

УДК 524.74/77:524.78-75

ГАЗ И ПЫЛЬ В VCD ГАЛАКТИКЕ VII ZW 403 (UGC 6456)

© 2011 О. В. Егоров*, Т. А. Лозинская**

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 апреля 2011 г.; принята в печать 26 апреля 2011 г.

По результатам проведенных нами ранее спектральных наблюдений на 6-метровом телескопе САО РАН уточнены оценки металличности в комплексах ионизованного газа галактики VII Zw 403. По архивным данным ИК-наблюдений на Космическом телескопе “Spitzer” проведен поиск возможной корреляции распределения массовой доли молекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) с распределением ионизованного и нейтрального водорода и с металличностью газа в HII-комплексах галактики.

Ключевые слова: галактики, группы и скопления галактик, межгалактический газ

1. ВВЕДЕНИЕ

Детальное исследование карликовых галактик важно для понимания происхождения и эволюции галактик. Согласно современным представлениям, они играют роль “строительных блоков”, из которых образуются более массивные системы [1, 2]. Особый интерес представляют близкие голубые компактные карликовые галактики (VCD), расстояния до которых позволяют провести детальные исследования их структуры, кинематики и спектра свечения.

Настоящая работа продолжает исследования комплексов ионизованного газа, связанных с последней вспышкой звездообразования в VCD-галактике VII Zw 403 (UGC 6456), представленные в статьях Архиповой и др. [3] и Лозинской и др. [4].

VII Zw 403 — одна из ближайших VCD-галактик ($D = 4.5$ Мпк), в которой выявлено несколько эпизодов звездообразования разной интенсивности [5, 6]. Согласно Линдс и др. [5], самая мощная вспышка звездообразования произошла 600–800 млн. лет назад, звезды этого поколения преобладают в галактике. Возраст последней, более слабой вспышки, составляет 4–10 млн. лет. Лооз и Туан [7] отнесли VII Zw 403 к наиболее многочисленному классу VCD-галактик iE, которые характеризуются нерегулярной яркой областью звездообразования вблизи центра протяженного эллиптического гало, состоящего из старых звезд.

Фотометрия звездного населения VII Zw 403 в ближнем ИК-диапазоне подтверждает, что область современного звездообразования окружена протяженным “старым” звездным гало [8]. Последняя вспышка звездообразования охватила центральную область галактики размером около 1 кпк в направлении гигантского облака нейтрального водорода с наиболее высокой лучевой плотностью, окруженного протяженным HII-гало размером $3.6' \times 2.9'$ (4.7×3.8 кпк) [9, 10]. Наблюдаются несколько очагов этого последнего эпизода звездообразования: самые молодые массивные звезды образуют компактные ОВ ассоциации №1–6 (для единообразия здесь приняты обозначения ассоциаций и HII-комплексов согласно [5]). Ионизованный газ сосредоточен в той же центральной области; с ассоциациями связаны яркие HII-комплексы размером 80–150 пк, погруженные в диффузный ионизованный газ, излучающий в H_{α} [5, 11, 12]. Наблюдения с HST обнаружили оболочечную структуру ряда ярких HII-комплексов; Линдс и др. [5] нашли скорость расширения оболочек 50–70 км/с, Лозинская и др. [4] эти результаты не подтвердили. Силич и др. [13] выявили в H_{α} -излучении диффузного газа следы слабого гигантского кольца размером $D \simeq 500$ пк.

В нашей работе [4] исследованы структура и кинематика ионизованного газа в VII Zw 403. Кроме известных ранее ярких HII-комплексов и следов слабого гигантского кольца, обнаружено много новых слабых диффузных и дуговых образований, выявлена “тонкая структура” гигантского кольца. Мы не нашли свидетельств расширения оболочек.

*E-mail: morzedon@gmail.com

**E-mail: lozinsk36@mail.ru

чечных комплексов со скоростью 50–70 км/с, о которой сообщалось в работе [5], но выявили явное уширение линии (FWHM до порядка 60–120 км/с) в области слабой диффузной эмиссии за пределами ярких НII–комплексов. В наиболее яркой оболочке № 1 вокруг самой богатой и молодой ассоциации № 1 наблюдаются слабые детали в крыльях линии [OIII] на скоростях до –200...–300 км/с, в крыльях линии H_{α} — до –350 км/с и до 550–600 км/с от центра линии [4]. Такие скорости в VII Zw 403 были обнаружены впервые и являются однозначным свидетельством ускорения газа на фронте ударной волны. Кинематический возраст ярких оболочек, соответствующий нашим оценкам их средней скорости расширения (20 км/с или ниже), составляет не менее 2–4 млн. лет, что хорошо согласуется с возрастом центральных ОВ ассоциаций, найденных в работе [5]. Слабые протяженные волокнистые и диффузные области ионизованного газа, которые наблюдаются во всей центральной части галактики, а также гигантское кольцо НII могут быть сопоставлены с более старым звездным населением последней вспышки звездообразования (возраст 10 млн. лет согласно [5]).

В работе [3] по наблюдениям VII Zw 403 на 6-м телескопе САО РАН с панорамным мультиспектральным волоконным спектрографом (MPFS) и с фокальным редуктором SCORPIO в режиме щелевого спектрографа мы провели анализ спектра свечения газа и определили относительное содержание кислорода в комплексах №1, 3, 4 и содержание азота и серы во всех НII–комплексах. Насколько нам известно, эти оценки металличности в индивидуальных комплексах ионизованного газа VII Zw 403 были первыми, все опубликованные ранее значения являются средними по галактике.

