

УДК 524.7

К. Б. Агиенко, Н. Г. Гусева, Ю. И. Изотов

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
agienko@mao.kiev.ua

Выборка галактик Вольфа — Райе из цифрового обзора SLOAN

Мы проанализировали спектры голубых компактных карликовых галактик из седьмого выпуска данных цифрового обзора неба SLOAN и создали выборку из 271 галактики, в спектрах которых наблюдаются особенности Вольфа — Райе (WR-особенности), образованные высокоскоростным звездным ветром. Голубая WR-особенность образована blendой эмиссионных линий $N V \lambda \lambda 460.5, 462.0$ нм, $N III \lambda \lambda 463.4, 464.0$ нм, $C III \lambda 465.0$ нм, $C IV \lambda 465.8$ нм и $He II \lambda 468.6$ нм. Красная WR-особенность представляет собой широкую эмиссию $C IV \lambda 580.8$ нм. Голубая WR-особенность образована главным образом из эмиссии азотных WR-звезд (WN-звезд), красная WR-особенность полностью образована из эмиссии углеродных WR-звезд (WC-звезд). Голубая WR-особенность детектирована во всех спектрах выборки, красная WR-особенность была обнаружена в 50 % спектров выборки. Мы получили количество ранних WC (WCE) и поздних WN (WNL) звезд в галактиках по светимости единичной WC и WN звезды в красной и голубой особенностях. Количество O-звезд получили из светимости в линии H_{β} . Отношение количества WR-звезд всех типов к количеству всех массивных звезд $N(WR)/N(O+WR)$ уменьшается с уменьшением металличности, что согласуется с моделями эволюционного популяционного синтеза.

ВИБІРКА ГАЛАКТИК ВОЛЬФА — РАЙЄ ІЗ ЦИФРОВОГО ОГЛЯДУ НЕБА SLOAN, Агієнко К. Б., Гусєва Н. Г., Изотов Ю. І. — Ми проаналізували спектри блакитних компактних карликових галактик із сьомого випуску даних цифрового огляду неба SLOAN і створили вибірку із 271 галактики, в спектрах яких наявні особливості Вольфа — Райє (WR-особливості), утворені високошвидкісним зоряним вітром. Блакитна WR-особливість утворена blendою емісійних ліній

N V $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0 нм, *N III* $\lambda\lambda$ 463.4, 464.0 нм, *C III* λ 465.0 нм, *C IV* λ 465.8 нм і *He II* λ 468.6 нм. Червона WR-особливість представлена у спектрі широкою емісією *C IV* λ 580.8 нм. Блакитна WR-особливість утворена головним чином із емісії азотних WR-зір (*WN*-зір), червона WR-особливість повністю утворена вуглецевими WR-зорями (*WC*-зорі). Блакитна WR-особливість була детектована в усіх спектрах вибірки, червона WR-особливість спостерігалась у 50 % спектрів вибірки. Ми отримали кількість раних *WC* (*WCE*) і пізніх *WN* (*WNL*) зір в галактиках по світності одиначної *WC* і *WN* зорі в червоній і блакитній особливостях. Кількість *O*-зір отримали із світності в лінії H_{β} . Відношення кількості WR-зір всіх типів до кількості всіх масивних зір $N(WR)/N(O+WR)$ зменшується зі зменшенням металічності, що узгоджується з моделями еволюційного популяційного синтезу.

A SAMPLE OF WOLF-RAYET GALAXIES FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY, by Agiienko K. B., Guseva N. G., Izotov Yu. I. — We analysed spectra of Blue Compact Dwarf galaxies from Data Release 7 of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and created a sample of 271 galaxies with Wolf-Rayet (WR) features in their spectra which are produced by high-velocity stellar winds. The blue WR-feature (bump) is a blend of the emission lines *N V* $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0 nm, *N III* $\lambda\lambda$ 463.4, 464.0 nm, *C III* λ 465.0 nm, *C IV* λ 465.8 nm and *He II* λ 468.6 nm. The red WR-feature (bump) is a broad emission of *C IV* λ 580.8 nm. Nitrogen WR-stars (*WN*-stars) are main contributors to the blue bump and carbon WR-stars (*WC*-stars) contribute to the red bump. The blue bump is presented in all the spectra of our sample and the red bump is seen for 50 % of our spectra. We obtained the number of early-type *WC* and late-type *WN* stars from the luminosity of single *WC* and *WN* stars of the red and blue bump, respectively. The number of *O*-stars was derived from the H_{β} luminosity. The number ratio of WR stars to all massive stars is decreased with a reduction in metallicity, which is in good agreement with evolution population synthesis models.

ВВЕДЕНИЕ

Массивные звезды воздействуют на межзвездную среду своим ионизирующим излучением, обогащают ее продуктами нуклеосинтеза, а также передают кинетическую энергию посредством вспышек сверхновых и сильного звездного ветра [2, 32]. В частности, темп потери вещества звездами Вольфа — Райе (WR) составляет $(10^{-4}—10^{-5})M_{\odot}/\text{год}$, что на порядок выше, чем от *O*-звезд [9]. Массивные звезды также являются возможными предшественниками источников длинных мягких гамма-вспышек [15, 58, 59]. Отдельные WR-звезды наблюдаются только в нашей Галактике [10, 16, 19, 26, 43], Магеллановых Облаках

[6, 12, 14, 21, 36, 39, 48, 49, 52] и других галактиках Местной Группы [3, 11, 17, 22, 40, 44]. Интегральные спектры областей с WR-эмиссией, неразрешимые на отдельные звезды, исследуют в галактиках за пределами Местной Группы [13, 24, 25, 41].

Галактики, в интегральных спектрах которых наблюдаются широкие эмиссии от звезд WR, известны давно, с открытия этих особенностей в спектре голубой компактной галактики He 2-10 [4]. WR-галактикой считается всякая галактика, в спектре которой обнаружены WR-особенности, производимые неразрешимыми на звезды скоплением или скоплениями. Голубая WR-особенность представляет собой бленду эмиссионных линий N V $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0 нм, N III $\lambda\lambda$ 463.4, 464.0 нм, C III λ 465.0 нм, C IV λ 465.8 нм и He II λ 468.6 нм. Красная WR-особенность представляет собой широкую эмиссию C IV λ 580.8 нм. В синей WR-особенности излучают в основном поздние WR-звезды азотной последовательности (WNL) и ранние WR-звезды углеродной последовательности (WCE). Основной вклад в красную WR-особенность дают WCE-звезды. В WR-особенностях также может наблюдаться излучение ранних WR-звезд азотной последовательности (WNE) [47]. WNE-звезды излучают в линиях N V $\lambda\lambda$ 460.5, 462.0 нм, C IV λ 465.8 нм, He II λ 468.6 нм, C IV λ 580.8 нм [51], поэтому их невозможно отличить от других WR-звезд в спектрах галактик с низким спектральным разрешением.

