

УДК 524.7+524.78

И. Ю. Изотова, С. Л. Парновский

Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

Эмиссионные галактики из обзора SDSS DR4: статистические исследования текущего звездообразования

Для выборки 8156 эмиссионных галактик из обзора Sloan Digital Sky Survey Data Release 4 (SDSS DR4) определена скорость текущего звездообразования (SFR) по трем параметрам: светимости областей $H\ II$ в линии $H\alpha$ с учетом коррекции за апертуру наблюдений и межзвездную экстинкцию ($N = 7006$ галактик), светимости в дальнем ИК-диапазоне (данные спутника IRAS, $N = 350$), монохроматической светимости в радиоконтинууме на частоте $\nu = 1.4$ ГГц (обзор NVSS, $N = 475$). При вычислениях SFR_{FIR} приняты начальная функция масс Солпитера с диапазоном масс звезд $0.1-100 M_{\odot}$. При вычислении $SFR_{1.4}$ принято, что доля теплового излучения в общем излучении галактики в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц составляет 10%. Для галактик с известным содержанием тяжелых элементов определен верхний предел возраста вспышки звездообразования. Проведено сравнение с результатами аналогичных исследований изолированных галактик и HII -галактик Маркарьяна.

ЕМІСІЙНІ ГАЛАКТИКИ З SDSS DR4 ОГЛЯДУ: СТАТИСТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО ЗОРЕУТВОРЕННЯ, Изотова І. Ю., Парновський С. Л. — Для вибірки 8156 емісійних галактик з огляду Sloan Digital Sky Survey Data Release 4 (SDSS DR4) визначено швидкість поточного зореутворення за трьома параметрами: світністю областей $H\ II$ в лінії $H\alpha$ з врахуванням корекції за апертуру спостережень та міжзоряну екстинкцію ($N = 7006$ галактик), світністю галактик в далекому ІЧ-діапазоні (дані IRAS, $N = 350$), монохроматичною світністю в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц (дані NVSS, $N = 475$). При обчисленнях SFR_{FIR} були прийняті початкова функція мас Солпітера з діапазоном мас зір $0.1-100 M_{\odot}$. При обчисленнях $SFR_{1.4}$ припускається, що частка теплового компонента у радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц складає 10%. Для галактик з відомим вмістом важких елементів визначено верхню межу віку спалаху зореутворення. Проведено порівняння з

результатами аналогічних досліджень ізольованих галактик та HII-галактик Маркаряна.

STAR-FORMING GALAXIES FROM SDSS DR4: STATISTICAL STUDY OF THE CURRENT STAR FORMATION PROCESSES, by Izotova I. Yu., Parnovsky S. L. — The current star formation rates (SFR) for a sample of 8156 star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey (DR4) are derived using the following estimators: the galaxy far-infrared luminosity (the IRAS data, $N = 350$), the monochromatic luminosity in the radiocontinuum at 1.4 GHz (the NVSS data, $N = 475$) and H_{α} emission of ionized hydrogen regions (corrected for interstellar extinctions and aperture, $N = 7006$). The Salpeter shape of the initial mass function with the mass range from 0.1 to 100 M_{\odot} was assumed for SFR_{FIR} calculations. The $SFR_{1.4}$ was determined assuming that the fraction of thermal component in the galaxy radiocontinuum emission at 1.4 GHz is about 10 %. The upper limit of starburst age is estimated for galaxies with known abundances of heavy elements. The results are compared with similar studies for H II Markarian galaxies and isolated ones.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость звездообразования — одна из важных характеристик, определяющих эволюцию галактик и их химический состав. В галактиках различных морфологических типов происходит звездообразование разной интенсивности. В работах [1—3, 5—7, 10—18, 20—22, 25, 28—30, 32, 34, 36] изучены свойства галактик с активным звездообразованием, скорость и эффективность звездообразования (SFR и $SFR/M_{\text{газ}}$ — масса газа и доля газа в галактике, которая в течение года конвертируется в звезды) и скорость звездообразования в единице объема, определенные по светимости областей H II в линиях H_{α} и [O II] λ 372.7 нм, в дальнем ИК-диапазоне, в радиоcontinuum на частотах 1.4 и 8.46 ГГц, в близкой УФ-области на $\lambda = 231.5$ нм. Излучение галактик в дальнем ИК-диапазоне и радиоcontinuum на частоте 1.4 ГГц, а также светимость областей ионизованного водорода в линии H_{α} наиболее часто выбираются в качестве индикаторов процессов звездообразования и используются для определения значения скорости текущего звездообразования на протяжении последних 10—100 млн лет.

В работе [32] для выборки галактик из обзора CfA проведено детальное исследование изменения свойств излучения галактик в дальнем ИК-диапазоне вдоль последовательности Хаббла. Показано, что характеристики цвета (отношение потоков излучения в разных полосах ИК-диапазона) как функция морфологического типа галактики хорошо объясняются в рамках модели, в которой пыль состоит из полиатомных гидрокарбонатов (РАН-молекулы), а также частиц промежуточных и больших размеров в комбинации с соответствующим распределением энергии источника, нагревающего пыль.

В работе [11] для нормальных галактик предложена феноменологическая модель, описывающая излучение в дальнем ИК-диапазоне как комбинацию двух компонентов: относительно холодного излучения («цирруса»), связанного с диффузным излучением всех звезд галактики, и относительно теплого, связанного с излучением звезд области звездообразования. В

рамках этой модели положение галактики на диаграмме цвет—цвет определяется двумя параметрами: интенсивностью излучения в области звездообразования и ее долей в общей интенсивности.

Исследование карликовых галактик позднего типа из скопления в Деве показало, что характеристики цвета галактик в основном могут быть объяснены комбинацией двух различных звездных населений: молодого (3—20 млн лет) с низкой металличностью, представляющего звезды, формирующиеся в процессе вспышек звездообразования, и более старого (0.1—1 млрд лет), представляющего предыдущие звездные генерации [5]. В этой работе отмечены свидетельства, что старое звездное население также формировалось в процессе вспышек звездообразования.