Запуск телескопа “Spitzer” открыл новые возможности для изучения пылевой составляющей межзвездной среды галактик. Особый интерес представляют полициклические ароматические углеводороды (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH) — макромолекулы, состоящие из десятков и сотен атомов, главным образом, углерода и водорода [14]. Механизм образования и разрушения ПАУ окончательно не установлен; обсуждаются такие возможности, как образование их в атмосферах богатых углеродом AGB и post-AGB звезд или в плотных молекулярных облаках, а также разрушение ПАУ ударными волнами или УФ-излучением горячих звезд (см., например, работу Сандстром и др. [15] и ссылки в ней).

Для выяснения механизмов образования и разрушения ПАУ и их связи с физическими пара-

метрами и металличностью газа галактик в работе [15] по наблюдениям “Spitzer” исследована пылевая составляющая ближайшей dIrr галактики ММО. Проведенный нами детальный анализ ИК-излучения dIrr галактики IC 10 показал, что результаты наблюдений лучше согласуются с предположением об образовании ПАУ в молекулярных облаках и разрушении под действием УФ-излучения, чем с их образованием в атмосферах богатых углеродом звезд [16]. Для выяснения природы ПАУ может оказаться важным давно обнаруженный дефицит излучения этих молекул в галактиках с низкой металличностью. Согласно Дрейн и др. [17], этот дефицит связан именно с недостатком самих ПАУ, а не с менее эффективным возбуждением ИК-переходов в них. В нашей работе [16] по наблюдениям областей НII в галактике IC 10 впервые была заподозрена корреляция между массовой долей пыли, заключенной в ПАУ (q_{PAU}), и металличностью газа на уровне отдельных областей НII. Однако точность найденной зависимости оказалась недостаточной, чтобы считать эту корреляцию достоверной, и ее проверка по наблюдениям других галактик представляется интересной задачей.

В настоящей работе по результатам проведенных ранее наблюдений VII Zw 403 на 6-м телескопе САО РАН [3, 4] уточнены значения содержания кислорода, азота и серы в отдельных НII–комплексах. По архивным данным наблюдений телескопа “Spitzer” рассмотрено излучение галактики в ИК-диапазоне с целью анализа распределения ПАУ и поиска возможной корреляции q_{PAU} с яркостью излучения ионизованного и нейтрального газа, а также с металличностью НII–комплексов.

В последующих разделах описаны использованные наблюдения, представлены полученные результаты, в Заключение суммируются основные выводы работы.

Расстояние до VII Zw 403 принято равным $D = 4.5$ Мпк [5, 6], что соответствует угловому масштабу 22 пк/”.

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения VII Zw 403 проведены на 6-метровом телескопе САО РАН с фокальным редуктором SCORPIO¹ [18] в режиме щелевого спектрографа, а также с панорамным мультиспектральным волоконным спектрографом MPFS.

¹<http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>

Обе серии наблюдений, проведенные в 2003 и в 2004 г.г., детально описаны в нашей работе [3], поэтому здесь лишь кратко суммированы основные данные.

При наблюдениях со щелевым спектрографом длина щели составляла около $6'$, ширина — $1''$, масштаб вдоль щели — $0.36''/\text{пиксель}$. Были получены две спектрограммы, локализация щели спектрографа показана на Рис. 1. Разрез 1 прошел через комплексы №2, 3, 4, разрез 2 — через комплексы № 1 и 5. Для двух положений щели получены спектры в диапазонах $6270\text{--}7300 \text{ \AA}$ и $4800\text{--}5600 \text{ \AA}$, качество изображения составляло около $2''$, длительность экспозиции менялась в пределах от 800 до 1800 с. Обработка данных проводилась стандартным методом, для привязки к энергетической шкале использовался спектрофотометрический стандарт AGK+81°266. Интенсивности эмиссионных линий определялись с помощью однокомпонентной гаусс-аппроксимации профилей.

При наблюдениях с MPFS² [19] одновременно регистрировались спектры от 256 пространственных элементов, составляющих в картинной плоскости матрицу размером 16×16 элементов, угловой размер элемента изображения — $1''$. Спектры с разрешением около 8 \AA были получены в диапазоне $4250\text{--}7200 \text{ \AA}$ для 7 полей в центральной области галактики, снятых со взаимным смещением. Суммарное время экспозиций для каждого из полей менялось в пределах от 600 до 1800 с, среднее качество изображений составляло $1.7''\text{--}2''$. Обработка наблюдений проводилась с помощью пакетов программ, разработанных в лаборатории СФВО САО РАН, работающих под IDL. В качестве спектрофотометрического стандарта использовались спектры GRW+70°5824. Результатом обработки является “куб данных”, в котором каждому пикселю изображения размером $16'' \times 16''$ соответствует спектр из 2048 элементов. После первичной редукции кубы данных для всех 7 полей были совмещены и сложены, так что размер получившейся мозаики составил $49'' \times 31''$; соответствующая область галактики показана на Рис. 1.

