

УДК 524.7–323.3/4, 524.77

## РАССТОЯНИЕ ДО ГРУППЫ ГАЛАКТИК DORADO (ЗОЛОТАЯ РЫБА)

© 2020 Н. А. Тихонов<sup>1\*</sup>, О. А. Галазутдинова<sup>1</sup><sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 5 февраля 2020 года; после доработки 5 августа 2020 года; принята к публикации 5 августа 2020 года

На основе архивных снимков космического телескопа Хаббла проведена звездная фотометрия ярчайших галактик группы Dorado (Золотая Рыба): NGC 1433, NGC 1533, NGC 1566 и NGC 1672. На полученных СМ-диаграммах выделены красные гиганты и TRGB-методом измерены расстояния до галактик. Полученные значения —  $14.2 \pm 1.2$ ,  $15.1 \pm 0.9$ ,  $14.9 \pm 1.0$  и  $15.9 \pm 0.9$  Мпк — показывают, что все названные галактики находятся примерно на одинаковых расстояниях и образуют рассеянную группу при среднем значении расстояния  $D = 15.0$  Мпк. В линзовидной галактике NGC 1533 найдено, что голубые и красные сверхгиганты образуют кольцевую структуру на расстоянии 3.6 кпк от центра, а также видны в водородном рукаве между галактиками NGC 1533 и карликовой IC 2038. Высокая металличность этих звезд ( $Z = 0.02$ ) указывает на их происхождение из газа NGC 1533.

Ключевые слова: галактики: группы: индивидуальные: Dorado — галактики: расстояния и красное смещение — галактики: индивидуальные: NGC 1433, NGC 1533, NGC 1566, NGC 1672

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В южном созвездии Dorado (Золотая рыба) наблюдается концентрация галактик разных типов и светимостей. Среди них Shobbrook (1966) выделил 11 галактик, которые, по его мнению, составляли одну группу, названную им «Dorado.» На основании измеренных лучевых скоростей и фотометрии галактик Shobbrook (1966) оценил расстояние до группы в 9.8 Мпк. Ее положение на небесной сфере определяют шесть массивных галактик: NGC 1433, NGC 1533, NGC 1549, NGC 1553, NGC 1566 и NGC 1672, вокруг которых концентрируются более слабые галактики, что хорошо видно на диаграмме Kilborn et al. (2005). Рассеянное расположение галактик Dorado на небе привело к различным гипотезам по их объединению в группы. Яркие галактики de Vaucouleurs (1975) объединил в группы G16, G21 и G22 и оценил расстояние до основной группы G16 в 18.4 Мпк. В том же году Sandage (1975) опубликовал списки групп галактик, включив в группу Dorado 12 основных и шесть вероятных членов. Указывалось, что расстояние до группы равно 16.9 Мпк. В дальнейшем состав группы Dorado несколько раз менялся в зависимости от критериев отбора галактик или после получения новых данных по лучевым скоростям или измерению расстояний. Nuchra and Geller (1982) 28 галактик Dorado разделили на две группы, NG3 и NG8, а Maia et al. (1989) увеличили

число галактик Dorado до 60, отнеся их к группам 7 и 13. Расстояния до групп галактик Nuchra and Geller (1982) и Maia et al. (1989) оценивали на основе лучевых скоростей и постоянной Хаббла  $H = 100$ . Т.е. все галактики Dorado находились, по их оценкам, не далее 12 Мпк.

Используя фотографические наблюдения, Ferguson and Sandage (1990) провели фотометрию галактик до  $B = 20^m$  и в группу Dorado зачислили 79 галактик. Для большинства новых галактик лучевые скорости были неизвестны, поэтому авторы исходили из близкого расположение слабых галактик относительно ярких. Carrasco et al. (2001) на основе глубоких снимков нашли в группе Dorado 69 галактик низкой поверхностной яркости и определили их показатели цвета ( $V - I$ ) и звездные величины в фильтрах  $V$  и  $I$ .

Проведенные исследования показали, что группа Dorado на южном небе является одной из самых богатых групп галактик. Четыре яркие галактики, звездную фотометрию которых мы представим далее, имеют активные ядра, несмотря на их разные морфологические типы. NGC 1433 и NGC 1672 относятся к Sy2-галактикам, NGC 1566 к Sy1, а NGC 1533 к LINER-галактикам (NED). Поэтому вопрос об измерении расстояний до галактик Dorado требует своего решения.

После получения на космическом телескопе Хаббла снимков галактик Dorado стало возможным для определения расстояния использовать

\*E-mail: ntik@sao.ru

метод флуктуации поверхностной яркости (SBF-метод), которым Tonry et al. (2001) измерили расстояния до нескольких галактик Dorado. Получившееся среднее значение  $D = 18.5$  Мпк ставило эту группу дальше, чем считалось ранее.

Чаще всего для определения расстояний до спиральных галактик используется метод Талли–Фишера (TF). Этим методом Tully et al. (2009) определили, что расстояние до NGC 1433 равно 8.32 Мпк, а до NGC 1672 — 11.9 Мпк. В обширной работе Tully et al. (2013), где представлены результаты измерения расстояний до многих галактик разными методами, указаны расстояния до двух других галактик Dorado: для NGC 1533 — 20.5 Мпк, а для NGC 1566 — 6.61 Мпк. Расстояние до NGC 1566 вызывает сомнение, поскольку у NGC 1533 гелиоцентрическая скорость  $v_h = 790$  км с<sup>-1</sup>, а у NGC 1566 скорость существенно больше,  $v_h = 1504$  км с<sup>-1</sup>. Впрочем, Sorge et al. (2014) оценили расстояние до NGC 1566 еще меньше,  $D = 5.5–6.0$  Мпк. Оценки расстояний по лучевым скоростям показывали меньший разброс. Firth et al. (2006) определили лучевые скорости галактик группы Dorado и нашли, что расстояние до нее равно 16.9 Мпк. Сама группа, по их измерениям, не является вириализованной из-за существования подгрупп внутри группы.

Недавние измерения расстояний до галактик NGC 1433 и NGC 1566 TRGB-методом (Sabbini et al. 2018) дают значения 9.04 Мпк и 17.9 Мпк. Более подробно об этих расстояниях будет сказано в разделе 4.