Анализ данных наблюдений в дальнем ИК-диапазоне для статистически полной выборки ближайших галактик, проведенный на основе Паломарского обзора, выявил, что доля галактик с относительно старыми вспышками звездообразования составляет 30—40 % местного населения [29]. Показано, что при сравнимых значениях светимости в дальнем ИК-диапазоне галактики Маркаряна и галактики со вспышками звездообразования из исследуемой выборки имеют статистически существенные различия показателей цвета в ИК-диапазоне, объясняемые различным возрастом вспышек звездообразования для этих объектов [29].

Детальное сравнение результатов разных исследований часто затруднено из-за различия как выбранных индикаторов, так и калибровок для определения скоростей звездообразования по одинаковым индикаторам. Хорошее согласие значений SFR , определенных по разным индикаторам, получено в работе [15]. Здесь для 50 детально исследованных голубых компактных карликовых галактик определены значения SFR (диапазон изменений $2.5 \cdot 10^{-3} \dots 25 M_{\odot}/\text{год}$) по их светимостям на λ 60 мкм и $\nu = 1.4$ ГГц. В 12 случаях (когда можно провести сравнение) они хорошо согласуются друг с другом.

Новые перспективы в исследовании процессов звездообразования открыл обзор SDSS. В работе [14] для 3079 галактик из SDSS DR1 (Sloan Digital Sky Survey Data Release 1) исследовались скорости звездообразования, определенные по излучению в линиях H_{α} , [O II] λ 372.7 нм и в радиоконтинууме на $\nu = 1.4$ ГГц. В работе [30] для этого использовались линии H_{α} λ 656.3, H_{β} λ 486.1, [O II] λ 372.7 и [O III] λ 500.7 нм.

В настоящей работе для выборки эмиссионных галактик из SDSS DR4 оценены верхний предел возраста вспышки звездообразования и скорость текущего звездообразования по трем индикаторам: светимости областей H II в линии H_{α} , светимости галактик в дальнем ИК-диапазоне и монохроматической светимости в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц. Проведено сравнение с результатами аналогичных исследований галактик из Первого Бюраканского обзора а также изолированных галактик. Значение постоянной Хаббла принималось равным $H_0 = 75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

ВЫБОРКА

Основу проведенного исследования составила выборка эмиссионных галактик [23] из SDSS DR3, в которых наблюдается линия [O III] λ 436.3 нм, что позволяет получить модельно-независимое содержание тяжелых элементов. Часть этой выборки, включающая галактики с потоком излучения в линии H_{β} λ 486.1 нм более $10^{-21} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2}$ и линией [O III] λ 436.3 нм,

зарегистрированной на уровне не менее 2σ , обсуждается в работе [23]. Кроме того, она дополнена данными из SDSS DR4 [4], появившимися позже работы [23].

Скорость текущего звездообразования галактик будем исследовать по данным излучения в линии областей H_{α} ионизованного водорода 8156 галактик с активным звездообразованием, для которых в обзоре SDSS DR4 получены спектры высокого качества. Потоки в линии H_{α} были исправлены как за межзвездную экстинкцию (использовались данные наблюдений потоков в эмиссионных линиях серии Бальмера) [23], так и за апертуру наблюдений. Коррекция за апертуру наблюдений была проведена путем сравнения потоков, соответствующих полной звездной величине m галактики и ее звездной величине $m(3'')$ в апертуре наблюдений в спектральной полосе r (для красного смещения $z < 0.04$), в полосе i ($0.04 \leq z < 0.26$) и в полосе z ($z \geq 0.26$). Звездная величина $m(3'')$ приведена для каждого спектра в базе данных [4]. Получен коэффициент коррекции $A = 10^{-0.4[m_{r,i,z} - m_{r,i,z}(3'')]}$. Коррекция за апертуру наблюдений была проведена для 7006 галактик, имеющих данные фотометрии в SDSS-обзоре.

С учетом данных NED (The NASA/IPAC Extragalactic Database), а также размеров радиоисточников и поисковых карт SDSS DR4 по координатам было проведено отождествление исследуемых галактик с источниками IRAS, IRASF [19] и NVSS (National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey) [9]. В результате перекрестного отождествления из каталогов IRAS Point Source Catalog (IRAS PSC, объекты ярче 0.5 Ян) и/или IRAS Faint Source Survey (IRAS FSS, объекты ярче 0.2 Ян) были отобраны 350 галактик с потоками излучения в полосах $\lambda\lambda = 60$ и 100 мкм. У отобранных галактик измерения потоков излучения в дальнем ИК-диапазоне имеют оценку «хорошо» или «удовлетворительно» (согласно классификации, приведенной в каталогах). При одинаковой оценке качества измерения предпочтение отдавалось данным каталога IRAS FSS. Установлено, что 475 галактик исследуемой выборки являются источниками излучения в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, при этом 226 из них имеют также

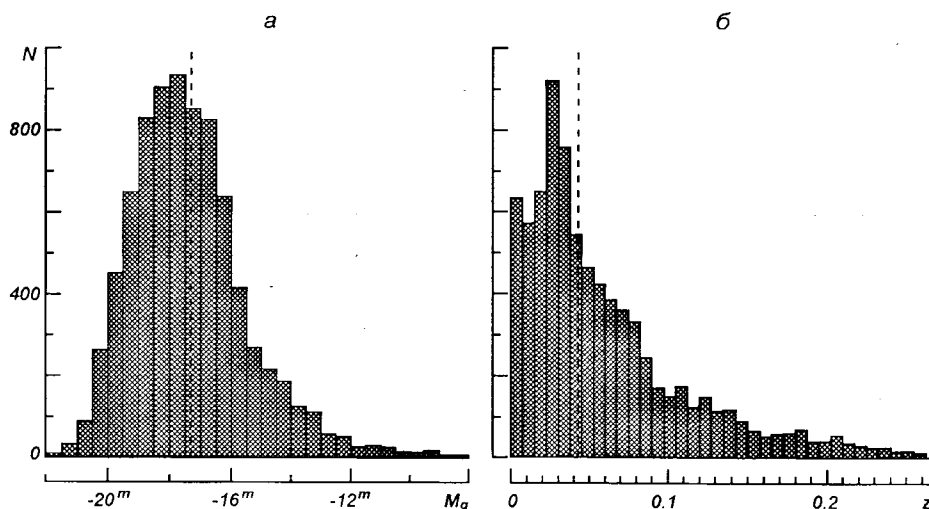


Рис. 1. Распределение количества N галактик: a — по абсолютной звездной величине M_g , b — по значениям красного смещения z . Штриховые линии — медианы распределений

данные наблюдений в дальнем ИК-диапазоне. Для 193 галактик имеются данные излучения в дальнем ИК-диапазоне, радиоконтинууме на 1.4 ГГц и в линии H_α . Для всех исследуемых галактик красные смещения получены из обзора SDSS.