Светимость WNE-звезд в среднем меньше, чем светимость WNL-звезд. Продолжительность жизни WR-звезды в стадии WNE короче, чем в WNL-стадии для всех металличностей и масс звезд-предшественниц [33], поэтому вклад WNE-звезд в голубую и красную WR-особенности ожидается малым.

WR-галактики представляют собой морфологически неоднородный класс галактик, общей характеристикой которых являются активные процессы звездообразования, в результате которых образуются звезды, достаточно массивные для их эволюции через стадию WR, стадию горения гелиевого ядра или более поздние стадии, когда происходит интенсивная потеря массы, наблюдаемая как мощный звездный ветер [23]. К концу прошлого века было известно около 140 WR-галактик [46]. С появлением глубоких обзоров, в частности цифрового обзора SLOAN (SDSS) [60], количество WR-галактик увеличилось. Стало возможным изучение этих галактик в больших однородных выборках. В работе [29] был создан каталог содержаний кислорода для 5000 галактик из первого выпуска SDSS (DR1); у 100 галактик из этого каталога обнаружена WR-эмиссия. На основании выборки из 174 WR-галактик из DR3 SDSS в работе [61] получено уменьшение наклона начальной функции масс с уменьшением металличности. В работе [7] была собрана самая большая на сегодняшний день выборка WR-галактик, в которую входит 570 галактик из DR6 SDSS. На основании этой выборки было показано, что количество WR-звезд очень сильно зависит от металличности и эквивалентной ширины H_{β} , слу-

жащей индикатором возраста вспышки звездообразования. Было показано также, что в галактиках с $W(H_{\beta}) \geq 20$ нм доля галактик с WR-особенностями уменьшается.

При исследовании выборки из 20 галактик с активным звездообразованием в работе [31] использованы наблюдения не только в оптическом диапазоне, но также в гамма-, инфракрасном- и радиодиапазонах. Исследования массивных звезд в галактиках этой выборки показали, что количество WR-звезд относительно всех массивных звезд уменьшается с уменьшением металличности галактики, но при содержании кислорода $12 + \lg(O/H) < 8.2$ величина $N(WR)/N(O + WR)$ не зависит от металличности.

Из моделей эволюционного популяционного синтеза следует, что количество WR-звезд по отношению ко всем массивным звездам и длительность WR-фазы при вспышечном характере звездообразования уменьшается с уменьшением металличности, поэтому количество WR-галактик низкой металличности должно быть небольшим и должно стремиться к нулю при уменьшении металличности [33, 37, 47]. В результате наблюдений WR-галактик [20, 23, 31] найдено хорошее соответствие наблюдений и теоретической модели [47], за исключением WR-галактик с металличностями $Z < (1/20)Z_{\odot}$. При низких металличностях наблюдаемое количество WR-звезд относительно всех массивных звезд в 3-4 раза выше предсказанных теоретически. Частично такое разногласие можно объяснить эволюцией массивных звезд в тесных двойных системах. Эволюция тесных двойных систем при низкой металличности исследована в работе [55], где показано, что наличие тесных двойных систем ведет к продлению WR-фазы. В работе [18] получено увеличение относительного количества $N(WR)/N(O)$ в моделях с эволюцией тесных двойных систем в сравнении с моделями для одиночных звезд. Учет вращения позволяет понизить начальную массу звезд, эволюционирующих через фазу WR-звезды, до $(25—40)M_{\odot}$ [38], тем самым также увеличивая величину $N(WR)/N(O)$.

Цель нашей работы состоит в создании на базе SDSS DR7 надежной однородной выборки WR-галактик и исследовании их массивного звездного населения.

ВЫБОРКА

Для создания выборки WR-галактик использовались спектры седьмого выпуска (DR7) SDSS [1], полученные на 2.5-м телескопе в Нью-Мексико (США). Из созданной Ю. И. Изотовым и Н. Г. Гусевой подвыборки спектров голубых компактных карликовых галактик и областей H II, состоящей из 16 тыс. спектров, были отобраны самые яркие галактики, с потоками в линии H_{β} λ 486.1 нм, превышающими 10^{-20} Дж/(с·см²·нм). Из этой выборки визуально была отобрана 271 галактика, в спектрах которых наблюдаются WR-особенности [7, 45]. Все

WR-галактики выборки находятся на красном смещении $z < 0.2$ и имеют широкую голубую WR-эмиссию вблизи $\lambda \approx 465.0$ нм. Широкая красная эмиссия C IV λ 580.8 нм обнаружена в 137 спектрах (около 50 % выборки).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛИЧНОСТЕЙ

Для определения металличностей WR-галактик применялся прямой T_e -метод в тех случаях, когда в спектре детектировалась авроральная эмиссионная линия [O III] λ 436.3 нм на уровне более 2σ , а также если отношение потоков [O III] λ 495.9/ $H_\beta > 0.7$. При этом наблюдаемые потоки F_0 были скорректированы за экстинкцию. Коэффициент экстинкции $S(H_\beta)$ определялся по бальмеровскому декременту [28]. Скорректированный за экстинкцию поток F_c определялся выражением

$$F_c = F_0 \cdot 10^{C(H_\beta)(f(\lambda)+1)}, \quad (1)$$

где $f(\lambda) = 3.15854 \cdot 10^{-1.02109\lambda} - 1$ — функция покраснения [56], λ — длина волны в микрометрах. В таком случае электронная температура определялась по отношению [O III] λ 436.3/ $(\lambda$ 495.9 + λ 500.7) [28]. T_e -метод использовался для 198 из 271 галактики. Для остальных галактик использовались эмпирические калибровки, основанные на отношениях сильных эмиссионных линий [O III], [N II] и [S II]. Эти калибровки разработаны в работе [42] специально для SDSS-галактик (λ 380.0—920.0 нм), в спектрах которых отсутствует линия [O II] λ 372.7 у близких галактик с красным смещением $z \leq 0.02$. В работе [42] все эмиссионные галактики разделены на три части в зависимости от отношений интенсивности эмиссионных линий азота и серы и/или интенсивности линии азота:

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{NS} &= \\ &= 8.454 - 0.216 \lg R_3 - 0.362 \lg S_2 - 0.101 \lg(N_2/S_2) \end{aligned} \quad (2)$$

при $\lg(N_2) > -0.1$,

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{NS} &= \\ &= 8.456 + 0.082 \lg R_3 + 0.391 \lg N_2 + 0.290 \lg(N_2/S_2) \end{aligned} \quad (3)$$

при $\lg(N_2) < -0.1$ и $\lg(N_2/S_2) > -0.25$,

$$\begin{aligned} 12 + \lg(O/H)_{NS} &= \\ &= 7.881 + 0.929 \lg R_3 + 0.650 \lg N_2 + 0.025 \lg(N_2/S_2) \end{aligned} \quad (4)$$

при $\lg N_2 < -0.1$ и $\lg(N_2/S_2) < -0.25$.

В калибровках использованы следующие обозначения:

$$N_2 = I_{([N II]\lambda 654.8 + \lambda 658.4)} / I_{(H_\beta)}, \quad (5)$$

$$S_2 = I_{([S II]\lambda 671.7 + \lambda 673.1)} / I_{(H_\beta)}, \quad (6)$$

$$R_3 = I_{([O III]\lambda 495.9 + \lambda 500.7)} / I_{(H_\beta)}. \quad (7)$$

Содержание кислорода для WR-галактик находится в пределах $7.17 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.77$. В частности, для галактики I Zw18 мы взяли содержание $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 7.17$ из работы [27] и расстояние 14.6 Мпк из базы данных NED (NASA Extragalactic Database).

Таким образом, созданная нами выборка WR-галактик является достаточно большой однородной выборкой в широком диапазоне металличностей.

КОЛИЧЕСТВО WR- И O-ЗВЕЗД

Количество WR-звезд. Количество WR-звезд оценивают по абсолютной светимости в отдельных линиях WR-особенности или интегрально в пределах широкой WR-особенности, зная абсолютную светимость одной WR-звезды в этой же линии или WR-особенности.

Количество поздних WR-звезд азотной последовательности (WNL) и количество ранних WR-звезд углеродной последовательности (WCE) рассчитывалось из абсолютных светимостей голубой и красной WR-особенностей соответственно и абсолютной светимости отдельной звезды L_{WR}^0 :

$$N_{\text{WR}} = \frac{L_{\text{WR}}}{L_{\text{WR}}^0}, \quad (8)$$

Абсолютная светимость в WR-особенностях была определена по формуле

$$L_{\text{WR}} = F_c 4\pi D^2, \quad (9)$$

где D — расстояния до галактик, взятые из базы данных NED (полученные из закона Хаббла с учетом влияния на лучевую скорость галактик скопления Девы, Большого Аттрактора и сверхскопления Шепли), а F_c — интегральный поток в WR-особенности, скорректированный за экстинкцию. Расстояния до галактик, для которых в NED нет данных, вычислялись по красному смещению z , которое получено по наиболее ярким линиям в SDSS-спектрах, при этом использовалось значение постоянной Хаббла $H_0 = 73.0 \pm 5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Обычно в качестве представителя звезд WCE выбирают звезды WC4, а WNL-звезды представляют звездами WN7. Количество WCE-звезд получено напрямую из «красной» WR-особенности. С «синей» WR-особенностью ситуация сложнее: из нее необходимо вычесть вклад WCE-звезд, чтобы получить количество WNL-звезд. Для этого вводится коэффициент

$$k = \frac{L_{\text{WC4}}(\lambda 465.8)}{L_{\text{WC4}}(\lambda 580.8)}, \quad (10)$$

который позволяет рассчитать поток WCE-звезд в синей широкой эмиссии из потока WCE-звезд в красной широкой эмиссии. Затем светимость WCE звезд вычитается из общей светимости голубой WR-особенности. Значение коэффициента k определено недостаточно хо-

рошо. В работе [50] приводится значение $k = 1.52$, позже в работе [47] получено значение $k = 1.71 \pm 0.53$, которое в пределах ошибок согласуется с ним. Последнюю оценку мы и использовали для определения вклада WCE-звезд в синюю WR-особенность.

Светимость одиночных WR-звезд в эмиссионных линиях также известна с невысокой точностью. Кроме того, она зависит от металличности. В работе [47] получена оценка светимости одиночной звезды в красной WR-особенности $L(\text{C IV } \lambda 580.8) = 3.0 \cdot 10^{29} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$. Значение светимости одиночной WNL-звезды в голубой WR-особенности для металличностей $Z < Z_{\odot}$ принято равным $2.0 \cdot 10^{29} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$, а для металличностей $Z \geq Z_{\odot} - 2.6 \cdot 10^{29} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$, где $Z_{\odot} = 8.66$ [5].

В работе [12] сравнивались WR-звезды разных типов, IZw18 и IC1613, в Большом и Малом Магеллановых Облаках и показано, что при низких металличностях ($Z_{\odot}/50$) светимости звезд в линиях C IV $\lambda 580.8$ и He II $\lambda 468.6$ уменьшаются в 3—6 и 7—20 раз соответственно по сравнению с солнечными металличностями. В работе [31] по наблюдаемым светимостям в этих линиях при металличностях Z_{\odot} и $Z_{\odot}/50$, которым соответствуют содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 6.96$ и 8.66 , получена линейная зависимость светимости одиночной WR-звезды от металличности:

$$L_{\text{WNL}}(\text{He II } \lambda 468.6) = (-5.430 + 0.812x) \cdot 10^{29} \text{ Дж/с}, \quad (11)$$

$$L_{\text{WCE}}(\text{C IV } \lambda 580.8) = (-8.198 + 1.235x) \cdot 10^{29} \text{ Дж/с}, \quad (12)$$

$$x = 12 + \lg(\text{O} / \text{H}). \quad (13)$$

Для получения количества WN- и WC-звезд в галактиках нашей выборки мы использовали оба варианта светимостей одиночных WNL- и WCE-звезд: 1) используя светимости одиночных WNL- и WCE-звезд из работы [47] для определения количества WN и WC звезд из интегральных светимостей $L_{\text{WNL}}(\lambda 465.0)$ и $L_{\text{WCE}}(\lambda 580.8)$ голубой и красной WR-особенностей соответственно для всех галактик выборки; 2) используя светимости одиночных WNL- и WCE-звезд, полученные из уравнений [31], для галактик, в которых можно отдельно измерить широкую эмиссионную линию He II $\lambda 468.6$ нм.