Приведенные выше результаты измерений расстояний указывают на большие неопределенности получаемых значений, что ведет, в свою очередь, к таким же неопределенностям при составлении списка членов группы Dorado. Трудности возрастают из-за того обстоятельства, что галактики значительно рассеяны по небу, и ни для одной из них не получено к настоящему времени точной оценки расстояния. Невозможно даже указать, какая из ярких галактик ближе, так как расстояния для ярчайших в группе галактик изменяются в широких пределах (см. таблицу 1). Для более слабых галактик разброс измерений может быть только сильнее. Более реальные значения расстояний можно получить простым делением лучевой скорости на постоянную Хаббла. Однако при этом не будут учитываться собственные скорости галактик, значения которых обычно находятся в интервале от 50 до 150 км с<sup>-1</sup>, но внутри групп и скоплений могут быть существенно больше из-за взаимодействия галактик между собой.

Основные параметры исследованных галактик приведены в таблице 1. Результаты классификации

галактик T, величины гелиоцентрических скоростей  $v_h$ , видимые величины  $B_t$  и размеры галактик  $a \times b$  взяты из NED, а измерение расстояний и вычисление светимостей галактик выполнено нами. Минимальные и максимальные расстояния,  $D_{\min}$  и  $D_{\max}$ , указаны согласно литературным данным.

Чтобы обойти трудности в составлении списка галактик одной большой группы, можно разбить ее на подгруппы, в каждую из которых зачислить те галактики, которые концентрируются вокруг ярких. Так были выделены группы NGC 1533, NGC 1566, NGC 1672 (Kilborn et al. 2005), которые раньше входили в одну группу Dorado. Нечто подобное наблюдается в скоплении галактик Virgo, где группы галактик вокруг M 87, M 86 и M 49 удалены друг от друга, но вместе составляют одно скопление Virgo.

## 2. ЗВЕЗДНАЯ ФОТОМЕТРИЯ

Для четырех ярких галактик группы Dorado на космическом телескопе им. Хаббла по разным программам и в разные годы были получены снимки, которые можно было использовать для звездной фотометрии и определения расстояния. К сожалению, большинство снимков приходится на центральные области галактик, где яркий фон галактик и присутствие сверхгигантов и AGB звезд, более ярких, чем красные гиганты, делали эти области малоприспособными для определения расстояния TRGB-методом. Поэтому измерения расстояний мы проводили только по звездам на периферии таких галактик. Эта селекция вела к уменьшению общего числа звезд в выборке, но увеличивала содержание красных гигантов по отношению к другим типам звезд, что давало возможность измерить положение верхнего края ветви красных гигантов (TRGB-скачок), необходимого для вычисления расстояния.

Для изучения звездного состава галактик и определения расстояния мы использовали архивные снимки космического телескопа Хаббла (HST), полученные по заявкам 10438, 10354, 12659, 12999, 13364 и 15654 с камерами ACS/WFC и WFC3. В таблице 2 представлена информация по исходным фотометрическим данным: номер заявки (ID), камера (ACS или WFC3), время экспозиции в секундах в соответствующих фильтрах (F814W(I), F606W(V), F555W(V), F435W(B), F110W(IR), F160W(IR)).

На рис. 1 представлены снимки в голубом фильтре B четырех основных галактик группы Dorado из архива DSS (Digitized Sky Survey) с разметкой положений снимков HST, а на рис. 2 показаны изображения этих же галактик, полученные на HST в фильтрах F606W, F555W и F435W.

Звездная фотометрия галактик выполнялась двумя пакетами программ: DAOPHOT II (Stetson

**Таблица 1.** Параметры ярких галактик группы Dorado

Галактика	T	$B_t$ , mag	$v_h$ , km s <sup>-1</sup>	$a \times b$ , arcmin	$D$ , Мпк	$M_B$ , mag	$D_{\min}$ , Мпк	$D_{\max}$ , Мпк
NGC 1433	(R)SB(r)ab	10.70	1076	6.5 × 5.9	14.2	-20.08	8.3 <sup>1</sup>	11.6 <sup>2</sup>
NGC 1533	SB(rs)0	11.70	790	2.8 × 2.3	15.1	-19.26	13.4 <sup>2</sup>	24.1 <sup>3</sup>
NGC 1566	SAB(s)bc	10.33	1504	8.3 × 6.6	14.9	-20.56	5.5 <sup>4</sup>	21.3 <sup>5</sup>
NGC 1672	SB(s)b	10.28	1331	6.6 × 5.5	15.9	-20.81	9.9 <sup>6</sup>	14.5 <sup>2</sup>

Notes: <sup>1</sup> — Tully et al. (2009), <sup>2</sup> — Tully and Fisher (1988), <sup>3</sup> — Springob et al. (2014),  
<sup>4</sup> — Sorce et al. (2014), <sup>5</sup> — Willick et al. (1997), <sup>6</sup> — Giraud (1985).

**Таблица 2.** Данные из архива HST, использованные в работе

Галактика	ID	Камера	$T_{\text{exp}}$ , с					
			F814W	F606W	F555W	F435W	F110W	F160W
NGC 1433	13364	WFC3	986	—	1140	—	—	—
NGC 1433	12659	WFC3	—	—	—	—	1212	1412
NGC 1533-1	10438	ACS	4950	2288	—	—	—	—
NGC 1533-2	10438	ACS	4950	2288	—	—	—	—
NGC 1566	13364	WFC3	989	—	1143	—	—	—
NGC 1566	12999	ACS	1244	—	768	—	—	—
NGC 1672	10354	ACS	2444	—	—	2444	—	—
NGC 1672	15654	ACS	3775	3063	—	—	—	—

