНЫХ ГИГАНТОВ И СВЕРХГИГАНТОВ

На рис. 4 показана CM-диаграмма теоретических изохрон Бертелли и др. [41], красных гигантов разной металличности ( $Z = 0.001$  и  $0.008$ ) и возраста (от 3.5 до 10 млрд лет). И видно, что положение ветви красных гигантов сильно зависит от их металличности, а изменение их возраста вызывает аналогичные, но значительно меньшие изменения. Таким образом, по положению ветви красных гигантов на CM-диаграмме можно оценить металличность этих звезд. В TRGB-методе [34] металличность определяется по показателю цвета  $(V - I)$  ветви красных гигантов на уровне  $M_I = -3.5$ , т.е. на 0.5 звездной величины слабее, чем TRGB-скачок. Такие измерения металличности красных гигантов были проведены нами для всех галактик списка при определении расстояний и полученные значения  $[\text{Fe}/\text{H}]$  приведены в таблице 1. Форма распределения показателя цвета  $(V - I)$  ветви красных гигантов на уровне  $M_I = -3.5$  в координатах  $(V - I) - N$  подобна скорее не гауссовому распределению, а похожа на направленный вверх треугольник, искаженный флуктуациями величин. Максимум такого распределения  $(V - I)$ , используемый нами для



**Рис. 5.** CM-диаграммы теоретических изохрон Бертелли и др. (1994) [41] для красных сверхгигантов разной металличности:  $Z = 0.001$  (точки) и  $0.02$  (кружки) и возраста от 7 до 100 млн. лет. Так же, как и у красных гигантов, изменение металличности смещает ветвь красных сверхгигантов по оси  $(V - I)$ . Горизонтальная линия проведена на уровне  $M_I = -7$ , при котором показатель цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов мы использовали как значение их металличности.

вычисления металличности, определяется с точностью  $0.02-0.03$ , что соответствует  $0.07-0.1$  при вычислении металличности  $[\text{Fe}/\text{H}]$  красных гигантов.

Положение ветви красных сверхгигантов на CM-диаграмме зависит, также как и для красных гигантов, от металличности составляющих ее звезд. На рис. 5 на CM-диаграмме теоретических изохрон [41] показаны положения ветвей красных сверхгигантов с металличностью  $Z = 0.02$  и  $0.001$ . Можно увидеть, что при увеличении металличности ветвь красных сверхгигантов сдвигается в сторону увеличения показателя цвета  $(V - I)$ . Для количественной оценки меры изменения положения ветви сверхгигантов мы выбрали, аналогично методу [34], значение показателя цвета на уровне  $M_I = -7$ . Изменение этого показателя цвета соответствует изменению металличности сверхгигантов. Уровень  $M_I = -7$  был выбран по следующей причине. На CM-диаграмме изохрон (рис. 5) видно, что чем выше яркость сверхгигантов, тем больше различие показателей цвета у сверхгигантов разной металличности, т.е. более яркие сверхгиганты дают большую точность в измерении разности металличности звезд. Однако, при использовании реальных результатов фотометрии звезд галактик часто оказывается, что очень яркие сверхгиганты в галактике отсутствуют, или их очень мало, что приводит к ошибкам в определении показателя

цвета ветви сверхгигантов. Более слабые, но более многочисленные красные сверхгиганты дают возможность выполнить такие измерения. Поэтому, на основе сравнения СМ-диаграмм многих галактик было выбрано компромиссное решение: измерения показателя цвета ветви сверхгигантов проводить на уровне  $M_I = -7$ .

Для нескольких типичных галактик (рис. 1) нашего списка на рис. 2 показаны их СМ-диаграммы. Положение ветви красных сверхгигантов каждой галактики определяет прямая линия, пересечение которой с горизонтальной прямой при  $M_I = -7$  дает значение показателя цвета ( $V - I$ ) красных сверхгигантов каждой галактики. На этих же СМ-диаграммах показаны уровни при  $M_I = -3.5$ , по которым определяются показатели цвета красных гигантов в TRGB-методе [34] и измеряется металличность этих звезд. Ветви красных сверхгигантов у галактик нашего списка значительно различаются по населенности и возрасту звезд, составляющих эти ветви, но практически во всех галактиках положение прямой линии, аппроксимирующей положение ветви сверхгигантов, определено по цвету ( $V - I$ ) с точностью не хуже чем 0.02–0.03 звездной величины.