Количество O-звезд. Количество O-звезд оценивают по потоку в линии H_{β} [23, 47] после учета вклада в нее WR-звезд. Из полных потоков F_0 в интегральных WR-особенностях были вычтены потоки узких небулярных линий [Fe III] $\lambda 455.9$ нм, [Fe III] $\lambda 466.9$ нм, He II $\lambda 468.6$ нм, [Fe III] $\lambda 470.2$ нм, [Ar IV] $\lambda 471.1$ нм, He I $\lambda 471.4$ нм ([7]). Затем абсолютные значения потоков корректировались за экстинкцию.

Оценить количество O-звезд можно по числу ионизирующих фотонов, необходимых для получения наблюдаемого рекомбинационного спектра. Согласно работе [47] светимость в линии H_{β} , скорректированная за межзвездное поглощение и эффект апертуры (случай В «стандартной» фотоионизационной модели), связана с числом ионизирующих фотонов зависимостью

$$L(H_{\beta}) = 4.76 \cdot 10^{-13} Q_0. \quad (14)$$

В качестве «реперной» звезды обычно используют звезду O7V. Поток ионизирующих фотонов, излучаемых звездой O7V в лаймановском континууме, принят согласно [30] равным $Q_0^{O7V} = 1.0 \cdot 10^{49} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, светимость одной звезды O7V в линии H_{β} будет равна $L_{O7V}(H_{\beta}) = 4.76 \cdot 10^{36} \text{ с}^{-1}$. Тогда количество O-звезд определяется из абсолютной светимости в линии H_{β} : $N_{O7V} = L(H_{\beta})/L_{O7V}(H_{\beta})$. Полученное значение должно быть скорректировано за вклад в ионизирующий поток O-звезд разных подтипов. Для этого был введен параметр η_0 , равный отношению количества звезд O7V к количеству всех звезд OV [53, 54]. Эта величина зависит от начальной функции масс (НФМ) для массивных звезд и от времени, прошедшего с начала вспышки звездообразования. В работе [47] рассчитана эволюция $\eta_0(t)$ с момента начала вспышки звездообразования для пяти разных металличностей. Мы использовали эти расчеты для всех галактик нашей выборки. Возраст вспышки звездообразования определялся по эквивалентной ширине эмиссионной линии H_{β} [47]. Для расчета $\eta_0(t)$ были использованы следующие параметры НФМ: $\alpha = 2.35$, $0.8M_{\odot} \leq M \leq 120M_{\odot}$. При определении количества O-звезд необходимо также учитывать вклад WR-звезд в ионизирующий поток. Согласно [45] средний ионизирующий поток от одной WR-звезды примерно равен ионизирующему потоку от одной звезды O7V, значит $Q_0^{WR} = Q_0^{O7V} = 10^{49} \text{ с}^{-1}$. В результате количество O-звезд определялось по формуле

$$N(O) = \frac{Q_0 - Q_0^{WR} N_{WR}}{\eta_0(t) Q_0^{O7V}}, \quad (15)$$

где Q_0 — суммарный поток ионизирующего излучения от всех звезд.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С МОДЕЛЯМИ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОПУЛЯЦИОННОГО СИНТЕЗА

Зависимость относительного количества WR-звезд от металличности. На рис. 1, а представлено количество WR-звезд относительно всех массивных звезд для галактик из нашей выборки в зависимости от содержания кислорода галактики (точки — количество WR-звезд определено с использованием светимостей одиночных WR-звезд из работы [47], светлые квадратики — количество WR-звезд определено с использованием светимостей одиночных WR-звезд [12, 31]. Для сравнения кружками нанесены данные из работы [23], где была использована та же методика для определения количества WR-звезд и массивных звезд. На рис. 1, а также показаны модельные расчеты для максимально возможных значений $N(WR)/N(WR+O)$ для мгновенной вспышки звездообразования с разным наклоном начальной функции масс из [47], а также значения из [38] для звездообразования с постоянным темпом с учетом и без учета вращения WR-звезд.