2.2. Архивные данные наблюдений космического телескопа “Spitzer”

В работе использованы архивные данные наблюдений галактики VII Zw 403 с приборами

²http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/mpfs/mpfs_main.html

IRAC и MIPS, полученные в рамках программы “Starburst Activity in Nearby Galaxies”³. Данные из архива скачивались с помощью системы “Spitzer Heritage Archive”⁴. В нашем распоряжении были изображения галактики в семи диапазонах длин волн: 3.6 мкм , 4.5 мкм , 5.8 мкм , 8.0 мкм по наблюдениям с прибором IRAC и 24 мкм , 70 мкм , 160 мкм — с прибором MIPS. Мозаики из снимков составлялись при помощи программного обеспечения MOPEX⁵, изображения в полосах 70 мкм и 160 мкм обрабатывались с помощью пакета программ GeRT⁶. Для анализа мозаичных изображений использовались собственные процедуры, написанные на языке IDL. При этом для определения интегральных потоков в качестве уровня фонового излучения во всех ИК-диапазонах использована средняя интенсивность в позициях, удаленных от основных областей звездообразования галактики. В нашем случае эта методика применима ввиду малого углового размера VII Zw 403; на полученных изображениях галактика занимала малую часть поля.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 1 показано изображение области звездообразования галактики VII Zw 403 в линии H_{α} , полученное в наших наблюдениях на 6-м телескопе [4]. На рисунке показаны локализация двух щелей и мозаики из наблюдавшихся полей MPFS; цифры — это номера НII-комплексов по обозначению Линдс и др. [5], буква “R” — упомянутое выше “гигантское кольцо”.

При определении потоков в эмиссионных линиях мы проводили усреднение по отдельным комплексам для увеличения отношения сигнал/шум.

Для уточнения металличности в НII-комплексах галактики использованы интенсивности линий, измеренные нами ранее [3], а также данные Линдс и др. [5]. В настоящей работе дополнительно учтены также относительные интенсивности более слабых линий: $[SIII]\lambda 6312 \text{ \AA}/H_{\alpha}$ для комплексов № 1–№ 5 по наблюдениям со щелевым спектрографом и $[OIII]\lambda 4363 \text{ \AA}/H_{\beta}$ для комплекса № 1 по наблюдениям с MPFS. Все использованные относительные интенсивности линий (не исправленные за межзвездное поглощение) приведены в Табл. 1.

³Spitzer Proposal, ID 59 (2003)

⁴<http://sha.ipac.caltech.edu>

⁵<http://ssc.spitzer.caltech.edu/dataanalysisistools/tools/mopex/>

⁶<http://ssc.spitzer.caltech.edu/dataanalysisistools/tools/gert/>

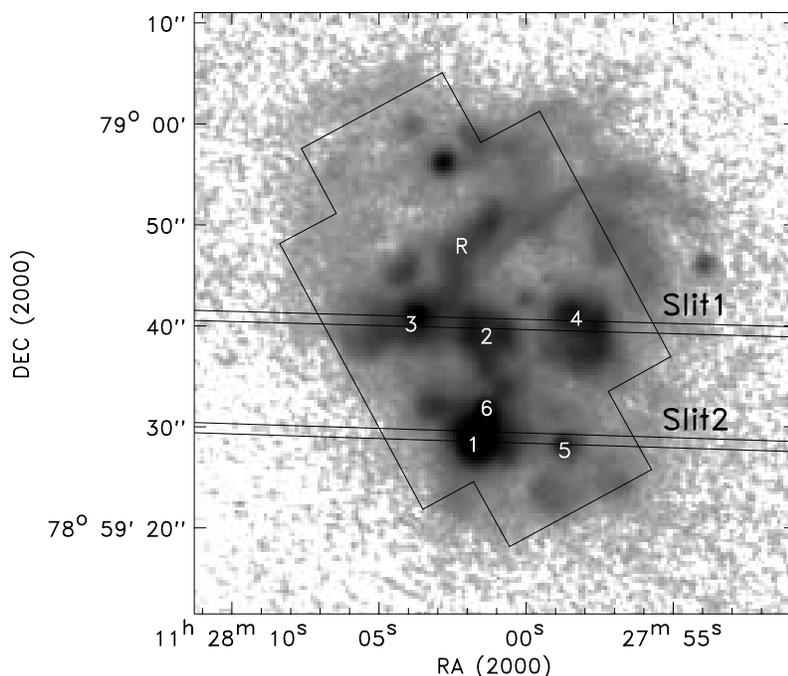


Рис. 1. Изображение области последней вспышки звездообразования в галактике VII Zw 403 в линии $H\alpha$. Показаны локализация щели спектрографа и часть галактики, перекрытая наблюдениями с MPFS. Цифрами обозначены HII-комплексы (согласно обозначениям Линдс и др. [5]), буквой R — самая яркая часть гигантского кольца.

3.1. Металличность ионизованного газа в галактике

В работе [3] мы оценили относительное содержание кислорода, азота и серы в предположении, что внутри HII-комплексов эти элементы находятся преимущественно в состояниях OIII, NII, SII соответственно. Обоснование этого следовало из анализа радиального распределения относительных интенсивностей соответствующих линий внутри самого яркого комплекса № 1. В данной работе мы оцениваем металличность газа по приведенным в Табл. 1 интенсивностям линий, учитывая и другие стадии ионизации. Используются хорошо известные методы оценки обилия кислорода, азота и серы: классический “прямой” T_e -метод (Изотов и др. [20]), а также ряд “эмпирических” методов. Полученные результаты представлены в Таблице 2 с указанием использованного метода.

