

УДК 524.7

МОЛОДЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ КОМПЛЕКСЫ В ГИГАНТСКОЙ ГАЛАКТИКЕ UGC 11973

© 2020 г. А. С. Гусев^{1,*}, Ф. Х. Сахибов², О. В. Ежкова¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

² Университет прикладных наук Гессен-Фридберг, Фридберг, Германия

* E-mail: gusev@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 24.01.2020 г.

Представлены результаты анализа фотометрических и спектральных наблюдений молодых звездных комплексов в гигантской спиральной галактике позднего типа UGC 11973. Проведен анализ фотометрических параметров в полосах *UBVRI* 13 крупнейших комплексов. Для одного из них, по данным спектроскопии, оценены металличность окружающего газа $Z = 0.013 \pm 0.005$, масса $M = (4.6 \pm 1.6) \times 10^6 M_{\odot}$ и возраст звездного комплекса $t = (2.0 \pm 1.1) \times 10^6$ лет. Показано, что все комплексы являются массивными ($M \geq 1.7 \times 10^5 M_{\odot}$) звездными группировками с возрастaми менее 3×10^8 лет.

DOI: 10.31857/S000462992006002X

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди относительно близких галактик UGC 11973 является одной из самых ярких, крупных и массивных звездных систем (см. табл. 1). Ее радиус достигает 30 кпк, абсолютная звездная величина $M(B)_0^i < -22^m$. Анализ кривой вращения показал, что общая масса галактики только в пределах 10 кпк ($1/3$ радиуса D_{25}) от центра составляет $2.4 \times 10^{11} M_{\odot}$ [1]. Полная звездная масса UGC 11973 оценена по данным светимости в полосах *B* и *K* в $9.4 \times 10^{10} M_{\odot}$ [2]. Масса HI по данным наблюдений в линии 21 см составляет $2 \times 10^{10} M_{\odot}$ [3]. Галактика является членом небольшой группы [4], но близких спутников не имеет. Несмотря на большой наклон ($i = 81^\circ$), хорошо прослеживается симметричная структура UGC 11973: мощные спиральные ветви с пылевыми линиями и слабый бар (рис. 1).

Помимо большого наклона, сложность в изучении этой галактики связана с ее близостью к плоскости Млечного Пути, из-за чего суммарное ослабление света в полосе *B* превышает 1.5^m . По-видимому, этим и объясняется относительно слабая изученность UGC 11973. Хотя детальные исследования галактики и не проводились (исключая [1]), она наблюдалась в рамках крупных про-

ектов в широком диапазоне длин волн от УФ до радио. Наблюдения в радио- [6, 7], дальнем и ближнем ИК- (проекты IRAS [8] и 2MASS [9]) и оптическом диапазонах [10], а также значительная яркость галактики в УФ-диапазоне (проект GALEX¹) согласованно показывают наличие активного, равномерного по времени звездообразования, характерного для массивных спиральных галактик позднего типа. Показатели цвета UGC 11973, исправленные за поглощение Галактики и поглощение за наклон диска, уменьшаются от значений $(U - B)_0^i = 0.38 \pm 0.03^m$ и $(B - V)_0^i = 0.85 \pm 0.04^m$ в центральной части (ядро и балдж), до $(U - B)_0^i = 0.08 \pm 0.19^m$, $(B - V)_0^i = 0.59 \pm 0.13^m$ в области спиральных ветвей вне ярких областей звездообразования [10] (рис. 1).

Основные сведения о галактике (морфологический тип, видимая звездная величина $m(B)$, исправленная за галактическое поглощение и поглощение за наклон диска, абсолютная звездная величина $M(B)_0^i$, наклон i и позиционный угол $P.A.$ диска, расстояние d , диаметр по изофоте 25^m в полосе *B* с учетом галактического поглощения и поглощения, вызванное наклоном галактики,

¹ <http://galex.stsci.edu/GR6/?page=explore&objidc72147238576064570>

Таблица 1. Основные характеристики UGC 11973

Параметр	Значение
Тип	SAB(s)bc (3.9)
$m(B)$	13.34 ^m
$M(B)_0^i$	-22.47 ^m
i	81°
Р.А.	39°
d	58.8 Мпк
D_{25}	3.46′
D_{25}	59.2 кпк
V_{rad}	4215 ± 8 км/с
V_{max}	231 ± 7 км/с
$A(B)_G$	0.748 ^m
$A(B)_i$	0.85 ^m

D_{25} , лучевая скорость V_{rad} , максимальная скорость вращения V_{max} , галактическое поглощение $A(B)_G$ и поглощение, вызванное наклоном галактики, $A(B)_i$ приведены в табл. 1. Данные о величине поглощения в нашей Галактике ($A(B)_G$) и морфологический тип UGC 11973 приведены согласно базе данных NED², остальные параметры брались из базы данных HyperLEDA³.

Отметим, что в ряде работ используется расстояние до галактики 49–55 Мпк, полученное по методу Талли-Фишера в работе [11]. Это несколько уменьшает оценки светимости, массы и линейного размера UGC 11973. В частности, в последнем варианте базы данных HyperLEDA дается абсолютная звездная величина галактики $M(B)_0^i = -22.28 \pm 0.35^m$. В данной работе мы используем значения, приведенные в табл. 1, основанные на измерении лучевой скорости UGC 11973 [1].

Целью данной работы являются анализ фотометрических и оценка физических параметров 13 крупнейших комплексов звездообразования, обнаруженных в галактике. Основой для анализа являются данные *UBVRI*-фотометрии комплексов, полученные нами ранее, а также результаты спектроскопических наблюдений комплекса № 1502 [5], ранее не публиковавшиеся.