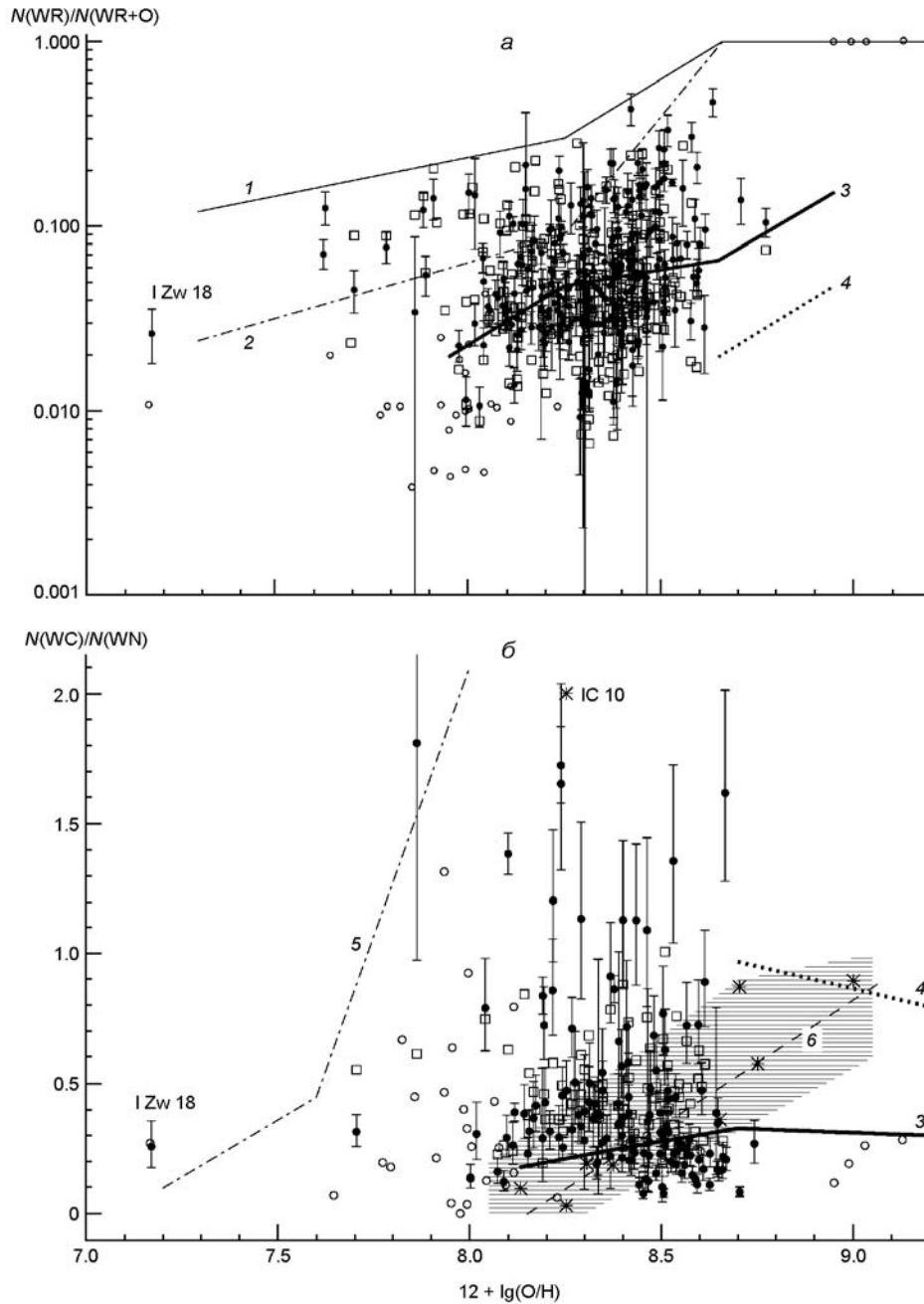


Рис. 1. Зависимости отношений $N(\text{WR})/N(\text{WR}+\text{O})$ (а) и $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ (б) от содержания кислорода. Точки, квадратики, кружки и звездочки — по данным [47], [12, 31], [23] и [35] соответственно (см текст). Линии 1 и 2 — модельные расчеты [47] для мгновенной вспышки звездообразования с наклоном начальной функции масс $\alpha = 1.0$ и 2.35 соответственно, 3 и 4 — модельные расчеты [38] для звездообразования с постоянным темпом с учетом и без учета вращения WR-звезд соответственно; 5 — максимально возможные величины, предсказанные моделью [47]; 6 — эмпирическая зависимость, полученная усреднением значений для WR-галактик из Местной группы галактик [35], которая отображает протяженное звездообразование с постоянным темпом. Заштрихованной областью показано положение WR-галактик из работы [35]

Подавляющее большинство галактик нашей выборки имеют содержание кислорода в интервале от 7.9 до 8.7, а большинство галактик выборки [23] — от 7.7 до 8.1, поэтому полученные нами новые данные хорошо дополняют выборку [23]. Несмотря на большой разброс значений, виден общий тренд уменьшения $N(WR)/N(WR+O)$ с уменьшением металличности в согласии с моделями эволюционного популяционного синтеза. Модельные значения максимально возможных $N(WR)/N(WR+O)$ в случае мгновенной вспышки звездообразования (тонкая сплошная и штрих-пунктирная линии на рис. 1) хорошо описывают верхний предел наблюдаемого распределения. Все галактики расположены ниже этих зависимостей, если принять во внимание возможное отклонение наклона НФМ от НФМ Солпитера с $\alpha = 2.35$. Большой разброс точек на рис. 1 может быть объяснен короткой шкалой времени жизни массивных звезд на стадии WR (несколько миллионов лет). При этом мы можем случайным образом наблюдать области, находящиеся на разных стадиях эволюции вспышки звездообразования. Дополнительный разброс обусловлен определенной продолжительностью вспышки звездообразования. Модельные расчеты значений $N(WR)/N(WR+O)$ для звездообразования с постоянным темпом и с учетом вращения массивных звезд (сплошная жирная линия) описывают наблюдения галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(O/H) \geq 8.0$, что, однако, не означает непрерывность звездообразования. В голубых компактных карликовых галактиках часто наблюдают несколько областей звездообразования с определенным разбросом возрастов, что дает квази-непрерывное звездообразование.

Зависимость $N(WC)/N(WN)$ от металличности. Поскольку WC-звезды — сильно проэволюционировавшие потомки массивных звезд и только самые массивные из них после WN-стадии становятся WC-звездами, отношение WC/WN очень чувствительно к выбору сценария эволюции и параметров вспышки звездообразования. Здесь под звездами азотной последовательности подразумевают звезды WNL, а под звездами углеродной последовательности — звезды WCE. На рис. 2 представлена диаграмма зависимости $N(WC)/N(WN)$ от содержания кислорода $12 + \lg(O/H)$. Точки на диаграмме соответствуют отношению $N(WC)/N(WN)$, для которого количество WC- и WN-звезд было определено с использованием светимостей одиночных WR-звезд из работы [47]; светлые квадратики — отношению $N(WC)/N(WN)$, для которого количество WC- и WN-звезд было определено с использованием светимостей одиночных WR-звезд [12, 31]. Дополнительно кружками нанесены данные из работы [23], звездочками — данные [35]. Также нанесены теоретические кривые моделей популяционного синтеза: тонкая штрих-пунктирная линия соответствует максимально возможным величинам $N(WC)/N(WN)$, предсказанным [47] для мгновенной вспышки звездообразования; жирные сплошная и пунктирная линии — расчеты [38] для звездообразования с постоянным темпом с учетом вращения и без учета вращения соот-