Гистограммы распределения 8156 галактик по абсолютным звездным величинам M_g (спектральная полоса SDSS g , $\lambda_{\text{эф}} = 488.6$ нм) и красным смещениям z приведены на рис. 1. Для полной выборки галактик $1.4 \cdot 10^{-5} \leq z \leq 0.635$, медиана $\hat{z} = 0.045$, среднее значение $\langle z \rangle = 0.066$; медиана $M_g = -17.6^m$, $\langle M_g \rangle = -17.3^m$. У подвыборки с известными данными в дальнем ИК-диапазоне медиана $M_g = -16.2^m$. При этом у подвыборок галактик с данными излучения областей H II в линии H_α медиана $\hat{z} = 0.043$ ($N = 7006$), с данными излучения в радиоконтинууме на 1.4 ГГц медиана $\hat{z} = 0.027$ ($N = 475$), с излучением в дальнем ИК-диапазоне медиана $\hat{z} = 0.012$ ($N = 350$). Таким образом, подвыборка эмиссионных галактик из SDSS DR4, имеющих данные наблюдений в дальнем ИК-диапазоне, включает наиболее близкие галактики из полной выборки, а подвыборка с данными излучения в линии H_α — наиболее далекие галактики.

Подвыборки галактик с активным звездообразованием из Первого и Второго Бюраканских обзоров, имеющие данные в дальнем ИК-диапазоне, включают более яркие галактики, чем выборка эмиссионных галактик из SDSS DR4 (медианы $M_B = -19.6^m$ [20] и $M_B = -18.6^m$ [2] соответственно).

Определение скорости текущего звездообразования в галактиках. Каждый из индикаторов процессов звездообразования, будь то излучение областей H II в линии H_α , либо излучение в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, либо светимость в дальнем ИК-диапазоне, имеет свои преимущества и недостатки.

Скорость звездообразования может быть оценена по числу N_c фотонов Лайман-континуума (L_c -квантов), которые вырабатываются массивными звездами в единицу времени и ионизируют водород. Величину N_c можно определить по светимости области H II в рекомбинационных линиях водорода серии Бальмера или из свободно-свободного излучения в радиоконтинууме. Использование непрерывного радиоизлучения имеет преимущества, поскольку оно не зависит от межзвездной экстинкции. Недостатками этого индикатора является относительно невысокая чувствительность приемников излучения и неопределенность соотношения теплового и нетеплового компонентов излучения в радиоконтинууме для разных типов галактик (нормальных, голубых компактных и др.). L_c -кванты, ионизирующие водород, производятся в основном звездами с массой $M = 30 \dots 60 M_\odot$ в течение 3 млн лет. При расчетах, как правило, принимается, что приблизительно треть L_c -квантов поглощается пылью. В работе [10] получено следующее выражение для определения скорости текущего звездообразования галактики как функции ее светимости $L(H_\alpha)$ в линии H_α :

$$SFR(H_\alpha) = 7.07 \cdot 10^{-49} L(H_\alpha), \quad (1)$$

где $L(H_\alpha)$ выражена в ваттах, $SFR(H_\alpha)$ — в $M_\odot/\text{год}$, M_\odot — масса Солнца.

Скорость текущего звездообразования по светимости галактики в дальнем ИК-диапазоне была получена в соответствии с работой [36]:

$$SFR_{\text{FIR}} = 6.5 \cdot 10^{-10} L_{\text{FIR}} / L_\odot \quad (M_\odot/\text{год}), \quad (2)$$

где L_{FIR} — светимость галактики в дальнем ИК-диапазоне, вычисленная

согласно [19]:

$$L_{FIR} / L_{\odot} = 3.89 \cdot 10^5 (2.58 F_{60} + F_{100}) D^2. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) F_{60} и F_{100} , Ян — монохроматические потоки излучения в полосах $\lambda\lambda = 60$ и 100 мкм; D , Мпк — расстояние до галактики; L_{\odot} — светимость Солнца.

Уравнения (1) и (2) предполагают одинаковые начальные функции масс, нижние пределы масс звезд, и усреднены за приблизительно одинаковое время порядка 3 млн лет. Если же при построении уравнений (1) и (2) использовать различные модели массивных звезд и начальных функций масс, то это приведет к получению различных, но близких (в пределах 20 %) коэффициентов пропорциональности между SFR и соответствующими светимостями, а значит, и значений SFR [1]. В этих же пределах находится различие между значениями скоростей текущего звездообразования $SFR(H_{\alpha})$, полученными в работах [10] и [13].

Следует также отметить, что вычисления SFR_{FIR} часто основаны не на светимости L_{FIR} , полученной согласно (3) и хорошо представляющей излучение галактик в диапазоне 42.5...122.5 мкм (с температурой пыли $T_{dust} > 30$ К), а на излучении в более широком диапазоне — от 8 до 1000 мкм, так называемой полной светимости L_{TIR} в ИК-диапазоне, учитывающей излучение более холодной пыли. В среднем отношение L_{TIR} / L_{FIR} равно 2.2 ± 0.4 [28] либо близко к 2 [6], что приводит к систематически более высоким значениям SFR_{FIR} в случае использования L_{TIR} . С другой стороны, калибровка для SFR_{FIR} , предложенная в работе [13], в случае одинаково вычисленных L_{FIR} дает следующий результат: SFR_{FIR} согласно выражению (2) примерно в 3.7 раза превышает аналогичное значение, полученное согласно [13].