Работа является частью обширного проекта исследования физических параметров звездного

населения областей современного звездообразования в дисках галактик на основе комплексных спектральных и фотометрических наблюдений [5, 12–14]. Результаты спектроскопических исследований были опубликованы нами ранее в работах [12, 13] за единичным исключением – области НII (комплекса № 1502) в галактике UGC 11973. Причиной “пропуска” явилось то, что для данной области НII нам не удалось померить линии кислорода [OIII] λ 4959 и λ 5007 Å (см. подробнее раздел 3.1). Это потребовало особой нестандартной методики определения химического состава газа в области. Такая методика была разработана лишь в 2016 г. в работе [15].

В следующей работе в рамках проекта мы планируем исследовать физические параметры в нескольких сотнях областей звездообразования, используя, в том числе, спектральные данные из литературы. Для них химический состав газа будет определяться стандартными методами с использованием интенсивностей линий кислорода. Нестандартная методика определения химических параметров газа области НII в галактике UGC 11973 представляет, по нашему мнению, самостоятельный интерес.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Фотометрические наблюдения галактики в фильтрах *UBVRI*, проведенные на 1.5-метровом телескопе Майданакской обсерватории (Узбекистан), были описаны нами ранее в работе [10]. Идентификация комплексов звездообразования, проведенная с помощью программы SExtractor⁴ с порогом обнаружения над локальным фоном, равным 5σ и количеством пикселей ≥ 10 выше порогового, и фотометрия 13 выявленных комплексов описаны в работе [5]. Каталог фотометрических параметров областей звездообразования представлен также в электронном виде⁵.

Спектральные наблюдения одной из наиболее ярких областей НII в UGC 11973 – комплекса № 1502, расположенного в 23.0″ к северу и 9.5″ к востоку от центра галактики (см. рис. 1), были выполнены одним из авторов данной работы 23/24 августа 2006 г. на 6-метровом телескопе БТА САО РАН с помощью фокального редутора SCORPIO (детальное описание прибора см. в [16]) в многощелевом режиме. В качестве приемника использовалась ПЗС-камера EEV 42–40. Размер матрицы составляет 2048 × 2048 пикселей, что обеспечивает поле зрения 6′ при масштабе изображения 0.178″/пикс. В многощелевом режиме размер щелей составляет 1.5″ × 18″. Наблюдения проводились при значении воздушной

² <http://ned.ipac.caltech.edu/>

³ <http://leda.univ-lyon1.fr/>

⁴ <http://sextractor.sourceforge.net/>

⁵ http://lnfm1.sai.msu.ru/~gusev/sfr_cat.html

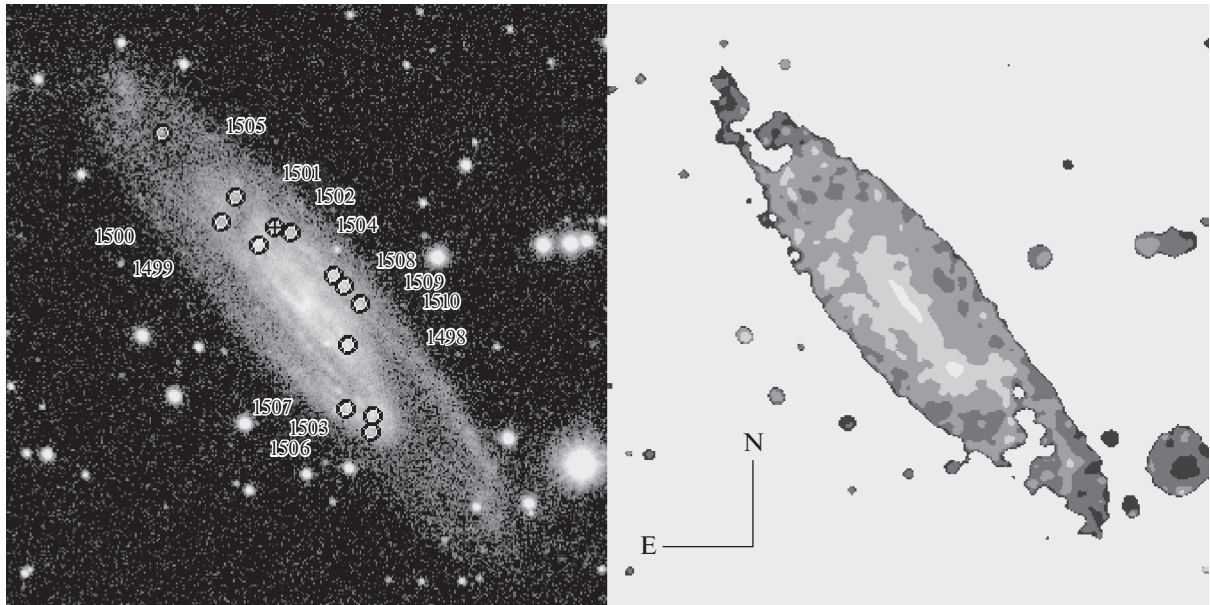


Рис. 1. Изображение UGC 11973 в полосе B (слева) и карта показателя цвета $(B - V)_0^j$, исправленного на поглощение в Галактике и поглощение за наклон диска UGC 11973 (справа). На изображении слева кружками отмечены комплексы звездообразования, кружком с крестом (№ 1502) — комплекс, изученный спектрально, цифры — номера областей по каталогу [5]. Справа выделены области с показателем цвета >0.8 , $0.6-0.8$, $0.4-0.6$, $0.2-0.4$ и $<0.2^m$; более красные области показаны более светлыми. Размеры изображений — $3.0' \times 3.0'$.

массы $M(z) = 1.16-1.33$. Качество изображения составляло $1.8''$. Всего было сделано 4 экспозиции по 900 с каждая. После каждой экспозиции позиции щелей смещались вправо-влево вдоль щели с шагом 30 пикселей.