Полученные значения показателей цвета ( $V - I$ ) для красных сверхгигантов разных галактик являются уже сами по себе индикаторами металличности молодых звезд галактик и могут использоваться в этом качестве. Для перевода этих величин в обычные, стандартные, значения металличности ( $Z$  или  $[Fe/H]$ ) необходимы измерения объектов, для которых имеются как СМ-диаграммы звезд, так и определения металличности на основе спектральных измерений. Наиболее удобно для этой цели использовать рассеянные скопления или области звездообразования разной металличности. Мы планируем выполнить эту работу в ближайшее время, а в данной публикации в качестве аналога металличности будем использовать только значения ( $V - I$ ) ветвей красных сверхгигантов.

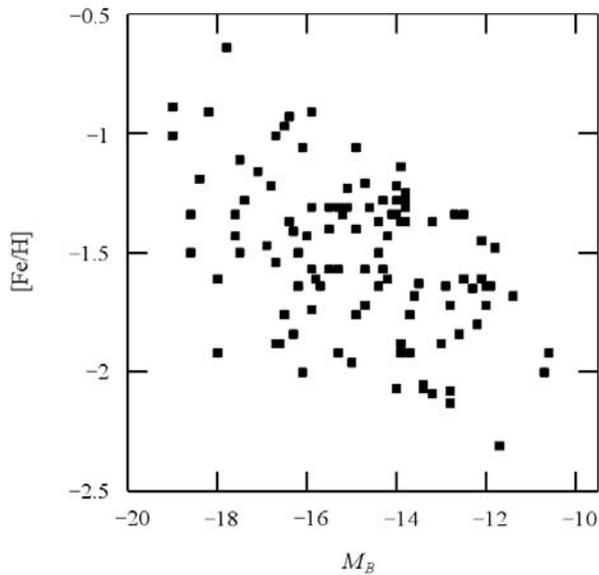
## 5. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ МОЛОДЫХ И СТАРЫХ ЗВЕЗД

Как указывалось выше, зависимость между светимостью или массой галактики и металличностью ее звезд или межзвездного газа установлена во многих работах. Несмотря на уверенно прослеживаемую закономерность, разброс точек на диаграммах в указанных выше работах довольно большой, необъяснимый точностью измерений сравниваемых величин. Особенно большие отклонения от линейной зависимости видны у слабых галактик с очень низкой металличностью [42]. В большинстве

случаев при спектральных измерениях металличности галактик используются области звездообразования, населенные молодыми звездами (из-за их большой яркости). Гало галактик, населенное старыми красными гигантами, ввиду низкой поверхностной яркости, доступно спектральным измерениям только у самых близких галактик. Если же галактики разрешаются на звезды, то, независимо от расстояния, металличность звезд гало можно измерить фотометрическим методом.

На диаграммах «светимость — металличность» чаще всего используется «полная» светимость галактики в синей области спектра (фильтр  $B$ ). Термин «полная» ( $B_t$ ) означает, что результат получается после экстраполяции нескольких измерений, сделанных с последовательно увеличивающимися апертурами, либо с большой апертурой, за пределами которой, по мнению авторов, находится совсем незначительная часть галактики. Однако у галактик низкой поверхностной яркости слабосветящаяся периферия может продолжаться на большие расстояния и давать существенный вклад в общую светимость галактики. Такие галактики найдены, например, на окраине скопления галактик Дева [43]. Из-за изменений градиента поверхностной яркости вдоль радиуса галактики, особенно при переходе от диска к гало, метод экстраполяции тоже может привести к недооценке реальной яркости галактики. Газопылевые облака галактики, видимой с ребра, экранируют свет от ее дальних частей и галактика оказывается более слабой, чем она есть в действительности. Эмпирические формулы учета такого экранирования в каталоге галактик RC3 позволяют компенсировать этот эффект только частично, поскольку галактики, в зависимости от их индивидуальной морфологии, могут сильно различаться по величине внутреннего поглощения света. Полученные таким образом исправленные светимости  $B_t^0$  могут содержать значительные ошибки, что приводит к дополнительной причине рассеяния точек на диаграммах с использованием светимости галактик.