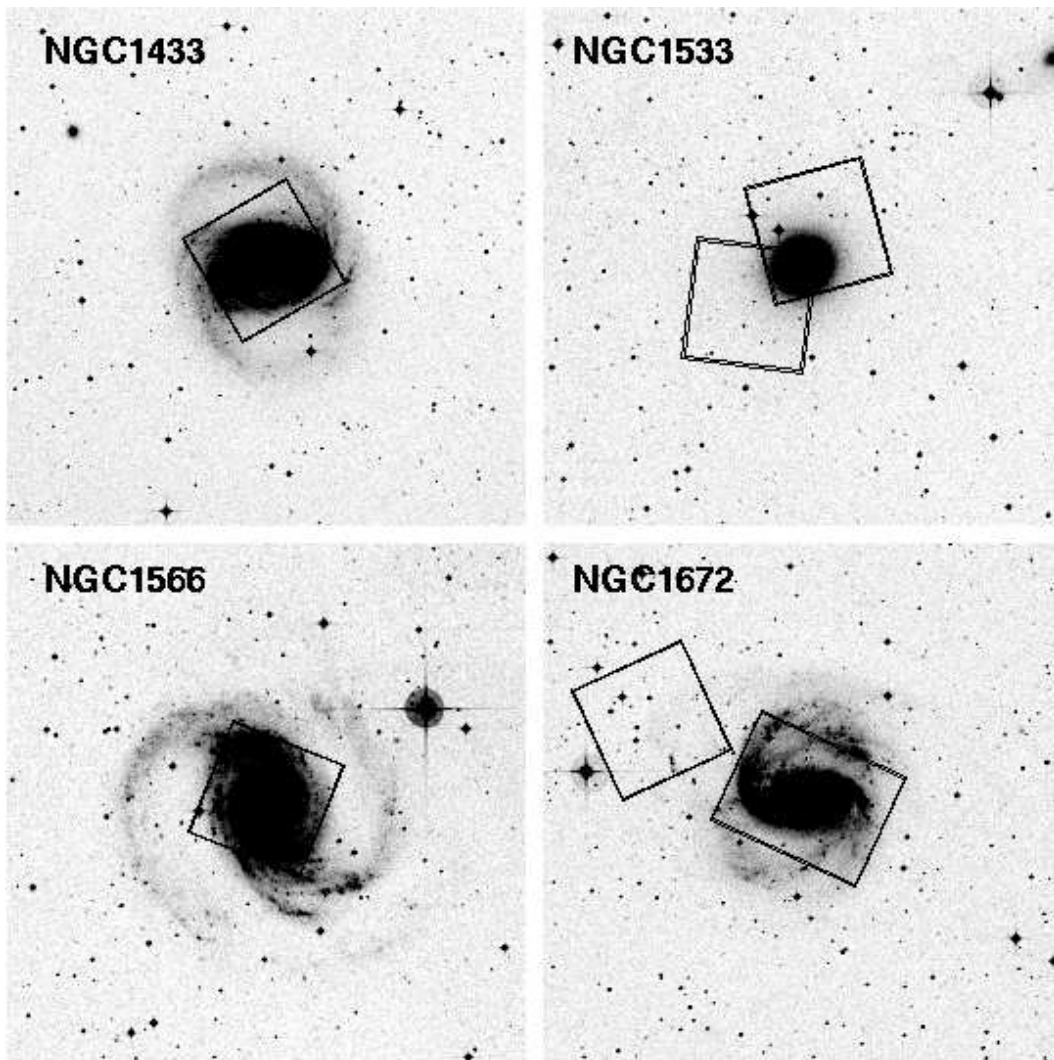
1987; 1994) и DOLPHOT 2.0 (Dolphin 2016). Фотометрия звезд обоими программами проводилась стандартным образом. Для DAOPHOT II это описано нами ранее (Tikhonov and Galazutdinova 2009, Tikhonov et al. 2009). Пакет DOLPHOT 2.0 (Dolphin 2016) использовался в соответствии с рекомендациями его автора<sup>1</sup>, а процедура фотометрии состояла из предварительного маскирования плохих пикселей, удаления следов космических частиц и дальнейшей PSF-фотометрии найденных звезд в двух фильтрах. Для разделения звездобразных и диффузных объектов (звездных скоплений, далеких или компактных галактик) мы применяли селекцию по параметрам «СН1» и «SHARP», которые определяют форму фотометрического профиля каждой измеряемой звезды (Stetson 1987). Отличие профилей диффузных объектов от профилей изолированных звезд, выбранных нами в качестве стандартных, позволило провести такую селекцию для списков объектов, полученных при работе DAOPHOT II и DOLPHOT 2.0.

Принципы фотометрии с помощью программ

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

DOLPHOT и DAOPHOT одинаковы, но есть некоторые различия при их использовании. Например, в DAOPHOT в качестве PSF-звезд мы брали одиночные звезды из исследуемых полей, а в DOLPHOT использовалась библиотека PSF-профилей. Различие результатов работы двух программ заметно при сравнении видимого распределения очень слабых звезд по полю снимка. Из-за неэффективности переноса заряда и существования остаточных следов космических частиц DOLPHOT показывает избыточное число слабых звезд в центральной области поля вместо их ровного распределения, а у DAOPHOT распределение звезд более близко к реальному. Но в DAOPHOT возникает проблема выбора PSF-звезд при большой концентрации звезд. Принимая во внимание плюсы и минусы двух пакетов программ, мы использовали их оба, сравнивая полученные результаты. При измерении положений TRGB-скачков оба метода дали сходные результаты и значимых различий между ними не обнаружено.

Полученные при фотометрии звезд диаграммы Герцшпрунга–Рессела (СМ-диаграммы) трех спиральных галактик являются обычными диаграммами для такого типа галактик, поэтому мы представ-



**Рис. 1.** Изображения галактик группы Dogado на снимках DSS-обзора в фильтре *B*. Прямоугольниками отмечены поля космического телескопа Хаббла. Размер снимка каждой галактики  $15' \times 15'$ , север — вверх.