Для проведения стандартной обработки и калибровки данных, до и после наблюдений галактики были получены изображения байеса, “плоского поля”, спектры гелий-неон-аргоновой лампы и звезды сравнения BD+25°4655 из каталога спектрофотометрических стандартов [17].

Дальнейшая обработка проводилась по стандартной процедуре с использованием системы обработки изображений ESO-MIDAS. Основные этапы обработки включали в себя: устранение следов космических лучей; определение и исправление данных за смещение усилителя матрицы (байес) и “плоское поле”; перевод в шкалу длин волн, используя спектр He-Ne-Ar лампы; вычитание фона; перевод инструментальных потоков в абсолютные по данным наблюдений звезды-стандарта; коррекция за атмосферное поглощение; интегрирование двумерных спектров в выбранных апертурах и получение одномерных спектров области HII; сложение спектров.

Подробное описание методики обработки спектральных наблюдений дано нами в работах [12, 13].

Эквивалентные ширины эмиссионных линий $H\alpha$ и $H\beta$ оценивались по спектру области HII с учетом континуума. Такой спектр строился путем вычитания из спектра области HII спектра окружающей подложки диска галактики. Это позволило исключить вклад звезд и газа диска галактики в излучение, приходящее из области HII.

Наблюдаемые потоки в линиях представлены в левом столбце табл. 2. В среднем столбце таблицы приведены коэффициент поглощения $c(H\beta)$, исправленные за межзвездное поглощение света относительные интенсивности линий $[NII] \lambda 6548 + \lambda 6584$ и $[SII] \lambda 6717 + \lambda 6731$ (в единицах $I(H\beta)$), отношение линий серы $[SII] \lambda 6717/[SII] \lambda 6731$, эквивалентные ширины линий $H\alpha$ и $H\beta$.

Учет поглощения эмиссионных линий газа проведен на основе величины бальмеровского декремента с использованием теоретического отношения линий $H\alpha/H\beta$ [18] для случая В рекомбинации при электронной температуре 10^4 К и аналитической аппроксимации [19] закона межзвездного покраснения Витфорда. При этом эквивалентная ширина линий поглощения водорода $EW_a(\lambda)$ принималась равной 2 \AA , что является средней величиной для областей HII [20]. Для линий других химических элементов значение $EW_a(\lambda)$ принималось равным 0.

Таблица 2. Спектральные параметры области НII, физические и химические параметры газа в комплексе № 1502

Линия	Поток F , 10^{-16} эрг/(с см ²)	Параметр	Значение	Параметр	Значение
H β	4.27 ± 0.49	$c(\text{H}\beta)$	1.27 ± 0.26		
[NII] 6548	6.16 ± 1.06	[NII] 6548	2.12 ± 0.76	12+(O/H)	8.67 ± 0.18
H α	48.24 ± 1.11	[SII] 6717	0.99 ± 0.37	Z	0.013 ± 0.005
[NII] 6584	17.97 ± 1.07	[SII] 6717/[SII] 6731	1.24 ± 0.42	T_e , К	~ 5000
[SII] 6717	6.65 ± 1.01	EW(H α), Å	26.84 ± 1.24	n_e , см ⁻³	≤ 300
[SII] 6731	5.37 ± 1.01	EW(H β), Å	3.26 ± 0.49		

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Физические и химические параметры газа в комплексе звездообразования № 1502

Используя эмиссионные линии газа, можно оценить ряд характеристик газа. Очень важными для этого являются линии [OIII] λ 4959 и λ 5007 Å. Однако, как уже упоминалось во Введении, в связи с относительной слабостью этих линий и большим поглощением в данной области (см. табл. 2), их не удалось измерить. Поэтому мы проводим анализ, возможный на основе измерений полученных линий водорода, азота и серы.

Классические диаграммы классификации различных типов объектов эмиссионных линий (BPT-диаграммы $\lg([\text{NII}] \lambda 6584/\text{H}\alpha) - \lg([\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta)$ и $\lg([\text{SII}] \lambda 6717 + \lambda 6731/\text{H}\alpha) - \lg([\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta)$) позволяют определить основной механизм возбуждения газа в области эмиссии. Несмотря на отсутствие измерений линии [OIII] λ 5007, мы можем оценить верхний предел ее интенсивности – $\lg([\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta) < 0$. Учитывая относительные интенсивности линий азота и серы $\lg([\text{NII}] \lambda 6584/\text{H}\alpha) = -0.43 \pm 0.04$ и $\lg([\text{SII}] \lambda 6717 + \lambda 6731/\text{H}\alpha) = -0.60 \pm 0.03$, исследуемый нами источник располагается на BPT-диаграммах в области, занимаемой областями НII, то есть объектами с фотоионизацией (согласно моделям [21]).

Для оценок химического состава и физических характеристик газа, окружающего звездный комплекс, при отсутствии данных по интенсивностям линий кислорода, мы можем воспользоваться эмпирическими зависимостями и корреляциями, полученными Пилюгиным и Гребель в работе [15].

Относительная интенсивность линий азота указывает на высокую металличность области НII, поэтому мы можем воспользоваться формулой (9) из работы [15] для оценки содержания кислорода: $12 + (\text{O}/\text{H}) = 8.67 \pm 0.18$ или $Z = 0.013 \pm 0.005$, что в пределах ошибок соответствует солнечной металличности. Согласно зависимости между относительной интенсивностью линии азота

$\lg(I([\text{NII}] \lambda 6548 + \lambda 6584)/I(\text{H}\beta))$ и электронной температурой T_e из работы [15], мы оценили температуру газа $T_e \sim 5000$ К.

Подобные характеристики – высокая металличность, близкая к солнечной, и относительно низкая электронная температура – являются типичными для областей НII в гигантских спиральных галактиках. Похожие значения O/H и T_e были получены нами и в крупной близкой галактике NGC 6946 [13], где также была отмечена антикорреляция между значениями O/H и электронной температуры.