Оценка скорости текущего звездообразования $SFR_{1.4}$ по монохроматической светимости галактики в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц была получена в работе [2] из соотношения теплового оптического и радиоизлучения ионизованного газа:

$$SFR_{1.4} = 2.5 \cdot 10^6 A \cdot L_{1.4} / L_{\odot} \quad (M_{\odot} / \text{год}), \quad (4)$$

где A — доля теплового (свободно-свободного) излучения в общем излучении в радиоконтинууме; $L_{1.4} / L_{\odot} = 3.07 \cdot 10^{-7} D^2 f_{1.4}$ — монохроматическая светимость галактики в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц; D , Мпк — расстояние до галактики; $f_{1.4}$, Ян — монохроматический поток излучения.

Доля теплового излучения в радиоконтинууме является функцией частоты и спектрального индекса излучения, и различается для разных типов галактик [8]. Если принять для галактик нашей выборки спектральный индекс излучения $\alpha = 0.33$ (как для голубых компактных галактик), то с учетом данных [8] получим $A \approx 0.1$, что неплохо согласуется с результатами работ [26, 27]. При этом в работе [8] отмечено, что определение соотношения теплового и нетеплового компонентов является достаточно трудной задачей, и даже для хорошо исследованных галактик фактор неопределенности может достигать значения 5.

Для определения $SFR_{1.4}$ используются и другие калибровки, например приведенные в работах [6, 28]. Значения $SFR_{1.4}$, вычисленные согласно [2] при $A = 0.1$, приблизительно в два раза меньше, чем значения, вычисленные согласно [28].

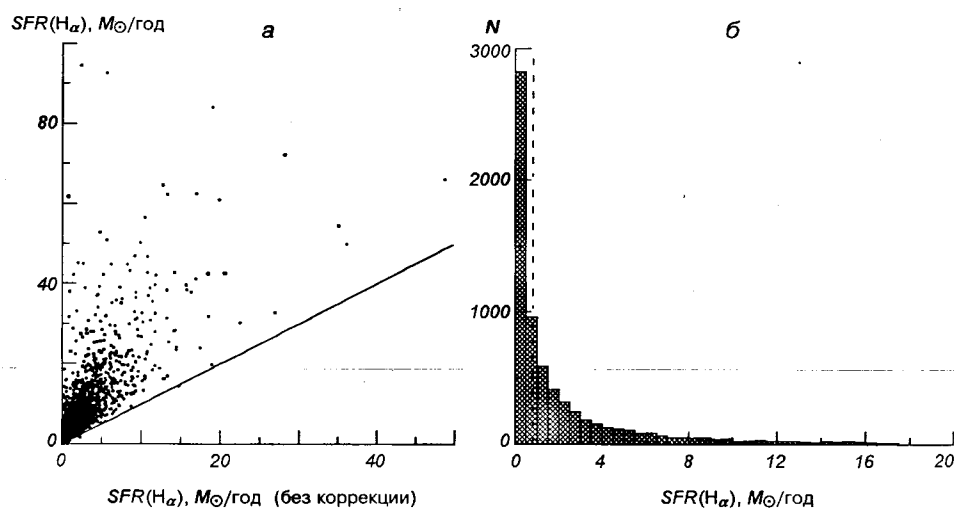


Рис. 2. а — коррелятивная связь скоростей $SFR(H_\alpha)$ текущего звездообразования, определенных без и с коррекциями наблюдений за апертуру и экстинкцию (прямая — линия равных значений); б — распределение количества N галактик по скоростям $SFR(H_\alpha)$ текущего звездообразования. Штриховая линия — медиана распределения

Сравнение $SFRs$ эмиссионных галактик из обзора SDSS DR4 и НII-галактик Маркаряна

Параметр	Эмиссионные галактики из SDSS DR4		НII-галактики Маркаряна (с излучением в ИК-диапазоне) [20]	
	диапазон	медиана	диапазон	медиана
z	$1.4 \cdot 10^{-5} \dots 0.635$	0.045 (8156)	0.005...0.082	0.020 (452)
M	-8.4...-21.5	$M_g = -17.6$ (8156)	-15.6...-22.1	$M_B = -19.6$
$SFR(H_\alpha)$, $M_\odot/\text{год}$	0.001...439.6	0.82 (7006)	—	—
SFR_{FIR} , $M_\odot/\text{год}$	0.003...409	2.8 (350)	0.2...344.3	16.1 (452)
$SFR_{1.4}$, $M_\odot/\text{год}$	0.0015...257	4.3 (475)	0.03...316.6	4.9 (452)
T_{age} , млн лет	1.1...19.3	6.4 (6888)	—	—

В настоящей работе величины $SFR(H_\alpha)$, SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$ вычислены по выражениям (1)—(4) с целью сравнения с аналогичными оценками, полученными ранее для других выборок [2, 3, 20, 21].

Детальное рассмотрение скоростей $SFR(H_\alpha)$ текущего звездообразования, полученных с учетом коррекции за межзвездную экстинкцию, а также апертуру, либо без коррекций показало, что в отдельных случаях коррекции изменяли значение потока излучения в линии H_α (а значит, и скорость текущего звездообразования $SFR(H_\alpha)$) в несколько раз: без коррекции $\langle SFR(H_\alpha) \rangle = 0.86 M_\odot/\text{год}$, с коррекцией $\langle SFR(H_\alpha) \rangle = 2.88 M_\odot/\text{год}$ (рис. 2, а, где прямая — линия равных значений). Индивидуальные значения $SFR(H_\alpha)$ изменяются в очень широком диапазоне — от 10^{-3} до $439.6 M_\odot/\text{год}$ (медиана 0.82). Гистограмма распределения количества N галактик по скорости $SFR(H_\alpha)$ приведена на рис. 2, б.

В таблице приведены значения медиан скоростей текущего звездообразования $SFR(H_\alpha)$, SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$, вычисленных по выражениям (1), (2) и

(4) соответственно, а также другие характеристики выборки. Для сравнения приведены аналогичные значения для НII-галактик Маркаряна. Видно, что, как и в случае со $SFR(H_\alpha)$, индивидуальные значения SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$ изменяются в широком диапазоне. В таблице рядом со значениями медиан в скобках дано число точек.