3.1.1. T_e -метод

Для применения T_e -метода (Изотов и др. [20]) необходимо знать температуру T_e и плотность n_e газа (последняя, впрочем, слабо влияет на результат). Плотность найдена по линиям [SII] $\lambda 6717/\lambda 6731$; температура оценена с помощью программы “Five level” [21] по отношению интенсивностей линий

[OIII]($\lambda 4959 \text{ \AA} + \lambda 5007 \text{ \AA}$)/ $\lambda 4363 \text{ \AA}$. Наши наблюдения позволили уверенно измерить интенсивность линии [OIII] $\lambda 4363 \text{ \AA}$ только для комплекса № 1; полученное значение T_e совпадает с оценкой Линдс и др. [5]. Для определения температуры в комплексах HII № № 3, 4 мы использовали наблюдения [5]; для областей № 2 и № 5, в которых нет измерений линии [OIII] $\lambda 4363 \text{ \AA}$, была принята температура $T_e = 14500 \text{ K}$, найденная для комплекса № 1.

Зная T_e и n_e , мы определили содержание ионов O^+ , O^{2+} , используя соотношения (3) и (5) из работы [20]. Полное содержание кислорода найдено в предположении, что кислород в областях HII преимущественно находится в состояниях OII и OIII. Обилие ионов азота и серы найдено по соотношениям (6), (8) и (9) из [20]. Чтобы получить полное содержание этих элементов, рассчитаны корректирующие факторы (ICF) для ненаблюдаемых стадий ионизации по соотношениям (18) и (20) для средней металличности $12 + \log(O/H) = 7.6$. При определении содержания O^+ , N^+ , S^+ была принята T_e в области излучения этих ионов, найденная из соотношения (14), для определения обилия S^{2+} — из соотношения (15) работы [20].

Оценки относительного содержания кислорода, азота и серы T_e -методом представлены в Таблице 2 с пометкой “ T_e ”; приведенные ошибки оценок

Таблица 1. Относительные интенсивности линий в спектре пяти ярких НII–комплексов

Линии	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	ссылка
[OII]3729/3727	1.39 ± 0.11	1.43 ± 0.14	1.50 ± 0.08	1.37 ± 0.10	1.80 ± 0.23	[5]
[OII](3727+29)/H β	0.59 ± 0.02	2.26 ± 0.11	1.18 ± 0.03	1.71 ± 0.06	2.20 ± 0.12	[5]
[OIII](5007)/H β	3.89 ± 0.01	1.65 ± 0.03	2.68 ± 0.01	2.59 ± 0.03	1.28 ± 0.03	[5]
[OIII](5007)/H β	3.43 ± 0.05	1.72 ± 0.02	2.85 ± 0.03	2.78 ± 0.03	1.69 ± 0.01	*
[OIII](5007)/H β	3.86 ± 0.02	1.79 ± 0.04	2.85 ± 0.02	2.82 ± 0.04	1.63 ± 0.07	**
[OIII](4363)/H β	0.064 ± 0.002	—	0.049 ± 0.006	0.063 ± 0.009	—	[5]
[OIII](4363)/H β	0.067 ± 0.009	—	—	—	—	**
[OI](6300)/H β	0.011 ± 0.003	0.04 ± 0.01	0.044 ± 0.005	—	—	*
[SIII](6312)/H α	0.0066 ± 0.0014	0.0073 ± 0.0038	0.0133 ± 0.0052	0.0087 ± 0.0031	0.0072 ± 0.0059	*
[SII](6717+31)/H α	0.066 ± 0.001	0.137 ± 0.001	0.123 ± 0.001	0.096 ± 0.001	0.137 ± 0.003	*
[SII](6717+31)/H α	0.051 ± 0.001	0.140 ± 0.008	0.110 ± 0.003	0.092 ± 0.005	0.137 ± 0.008	**
[SII](6717)/H α	0.028 ± 0.001	0.07 ± 0.012	0.06 ± 0.003	0.056 ± 0.005	0.076 ± 0.09	**
[NII](6548+84)/H α	0.024 ± 0.001	0.032 ± 0.001	0.024 ± 0.001	0.025 ± 0.003	0.038 ± 0.002	*
[NII](6584)/H α	0.013 ± 0.001	0.027 ± 0.001	0.022 ± 0.001	0.021 ± 0.001	0.034 ± 0.002	*
H γ /H β	0.44 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.42 ± 0.01	0.47 ± 0.01	0.51 ± 0.02	[5]
H β /H α	0.313 ± 0.002	0.304 ± 0.005	0.307 ± 0.002	0.309 ± 0.004	0.255 ± 0.01	**

* — Наши данные по щелевым спектрам.

** — Наши данные по наблюдениям с MPFS.

металличности не учитывают погрешность определения температуры.

3.1.2. Эмпирические методы

Сегодня для оценок содержания химических элементов в областях НII широко применяется ряд методов, использующих эмпирические зависимости между металличностью и относительными интенсивностями линий в спектре. Их точность, как правило, уступает “прямому” T_e –методу. Однако поскольку из наших наблюдений мы определили T_e только для комплекса № 1, для комплексов № 3 и № 4 использовали данные [5], а для областей № 2 и № 5 вообще нет оценок T_e , мы сочли целесообразным привлечь также эмпирические методы оценки металличности.

Мы использовали давно известный эмпирический так называемый P–метод (Пилюгин и Туан [22]), основанный на зависимости обилия кислорода от параметра возбуждения P и параметра R_{23} , которые определяются по относительным интенсивностям линий [OII] и [OIII]. В результате мы

убедились, что оценки, сделанные этим методом и T_e –методом для разных НII–комплексов, хорошо согласуются между собой.

Эмпирическая зависимость, предложенная Петтини и Пейджел [23], имеет преимущество, основанное на отношениях ярких и близких линий ([OIII]/H β и [NII]/H α), т.е. не чувствительна к поглощению. Однако значения используемого в ней параметра O3N2 для трех комплексов VII Zw 403 оказались за пределом интервала уверенной применимости метода и для двух комплексов — на его границе.