Отношение линий серы [SII] λ 6717/[SII] λ 6731 = $1.24 \pm 0.42 \geq 1$ из области НII соответствует значениям электронной плотности газа $n_e \leq 300$ см⁻³. Подобные относительно низкие плотности являются характерными для гигантских областей НII, наблюдаемых в других галактиках (см., напр., [22, 23]). Отметим, что диаметр области № 1502 оценен нами в 550 пк [5], что является типичным размером для звездных комплексов – крупнейших областей когерентного звездообразования [24].

Полученные нами оценки химических и физических параметров газа в области звездообразования № 1502 даны в правом столбце табл. 2.

3.2. Фотометрические и физические параметры комплексов звездообразования в UGC 11973

Изучение самых ранних этапов жизни областей звездообразования и оценка их физических параметров являются сложной задачей из-за воздействия газа и пыли. Возможно, самой сложной задачей является оценка возраста звездного населения. Если в ближайших галактиках мы можем разрешить молодую звездную группировку на отдельные звезды и определить их возраст на диаграмме цвет–светимость (см., напр., [25]), то для более далеких галактик используются спектроскопические или фотометрические данные или их комбинация. Спектроскопический метод включает в себя как оценку спектральных возраст-

ных показателей (например, эквивалентные ширины $EW(H\alpha)$ и $EW(H\beta)$, отношение $[OIII]/H\beta$, потоки в эмиссионных линиях $HeII$ и т.д.), так и прямое сравнение наблюдаемых спектров с модельными [26–33]. Фотометрический метод заключается в сравнении данных многоцветной фотометрии для областей звездообразования с предсказаниями моделей эволюционного или популяционного синтеза [34–39].

Хотя возрасты, оцененные для одних и тех же звездных скоплений с использованием спектроскопических и фотометрических данных, находятся в достаточно хорошем согласии [25, 33, 34], авторы [40], изучавшие разрешаемые на отдельные звезды скопления в M83, обнаружили, что корреляция между возрастными звездными группами, полученных по возрастам отдельных звезд в регионе, и возрастными, полученными по интегральным показателям цвета с использованием стандартного фотометрического метода, не является очень сильной.

Спектроскопические методы обычно обеспечивают высококачественные оценки возраста, однако позволяют определить его для ограниченного числа объектов. Основной проблемой оценки фотометрического возраста является учет влияния газа и пыли в измеряемых фотометрических потоках. Отсутствие независимых данных о химическом составе и поглощении приводит к вырождениям диаграмм “возраст–металличность” и “возраст–поглощение” при сравнительном анализе с теоретическими эволюционными моделями звездных скоплений [41].

Для оценки физических параметров звездного населения в комплексах звездообразования мы использовали методику, подробно описанную нами в работах [14, 42] и апробированную в работах [14, 43]. Она основана на наблюдаемых светимостях и показателях цвета объектов, полученных из фотометрии, и интенсивностях эмиссионных линий, оценках металличности и поглощения в газе, полученных из спектроскопических наблюдений. Используя эволюционные модели с определенным значением химического состава, по светимости и показателям цвета областей звездообразования, исправленных за поглощение света и вклад эмиссионных линий, можно получить оценки массы и возраста молодого звездного населения. В данной методике при решении задачи определения параметров массы m и возраста t ищутся не только все локальные минимумы функционала отклонений, но и вычисляется их глубина. За решение задачи принимается наиболее глубокий минимум.

При моделировании использовалась сетка изохрон версии 3.1, разработанная в Падуе (см., напр., [44]) и доступная через онлайн-сервер CMD⁶. Наборы звездных эволюционных треков данной версии были рассчитаны для начальной

функции масс Солпитера с диапазоном масс от $0.15 M_{\odot}$ до $100 M_{\odot}$.

Для оценки возраста использовалась модель единовременного звездообразования (SSP-модель). Хотя в крупных звездных комплексах, состоящих из систем звездных скоплений и ОВ-ассоциаций, звездообразование может происходить за больший промежуток времени, выбор режима звездообразования для них неоднозначен. Непрерывное постоянное звездообразование является крайним случаем в таких системах. Наиболее вероятным представляется серия вспышек звездообразования различной мощности и промежутков между ними. Наибольший вклад в цветовые характеристики такого комплекса будет вносить последняя крупная вспышка звездообразования. Из-за неопределенности истории звездообразования в крупных звездных комплексах мы решили отказаться от моделирования режима постоянного звездообразования. При этом стоит помнить, что определяемые нами возрасты молодых звездных комплексов являются “фотометрическими”, а не реальными физическими возрастными.

Относительный вклад газового континуума в излучение в широких фотометрических полосах ($I_{\text{gas}}/I_{\text{total}}$) оценивался с помощью уравнений для спектральной интенсивности излучения вблизи границ серий водорода, свободно-свободного излучения и двухфотонного излучения, приведенные в [18, 45]. Вклад от излучения эмиссионных линий был рассчитан путем суммирования интенсивностей линий излучения, которые проявляются в данной фотометрической полосе. Потоки для неизмеренных эмиссионных линий вычислялись по полученным оценкам меры эмиссии EM с использованием уравнений из работ [18, 45]. Всего учитывалось 18 основных линий межзвездной среды.

При оценке возрастов и масс мы использовали показатели цвета $U-B$ и $B-V$, поскольку в случае молодого звездного населения потоки в полосах R и I слабо чувствительны к изменениям в возрасте, а их фактические ошибки измерений увеличивают неопределенности оценок возраста и массы.