Как видно из таблицы, скорости текущего звездообразования для эмиссионных галактик из обзора SDSS DR4, определенные по трем индикаторам, невысокие, по сравнению со скоростями других выборок. Так, в работе [28] для 72 голубых компактных карликовых галактик получены следующие значения медиан скоростей текущего звездообразования $SFR(H_\alpha) = 2.4 M_\odot/\text{год}$, $SFR_{TIR} = 3.6 M_\odot/\text{год}$, $SFR_{1.4} = 5.3 M_\odot/\text{год}$; для изолированных галактик мы получили медиану $\widehat{SFR}_{FIR} = 3.5 M_\odot/\text{год}$ [3], а для НII-галактик из Первого Бюраканского обзора, включающего яркие в дальнем ИК-диапазоне объекты, медианы равны $SFR_{FIR} = 16.1 M_\odot/\text{год}$ и $SFR_{1.4} = 4.9 M_\odot/\text{год}$ [20]. При этом НII-галактики Маркаряна, у которых зарегистрировано излучение в дальнем ИК-диапазоне, в целом ярче, чем галактики из SDSS DR4. С другой стороны, медиана удельной скорости звездообразования SFR_{FIR}/L_g для галактик из SDSS DR4 примерно в шесть раз превышает величину SFR_{FIR}/L_B для НII-галактик Маркаряна. Таким образом, исследуемые галактики из SDSS DR4 — карликовые галактики, наблюдаемые во время вспышки звездообразования, тогда как в более ярких НII-галактиках Маркаряна звездообразование носит, по-видимому, более непрерывный характер. Однако этот результат требует дальнейшей проверки и уточнения с использованием выборок, испытывающих меньшее влияние эффектов селекции по потокам излучения, чем излучение в дальнем ИК-диапазоне.

Для подвыборки галактик ($N = 193$), которые имеют зарегистрированное излучение одновременно в линии H_α , в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, а также в дальнем ИК-диапазоне, получены следующие медианы значений скоростей текущего звездообразования: $SFR(H_\alpha) = 0.51 M_\odot/\text{год}$; $SFR_{FIR} = 3.6 M_\odot/\text{год}$; $SFR_{1.4} = 2.4 M_\odot/\text{год}$. Различия с данными, приведенными в таблице, объясняются только эффектом селекции. Если для этой подвыборки галактик посчитать SFR согласно с калибровками работы [13] и L_{FIR} согласно (3), то получим медианы 0.57, 0.96, 2.2 $M_\odot/\text{год}$ соответственно.

Для галактик с активным звездообразованием из SDSS DR4 методом наименьших квадратов (МНК) установлена тесная корреляционная связь между потоками $L_{1.4}$ и L_{FIR} с уравнением регрессии $\lg L_{1.4} = (1.045 \pm 0.016) \lg L_{FIR} - (16.84 \pm 0.7)$ и коэффициентом линейной корреляции $r = 0.95$. Ранее такая же тесная корреляционная связь была получена для НII-галактик из Первого [20] и Второго [21] Бюраканских обзоров, а также изолированных галактик [3]. Кроме того, тесная корреляционная связь для разных выборок галактик отмечена, например, в работах [6, 8]. Для разных выборок галактик получены близкие значения наклона α зависимости $\lg L_{1.4} = f(\lg L_{FIR})$: $\alpha = 1.05 \pm 0.04$ [6] и 1.07 ± 0.02 [20]. При этом различия значений L_{FIR} (полученных либо по излучению на $\lambda = 60$ мкм, либо в диапазоне 42.5...122 мкм, либо в диапазоне 8...1000 мкм) не сказываются существенным образом на значении α , что отмечено в работе [6].

На рис. 3 приведена диаграмма $\lg(F_{12}/F_{25}) - \lg(F_{60}/F_{100})$, где F_λ — монохроматические потоки излучения в полосах $\lambda\lambda = 12, 25, 60, 100$ мкм, для эмиссионных галактик из SDSS DR4 (точки) и НII-галактик Маркаряна

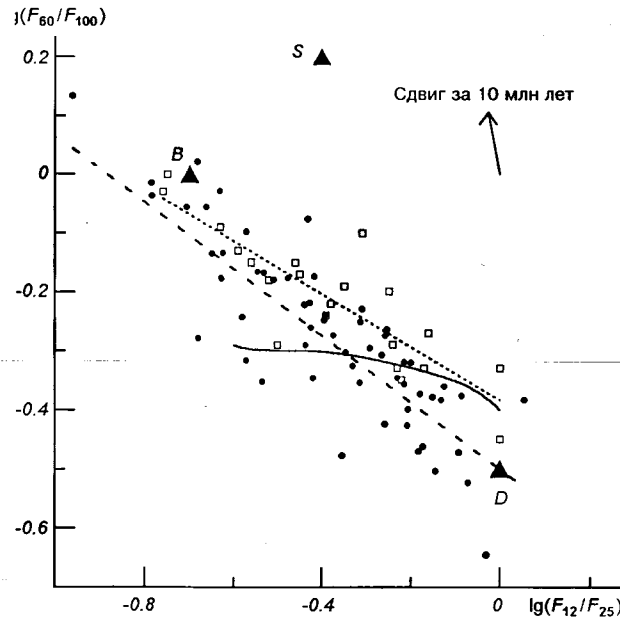


Рис. 3. Диаграмма $\lg(F_{12}/F_{25}) - \lg(F_{60}/F_{100})$: точки и штриховая линия — соответственно показатели цвета и их линейная МНК-аппроксимация для эмиссионных галактик из SDSS DR4, квадратики и пунктирная линия — то же для III-галактик Маркаряна, треугольники — модельные расчеты [31] для галактик Сейферта (S), галактик со вспышкой звездообразования (B) и дисков спиральных галактик (D). Непрерывная кривая согласно модели [11] разделяет галактики с преимущественным вкладом в нагрев пыли областей звездообразования (выше кривой) и межзвездного поля излучения, создаваемого основным звездным населением (ниже кривой). Стрелкой в правом верхнем углу показаны направление и величина сдвига каждой точки на диаграмме цвета за время $\Delta T_{age} = 10$ млн лет