Девять эмпирических зависимостей по разным отношениям интенсивностей линий, предложенных в [24], также были нами использованы, но дали большой (около ± 0.5 dex) разброс оценок для одного и того же комплекса по разным линиям. При этом средние по разным зависимостям оценки металличности согласуются с оценками T_e –методом.

Наиболее точные эмпирические методы оценки металличности предложены в работах Пилюгина

и др. [25] и Пилюгина, Мэттсона [26]. Точность оценок, полученных двумя методами первой работы, составляет, по утверждению авторов, 0.075 dex для содержания кислорода и 0.05 dex — для азота; авторы второй работы оценивают точность предлагаемой методики как 0.077 dex при оценке содержания кислорода и 0.110 dex — азота.

Результаты, полученные для НII-комплексов VII Zw 403 по эмпирическим зависимостям из этих работ, представлены в Табл. 2.

Методика [25] позволяет оценить относительное содержание кислорода и азота по отношениям интенсивностей ярких линий:

$$([\text{OIII}]\lambda 4959 + 5007 \text{ \AA})/H_{\beta},$$

$$([\text{OII}]\lambda 3727 + 3729 \text{ \AA})/H_{\beta},$$

$$([\text{NII}]\lambda 6548 + 6584 \text{ \AA})/H_{\beta}$$

(этот метод обозначен авторами как ON-метод); при применении ONS-метода используется также отношение $([\text{SII}]\lambda 6717 + 6731 \text{ \AA})/H_{\beta}$. Мы применили оба эти метода; для оценки относительного содержания кислорода и азота ONS-методом использованы соотношения (17) и (18) из работы [25]; для оценки с помощью ON-метода — соотношения (19) и (20). В Табл. 2 полученные результаты обозначены индексами “ONS” и “ON” соответственно.

Представленный в работе [26] NS-метод имеет для нас то преимущество, что не требует измерения интенсивностей линий $([\text{OII}]\lambda 3727 + 3729 \text{ \AA})$. Этим методом по относительным интенсивностям ярких линий $([\text{OIII}]\lambda 4959 + 5007 \text{ \AA})/H_{\beta}$, $([\text{NII}]\lambda 6548 + 6584 \text{ \AA})/H_{\beta}$ и $([\text{SII}]\lambda 6717 + 6731 \text{ \AA})/H_{\beta}$ мы нашли относительные содержания кислорода из соотношения (8) и относительные содержания азота — из соотношения (9) работы [26]. В Табл. 2 полученные результаты обозначены индексом “NS”.

Мы используем далее представленные в Табл. 2 значения металличности в отдельных НII-комплексах, полученные прямым T_e -методом и наиболее точными эмпирическими методами [25, 26], которые дают результаты, хорошо согласующиеся с T_e -методом. В частности, для комплексов № 1, 3, 4 приняты оценки T_e -методом, для комплексов № 2, 5, в которых нет измерений T_e , усреднены приведенные в таблице значения, определенные разными методами.

Как следует из Таблицы 2, металличность в отдельных НII — комплексах не обнаруживает сильных вариаций и хорошо согласуется со средними по галактике значениями, полученными другими авторами. По нашей оценке

средняя металличность в VII Zw 403 составляет $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.66 \pm 0.03$; согласно Изотову и др. [27]: $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.73 \pm 0.01$; по измеренным в работе [27] интенсивностям линий Нагао и др. [24] получили $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.7 \pm 0.01$; Шульте-Ладбек и др. [8] дают $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.63 - 7.71$, Перес-Монтеро и Диаз дают значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.7 \pm 0.05$, полученное по данным их наблюдений и результатам работы [27].

Обилие азота в разных комплексов также согласуется со средним по галактике: $12 + \log(\text{N}/\text{H}) = 6.19 \pm 0.08$ согласно [27] $12 + \log(\text{N}/\text{H}) = 6.18 \pm 0.09$ согласно [28].

Наши оценки содержания серы дают более высокие значения, чем среднее по галактике $12 + \log(\text{S}/\text{H}) = 6.16 \pm 0.04$ согласно [27] и $12 + \log(\text{S}/\text{H}) = 6.06 \pm 0.16$ по результатам [28], но с учетом ошибок измерений согласуются с этим значением для всех комплексов, кроме № 3.

Среднее по галактике содержание азота по нашей оценке составляет $12 + \log(\text{N}/\text{H}) = 6.22 \pm 0.19$, содержание серы — $12 + \log(\text{S}/\text{H}) = 6.27 \pm 0.14$. Заметим, что для VII Zw 403 мы нашли практически равные обилия азота и серы в НII-комплексах. Близкие содержания этих элементов наблюдается и в других галактиках, например, в Магеллановых облаках [29] и в NGC 3109 [30]. Галактика NGC 3109 является наиболее близким аналогом VII Zw 403 по содержанию O, N и S.

3.2. Пыль и полициклические ароматические углеводороды в галактике VII Zw 403

Наш особый интерес к ИК-наблюдениям VII Zw 403 связан с тем, что в результате анализа пылевой составляющей dIrr галактики IC 10 нам удалось пролить определенный свет на неясные пока механизмы образования и разрушения молекул ПАУ [16]. Поэтому ниже мы попытаемся сходным образом рассмотреть результаты наблюдений VII Zw 403.

На Рис. 2 показаны построенные по данным наблюдений “Spitzer” карты распределения ИК-излучения галактики VII Zw 403 в полосах 8 мкм и 24 мкм, совмещенные с H_{α} -изображением.