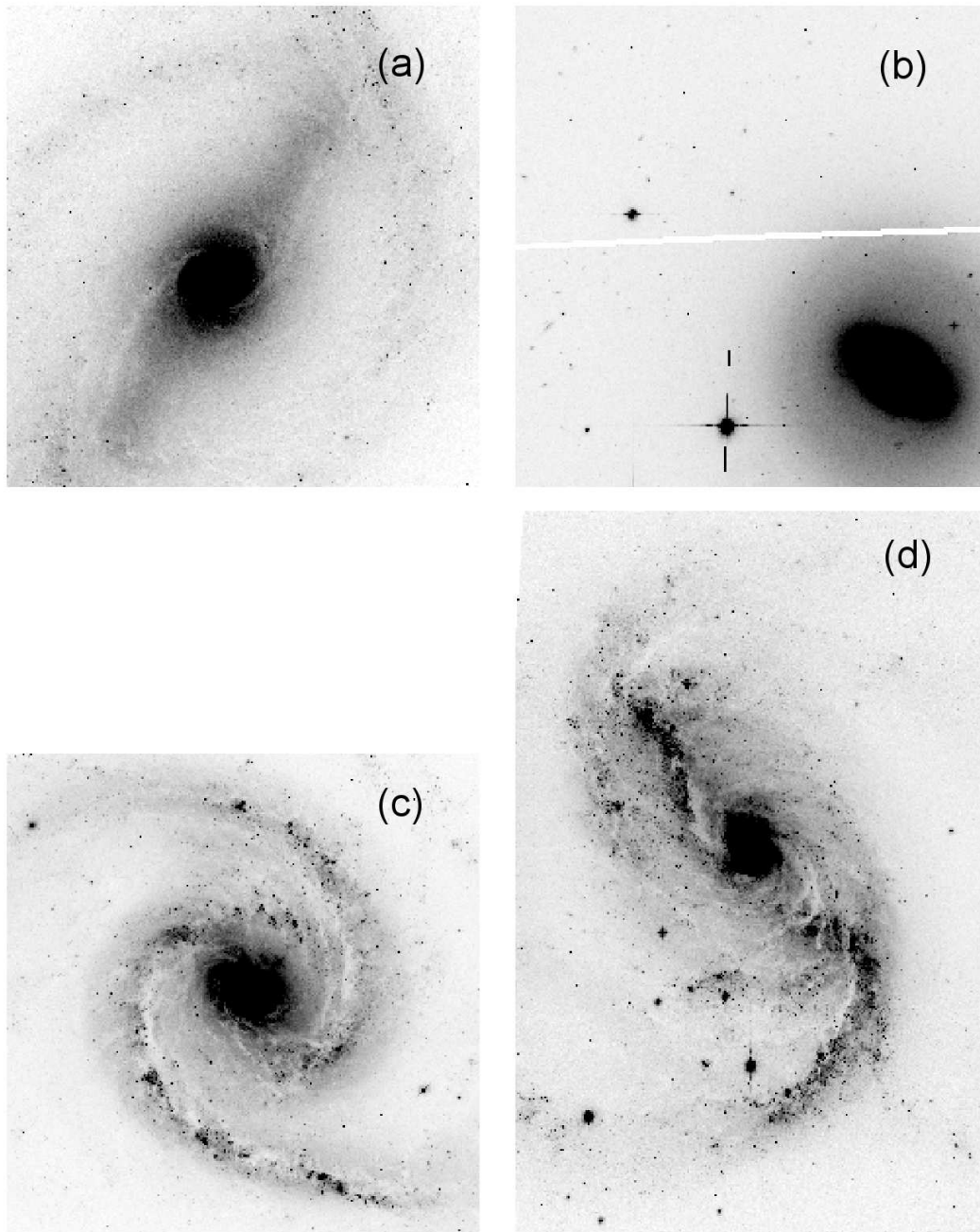
ляем для примера диаграмму NGC 1566 и диаграмму периферии NGC 1672 (рис. 3). На диаграммах хорошо видны ветви голубых и красных сверхгигантов. Красные гиганты визуально не выделяются из-за большого числа более ярких сверхгигантов и AGB-звезд.

Диаграмма галактики NGC 1533 (рис. 4) интересна тем, что в линзовидной галактике, где не видно больших областей звездообразования, присутствуют голубые и красные сверхгиганты. Радионаблюдения в HI (Ryan-Weber et al. 2004) выявили вокруг NGC 1533 кольцевую структуру и протяженный рукав, соединяющий ее с карликовой пекулярной галактикой IC 2038, с которой она взаимодействует (Cattapan et al. 2019). Структура газового рукава между галактиками хорошо видна на диаграмме 7 в работе Werk et al. (2010).

На полученной нами CM-диаграмме NGC 1533 (рис. 4а) видна населенная шаровыми скоплениями

ветвь при значении показателя цвета  $(V - I) = 1$ . Подобная диаграмма представлена в работе DeGraaff et al. (2007). Однако диаграмма рис. 4а получена при намеренно увеличенном параметре  $SN1 < 2.5$ , что привело к появлению диффузных объектов в списке звезд и на CM-диаграмме. Если использовать стандартный вариант,  $SN1 < 1.2$ , то на CM-диаграмме исчезнет большинство шаровых скоплений и останутся только звезды и очень компактные, звездообразные шаровые скопления (рис. 4б).

Голубые звезды, ветвь которых видна на диаграмме рис. 4, частично рассеяны по телу галактики, но большая их часть входит в состав малых скоплений, расположенных главным образом во внутренних областях галактики. Одиночные скопления видны даже за пределами 30 кпк от центра галактики (DeGraaff et al. 2007, Werk



**Рис. 2.** HST-снимки показанных на рис. 1 галактик: NGC 1433 (a) и NGC 1566 (b) в фильтре F555W, NGC 1533 (c) и NGC 1672 (d) в фильтрах F606W и F435W соответственно.

et al. 2008; 2010). Важный вопрос по исследованию молодых звезд в NGC 1533 — это вопрос об источнике происхождения газа, из которого родились молодые звезды, видимые на СМ-диаграмме. Поскольку наблюдается взаимодействие NGC 1533 с карликовой иррегулярной галактикой IC 2038, имеющей водород, то можно предполагать, что периферия карликовой галактики могла быть ободрана и стала источником водорода для NGC 1533.

На диаграмме рис. 5(1) представлено распре-

деление по телу галактики голубых звезд с показателем цвета  $(V - I) < 0.3$ . Можно заметить, что отдельные звезды и малые скопления образуют кольцо вокруг центра галактики. Кроме того, наблюдается концентрация этих голубых звезд и на периферии, где на снимок HST попадает фрагмент газового рукава между NGC 1533 и IC 2038. На СМ-диаграмме NGC 1533 (рис. 4b) видна мало-контрастная ветвь красных звезд с показателем цвета  $(V - I) = 1.75$ . Мы выделили эти звезды

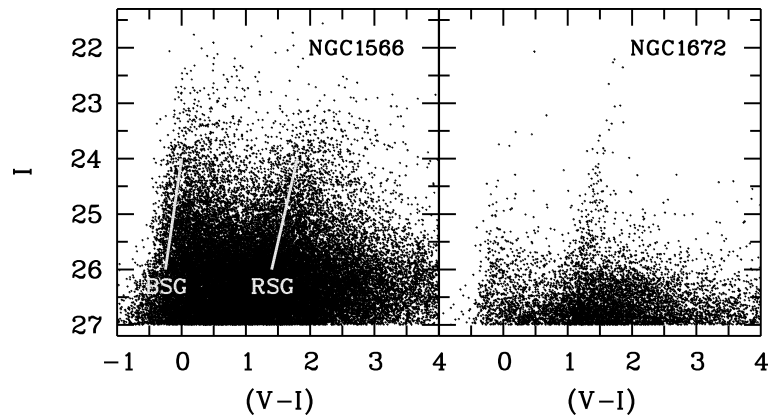


Рис. 3. CM-диаграмма звезд центральных областей галактики NGC 1566 и периферии галактики NGC 1672. Линиями отмечены положение ветви голубых сверхгигантов (BSG) и красных сверхгигантов (RSG) в NGC 1566.