(квадратики). Штриховая и пунктирная линии — их линейные МНК-аппроксимации. Треугольниками обозначены модельные расчеты [31] для галактик Сейферта (S), галактик со вспышкой звездообразования (B) и дисков спиральных галактик (D). На диаграмме цвета эмиссионные галактики из SDSS DR4, как и III-галактики Маркаряна, не попадают в область позиционирования галактик с активными ядрами, и расположены приблизительно вдоль кривой, соединяющей галактики со вспышкой звездообразования и диски спиральных галактик. У двух сравниваемых выборок галактик наклоны линейной МНК-аппроксимации на рис. 3 разные. Согласно критерию Фишера сравниваемые показатели цвета для галактик из SDSS DR4 и III-галактик Маркаряна с вероятностью более 99 % не ложатся на одну прямую. С другой стороны, положение эмиссионных галактик из SDSS DR4 и изолированных галактик [3] из выборки Караченцевой с вероятностью 75 % может быть аппроксимировано единой прямой $\lg(F_{60}/F_{100}) = C_1 \lg(F_{12}/F_{25}) + C_2$, где $C_1 = -0.55 \pm 0.05$ и $C_2 = -0.50 \pm 0.02$. Согласно феноменологической модели [11] непрерывная кривая на рис. 3 разделяет галактики с преимущественным вкладом в нагрев пыли, ответственный за излучение в дальнем ИК-диапазоне, областей звездообразования (выше кривой) и межзвездного поля излучения, создаваемого основным звездным населением (ниже кривой). Видно, что приблизительно одинаковое число галактик из SDSS DR4 расположены выше и ниже непрерывной кривой, а практически все III-галактики Маркаряна (за исключением двух) — выше.

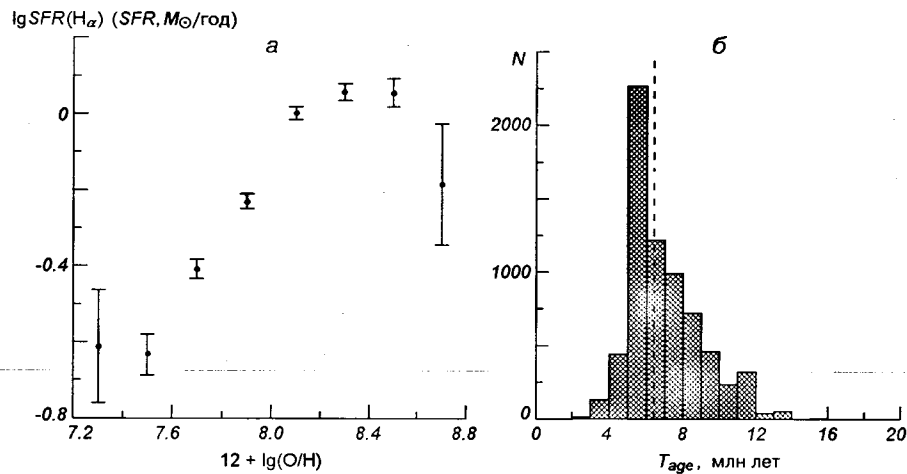


Рис. 4. *a* — зависимость скорости текущего звездообразования от содержания кислорода. Значения $\lg(SFR(H_\alpha))$ усреднялись в интервале металличности 0.2. Прямая и пунктирная линии соответствуют прямой и обратной регрессиям; *б* — распределение количества N галактик по значениям T_{age} верхнего предела возраста вспышки звездообразования (штриховая прямая — медиана)

Это может быть объяснено большим вкладом областей звездообразования в нагрев пыли в III-галактиках Маркаряна. Однако более вероятным является другое объяснение различий. В галактиках из SDSS DR4 с зарегистрированным излучением в дальнем ИК-диапазоне содержание кислорода (медиана $12 + \lg(O/H) = 8.19$, $N = 301$) ниже, чем в галактиках H II Маркаряна. Согласно работе [24] более высокое содержание тяжелых элементов в галактике приводит к большей доле PAH-молекул, и следовательно, к их большему вкладу в излучение в полосе $\lambda = 12$ мкм, а также, вероятно, к иному, по сравнению с бедными средами, соотношению пылевых частиц разных размеров. А это, согласно результатам работы [22], приводит к систематическому сдвигу вправо галактик Маркаряна на диаграмме (рис. 3).

Для выборки галактик с металличностью в интервале от 7.2 до 8.4 ($N = 6378$) получена зависимость скорости текущего звездообразования $SFR(H_\alpha)$ от содержания кислорода $12 + \lg(O/H)$: $\lg(SFR(H_\alpha)) = C_1(12 + \lg(O/H)) + C_2$, где $C_1 = 0.90 \pm 0.04$ и $C_2 = -7.4 \pm 0.3$. Согласно критерию Фишера с вероятностью более 95% зависимость от металличности носит неслучайный характер. Для наглядности эта зависимость представлена на рис. 4, *a* в виде усредненных значений скорости $\lg(SFR(H_\alpha))$ (со средним квадратичным отклонением) в интервалах $\Delta(12 + \lg(O/H)) = 0.2$. Однако эта корреляционная связь не такая тесная ($r < 0.5$), как выявленная в работе [28], и которую можно было бы ожидать на основе исследованной в работе [12] зависимости отношения пыль/газ от металличности в межзвездной среде с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H) < 8$.

Небольшое значение коэффициента корреляции приводит к существенному различию представленных на рис. 4, *a* линий, соответствующих прямой и обратной ($12 + \lg(O/H) = (0.072 \pm 0.003)\lg(SFR(H_\alpha)) + 7.994 \pm 0.003$) регрессиям. Установленная в работе [28] для 72 голубых компактных галактик корреляционная связь между содержанием кислорода

и скоростями звездообразования $SFR(H_\alpha)$, SFR_{IR} (коэффициент ранговой корреляции Спирмена $r_s = 0.67$) и уравнение линейной регрессии $12 + \lg(O/H) = 0.24\lg(SFR) + 8.52$ существенно отличаются от полученной нами обратной регрессии. При этом следует отметить, что в работе [28] исследуется выборка галактик с более высоким содержанием кислорода (диапазон $12 + \lg(O/H) = 8.0...9.0$) и используются совместно скорости звездообразования, полученные разными методами.