Полученные для комплекса № 1502 светимость в полосе B , $M(B)_c$, и показатели цвета $(U-B)_c$, $(B-V)_c$, $(V-R)_c$ и $(V-I)_c$, исправленные за поглощение света и вклад эмиссионных линий газа в общий поток, оценка вклада газа $I_{\text{gas}}/I_{\text{total}}$ в полосе B , возраст t и масса m приведены в табл. 3 и выделены жирным шрифтом. Для остальных комплексов звездообразования в галактике мы

⁶ <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

Таблица 3. Фотометрические и физические параметры комплексов звездообразования

Номер	$M(B)$, зв. вел. d , пк	$U-B$ r , кпк	$B-V$ $I_{\text{gas}}/I_{\text{total}}(B)$, %	$V-R$ t , 10^6 лет	$V-I$ m , $10^6 M_{\odot}$
1498	-13.29 ± 0.15 700	-0.27 ± 0.20 6.01	0.21 ± 0.13 —	0.08 ± 0.18 ≤ 300	0.34 ± 0.25 ≥ 0.21
1499	-15.29 ± 0.04 850	-0.50 ± 0.08 6.48	0.18 ± 0.08 —	0.26 ± 0.10 ≤ 45	0.67 ± 0.10 ≥ 1.4
1500	-13.56 ± 0.12 650	-0.37 ± 0.30 12.96	0.23 ± 0.16 —	0.05 ± 0.21 ≤ 300	0.45 ± 0.22 ≥ 0.27
1501	-13.22 ± 0.16 550	-0.73 ± 0.28 12.98	0.19 ± 0.21 —	0.06 ± 0.24 ≤ 47	0.71 ± 0.16 ≥ 0.19
1502	-15.99 ± 0.56 550	-1.19 ± 0.23 14.53	-0.34 ± 0.27 7	-0.06 ± 0.27 2.0 ± 1.1	0.19 ± 0.35 4.6 ± 1.6
1503	-13.55 ± 0.06 650	-0.62 ± 0.11 14.91	0.25 ± 0.08 —	0.41 ± 0.10 ≤ 25	0.70 ± 0.09 ≥ 0.29
1504	-13.30 ± 0.14 600	-0.61 ± 0.19 18.35	0.27 ± 0.13 —	— ≤ 32	0.85 ± 0.15 ≥ 0.21
1505	-14.06 ± 0.04 550	-1.29 ± 0.04 19.35	0.11 ± 0.06 —	0.14 ± 0.09 ≤ 5.1	0.47 ± 0.09 ≥ 0.45
1506	-13.05 ± 0.06 550	-0.78 ± 0.18 20.55	-0.07 ± 0.11 —	0.26 ± 0.15 ≤ 4.7	-0.11 ± 0.36 ≥ 0.17
1507	-14.42 ± 0.04 650	-0.75 ± 0.09 20.74	0.14 ± 0.06 —	0.33 ± 0.07 ≤ 5.3	0.30 ± 0.08 ≥ 0.63
1508	-14.35 ± 0.07 600	-0.56 ± 0.13 21.26	0.05 ± 0.14 —	0.27 ± 0.14 ≤ 53	0.24 ± 0.18 ≥ 0.58
1509	-14.43 ± 0.06 500	-0.57 ± 0.12 22.43	-0.10 ± 0.12 —	0.18 ± 0.13 ≤ 4.7	0.30 ± 0.19 ≥ 0.57
1510	-14.43 ± 0.06 650	-0.67 ± 0.10 22.68	0.09 ± 0.08 —	0.13 ± 0.09 ≤ 5.1	0.55 ± 0.08 ≥ 0.63

приводим в таблице значения $M(B)_0^i$, $(U-B)_0^i$, $(B-V)_0^i$, $(V-R)_0^i$ и $(V-I)_0^i$, исправленные за поглощение в Галактике, и поглощение, вызванное наклоном диска UGC 11973. В предположении, что поглощение в областях НП превышает или равно сумме поглощений A_G и A_r , а металличность звездного населения в них соответствует солнечной, мы оценили нижний предел массы и верхний предел возраста для остальных комплексов в галактике.

Предельные значения массы и возраста соответствуют случаю отсутствия дополнительного поглощения в области НП (поглощение равно $A_G + A_r$). В случае дополнительного поглощения, вызванного плотной оболочкой НП, массы объектов будут большими, а возраста — меньшими (на диаграммах рис. 2 это будет соответствовать смещению вверх влево вдоль линии поглоще-

ния). Данные предельные значения даны в табл. 3 с учетом погрешностей измерений яркости и показателей цвета объектов.

В табл. 3 приведены также галактоцентрические расстояния с учетом наклона диска r и диаметры комплексов d .

На рис. 2 показаны положения изученных комплексов на диаграмме цвет—светимость и двухцветных диаграммах.

Как видно из рисунка, на всех диаграммах все комплексы звездообразования в пределах ошибок и возможного недоучета поглощения располагаются вдоль эволюционных треков стареющих звездных систем. Мы оценили возраст и массу звездного комплекса № 1502, применяя методику [14]: $t = (2.0 \pm 1.1) \times 10^6$ лет, $M = (4.6 \pm 1.6) \times 10^6 M_{\odot}$. Остальные комплексы, не изученные методами