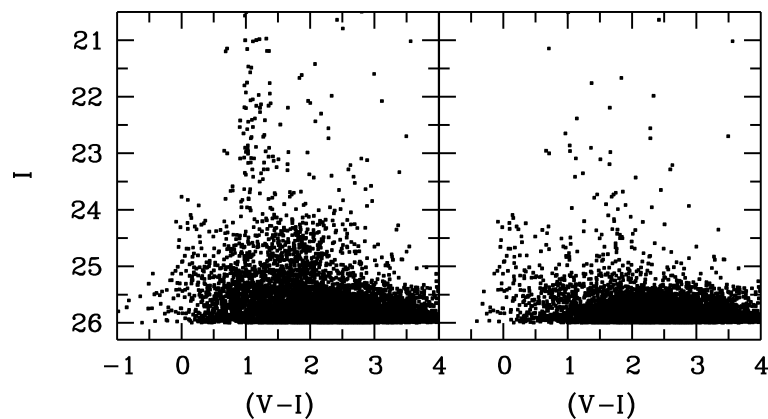


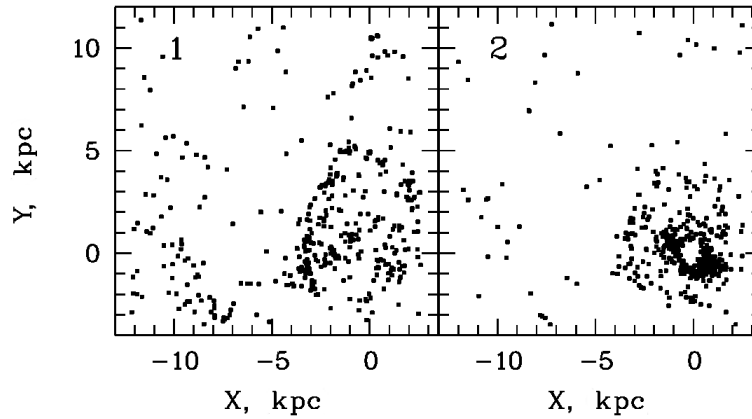
Рис. 4. CM-диаграмма галактики NGC 1533 при разных значениях CHI. При CHI < 2.5 на диаграмму попадают шаровые скопления, ветвь которых видна при  $(V - I) = 1$ . При CHI < 1.2 на диаграмме остаются звезды и очень немногие компактные скопления.

и построили их распределение по телу галактики (рис. 5(2)). Видно, что эти красные звезды, как и голубые сверхгиганты, также образуют кольцо и концентрируются в рукаве между двумя галактиками. Наличие кольцевой структуры из областей звездообразования подтверждают снимки космического телескопа GALEX в ближней и дальней ультрафиолетовой области, на которых наблюдаются отдельные сгущения, образующие также кольцевую структуру, как и молодые звезды. Можно отметить, что в морфологическом описании типа галактики NGC 1533 — SB(rs)0, также указано наличие кольца, однако неясно, имеет ли отношение к этому кольцу та кольцеобразная структура молодых звезд, которая видна на полученных нами диаграммах.

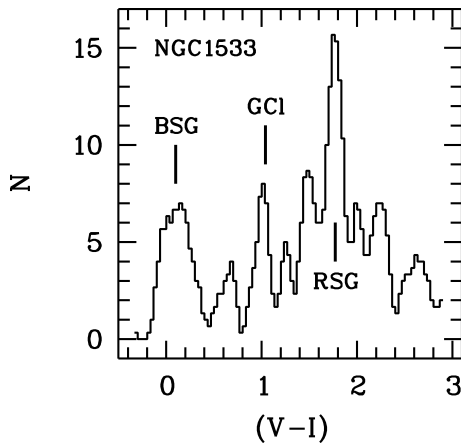
Чтобы изучить звездный состав видимого на рис. 5 кольца, мы выделили звезды входящие в него при  $700 < \text{RAD} < 1200$  пикселей, что соответствует  $2.6 < \text{RAD} < 4.4$  кпк. На рис. 6 показано распределение этих звезд по показателю цвета  $(V - I)$ . На диаграмме легко отождествляют-

ся максимумы, соответствующие голубым сверхгигантам (BSG) и компактным шаровым скоплениям при  $(V - I) = 1$ . Совершенно очевидно, что максимум при  $(V - I) = 1.75$  соответствует красным сверхгигантам. Становится понятно, почему голубые и красные звезды образуют почти одинаковые видимые распределения по телу галактики. Возраст красных сверхгигантов не слишком велик, и они концентрируются в тех же областях, где и родились, и где видны более молодые голубые сверхгиганты.

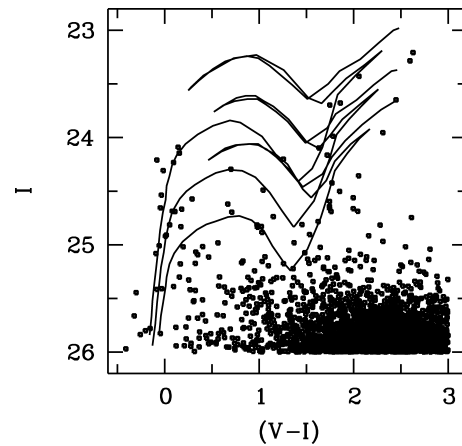
На рис. 7 представлена CM-диаграмма звезд, составляющих на рис. 5 кольцо. В эту диаграмму мы вписали наиболее подходящие изохроны (Bertelli et al. 1994). Эти изохроны показали, что возраст красных сверхгигантов находится в интервале от 12 до 30 млн лет, а их металличность равна металличности Солнца ( $Z = 0.02$ ). Возможно, что в выборке присутствуют и более старые сверхгиганты, но их трудно выявить. Из полученных результатов следует, что водород, из которого образовались звезды кольца, не может



**Рис. 5.** Распределение в виде кольца голубых (1) и красных (2) сверхгигантов в галактике NGC 1533. Центр системы координат совмещен с центром галактики. Размер и ориентация диаграммы соответствует размеру снимка NGC 1533 на рис. 2. Концентрация звезд на периферии галактики принадлежит газовой перемычке между галактиками NGC 1533 и IC 2038.



**Рис. 6.** Распределение звезд по показателю цвета в галактике NGC 1533 в области внутренней кольцевой структуры при  $2.6 < \text{RAD} < 4.4$  кпс. На диаграмме выделяются пики, соответствующие повышенной численности голубых сверхгигантов (BSG), красных сверхгигантов (RSG) и компактных шаровых скоплений (GCI).