Исторически сложилось так, что яркость галактик оценивалась в голубой области спектра (фильтр  $B$ ), поскольку первоначально не было иных светоприемников, кроме фотографической эмульсии, работающей только в голубой области. Позднее оказалось, что эта полоса спектра выбрана очень неудачно, поскольку светимость галактик в этой полосе подвержена сильным флуктуациям из-за вспышек звездообразования и появления голубых сверхгигантов высокой светимости. На короткое время галактика светит намного ярче обычного. Кроме того, поглощение света на газопылевых облаках в этой полосе спектра больше, чем в других полосах наблюдений (фильтры

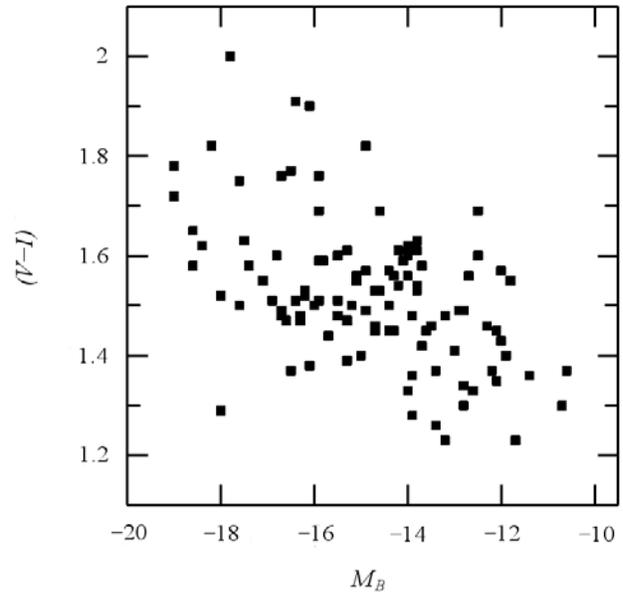


**Рис. 6.** Диаграмма зависимости между светимостью  $M_B$  галактик и металличностью их красных гигантов. Основной причиной рассеяния точек являются неопределенность в измерении реальных светимостей галактик и вспышки звездообразования.

$V, R, I$ ), т.е. в этой полосе спектра мы можем получить наибольшие флуктуации светимости галактики. Однако недостатки компенсируются тем, что в этой полосе спектра измерены яркости очень большого числа галактик, чего нельзя сказать про более удобные для сравнения светимостей галактик полосы наблюдений (например инфракрасная полоса  $K$ ). В последнее время идет быстрое пополнение данных по фотометрии галактик в ближней инфракрасной области спектра, но эти данные пока не охватывают все галактики нашего списка, поэтому нам пришлось довольствоваться взятыми из NED результатами фотометрии галактик в фильтре  $B$ . Из всех используемых в нашей работе измеряемых параметров светимость галактик определяется с наибольшей ошибкой. В работах по фотометрии обычно приводятся значения с точностью до сотых звездной величины, но в реальности светимость галактики может на одну звездную величину, если не более, отличаться от приводимых авторами результатов измерений. На это указывает различие результатов фотометрии у некоторых галактик.

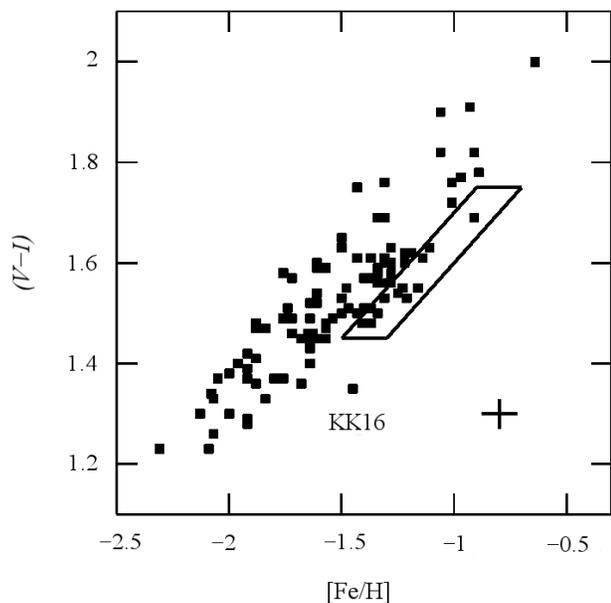
На диаграмме рис. 6 приведена зависимость между полученными нами значениями светимости галактик и металличностью старых звезд — красных гигантов. Зависимость между величинами наблюдается отчетливо. Видимое рассеяние точек на диаграмме может быть следствием неточности измерения светимости галактик и неопределенности в измерении металличности тех галактик, которые имеют широкую ветвь красных гигантов, т.е.