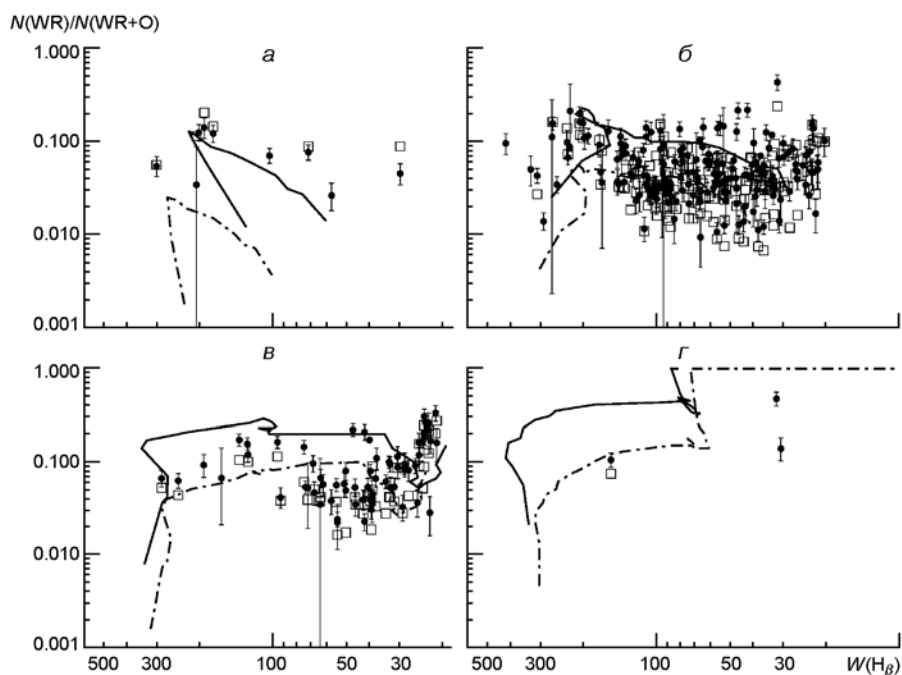


Рис. 2. Доля WR-звезд среди всех массивных звезд для WR-галактик нашей выборки, разбитой на четыре группы по значениям $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$: *a* — менее 7.93, *б* — от 7.93 до 8.43, *в* — от 8.43 до 8.63, *г* — более 8.63. Сплошная и штрих-пунктирная линии — модельные расчеты [47] для $\alpha = 1.0$ и 2.35 соответственно. Остальные обозначения см. на рис. 1

ответственно; тонкая штриховая линия — эмпирическая линейная зависимость $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ от металличности, полученная в работе [35] путем усреднения данных для большого количества индивидуально наблюдаемых WR-звезд в областях звездообразования Местной Группы галактик (исключая галактики IC 10 и Млечный Путь). Последнюю зависимость, показанную штриховой линией на рис. 2, можно рассматривать как эмпирическую для звездообразования с постоянным темпом.

Отметим, что значение $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ для I Zw 18 в нашей работе 0.25 ± 0.05 согласуется с оценкой 0.26 ± 0.04 [23].

Галактики нашей выборки с металличностями $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 8.0 \dots 8.2$ хорошо описываются моделями с мгновенной вспышкой звездообразования. Большая часть галактик нашей выборки, расположенная в области содержаний кислорода $8.2 \leq 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 8.5$, хорошо описывается моделями продолжительного звездообразования с постоянным темпом (жирные линии), однако это связано с тем, что достаточно большое количество WR-галактик из SDSS находится на расстоянии, при котором несколько областей звездообразования (несколько скоплений) суммируются в интегральном наблюдательном спектре, тем самым имитируя квазинепрерывное звездообразование. В каждой же конкретной области звездообразования (или скопления) звездообразование носит вспышечный характер.

Часть галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 8.6$ из нашей выборки, а также из выборки [23] лежит намного ниже эмпирической зависимости [35] и ниже модельных расчетов [38] для звездообразования с постоянным темпом и с учетом вращения звезд. Такие низкие значения отношения $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ в работе [38] объясняются увеличенной продолжительностью WN-фазы, поскольку массивная вращающаяся звезда переходит в режим WR уже на главной последовательности, имея при этом большую богатую водородом оболочку. При этом звезда минует стадию LBV (голубой переменной звезды высокой светимости). С другой стороны, при вспышечном сценарии эволюции в галактиках с большой металличностью и низкими эквивалентными ширинами H_β , т. е. на поздних стадиях эпизода звездообразования, также возможны низкие значения отношения $N(\text{WC})/N(\text{WN})$, когда WR-население представлено в основном WN-звездами, а количество WC-звезд резко снижается до нуля [47]. Для больших металличностей это происходит вследствие понижения нижней границы массы звезды, проходящей стадию WR-звезды. Например, при солнечной металличности звезды с массами $20M_\odot < M < 40M_\odot$ не достигают WC-стадии, заканчивая стадию горения гелия, все еще оставаясь WN-звездами.

Зависимость относительного количества WR-звезд от возраста вспышки звездообразования. На рис. 2 показана зависимость относительного количества $N(\text{WR})/N(\text{WR} + \text{O})$ от эквивалентной ширины линии H_β . Эквивалентную ширину линии H_β используют как индикатор возраста вспышки звездообразования, поскольку ионизирующий поток уменьшается с возрастом вспышки звездообразования [47]. Для сравнения с модельными расчетами наши данные были разделены на четыре группы в зависимости от содержания кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$. Мы сравнивали данные нашей выборки с моделями эволюционного популяционного синтеза из работы [47] для металличностей $Z = 0.001, 0.004, 0.008, 0.020$ и наклона начальной функции масс $\alpha = 1.0$ и 2.35 . Для околосолнечной металличности статистика настолько мала (3 галактики), что невозможно сделать какие-либо определенные выводы (рис. 2, ε). Для галактик с металличностями $Z = (1/2.5 \dots 1/5)Z_\odot$ найдено согласие наблюдательных данных с эволюционными популяционными моделями в пределах ошибок наблюдений, определений возраста вспышки звездообразования (наличия нескольких вспышек звездообразования в галактике), а также модельных предположений и аппроксимаций. Наибольшее расхождение с моделями из работы [47] получено для галактик нашей выборки с минимальной металличностью $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 7.93$. Несмотря на малую статистику наших данных все галактики на рис. 2, a лежат в области выше модельных расчетов. Таким образом, за исключением самых низких металличностей ($12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 7.93$) модель [47] достаточно хорошо описывает нашу выборку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании цифрового обзора неба SLOAN была создана выборка из 271 WR-галактики. Для каждого спектра, в котором была детектирована авроральная линия [O III] λ 436.3 нм, содержание кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$ определено с использованием T_e -метода (70 % выборки). Для всех остальных спектров содержание кислорода определено с использованием эмпирических калибровок, основанных на сильных эмиссионных линиях [O III], [N II] и [S II]. Для каждой галактики были получены количества WNL- и WCE-звезд из голубых и красных WR-особенностей (λ 465.0 и 580.8 нм), а также количество O-звезд из абсолютных светимостей в линии H_β . Полученные данные мы сравнили с моделями популяционного синтеза [38, 47]. На большом статистическом материале (271 галактика нашей выборки, 39 галактик из [23]) подтверждено уменьшение количества WR-звезд по отношению ко всем массивным звездам с уменьшением металличности. Теоретические предсказания [47] хорошо описывают верхний предел наблюдаемого распределения $N(\text{WR})/N(\text{WR}+\text{O})$ в зависимости от металличности при вспышечном сценарии эволюции. Большая часть распределения $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ в зависимости от металличности хорошо описывается моделями с продолжительным звездообразованием [38]. Это связано с тем, что в большинстве галактик SDSS в щель спектрографа попадает несколько областей звездообразования с определенным разбросом возрастов, что имитирует квазипродолжительное звездообразование. В каждой отдельной области звездообразование носит вспышечный характер. Модельные расчеты [47] хорошо описывают распределение отношения $N(\text{WC})/N(\text{WN})$ для галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) \leq 8.0 \dots 8.2$. Распределение $N(\text{WR})/N(\text{WR}+\text{O})$ в зависимости от возраста вспышки звездообразования хорошо описывается моделями [47] для галактик с содержанием кислорода $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) > 7.93$.