**Рис. 7.** CM-диаграмма звезд галактики NGC 1533 в области кольцевой структуры при  $2.6 < \text{RAD} < 4.4$  кпс. Вписаны наиболее подходящие изохроны с металличностью  $Z = 0.02$  и возрастом 12, 22 и 28 млн лет.

быть водородом карликовой галактики IC 2038, светимость которой  $M_V = -16$ , поскольку такие галактики имеют меньшую металличность водородных облаков и рождающихся из них молодых звезд (Tikhonov 2018). Кроме того, высокая металличность указывает, что видимые в NGC 1533 молодые звезды не могут быть звездами первой волны звездообразования на периферии галактики, как это предполагали Ryan-Weber et al. (2004).

В рукаве между галактиками NGC 1533 и IC 2038 также видны красные сверхгиганты, хотя и в меньшем количестве, чем в кольце. Измерение их металличности дает немного меньшее значение, чем для звезд кольца. Можно предполагать, что уменьшение металличности звезд в рукаве между галактиками указывает на возможное перемешива-

ние газа двух галактик, одна из которых поставляет водород, а другая обогащает его металлами.

На рис. 5 видно, что голубые и красные звезды располагаются не только в кольце и рукаве, но и ближе к центру галактики. Действительно, на CM-диаграмме центральной области галактики есть одиночные голубые и красные сверхгиганты при  $0.7 < \text{RAD} < 1.7$  кпс, но основное сгущение красных звезд вблизи центра галактики (рис. 5(2)) создают AGB-звезды.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЙ

Ветвь красных гигантов, необходимая для измерения расстояния, на CM-диаграммах галактик (рис. 3) не видна из-за большого числа более ярких звезд и повышенной яркости фона галактики. На

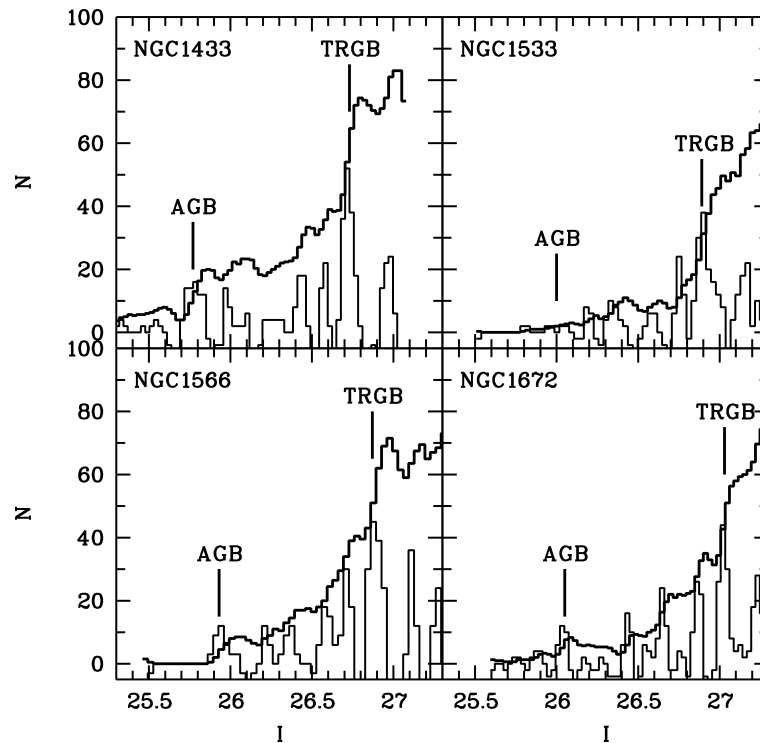


Рис. 8. Функция светимости красных гигантов и AGB звезд для четырех галактик. Вертикальными отрезками отмечены положения TRGB-скачков и границы увеличения численности AGB-звезд.

Таблица 3. Результаты фотометрии галактик

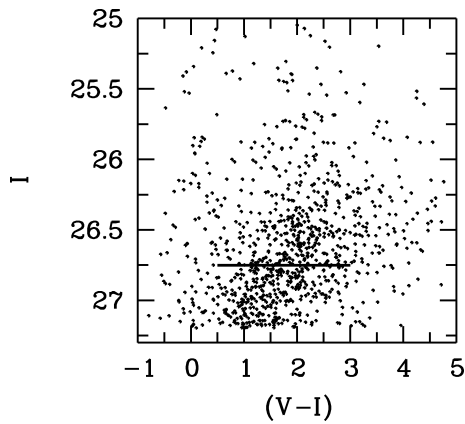
Галактика	$I_{\text{TRGB}}$ , mag	$(m - M)$ , mag	$D$ , Мпк	$[\text{Fe}/\text{H}]$	$A_I$ , mag	$E(V - I)$ , mag
NGC 1433	26.72	30.75	$14.15 \pm 1.15$	-1.46	0.014	0.011
NGC 1533	26.89	30.90	$15.12 \pm 0.90$	-1.64	0.024	0.020
NGC 1566	26.87	30.86	$14.88 \pm 1.00$	-1.79	0.014	0.011
NGC 1672	27.03	31.00	$15.86 \pm 0.92$	-1.74	0.035	0.029

снимках галактики NGC 1533 (рис. 1) несложно найти участки на периферии, где яркие звезды отсутствуют, а яркость галактики низкая. В таких участках проводилась выборка звезд для определения TRGB-скачка. У NGC 1672 звездное гало простирается далеко за пределы видимого на рис. 1 тела галактики, поэтому для поиска красных гигантов использовался снимок периферии галактики, где яркие звезды занимают только часть снимка. Сложнее было создать выборки звезд у галактик NGC 1433 и NGC 1566, где почти всю площадь занимают яркие звезды при повышенной яркости фона. У этих галактик звезды выбирались за пределами спиральных ветвей при  $\text{RAD} > 2000$  пикселей, что соответствует  $100''$  или 6.9 кпк у NGC 1433 и  $\text{RAD} > 2500$  пикселей, что равно  $125''$  или 9.0 кпк у NGC 1566. Кроме этого, применялась селекция по показателю цвета ( $1.2 < (V - I) < 1.7$ ), что-

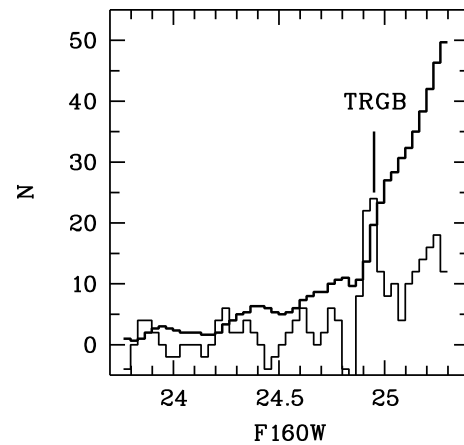
бы на функцию светимости красных гигантов не влияли голубые звезды и AGB звезды с большим показателем цвета.