содержат красные гиганты с различной металличностью. Например, одна из сильно отклоняющихся галактик — это NGC 1569, галактика с низкой металличностью и очень бурным звездообразованием, а значит, и повышенной яркостью, что сдвигает ее от средней зависимости «металличность—светимость» на диаграмме рис. 6. Аналогичным образом можно объяснить отклонения и других галактик, но для большей части галактик у нас недостаточно точных данных, чтобы объяснить наблюдающееся на диаграмме рис. 6 рассеяние.



**Рис. 7.** Диаграмма зависимости между светимостью галактик  $M_B$  и показателем цвета красных сверхгигантов этих же галактик. Наиболее сильно отклоняющаяся точка ( $M_B = -18$  при  $(V - I) = 1.3$ ) соответствует галактике NGC 1569 с очень бурными процессами звездообразования.

Зависимость между светимостью галактик и измеренными значениями показателя цвета ( $V - I$ ) при  $M_I = -7$  ветвей красных сверхгигантов представлена на рис. 7. Так же, как и для красных гигантов, для сверхгигантов видна зависимость между представленными величинами и также наблюдается довольно большое рассеяние точек. Причины рассеяния результатов у сверхгигантов на диаграмме рис. 7 остаются такими же, как и у красных гигантов — неопределенности в измерении светимостей и ошибки измерения ( $V - I$ ) у ветви сверхгигантов. На этой диаграмме галактика NGC 1569 с бурным звездообразованием, как и на диаграмме для красных гигантов, отклоняется от средней зависимости. Отклонения галактики NGC 1569 от средних зависимостей дает основание считать, что повышенное рассеяние точек на рис. 6 и рис. 7



**Рис. 8.** Зависимость между металличностью красных гигантов и показателем цвета  $(V - I)$  красных сверхгигантов, мы принимаем в качестве эквивалента металличности молодых звезд этих же галактик. При процессах падения на галактики значительных масс малометаллического газа, точки на диаграмме сдвинуты в сторону меньших значений  $(V - I)$ , как это наблюдается у галактики КК16. Показанный на диаграмме крест соответствует точности измерений сравниваемых величин. В нарисованный на диаграмме параллелограмм попадают те галактики, где вероятно наблюдается падение межгалактического газа.

связано с увеличением яркости галактик во время вспышек звездообразования.

Используя результаты измерения металличности красных гигантов и сверхгигантов из таблицы 1, мы построили диаграмму зависимости металличности между старыми и молодыми звездами галактик (рис. 8). Рассеяние точек на этой диаграмме существенно меньше, чем на рис. 6 и рис. 7, где одним параметром является светимость галактик. Это подтверждает наше предположение, что одной из основных причин рассеяния точек на диаграммах рис. 6 и рис. 7 является неопределенность в измерении светимости галактик.

На диаграмме рис. 8 хорошо заметна линейная зависимость между металличностью красных гигантов  $[Fe/H]$  и показателем цвета  $(V - I)$  ветви сверхгигантов, что мы принимаем в этой статье как эквивалент металличности. Эта зависимость выражается как:

$$(V - I) = (0.39 \pm 0.02) \times [Fe/H] + (2.11 \pm 0.04).$$

Видно, что галактики с малометаллическими старыми звездами содержат и молодые звезды также с низким содержанием металлов. И наоборот, если имеется высокометаллическое старое население,

то и молодое население будет высокометаллическим. Следует отметить, что используемым методом определяется металличность не изменчивой межзвездной среды, а образовавшихся в галактиках звезд разного возраста, что должно давать более устойчивые к разного рода флуктуациям результаты.