ВОЗРАСТ ВСПЫШКИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

В предположении, что наблюдаемая область звездообразования имеет конечные размеры, определяемые числом L_c -квантов, светимость области H II в линии H_β позволяет оценить величину ионизирующего потока, а эквивалентная ширина этой линии $W(H_\beta)$ может служить индикатором возраста вспышки звездообразования. Детальный обзор этого и других индикаторов возраста вспышки звездообразования приведен в работе [35].

В работе [33] были построены эволюционные модели для молодых вспышек звездообразования. В частности, была исследована эволюция эквивалентной ширины $W(H_\beta)$ со временем при различных значениях содержания тяжелых элементов для случая, когда звездообразование является не непрерывной функцией, а представляет собой отдельные вспышки на фоне существования старого звездного населения галактики, дающего вклад в континуум. Было показано стремительное падение эквивалентной ширины $W(H_\beta)$ на 2-3 порядка приблизительно за 10 млн лет от начала вспышки. Наличие старого звездного населения галактики «занижает» значение эквивалентной ширины $W(H_\beta)$ и тем самым «увеличивает» возраст вспышки звездообразования.

Для оценки верхнего предела T_{age} возраста вспышки звездообразования мы использовали данные из работы [23] об эквивалентной ширине $W(H_\beta)$ и содержании тяжелых элементов исследуемой выборки галактик, а также зависимости $W(H_\beta)$ от T_{age} согласно [33]. Получено, что вспышки звездообразования в эмиссионных галактиках из SDSS DR4 имеют верхний предел возраста от 1 до 19.3 млн лет (медиана 6.4 млн лет).

Гистограмма распределения количества N галактик по значениям T_{age} приведена на рис. 4, б.

Для 58 галактик из SDSS DR4 методом наименьших квадратов была найдена трехмерная регрессия $\lg(F_{60}/F_{100}) = C_1\lg(F_{12}/F_{25}) + C_2 + C_3T_{age}$, где $C_1 = -0.55 \pm 0.05$, $C_2 = -0.56 \pm 0.04$ и $C_3 = 0.009 \pm 0.004$, а T_{age} выражено в млн лет. Согласно критерию Фишера вероятность того, что вклад члена с C_3 носит случайный характер, не превышает 4 %.

На рис. 3 (стрелкой в правом верхнем углу) показаны направление и величина сдвига каждой точки на диаграмме цвета за время $\Delta T_{age} = 10$ млн лет. Однако в рамках найденной трехмерной регрессии и в предположении о разном возрасте вспышек звездообразования в галактиках из SDSS DR4 и HII-галактиках Маркаряна не удается объяснить различный наклон линейной регрессии $\lg(F_{60}/F_{100}) = f[\lg(F_{12}/F_{25})]$ для этих галактик. Вероятно, как отмечено выше, ключевую роль в объяснении этого феномена может играть различие содержания тяжелых элементов у галактик из этих выборок.

Не установлено, как можно было ожидать, тесной корреляции цвета галактик $\lg(F_{12}/F_{25})$ и $\lg(F_{60}/F_{100})$ в дальнем ИК-диапазоне с верхним

пределом возраста вспышки звездообразования T_{age} . Вероятно, это связано с тем, что верхний предел возраста вспышки звездообразования T_{age} определяется преимущественно O-звездами, а нагревание пыли производится в основном как O- так и B-звездами, т. е. на большем интервале времени. Кроме этого, с изменением возраста вспышки звездообразования изменяются как интенсивность и спектр излучения, нагревающего пыль в области звездообразования, так и ее доля в общей интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для выборки эмиссионных галактик из SDSS DR4 определены скорости текущего звездообразования $SFR(H_{\alpha})$, SFR_{FIR} , $SFR_{1.4}$, основанные на трех индикаторах: светимости областей H II в линии H_{α} , в дальнем ИК-диапазоне ($\lambda = 60$ и 100 мкм) и радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц.

Показано, что эмиссионные галактики из данной выборки характеризуются более низкой скоростью текущего звездообразования, определенной по излучению в дальнем ИК-диапазоне, чем галактики Маркаряна. Это отличие объясняется более низкой общей светимостью эмиссионных галактик из данной выборки. Кроме того, галактики из SDSS DR4 отличаются низким содержанием тяжелых элементов [23], и следовательно, включают меньше пыли, которая определяет излучение галактик в дальнем ИК-диапазоне. Однако удельная скорость текущего звездообразования SFR_{FIR}/L_g (в фильтре SDSS g с эффективной длиной волны $\lambda = 488.6$ нм) для галактик из SDSS DR4 превышает величину SFR_{FIR}/L_B для HII-галактик Маркаряна. Этот результат требует дальнейшей проверки и уточнения с использованием выборок, испытывающих меньшее влияние эффектов селекции по потокам излучения, чем излучение в дальнем ИК-диапазоне.

Тот факт, что $SFR(H_{\alpha})$, полученные по излучению в линии H_{α} областей ионизованного водорода, ниже, чем SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$, может свидетельствовать о неоднородном распределении пыли в областях звездообразования. В этом случае значительная часть излучения в линии H_{α} будет скрыта в более плотных частях областей звездообразования из-за более высокой межзвездной экстинкции.

Сравнение скоростей текущего звездообразования, полученных при разных калибровках, показывает, что они не отличаются принципиально.

Показано, что на диаграмме цвета $\lg(F_{12}/F_{25}) - \lg(F_{60}/F_{100})$ расположение галактик из SDSS DR4 отличается от расположения HII-галактик Маркаряна, что может быть объяснено более низким содержанием тяжелых элементов у первых, и следовательно, меньшим вкладом PAH-молекул в излучение в полосе 12 мкм.

Показано, что верхний предел возраста вспышки текущего звездообразования в эмиссионных галактиках из SDSS DR4 составляет около 6.5 млн лет. Найдена трехмерная регрессия, связывающая индексы цвета галактик в дальнем ИК-диапазоне и верхний предел возраста вспышки звездообразования. Не установлено прямой и тесной корреляции между индексами цвета в дальнем ИК-диапазоне и верхним пределом возраста вспышки текущего звездообразования.