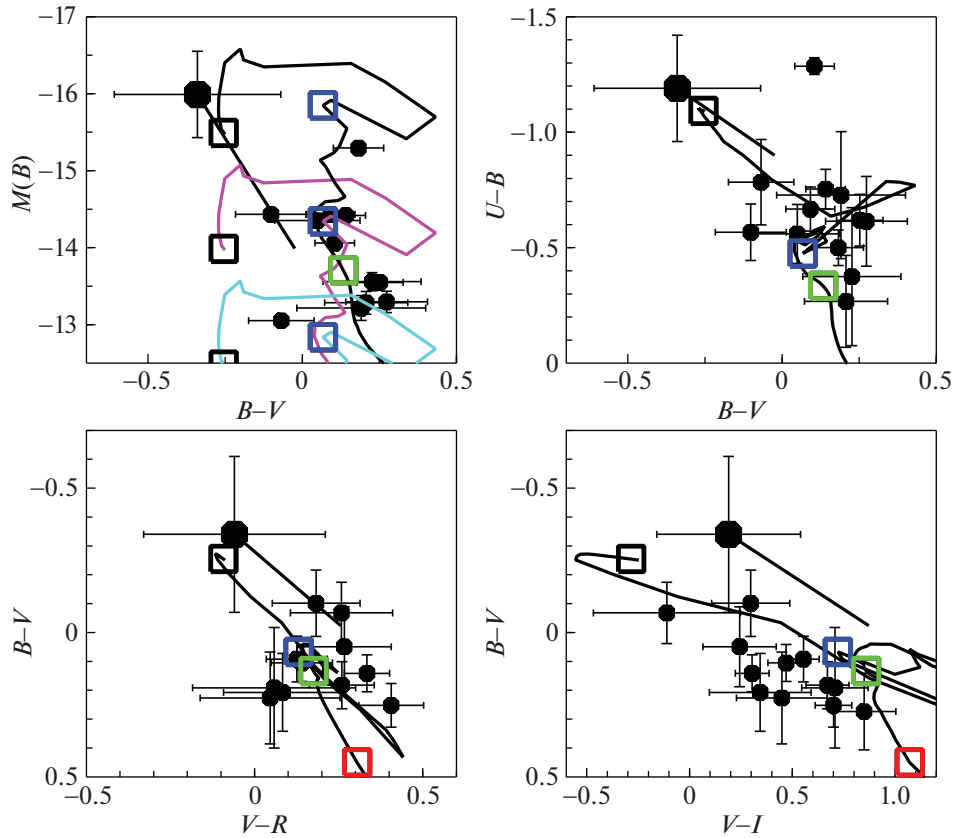


Рис. 2. Диаграмма цвет $(B-V)$ – светимость $M(B)$ и двухцветные диаграммы $(U-B)-(B-V)$, $(B-V)-(V-R)$ и $(B-V)-(V-I)$ для комплексов звездообразования в галактике. Для комплекса № 1502 (большой черный кружок) приведены абсолютная звездная величина $M(B)_c$ и показатели цвета, исправленные за поглощение света и вклад эмиссионных линий газа; для остальных комплексов звездообразования (маленькие черные кружки) даны светимости $M(B)_0^i$ и показатели цвета, исправленные за поглощение в Галактике и поглощение, связанное с наклоном диска UGC 11973. Приведены ошибки измерений. Толстые черные отрезки показывают смещение объектов на диаграммах вдоль линии поглощения. Длина отрезков соответствует величине поглощения $A(B) = 1.99^m$, равного разнице между поглощением в комплексе № 1502 $A(B)_c = 3.59^m$, определенному по бальмеровскому декременту, и сумме поглощений $A(B)_G + A(B)_i$ (см. табл. 1). Толстые линии – эволюционные треки звездных систем с металличностью $Z = 0.012$. На диаграмме цвет–светимость показаны треки звездных систем с массами $4 \times 10^6 M_\odot$ (черным), $1 \times 10^6 M_\odot$ (фиолетовым) и $2.5 \times 10^5 M_\odot$ (голубым) цветом. Квадраты – положения звездных систем с возрастом 10^6 (черный цвет), 10^7 (синий), 10^8 (зеленый) и 10^9 лет (красный) соответственно.

спектроскопии, имеют массы $M \geq 1.7 \times 10^5 M_\odot$ и возрасты $t \leq 3 \times 10^8$ лет.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами оценки возраста звездного комплекса № 1502 указывают на время последней крупной вспышки звездообразования в нем. Реальный физический возраст образования комплекса, по-видимому, должен быть большим. Характерное время звездообразования в звездных комплексах такого размера (550 пк) составляет порядка 20 млн. лет [46]. Оценки возраста ком-

плекса, полученные другими методами, более чувствительны к присутствию относительно “старого” звездного населения, дадут большие значения t . В частности, метод определения возраста по эквивалентной ширине линии H β [26–28], рассчитанный для единовременной вспышки звездообразования во всей области, дает для комплекса № 1502 несколько больший возраст – 6–8 млн. лет. Причиной этого является наложение спектра звездного населения с возрастом больше 10 млн. лет (с высоким уровнем в континууме и абсорбцией в линии H β) на спектр последней вспышки, уменьшающее величину EW(H β).