Как говорилось в начале этой работы, падение межгалактического газа может изменить металличность молодых звезд. Галактики с признаками такого эффекта следует искать именно на диаграмме рис. 8. Молодые звезды таких галактик должны быть менее металличными, чем это следует из общей зависимости на рис. 8, т.е. сдвигаться в сторону меньших значений  $(V - I)$  для красных сверхгигантов. Одна из 105 галактик — КК16 подпадает под этот критерий. Точность измерения величин  $(V - I)$  и  $[Fe/H]$  показана на рис. 8 в виде креста, с возможными отклонениями от центральной точки из-за ошибок измерения. Видно, что отклонение галактики КК16 больше, чем отклонение из-за ошибок измерения. Ряд галактик, в которых также могло происходить падение межгалактического газа, выделен на рис. 8 параллелограммом. Следует обратить внимание на асимметрию в расположении галактик на рис. 8 в интервале  $[Fe/H]$  от  $-1.1$  до  $-1.7$ . Молодые звезды этих галактик имеют, в среднем, меньшую металличность, чем это можно было бы ожидать, исходя из зависимости рис. 8. Именно среди этих галактик следует искать галактики с признаками падения межгалактического газа.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Использование полученных на космическом телескопе Хаббла глубоких снимков близких галактик позволяет на основе фотометрии измерить металличность старых и молодых звезд этих галактик. Изучение выборки из 105 галактик показало, что наблюдается хорошо видимая корреляция между металличностями звезд разного возраста. Процессы звездообразования должны увеличивать металличность галактик, но, согласно положению на диаграмме рис. 8, ни одна галактика с малометаллическим старым населением не имеет высокометаллическое молодое население. Маловероятно, чтобы ни в одной из этих галактик за последние миллиарды лет не было вспышек звездообразования, например из-за гравитационного взаимодействия с соседями. Вероятнее всего, это означает, что для существенного увеличения металличности галактики процессы звездообразования в этих галактиках должны быть более интенсивными, что возможно происходило на ранних стадиях эволюции галактик. Можно отметить, что на рис. 8

присутствуют галактики со старым населением высокой металличности. Объяснить наблюдаемую на рис. 8 диаграмму можно на основе предположения, что основное повышение металличности в галактиках имело место в далеком прошлом. Некоторые галактики из-за происходивших в них процессах получили высокое содержание металлов, а другие – низкое. Процессы звездообразования в этих галактиках за последние миллиарды лет были недостаточно интенсивными, чтобы существенным образом изменить химический состав. Что касается падения межгалактического газа, то у ряда галактик этот процесс, скорее всего, наблюдается, но вносит незначительный вклад в изменение их металличности.

Мы планируем провести калибровку полученных показателей цвета красных сверхгигантов ( $V - I$ ) при  $M_I = -7$  по имеющимся в литературе спектральным наблюдениям, с тем, чтобы представить металличности старых и молодых звезд в одной системе измерений ( $Z$  или  $[Fe/H]$ ). Это позволит определить изменение металличности за последние миллиарды лет у всех галактик нашего списка. Предполагается также провести поиск корреляций между изменением металличности галактики и ее внутренними параметрами, а также положением галактики среди окружающих ее соседей.