Авторы благодарят Ю. И. Изотова за предоставленные данные об эмиссионных галактиках из обзора SDSS DR4, а также рецензента за конструктивные критические замечания.

При исследованиях были использованы базы данных внегалактических источников NED, SDSS DR4, IRAS, IRASF, NVSS.

1. Засов А. В. Эффективность звездообразования в спиральных галактиках // Письма в астроном. журн.—1995.—21, № 10.—С. 730—742.
2. Изотова И. Ю., Изотов Ю. И. Темп звездообразования в голубых компактных галактиках из Второго Бюраканского обзора // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 3.—С. 195—205.
3. Изотова И. Ю., Парновский С. Л., Тютюнник А. А. Изолированные галактики: излучение в дальнем инфракрасном диапазоне, скорость и эффективность текущего звездообразования // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 3.—С. 187—203.
4. Adelman-McCarthy J. K., Jennifer K., Agueros M. A., et al. The fourth Data Release of the Sloan digital sky survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—162, N 1.—P. 38—48.
5. Almozino E., Brosch N. Late-type dwarf galaxies in the Virgo cluster: II. Star formation properties // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—298, N 3.—P. 931—944.
6. Bell E. F. Estimating star formation rates from infrared and radio luminosities: the origin of the radio-infrared correlation // *Astrophys. J.*—2003.—586, N 2.—P. 794—813.
7. Calzetti D. Star Formation Rate Determinations // astro-ph:ArXiv:0707.0467 v1, 3 Jul 2007.
8. Condon J. J. Radio emission from normal galaxies // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1992.—30.—P. 575—611.
9. Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., et al. The NRAO VLA sky survey // *Astron. J.*—1998.—115, N 5.—P. 1693—1716.
10. Gallagher J. S. III., Hunter D. A., Tutukov A. V. Star formation histories in irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1984.—284, N 2.—P. 544—556.
11. Helou G. The IRAS colors of normal galaxies // *Astrophys. J.*—1986.—311, N 2.—P. L33—L36.
12. Hirashita H., Tajiri Y. Y., Kamaya H. Dust-to-gas ratio and star formation history of blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2002.—388.—P. 439—445.
13. Hopkins A. M. On the evolution of star forming galaxies // *Astrophys. J.*—2004.—615, N 1.—P. 209—221.
14. Hopkins A. M., Miller C. J., Nichol R. C., et al. Star formation rate indicators in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2003.—599, N 2.—P. 971—991.
15. Hopkins A. M., Schulte-Labreck R. E., Drozdovsky I. O. Star formation rates of local blue compact dwarf galaxies. I. 1.4 GHz and 60 micron luminosities // *Astron. J.*—2002.—124, N 2.—P. 862—876.
16. Hunter D. A., Elmegreen B. G. Star formation properties of a large sample of irregular galaxies // *Astron. J.*—2004.—128, N 5.—P. 2170—2205.
17. Hunter D. A., Gallagher J. S. III Stellar populations and star formation in irregular galaxies // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1986.—98, N 1.—P. 5—28.
18. Iglesias-Paramo J., Buat V., Takeuchi T. T., et al. Star formation in the nearby universe: the ultraviolet and infrared points of view // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—164, N 1.—P. 38—51.
19. IRAS catalog and Atlases: Explanatory Supplement / Eds C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al. — Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1988.—80 p.
20. Izotova I., Parnovsky S. Star formation rate in Markarian galaxies // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.*—2000.—N 3.—P. 99—100.
21. Izotova I., Parnovsky S., Izotov Yu. Star formation rate in starburst galaxies // *New Astron. Revs.*—2000.—44.—P. 283—285.
22. Izotova I. Yu., Izotov Yu. I. Simulation of the far infrared emission of blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1992.—3.—P. 101—130.
23. Izotov Y. I., Stasinska G., Meynet G., et al. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—448, N 3.—P. 955—970.
24. Jackson D. C., Cannon J. M., Skillman E. D., et al. Hot dust and polycyclic aromatic hydrocarbon emission at low metallicity: A Spitzer survey of local group and other nearby dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—2006.—646, N 1.—P. 192—204.
25. Kennicutt R. C. Jr. Star formation in galaxies along the Hubble sequence // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1998.—36.—P. 189—231.
26. Klein U., Weiland H., Brinks E. A radio-optical study of blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1991.—246, N 2.—P. 323—340.
27. Klein U., Wielebinski R., Thuan T. X. Radio continuum observations of blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1984.—141, N 1.—P. 241—247.

28. Kong X. Spectroscopic study of blue compact galaxies. IV. Star formation rates and gas depletion timescales // *Astron. and Astrophys.*—2004.—425, N 2.—P. 417—427.
29. Mouri H., Taniguchi Y. Numerous old starburst galaxies in the local Universe // *Astrophys. J.*—2000.—545, N 2.—P. L101—L106.
30. Moustakas J., Kennicutt R. C., Tremonti C. A. Optical star formation rate indicator // *Astrophys. J.*—2006.—642, N 2.—P. 775—796.
31. Rowan-Robinson M., Efsthathiou A. Multigrain dust cloud models of starburst and Seyfert galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—263, N 3.—P. 675—680.
32. Sauvage M., Thuan T. X. The far-infrared properties of the CfA galaxy sample. II. Gas, dust and star formation along the Hubble sequence // *Astrophys. J.*—1994.—429, N 1.—P. 153—171.
33. Schaerer D., Vacca W. D. New models for Wolf-Rayet and O star population in young starburst // *Astrophys. J.*—1998.—497, N 2.—P. 618—644.
34. Schmitt H. R., Calzetti D., Armus L., et al. Multiwavelength star formations indicators: observations // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—164, N 1.—P. 52—80.
35. Stasinska G., Leitherer C. H II galaxies versus photoionisation models for evolving starbursts // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—107, N 2.—P. 661—692.
36. Thronson H. A., Telesco C. M. Star formation in active dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1986.—311, N 1.—P. 98—112.

Поступила в редакцию 06.08.07