Фотометрия VII Zw 403 в разных полосах ИК-диапазона по наблюдениям “Spitzer” ранее была проведена Энгельбрахтом и др. [31]. Мы провели повторную апертурную фотометрию всей галактики по тем же данным, результаты приведены в Табл. 3. Наши оценки несколько расходятся с результатами работы [31], различия, по всей вероятности,

Таблица 2. Металличность НII–комплексов

Оценка	Комплексы НII				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
$N_e(\text{SII}), \text{см}^{-3}$	57	66	57	110	—
$T_e(\text{OIII}), \text{K}$	14500	—	14900	16200	—
$12 + \log(\text{O}/\text{H}) (T_e)$	7.69 ± 0.01	7.69 ± 0.03	7.66 ± 0.01	7.64 ± 0.02	7.68 ± 0.03
$12 + \log(\text{O}/\text{H}) (\text{ONS})$	7.72 ± 0.02	7.75 ± 0.03	7.68 ± 0.02	7.71 ± 0.03	7.79 ± 0.04
$12 + \log(\text{O}/\text{H}) (\text{ON})$	7.80 ± 0.02	7.55 ± 0.02	7.61 ± 0.02	7.65 ± 0.04	7.59 ± 0.03
$12 + \log(\text{O}/\text{H}) (\text{NS})$	7.77 ± 0.01	7.56 ± 0.01	7.62 ± 0.01	7.67 ± 0.03	7.60 ± 0.02
$12 + \log(\text{N}^+/\text{H})$	5.72 ± 0.02	5.86 ± 0.02	5.72 ± 0.02	5.70 ± 0.05	6.01 ± 0.03
$ICF(\text{N}^+)$	6.82 ± 0.22	1.75 ± 0.10	3.27 ± 0.08	2.45 ± 0.09	1.70 ± 0.11
$12 + \log(\text{N}/\text{H}) (T_e)$	6.55 ± 0.02	6.10 ± 0.03	6.23 ± 0.02	6.09 ± 0.05	6.24 ± 0.04
$12 + \log(\text{N}/\text{H}) (\text{ONS})$	6.48 ± 0.03	6.13 ± 0.04	6.09 ± 0.03	6.11 ± 0.07	6.22 ± 0.06
$12 + \log(\text{N}/\text{H}) (\text{ON})$	6.56 ± 0.02	6.01 ± 0.03	6.09 ± 0.02	6.09 ± 0.06	6.09 ± 0.04
$12 + \log(\text{N}/\text{H}) (\text{NS})$	6.32 ± 0.02	6.07 ± 0.02	6.09 ± 0.02	6.18 ± 0.04	6.13 ± 0.03
$12 + \log(\text{S}^+/\text{H})$	5.39 ± 0.01	5.73 ± 0.03	5.60 ± 0.01	5.50 ± 0.02	5.79 ± 0.03
$12 + \log(\text{S}^{2+}/\text{H})$	6.07 ± 0.09	6.12 ± 0.23	6.23 ± 0.16	5.96 ± 0.15	6.12 ± 0.35
$ICF(\text{S}^+ + \text{S}^{2+})$	1.32 ± 0.02	1.05 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.06 ± 0.01	1.05 ± 0.01
$12 + \log(\text{S}/\text{H})$	6.27 ± 0.07	6.29 ± 0.16	6.36 ± 0.13	6.11 ± 0.11	6.31 ± 0.24

обусловлены разными значениями принятого уровня фона на изображениях; впрочем, эти различия практически не влияют на обсуждаемые ниже результаты.

При анализе ИК-излучения Дрейн и Ли [32] предложили параметризовать УФ-поле галактики в виде суммы “минимального” диффузного УФ-поля U_{min} , заполняющего большую часть ее объема, и более интенсивного УФ-поля со степенным распределением по энергии, воздействующего лишь на массовую долю γ всей пыли в галактике. Величина U_{min} , выраженная в единицах среднего УФ-поля нашей Галактики, характеризует общий уровень звездообразования в исследуемой системе, а величина γ позволяет оценить, какая доля вещества галактики охвачена текущими процессами звездообразования. В работе [32] приведен алгоритм оценки параметров галактики по данным ИК-наблюдений в полосах 8 мкм, 24 мкм, 70 мкм и 160 мкм (данные на 3.6 мкм используются для удаления вклада звездного излучения). Мы использовали результаты фотометрии галактики VII Zw 403, чтобы по методике, предложенной

в [32], попытаться определить U_{min} , γ , а также $q_{\text{пау}}$ — массовую долю пыли, заключенной в ПАУ. К сожалению, найденные для VII Zw 403 значения параметров, фигурирующих в моделях [32], оказались за пределами, для которых эти модели рассчитаны. Поэтому нам не удалось определить U_{min} и γ , мы получили лишь верхнюю границу $q_{\text{пау}} < 0.5\%$ и нижнюю границу $U_{\text{min}} > 25$. Такое значение U_{min} говорит о высоком уровне звездообразования в VII Zw 403, что естественно для ВСО-галактик. Низкое содержание ПАУ согласуется с предположением о разрушении этих молекул под действием УФ-излучения в областях звездообразования вблизи горячих звезд.

В ряде работ, в частности в [15], отмечена возможность использования отношения потоков на длинах волн 8 мкм и 24 мкм в качестве локального индикатора массовой доли $q_{\text{пау}}$. Основываясь на найденной в этой работе корреляции $q_{\text{пау}}$ с отношением $F_{8\mu\text{m}}/F_{24\mu\text{m}}$, мы проанализировали распределение $q_{\text{пау}}$ в VII Zw 403 и попытались сопоставить его с распределением ионизованного и нейтрального газа в галактике.