К сожалению, трудно провести аналогичные измерения для ярких спиральных галактик. Возникает сразу несколько проблем. В ярких галактиках существует градиенты металличности молодых и старых звезд вдоль радиуса галактик, и неясно, где измерять металличность. В любой выборке красных гигантов у таких галактик присутствуют звезды разных металличностей и возникает трудность как в измерении металличности, так и в интерпретации ее величины, полученной как среднее значение для очень различающихся друг от друга звезд.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14–50–00043).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Frebel, J. L. Johnson, and V. Bromm, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **380**, L40 (2007).
2. V. Bromm and N. Yoshida, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **49**, 373 (2011).
3. J. S. Ritter, A. Sluder, C. Safronek-Shrader, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451**, 1190 (2015).
4. A. Frebel, arXiv:1408.4832 (2014).
5. H. J. Zahid, M. J. Geller, L. J. Kewley, et al., *Astrophys. J. Lett.* **771**, L19 (2013).
6. J. Lequeux, M. Peimbert, J. F. Rayo, et al., *Astron. and Astrophys.* **80**, 155 (1979).
7. M. L. Mateo, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 435 (1998).
8. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, *Astron. and Astrophys.* **425**, 849 (2004).
9. R. Kuzio de Naray, S. S. McGaugh, and W. J. G. de Blok, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **355**, 887 (2004).
10. C. A. Tremonti, T. M. Heckman, G. Kauffmann, et al., *Astrophys. J.* **613**, 898 (2004).
11. F. Lamareille, M. Mouhcine, T. Contini, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **350**, 396 (2004).
12. F. Shi, X. Kong, C. Li, and F. Z. Cheng, *Astron. and Astrophys.* **437**, 849 (2005).
13. H. Lee, E. D. Skillman, J. M. Cannon, et al., *Astrophys. J.* **647**, 970 (2006).
14. L. van Zee and M. P. Haynes, *Astrophys. J.* **636**, 214 (2006).
15. I. Saviane, V. D. Ivanov, E. V. Held, et al., *Astron. and Astrophys.* **487**, 901 (2008).
16. Y. Zhao, Y. Gao, and Q. Gu, *Astrophys. J.* **710**, 663 (2010).
17. M. S. Bothwell, R. Maiolino, R. Kennicutt, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433**, 1425 (2013).
18. E. Wuyts, J. Kurk, N. M. Förster Schreiber, et al., *Astrophys. J. Lett.* **789**, L40 (2014).
19. S. Salim, J. C. Lee, R. Davé, and M. Dickinson, *Astrophys. J.* **808**, 25 (2015).
20. M. S. Bothwell, R. Maiolino, C. Ciccone, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, A48 (2016).
21. J. Köppen and G. Hensler, *Astron. and Astrophys.* **434**, 531 (2005).
22. R. Sancisi, F. Fraternali, T. Oosterloo, and T. van der Hulst, *Astron. Astrophys. Reviews* **15**, 189 (2008).
23. M. Mollá, *Advances in Astronomy* **2014**, 162949 (2014).
24. R. Verbeke, S. De Rijcke, M. Koleva, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 1830 (2014).
25. M. Mollá, Á. I. Díaz, B. K. Gibson, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **462**, 1329 (2016).
26. N. Pastorello, D. A. Forbes, C. Foster, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442**, 1003 (2014).
27. M. Koleva, P. Prugniel, S. De Rijcke, and W. W. Zeilinger, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417**, 1643 (2011).
28. H. Lee, D. B. Zucker, and E. K. Grebel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **376**, 820 (2007).
29. L. S. Pilyugin, E. K. Grebel, and A. Y. Kniazev, *Astron. J.* **147**, 131 (2014).
30. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 191 (1987).
31. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 250 (1994).
32. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astronomy Letters* **35**, 748 (2009).
33. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737**, 103 (2011).
34. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).

35. B. F. Madore and W. L. Freedman, *Astron. J.* **109**, 1645 (1995).
36. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astronomy Letters* **42**, 428 (2016).
37. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astronomy Letters* **38**, 147 (2012).
38. J. M. Cannon, R. C. Dohm-Palmer, E. D. Skillman, et al., *Astron. J.* **126**, 2806 (2003).
39. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146**, 86 (2013).
40. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **145**, 101 (2013).
41. G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **106**, 275 (1994).
42. S. A. Pustilnik, J.-M. Martin, A. L. Tepliakova, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417**, 1335 (2011).
43. N. A. Tikhonov, *Astronomy Letters* **43**, 21 (2017).

## Metallicity of Young and Old Stars in Irregular Galaxies

N. A. Tikhonov

Based on archived images obtained with the Hubble Space Telescope, stellar photometry for 105 irregular galaxies has been conducted. We have shown the red supergiant and giant branches in the obtained Hertzsprung–Russel diagrams. Using the TRGB method, distances to galaxies and metallicity of red giants have been determined. The color index ( $V - I$ ) of the supergiant branch at the luminosity level  $M_I = -7$  was chosen as the metallicity index of red supergiants. For the galaxies under study, the diagrams have been built, in which the correlation can be seen between the luminosity of galaxies ( $M_B$ ) and metallicity of red giants and supergiants. The main source of variance of the results in the obtained diagrams is, in our opinion, uncertainty in measurements of galaxy luminosities and star-forming outburst. The relation between metallicity of young and old stars shows that main enrichment of galaxies with metals has taken place in the remote past. Deviations of some galaxies in the obtained relation can possibly be explained with the fall of the intergalactic gas on them, although, this inconsiderably affects metallicities of the stellar content.

Keywords: *galaxies: irregular—galaxies: stellar content*