После проведения селекции, для звезд четырех галактик были получены функции светимости (рис. 8). На диаграммах отмечены начала ветвей красных гигантов (TRGB-скачки) и начала ветвей AGB-звезд. Различие между ними составляет примерно одну звездную величину. Для объективного представления положений TRGB-скачков мы использовали функцию Собеля (Madore and Freedman 1995), максимумы которой соответствуют резким изменениям численности звезд, что наблюдается на границе ветви красных гигантов. На диаграммах рис. 8 тонкой линией показана функция Собеля, положения максимумов которой мы использовали для определения расстояний до галактик.





**Рис. 9.** CM-диаграмма звезд периферии NGC 1433. Горизонтальный отрезок отмечает положение TRGB-скачка. Видимое сгущение звезд выше этой линии образовано AGB-звездами диска галактики. При  $I = 25.7$ , что соответствует  $D = 9.1$  Мпк, ветвь красных гигантов отсутствует.



**Рис. 10.** Функция светимости звезд в инфракрасной области с фильтром F160W в площадке на расстоянии  $30'$  от NGC 1433. Вертикальный отрезок показывает положение TRGB-скачка, при  $F160W = 24.95$ . Это значение согласуется с расстоянием до NGC 1433 при  $I_{TRGB} = 26.72$ .

Кроме TRGB-скачков, мы измерили показатели цвета вершин ветвей красных гигантов  $(V - I)_{TRGB}$ , значения которых не отличаются от аналогичных показателей у галактик подобного типа. Величины поглощения света в направлении на галактики взяты из работы Schlafly and Finkbeiner (2011) и указаны в таблице 3. Расстояния до NGC 1433, NGC 1533, NGC 1566 и NGC 1672, а также модули расстояний и металличности красных гигантов в этих галактиках, мы определили, пользуясь уравнениями из работы Lee et al. (1993) по применению TRGB-метода. Полученные результаты приведены в таблице 3, где  $I_{TRGB}$  — положение TRGB-скачка на функции светимости в фильтре  $I$ ,  $(m - M)$  — модуль расстояния,  $[Fe/H]$  — металличность красных гигантов,  $D$  — расстояние до галактики,  $A_I$  — экстинкция в фильтре  $I$ .

Указанная в таблице 3 точность измерения расстояний (внешняя точность) является результатом сложения нескольких возможных источников ошибок измерений. Точность метода Lee et al. (1993) составляет  $0.1$ . Точность определения TRGB-скачка изменяется от галактики к галактике и не превышает  $0.05$ . Остальные составляющие ошибки измерения не превышают  $0.02$ – $0.03$ .

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Впервые для основных галактик группы Dorado TRGB-методом определены точные расстояния. Для подгрупп галактик вокруг NGC 1433, NGC 1566 и NGC 1672 они примерно одинаковы, и можно считать, что эти галактики образуют единую группу, в которой не закончился процесс вириализации. Среднее расстояние до группы Dorado

по четырем галактикам, без внесения поправок за массы отдельных галактик, равно  $D = 14.99$  Мпк. Это значительно меньше, чем расстояние на основе SBF-метода и больше соответствует расстоянию, полученному по лучевым скоростям и постоянной Хаббла. Найденные расстояния галактик позволят точно оценить энергетику их активных ядер и установить пространственные положения галактик Dorado среди соседей.

Мы установили, что молодые звезды линзовидной галактики NGC 1533, образующие кольцо (рис. 5) и находящиеся в рукаве к IC 2038, имеют высокую металличность ( $Z = 0.02$ ), равную металличности Солнца, а их возраст доходит до 30 млн лет. Исходя из высокой металличности звезд кольца, можно заключить, что водород, из которого они родились, может принадлежать только NGC 1533, несмотря на бедность этой галактики водородом. В то же время меньшая металличность звезд рукава между NGC 1533 и IC 2038, вероятно, указывает на участие карликовой IC 2038, имеющей малометаллический водород в достаточном количестве, в процессах звездообразования в рукаве между этими галактиками.

В некоторых публикациях (см., например, Carrasco et al. (2001), Firth et al. (2006)) сообщается, что первое упоминание группы Dorado под номером 18 было у Shahbazian (1957). Однако в указанной публикации говорится только о звездном скоплении северного неба. По всей видимости, первая ошибка копируется более поздними авторами без прочтения статьи.

В NED указано, что Sabbi et al. (2018) для галактик NGC 1433 и NGC 1566 измерили расстояния TRGB-методом. Для галактики NGC 1566

это сообщение ошибочное, поскольку сами авторы пишут, что TRGB-скачок находится за пределами полученной ими CM-диаграммы.

Для галактики NGC 1433 Sabbi et al. (2018) получили значение  $D = 9.1$  Мпк, т.е. это должна быть сравнительно близкая галактика. Действительно, если взять звезды этой галактики за пределами яркого ядра и провести их обычную селекцию по цвету, параметрам CHI и SHARP, то на функции светимости можно увидеть скачок при  $I = 25^m7$ , что соответствует расстоянию  $D = 9.1$  Мпк. Однако этот скачок относится к AGB-звездам, а истинный TRGB-скачок слабее на одну звездную величину. Аналогичная ошибка для галактик Maffei 1 и Maffei 2, где начало ветви AGB-звезд принималось за TRGB-скачок, подробно описана нами ранее (Tikhonov and Galazutdinova 2018).

Для показа действительного положения ветви красных гигантов на рис. 9 представлена CM-диаграмма периферии галактики NGC 1433. На диаграмме видно, что при  $I = 25^m7$ , что соответствует расстоянию 9.1 Мпк, ветвь красных гигантов отсутствует, т.е. измерение Sabbi et al. (2018) для этой галактики ошибочно. Визуально кажется, что на диаграмме рис. 9 TRGB-скачок виден при  $I = 26^m5$ , однако более подробное изучение распределения звезд показывает, что действительный TRGB-скачок расположен на  $I = 26^m72$  (рис. 8), а мнимый скачок при  $I = 26^m5$  вызван наличием в выборке AGB-звезд.