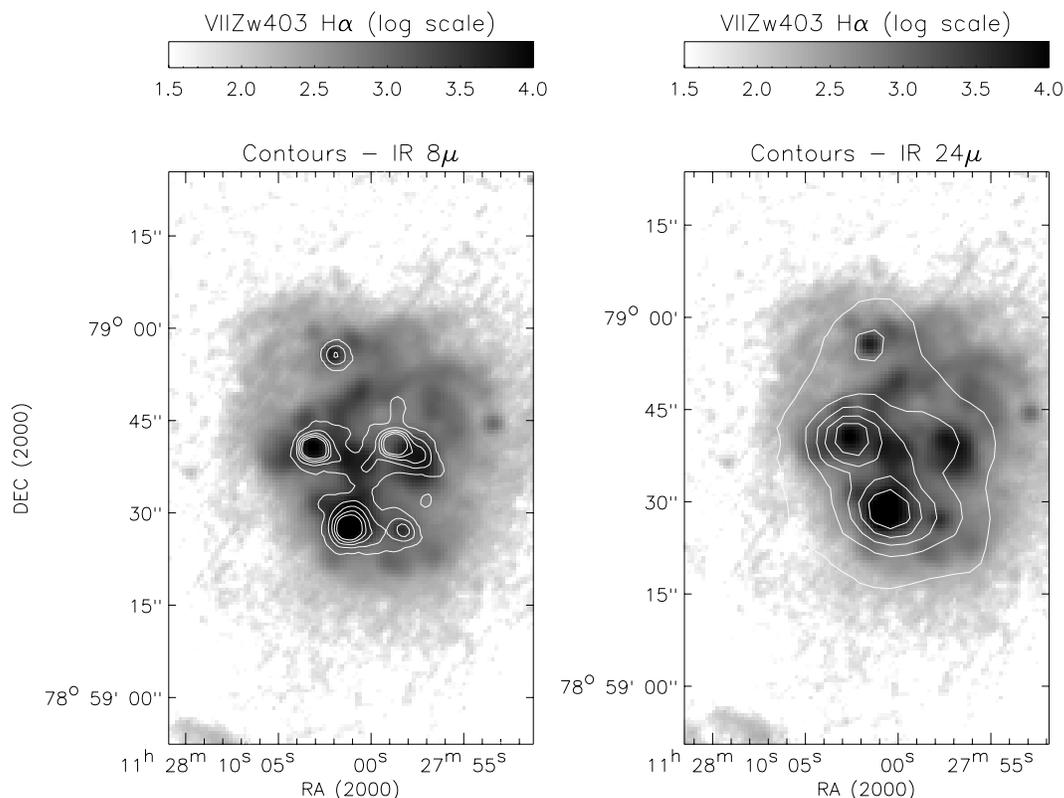


Рис. 2. Изображение области звездообразования VII Zw 403 в линии $H\alpha$ с наложенными контурами в разных полосах ИК-диапазона: слева — 8 мкм, справа — 24 мкм. Показаны изофоты, соответствующие уровням 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 и 0.5 мЯн/сг для 8 мкм и 0.2, 0.9, 1.6, 2.3, 3.0 мЯн/сг для 24 мкм.

Таблица 3. Результаты фотометрии изображений с космического телескопа “Spitzer”

$F_{3.6\mu m}$, мЯн	$F_{4.5\mu m}$, мЯн	$F_{5.8\mu m}$, мЯн	$F_{8.0\mu m}$, мЯн	$F_{24\mu m}$, мЯн	$F_{70\mu m}$, Ю	$F_{160\mu m}$, Ян
3.27 ± 0.02	1.94 ± 0.02	2.02 ± 0.06	3.58 ± 0.07	28.4 ± 0.7	0.355 ± 0.003	0.123 ± 0.003

На Рис. 3 показаны карты распределения отношения потоков $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ с наложенными изофотами в линиях $H\alpha$ (слева) и HI 21 см (справа). Мы использовали изофоты в линии 21 см по наблюдениям на VLA, представленные в работе Эшли и Симпсон [10].

Из Рис. 3 следует, что в центральной части VII Zw 403 не наблюдается больших вариаций отношения потоков $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$, исключение составляет яркая западная область. Однако хорошо видно, что указанное отношение повышено на границах и за пределами HI -комплексов и понижено в их центральной части. Это может быть следствием разрушения молекул ПАУ в ярких комплексах ионизованного газа под действием ультрафиолетового излучения центральных OB ассоциаций.

Из-за более низкого пространственного разрешения нам не удалось выявить в VII Zw 403 отчет-

ливой корреляции распределения ПАУ с оболочками нейтрального водорода, подобной той, что наблюдается в IC 10 [16]. Как следует из Рис. 3, самое высокое значение $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$, соответствующее наибольшей массовой доле ПАУ, наблюдается в направлении западной части плотного облака HI . Возможно, в направлении южной части этого облака молекулы ПАУ разрушены ультрафиолетовой радиацией расположенных здесь OB ассоциаций. О сильном УФ-излучении свидетельствует и находящийся здесь ярчайший в галактике оболочечный комплекс № 1, см. Рис. 1.