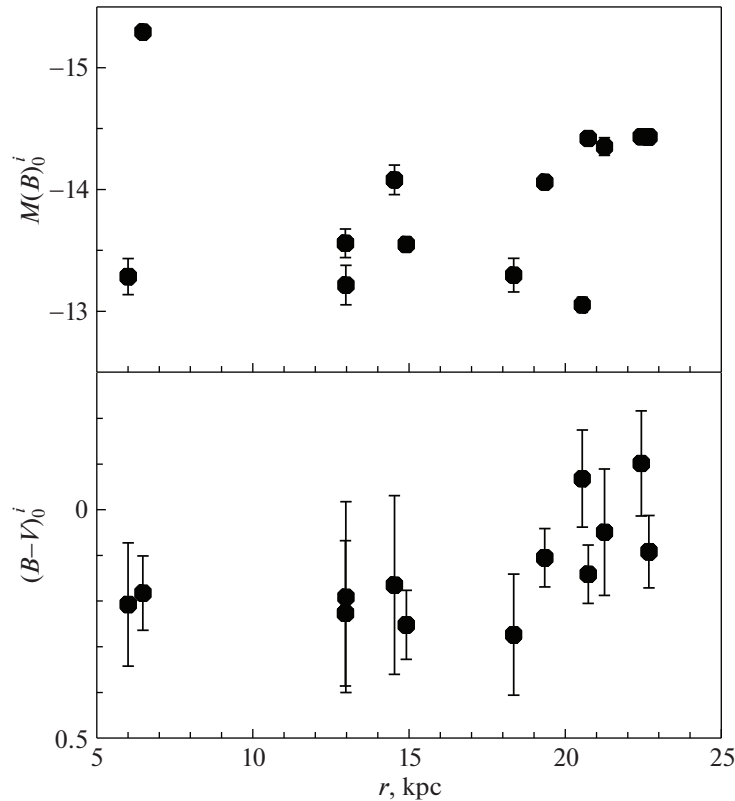


Рис. 3. Светимость и цвет звездных комплексов в зависимости от их расстояния до центра галактики. Абсолютные звездные величины $M(B)_0^i$ и показатели цвета $(B-V)_0^i$ исправлены за поглощение в Галактике и поглощение, связанное с наклоном диска UGC 11973, для всех комплексов, включая № 1502. Показаны ошибки измерений.

Индикатором присутствия молодого звездного населения с возрастом менее 10 млн. лет является эмиссия в линии $H\alpha$. Фотометрия галактики в данной линии не проводилась, поэтому мы не можем уверенно констатировать, что все изученные комплексы являются областями эмиссии $H\alpha$. Однако по положению на двухцветных диаграммах можно утверждать, что, как минимум, пять наиболее голубых комплексов (№№ 1505–1507, 1509, 1510) должны быть моложе 10 млн. лет (см. табл. 3 и рис. 2).

Представленные в табл. 3 значения t являются верхним пределом возрастов изученных звездных комплексов по показателям цвета $(U-B)_0^i$ и $(B-V)_0^i$. Показатель цвета $V-I$, хотя и является менее достоверным индикатором, указывает на еще более юные возрасты комплексов: их положение на диаграмме $(B-V)_0^i - (V-I)_0^i$ соответствует возрастам $t \leq 5 \times 10^6$ лет для всех объектов, кроме четырех с наибольшим значением $(V-I)_0^i$ (см. рис. 2 и табл. 3).

Комплекс № 1502 по своим наблюдаемым фотометрическим параметрам (абсолютной звезд-

ной величине и показателям цвета, исправленным за A_G и A_I) не выделяется среди других областей звездообразования (см. положение нижних правых концов черных отрезков на рис. 2). Его смещение в левые верхние углы на диаграммах вызвано большим внутренним поглощением, определенном из спектральных данных по балмеровскому декременту. Весьма вероятно, что и другие звездные комплексы в UGC 11973 имеют схожие величины внутреннего поглощения и могли бы располагаться на диаграммах $(B-V)_c - M(B)_c$, $(U-B)_c - (B-V)_c$ и др. рядом с комплексом № 1502.

В сильно наклоненной галактике, какой является UGC 11973, важную роль играют эффекты селекции. Поглощение, вызванное наклоном диска галактики, принимается, в общем случае, равным константе. Реально, поглощение меняется по полю диска, оно уменьшается от центра к краю галактики пропорционально уменьшению поверхностной плотности пыли в диске и от дальнего края галактики к ближнему вдоль малой оси (см. рис. 1). По-видимому, поэтому большинство идентифицированных звездных комплексов расположено в ближней к нам северо-западной ча-

сти UGC 11973 и находится во внешних областях диска на расстояниях от центра $r > 18$ кпк (см. табл. 3). Из-за эффектов селекции мы не проводим в работе анализ пространственного распределения комплексов в галактике.

Отметим при этом, что комплексы с меньшим расстоянием до центра галактики систематически менее яркие и более красные, чем внешние (рис. 3). Самый яркий комплекс № 1499, выпадающий из общей зависимости на рис. 3, имеет площадь в ≈ 2.5 раза большую, чем остальные (см. табл. 3).

В целом измеренные и оцененные параметры популяции звездных комплексов в UGC 11973 являются типичными для областей звездообразования в крупных спиральных галактиках позднего типа. Подробный анализ характеристик областей звездообразования в дисках галактик различных типов будет проведен нами в следующей работе в рамках проекта. Исследование будет базироваться на однородном каталоге фотометрических параметров более 1500 областей звездообразования в 19 галактиках (каталог [5]), включающем спектральные характеристики более 500 областей НII.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Мы провели анализ фотометрических и спектральных наблюдений 13 молодых звездных комплексов в гигантской спиральной галактике UGC 11973. Для комплекса № 1502 оценены химические и физические параметры окружающего его газа, масса и возраст.

2. Металличность газа в окрестностях звездного комплекса № 1502 оказалась, в пределах ошибок, солнечной: $Z = 0.013 \pm 0.005$; масса комплекса $M = (4.6 \pm 1.6) \times 10^6 M_{\odot}$, а его возраст t оценен в $(2.0 \pm 1.1) \times 10^6$ лет.