1. *Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., et al.* The seventh data release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.—**182**.—P. 543—558.
2. *Abbott D. C.* The theory of radiatively driven stellar winds. II. The line acceleration // *Astrophys. J.*—1982.—**259**.—P. 282—301.
3. *Abbott J. B., Crowther P. A., Drissen L., et al.* Wolf-Rayet stars in M33 - I. Optical spectroscopy using CFHT-MOS // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**350**, N 2.—P. 552—564.
4. *Allen D. A., Wright A. E., Goss W. M.* The dwarf emission galaxy He2-10 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1976.—**177**.—P. 91—97.
5. *Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J.* The solar chemical composition // *ASP Conf. Ser.*—2005.—**335**.—P. 25.—(Cosmic Abundances as Records of Stellar Evolution and Nucleosynthesis in honor of David L. Lambert, Proceedings of a symposium held 17—19 June, 2004 in Austin, Texas / Ed. by T. G. Barnes III, F. N. Bash. — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).

6. *Bartzakos P., Moffat A. F. J., Niemela V. S.* Magellanic Cloud WC/WO Wolf-Rayet stars. I. Binary frequency and Roche lobe overflow formation // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—**324**, N 1.—P. 18—32.
7. *Brinchmann J., Kunth, D., Durret F.* Galaxies with Wolf-Rayet signatures in the lo-redshift Universe. A survey using the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**485**, N3.—P. 657—677.
8. *Conti P. S.* Wolf-Rayet galaxies — an introduction and a catalog // *Astrophys. J.*—1991.—**377**.—P. 115—125.
9. *Crowther P. A.* Physical properties of Wolf-Rayet stars // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2007.—**45**.—P. 177—219.
10. *Crowther P. A., Bohannan B.* The distinction between OIafpe and WNLha stars. A spectral analysis of HD 151804, HD 152408 and HDE 313846 // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**317**.—P. 532—547.
11. *Crowther P. A., Drissen L., Abbott J. B., et al.* Gemini observations of Wolf-Rayet stars in the Local Group starburst galaxy IC 10 // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**404**.—P. 483—493.
12. *Crowther P. A., Hadfield L. J.* Reduced Wolf-Rayet line luminosities at low metallicity // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**449**, N 2.—P. 711—722.
13. *Crowther P. A., Hadfield L. J., Schild H., Schmutz W.* An exceptional population of late-type WC stars in the metal-rich spiral galaxy M 83 // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**419**.—P. L17—L20.
14. *Crowther P. A., Smith L. J.* Fundamental parameters of Wolf-Rayet stars. VI. Large Magellanic Cloud WNL stars // *Astron. and Astrophys.*—1997.—320.—P. 500—524.
15. *Dessart L., Hillier D. J., Livne Eli Yoon, et al.* Core-collapse explosions of Wolf-Rayet stars and the connection to Type IIb/Ib/Ic supernovae // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**414**, N4.—P. 2985—3005.
16. *Drew J. E., Barlow M. J., Unruh Y. C., et al.* Discovery of a WO star in the Scutum-Crux arm of the inner Galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**351**, N1.—P. 206—214.
17. *Drissen L., Crowther P., Úbeda L., Martin P.* Wolf-Rayet stars in M33. II. Optical spectroscopy of emission-line stars in giant HII regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**389**, N 3.—P. 1033—1040.
18. *Eldridge J. J., Izzard R. G., Tout C. A.* The effect of massive binaries on stellar populations and supernova progenitors // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**384**, N 3.—P. 1109—1118.
19. *Esteban C., Peimbert M.* Abundance Gradients in the Galaxy // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Serie de Conferencias*, Vol. 3, The Fifth Mexico-Texas Conference on Astrophysics: Gaseous Nebulae and Star Formation, Tequesquitengo, Mor., Mexico, April 3-5.—1995.—P. 133.
20. *Fernandes I. F., de Carvalho R., Contini T., Gal R. R.* Massive star populations in Wolf-Rayet galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**355**, N 3.—P. 728—746.
21. *Foellmi C., Moffat A. F. J., Guerrero M. A.* Wolf-Rayet binaries in the Magellanic Clouds and implications for massive-star evolution. II. Large Magellanic Cloud // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**338**, N 4.—P. 1025—1056.
22. *Groh J. H., Damineli A., Teodoro M., Barbosa C. L.* Detection of additional Wolf-Rayet stars in the starburst cluster Westerlund 1 with SOAR // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**457**, N 2.—P. 591—594.
23. *Guseva N. G., Izotov Y. I., Thuan T. X.* A spectroscopic study of a large sample of Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—2000.—**531**, N 2.—P. 776—803.