В архиве HST есть ИК-снимки в фильтрах F110W и F160W полученные для поля на расстоянии 30' от NGC 1433. Мы провели фотометрию этих снимков и выяснили, что при F160W = 25<sup>m</sup> наблюдается увеличение численности звезд (рис. 10). Этих звезд немного, но скачок на функции светимости виден вполне отчетливо. Если это красные гиганты, то расстояние до них соответствует расстоянию до NGC 1433, поскольку разность между TRGB-скачками в фильтрах F160W и F814W ( $I$ ) составляет примерно 2<sup>m</sup>. Эти звезды могут принадлежать далекой периферии NGC 1433 либо быть межгалактическими звездами. Угловое расстояние между NGC 1433 и этим полем соответствует 124 кпк. У массивной эллиптической галактики M 87 звездная периферия прослеживается до расстояния 190 кпк (Tikhonov et al. 2019), а у линзовидной галактики NGC 5129, яркость которой подобна яркости NGC 1433, звездное гало прослеживается до 140 кпк (Rejkuba et al. 2014), т.е. имеются основания предполагать, что гало NGC 1433 простирается до 124 кпк.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа основана на наблюдениях с космического телескопа Хаббла NASA/ESA, полученных в Научном институте космического телескопа, который управляется AURA, Inc. по контракту № NAS5–26555. Эти наблюдения связаны с заявками 10438, 10354, 12999, 13364, 15654. В настоящей работе были использованы базы данных NED, HyperLeda.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии в рамках научного проекта №19–52–18007.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **106**, 275 (1994).
2. E. R. Carrasco, C. Mendes de Oliveira, L. Infante, and M. Bolte, *Astron. J.* **121** (1), 148 (2001).
3. A. Cattapan, M. Spavone, E. Iodice, et al., *Astrophys. J.* **874** (2), 130 (2019).
4. G. de Vaucouleurs, *Nearby Groups of Galaxies* (Chicago Univ. Press, Chicago, USA, 1975), p. 557.
5. R. B. DeGraaff, J. P. Blakeslee, G. R. Meurer, and M. E. Putman, *Astrophys. J.* **671** (2), 1624 (2007).
6. A. Dolphin, *DOLPHOT: Stellar photometry* (2016), ascl:1608.013.
7. H. C. Ferguson and A. Sandage, *Astron. J.* **100**, 1 (1990).
8. P. Firth, E. A. Evstigneeva, J. B. Jones, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372** (4), 1856 (2006).
9. E. Giraud, *Astron. and Astrophys.* **153**, 125 (1985).
10. J. P. Huchra and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **257**, 423 (1982).
11. V. A. Kilborn, B. S. Koribalski, D. A. Forbes, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **356** (1), 77 (2005).
12. M. G. Lee, W. L. Freedman, and B. F. Madore, *Astrophys. J.* **417**, 553 (1993).
13. B. F. Madore and W. L. Freedman, *Astron. J.* **109**, 1645 (1995).
14. M. A. G. Maia, L. N. da Costa, and D. W. Latham, *Astrophys. J. Suppl.* **69**, 809 (1989).
15. M. Rejkuba, W. E. Harris, L. Greggio, et al., *Astrophys. J.* **791** (1), L2 (2014).
16. E. V. Ryan-Weber, G. R. Meurer, K. C. Freeman, et al., *Astron. J.* **127** (3), 1431 (2004).

17. E. Sabbi, D. Calzetti, L. Ubeda, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **235** (1), 23 (2018).
18. A. Sandage, *Astrophys. J.* **202**, 563 (1975).
19. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), 103 (2011).
20. R. K. Shabbazian, *Astronomicheskij Tsirkulyar* **177**, 11 (1957).
21. R. R. Shobbrook, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **131**, 365 (1966).
22. J. G. Sorce, R. B. Tully, H. M. Courtois, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 527 (2014).
23. C. M. Springob, C. Magoulas, M. Colless, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **445** (3), 2677 (2014).
24. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **99**, 191 (1987).
25. P. B. Stetson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 250 (1994).
26. N. A. Tikhonov, *Astrophysical Bulletin* **73** (1), 22 (2018).
27. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astronomy Letters* **35** (11), 748 (2009).
28. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 279 (2018).
29. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and G. M. Karataeva, *Astrophysical Bulletin* **74** (3), 257 (2019).
30. N. A. Tikhonov, O. A. Galazutdinova, and E. N. Tikhonov, *Astronomy Letters* **35** (9), 599 (2009).
31. J. L. Tonry, A. Dressler, J. P. Blakeslee, et al., *Astrophys. J.* **546** (2), 681 (2001).
32. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, et al., *Astron. J.* **146** (4), 86 (2013).
33. R. B. Tully and J. R. Fisher, *Catalog of Nearby Galaxies* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1988).
34. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138** (2), 323 (2009).
35. J. K. Werk, M. E. Putman, G. R. Meurer, et al., *Astrophys. J.* **678** (2), 888 (2008).
36. J. K. Werk, M. E. Putman, G. R. Meurer, et al., *Astron. J.* **139** (1), 279 (2010).
37. J. A. Willick, S. Courteau, S. M. Faber, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **109** (2), 333 (1997).

## Distance to the Dorado Group

N. A. Tikhonov<sup>1</sup> and O. A. Galazutdinova<sup>1</sup>

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

Based on the archival images from the Hubble Space Telescope, we performed the photometry of the brightest galaxies of the Dorado group: NGC 1433, NGC 1533, NGC 1566, and NGC 1672. In the obtained CM-diagrams, red giants are specified, and distances to galaxies are measured by the TRGB method. The estimates obtained:  $14.2 \pm 1.2$ ,  $15.1 \pm 0.9$ ,  $14.9 \pm 1.0$ , and  $15.9 \pm 0.9$  Mpc show that all the galaxies mentioned are located at approximately similar distances and form a scattered group with the average distance  $D = 15.0$  Mpc. In the lenticular galaxy NGC 1533, it was found that blue and red supergiants form a ring structure at a distance of 3.6 kpc from the center, and are also visible in the hydrogen arm between the galaxy NGC 1533 and the dwarf IC 2038. High metallicity of these stars ( $Z = 0.02$ ) indicates their origin from the gas of NGC 1533.

Keywords: *galaxies: groups: individual: Dorado—galaxies: distances and redshift—galaxies: individual: NGC 1433, NGC 1533, NGC 1566, NGC 1672*