3. Для 12 остальных комплексов в галактике были оценены нижний предел массы и верхний предел возраста. Все комплексы оказались массивными с $M \geq 1.7 \times 10^5 M_{\odot}$, а их возраст не превышает 3×10^8 лет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа частично выполнена при поддержке гранта Программы развития МГУ “Ведущая научная школа “Физика звезд, релятивистских объектов и галактик”. Работа выполнена в рамках научного проекта, поддержанного с 2020 г. грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 20-02-00080.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента за ценные замечания и С.Н. Додонова (САО РАН) за помощь в наблюдениях на телескопе БТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. L. Afanas'ev, A. N. Burenkov, A. B. Zasov, O. K. Silychenko*, *Астрофизика* **29**, 155 (1988).
2. *O. Graur, F. B. Bianco, S. Huang, M. Modjaz, I. Shivers, F. V. Filippenko, W. Li, and J. J. Eldridge*, *Astrophys. J.* **837**, Id. 120 (2017).
3. *H. M. Courtois and R. B. Tully*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **447**, 1531 (2015).
4. *A. M. Garcia*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **100**, 47 (1993).
5. *A. S. Gusev, E. V. Shimanovskaya, N. I. Shatsky, F. Sakhibov, A. E. Piskunov, and N. V. Kharchenko*, *Open Astronomy* **27**, 98 (2018).
6. *J. Marvil, F. Owen, and J. Eilek*, *Astron. J.* **149**, Id. 32 (2015).
7. *J. J. Condon, W. D. Cotton, and J. J. Broderick*, *Astron. J.* **124**, 675 (2002).
8. *M. A. Strauss, J. P. Huchra, M. Davis, A. Yahil, K. B. Fisher, and J. Tonry*, *Astrophys. J. Suppl.* **83**, 29 (1992).
9. *M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al.*, *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
10. *A. C. Gusev, C. A. Гусякова, А. П. Новикова, М. С. Храмова, В. В. Бруевич, О. В. Ежкова*, *Астрон. журн.* **92**, 779 (2015).
11. *J. G. Sorce, R. B. Tully, H. M. Courtois, T. N. Jarrett, J. D. Neill, and E. J. Shaya*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 527 (2014).
12. *A. S. Gusev, L. S. Pilyugin, F. Sakhibov, S. N. Dodonov, O. V. Ezhkova, and M. S. Khrantsova*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **424**, 1930 (2012).
13. *A. C. Gusev, Ф. X. Сахибов, С. Н. Додонов*, *Астрофиз. бюл.* **68**, 42 (2013).
14. *A. S. Gusev, F. Sakhibov, A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 3334 (2016).
15. *L. S. Pilyugin and E. K. Grebel*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **457**, 3678 (2016).
16. *V. L. Afanas'ev, A. B. Mousseev*, *Письма в Астрон. журн.* **31**(3), 214 (2005).
17. *J. B. Oke*, *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
18. *D. E. Osterbrock*, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (Mill Valley, CA: University Science Books, 1989).
19. *Y. I. Izotov, T. X. Thuan, and V. A. Lipovetsky*, *Astrophys. J.* **435**, 647 (1994).
20. *M. L. McCall, P. M. Rybski, and G. A. Shields*, *Astrophys. J. Suppl.* **57**, 1 (1985).
21. *L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, C. A. Heisler, and J. Trevena*, *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
22. *R. C. Kennicutt*, *Astrophys. J.* **287**, 116 (1984).
23. *L. Gutiérrez and J. E. Beckman*, *Astrophys. J.* **710**, L44 (2010).
24. *Yu. N. Efremov*, *Astron. J.* **110**, 2757 (1995).

25. *B. C. Whitmore, R. Chandar, H. Kim, C. Kaleida, et al.*, *Astrophys. J.* **729**, 78 (2011).
26. *M. V. F. Copetti, M. G. Pastoriza, and H. A. Dottori*, *Astron. and Astrophys.* **156**, 111 (1986).
27. *G. Stasińska and C. Leitherer*, *Astrophys. J. Suppl.* **107**, 661 (1996).
28. *D. Schaerer and W. D. Vacca*, *Astrophys. J.* **497**, 618 (1998).
29. *N. Bastian, M. Gieles, Yu. N. Efremov, and H. J. G. L. M. Lamers*, *Astron. and Astrophys.* **443**, 79 (2005).
30. *N. Bastian, E. Emsellem, M. Kissler-Patig, and C. Maraston*, *Astron. and Astrophys.* **445**, 471 (2006).
31. *N. Bastian, G. Tranco, I. S. Konstantopoulos, and B. W. Miller*, *Astrophys. J.* **701**, 607 (2009).
32. *I. S. Konstantopoulos, N. Bastian, L. J. Smith, M. S. Westmoquette, G. Tranco, and J. S. Gallagher III*, *Astrophys. J.* **701**, 1015 (2009).
33. *A. Wofford, C. Leitherer, and R. Chandar*, *Astrophys. J.* **727**, Id. 100 (2011).
34. *L. Searle, A. Wilkinson, and W. G. Bagnuolo*, *Astrophys. J.* **239**, 803 (1980).
35. *R. A. W. Elson and S. M. Fall*, *Astrophys. J.* **299**, 211 (1985).
36. *F. Bresolin, R. C. Jr. Kennicutt, and P. B. Stetson*, *Astron. J.* **112**, 1009 (1996).
37. *R. Chandar, B. C. Whitmore, H. Kim, C. Kaleida, et al.*, *Astrophys. J.* **719**, 966 (2010).
38. *K. Hollyhead, N. Bastian, A. Adamo, E. Silva-Villa, J. Dale, J. E. Ryon, and Z. Gazak*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **449**, 1106 (2015).
39. *K. Hollyhead, A. Adamo, N. Bastian, M. Gieles, and J. E. Ryon*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **460**, 2087 (2016).
40. *H. Kim, B. C. Whitmore, R. Chandar, A. Saha, et al.*, *Astrophys. J.* **753**, Id. 26 (2012).
41. *J. M. Scalo*, *Fundam. Cosmic Phys.* **11**, 1 (1986).
42. *А. С. Гусев, В. И. Мясутин, Ф. Х. Сахибов, М. А. Смирнов*, *Астрон. журн.* **84**(3), 266 (2007).
43. *В. В. Бруевич, А. С. Гусев, О. В. Ежкова, Ф. Х. Сахибов, М. А. Смирнов*, *Астрон. журн.* **84**(3), 253 (2007).
44. *P. Marigo, L. Girardi, A. Bressan, P. Rosenfield, et al.*, *Astrophys. J.* **835**, Id. 77 (2017).
45. *С. А. Каплан, С. Б. Пикельнер*, *Физика межзвездной среды* (М.: Наука, 1979).
46. *Y. N. Efremov and B. Elmegreen*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **299**, 588 (1998).