24. *Hadfield L. J., Crowther P. A.* A survey of the Wolf-Rayet population of the barred, spiral galaxy NGC 1313 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**, N 1.—P. 418—432.
25. *Hadfield L. J., Crowther P. A., Schild H., Schmutz W.* A spectroscopic search for the non-nuclear Wolf-Rayet population of the metal-rich spiral galaxy M 83 // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**439**, N 1.—P. 265—277.
26. *Hadfield L. J., van Dyk S. D., Morris P. W., et al.* Searching for hidden Wolf-Rayet stars in the Galactic plane — 15 new Wolf-Rayet stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**376**, N 1.—P. 248—262.
27. *Izotov Y. I., Chaffee F. H., Foltz C. B., et al.* Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I. ZW 18 and SBS 0335-052 // *Astrophys. J.*—1999.—**527**, N 2.—P. 757—777.
28. *Izotov Y. I., Stasińska 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**.—P. 955—970.
29. *Kniazev A. Y., Pustilnik S. A., Grebel E. K., et al.* Strong emission line H II galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. I. Catalog of DR1 objects with oxygen abundances from T_e measurements // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2004.—**153**, N 2.—P. 429—445.
30. *Leitherer C.* Observational tests for the evolution of massive stars in nearby galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1990.—**73**.—P. 1—20.
31. *López-Sánchez A. R., Esteban C.* Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies. III. Analysis of the O and WR populations // *Astron. and Astrophys.*—2010.—**516**.—id. A104.
32. *Maeder A.* The most massive stars evolving to red supergiants - Evolution with mass loss, WR stars as post-red supergiants and pre-supernovae // *Astron. and Astrophys.*—1981.—**99**.—P. 97—107.
33. *Maeder A., Meynet G.* New models of Wolf-Rayet stars and comparison with data in galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1994.—**287**.—P. 803—816.
34. *Massey P., Conti P.* Spectroscopic studies of Wolf-Rayet stars with absorption lines. II. The WN8 standard star HD 177230 // *Astrophys. J.*—1980.—**242**.—P. 638—645.
35. *Massey P., Johnson O.* Evolved massive stars in the Local Group. II. A new survey for Wolf-Rayet stars in M33 and its implications for massive star evolution: evidence of the “Conti scenario” in action // *Astrophys. J.*—1998.—**505**.—P. 793—827.
36. *Massey P., Olsen K. A. G., Parker J. Wm.* The discovery of a 12th Wolf-Rayet star in the Small Magellanic Cloud // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—2003.—**115**, N 813.—P. 1265—1268.
37. *Meynet G.* Wolf-Rayet population syntheses for starburst galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**298**.—P. 767.
38. *Meynet G., Maeder A.* Stellar evolution with rotation. XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**429**.—P. 581—59.
39. *Nazé Y., Rauw G., Manfroid J., et al.* WR bubbles and He II emission // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**408**.—P. 171—186.
40. *Neugent K. F., Massey P.* The Wolf-Rayet content of M33 // *Astrophys. J.*—2011.—**733**, N 2.—id.A123.
41. *O’Halloran B., McBreen B., Metcalfe L., et al.* ISO observations of the Wolf-Rayet galaxies NGC 5430, NGC 6764, Mrk 309 and VII Zw 19 // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**439**, N 2.—P. 539—550.
42. *Pilyugin L. S., Mattsson L.* Abundance determination in HII regions from spectra without the [O II]3727+3729 line // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**412**, N 2.—P. 1145—1150.

43. *Raassen A. J. J., van der Hucht K. A., Mewe R., et al.* XMM-Newton high-resolution X-ray spectroscopy of the Wolf-Rayet object WR 25 in the Carina OB1 association // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**402**.—P. 653—666.
44. *Royer P., Smartt S. J., Manfroid J., Vreux J.-M.* The WR content of IC10 — first detection of WC9 stars in a low metallicity environment? // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**366**.—P. L1—L4.
45. *Schaerer D., Contini T., Kunth D.* Populations of WC and WN stars in Wolf-Rayet galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**341**.—P. 399—417.
46. *Schaerer D., Contini T., Pindao M.* New catalogue of Wolf-Rayet galaxies and high-excitation extra-galactic HII regions // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**136**, N 1.—P. 35—52.
47. *Schaerer D., Vacca W. D.* New models for Wolf-Rayet and O populations in young starbursts // *Astrophys. J.*—1998.—**497**, N 2.—P. 618—644.
48. *Schnurr O., Chené A.-N., Casoli J., et al.* VLT/SINFONI time-resolved spectroscopy of the central, luminous, H-rich WN stars of R136 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**397**, N 4.—P. 2049—2056.
49. *Schnurr O., Moffat A. F. J., St-Louis N., et al.* A spectroscopic survey of WNL stars in the Large Magellanic Cloud: general properties and binary status // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—**389**, N 2.—P. 806—828.
50. *Smith L. F.* Wolf-Rayet populations in dwarf galaxies. // *IAU Symposium N 143: Wolf-Rayet stars and interrelations with other massive stars in galaxies.*—1991.—P. 601—612.
51. *Smith L. F., Shara M. M., Moffat A. F. J.* A three-dimensional classification for WN stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**281**, N 1.—P. 163—191.
52. *Stock D. J., Barlow M. J., Wesson R.* The spectroscopic properties of the nebulae around seven Galactic and LMC Wolf-Rayet stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2011.—**418**, N 4.—P. 2532—2547.
53. *Vacca W. D.* On the determination of the number of O stars in H II regions and starburst galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**421**, N 1.—P. 140—152.
54. *Vacca W. D., Conti P. S.* Optical spectrophotometry of Wolf-Rayet galaxies // *Astrophys. J.*—1992.—**401**, N 2.—P. 543—558.
55. *Van Bever J., Vanbeveren D.* The effects of binaries on the evolution of Wolf-Rayet type spectral features in starbursts // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**400**.—P. 63—79.
56. *Whitford A. E.* The law of interstellar reddening // *Astron. J.*—1958.—**63**.—P. 201—207.
57. *Woodward P. R.* Theoretical models of star formation // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1978.—**16**.—P. 555—584.
58. *Woosley S. E., Bloom J. S.* The supernova gamma-ray burst connection // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—2006.—**44**.—P. 507—556.
59. *Woosley S. E., Heger A.* The progenitor stars of gamma-ray bursts // *Astrophys. J.*—2006.—**637**.—P. 914—921.
60. *York D. G., Adelman J., Anderson J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: technical summary // *Astrophys. J.*—2000.—**120**, N 3.—P. 1579—1587.
61. *Zhang Wei, Kong Xu, Li Cheng, et al.* Wolf-Rayet galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: The metallicity dependence of the initial mass function // *Astrophys. J.*—2007.—**655**, N 2.—P. 851—862.

Статья поступила в редакцию 13.07.12