В галактиках низкой металличности наблюдается дефицит излучения ПАУ, связанный с недостатком этих макромолекул (см. Дрейн и др. [17] и ссылки в этой работе). В галактиках с содержанием кислорода $12 + \log(O/H) > 8.1$ характерные значения составляют $q_{\text{пau}} \sim 4\%$, в галактиках с

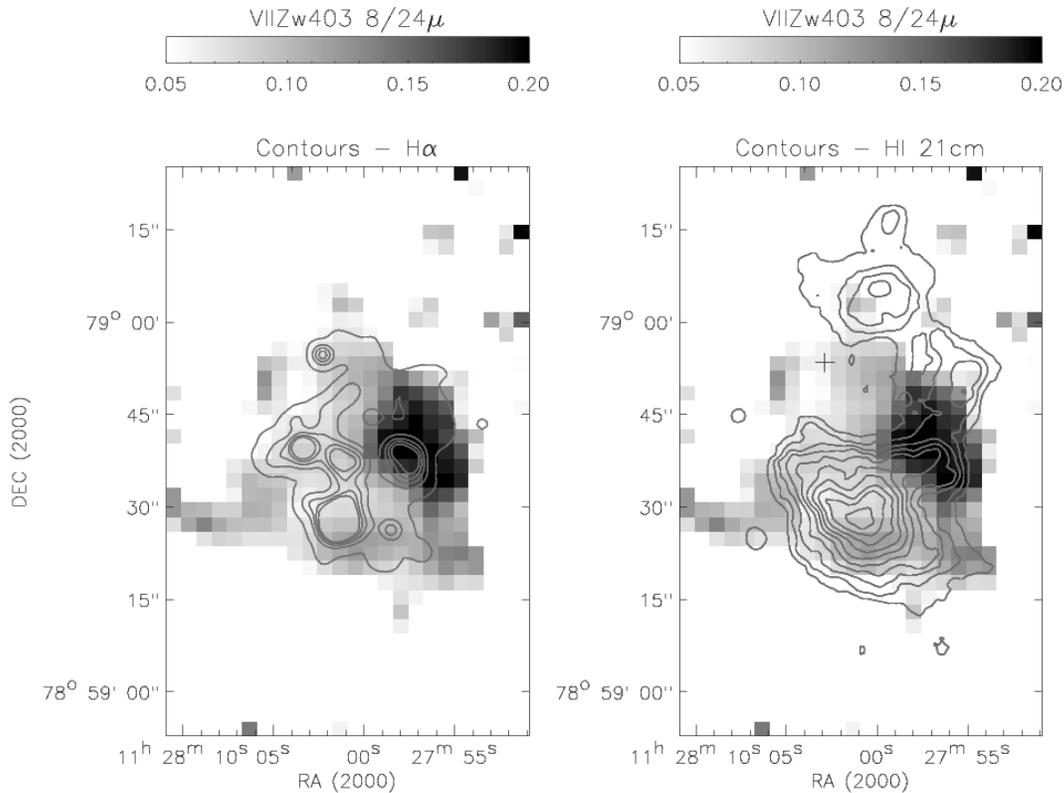


Рис. 3. Карты отношения потоков $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ области звездообразования VII Zw 403 с наложенными контурами в $H\alpha$ (слева) и HI 21 см (справа). Изофоты в линии $H\alpha$ соответствуют уровням яркости 500, 1750, 3000, 4250, 5500 в условных единицах; изофоты в линии HI 21 см показывают уровни яркости, соответствующие лучевой плотности $N(H)=(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 \text{ и } 50) \times 10^{20}$ атомов/см². Крестик на правом рисунке отмечает положение единственного обнаруженного в этой галактике точечного рентгеновского источника [33].

меньшей металличностью среднее значение соответствует $q_{\text{PAU}} \simeq 1\%$. В нашей работе [16] по наблюдениям IC 10 было заподозрено существование сходной корреляция между массовой долей ПАУ и металличностью газа на уровне отдельных НII областей в пределах одной галактики, а не только при сравнении разных галактик. Мы предположили, что подобная корреляция может отражать процессы образования молекул ПАУ, а не их дальнейшей эволюции. Однако точность наблюдаемой в IC 10 зависимости оказалась недостаточной для того, чтобы считать эту корреляцию достоверной. Поэтому интересно проверить наблюдается ли в галактике VII Zw 403 падение q_{PAU} с убыванием металличности НII-комплексов.

На Рис. 4 показаны отношения потоков $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ для отдельных зон НII в зависимости от металличности для обеих исследованных галактик: IC 10 по данным Вибе и др. [16] и VII Zw 403 по результатам настоящей работы.

Отметим, что в работе [16] мы использовали металличность, полученную ОЗН2-методом [23].

Для единообразия мы попытались оценить относительное содержание кислорода в областях НII-галактики IC 10 с помощью NS-метода [26], использованного выше для VII Zw 403. Однако при этом из-за низкой интенсивности линий $[NII]\lambda 6548 \text{ \AA}$ и $[OIII]\lambda 4959 \text{ \AA}$ в слабых областях НII возросли ошибки оценок, хотя общий вид зависимости существенно не изменился. Поэтому для IC 10 на Рис. 4 показаны результаты, полученные ОЗН2-методом согласно данным [16].

В работе [16] мы отметили, что отношение $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$, по-видимому, падает с уменьшением содержания кислорода в НII областях IC 10, однако пороговое значение составляет не $12 + \log(O/H) = 8.0 - 8.1$, как наблюдается при сравнении разных галактик между собой, а скорее, порядка 8.3. К сожалению, малые вариации металличности и отношения $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ в НII-комплексах VII Zw 403 не позволяют по наблюдениям этой галактики подтвердить наличие заподозренной в IC 10 корреляции. Такая зависимость видна, только если рассматривать обе галактики

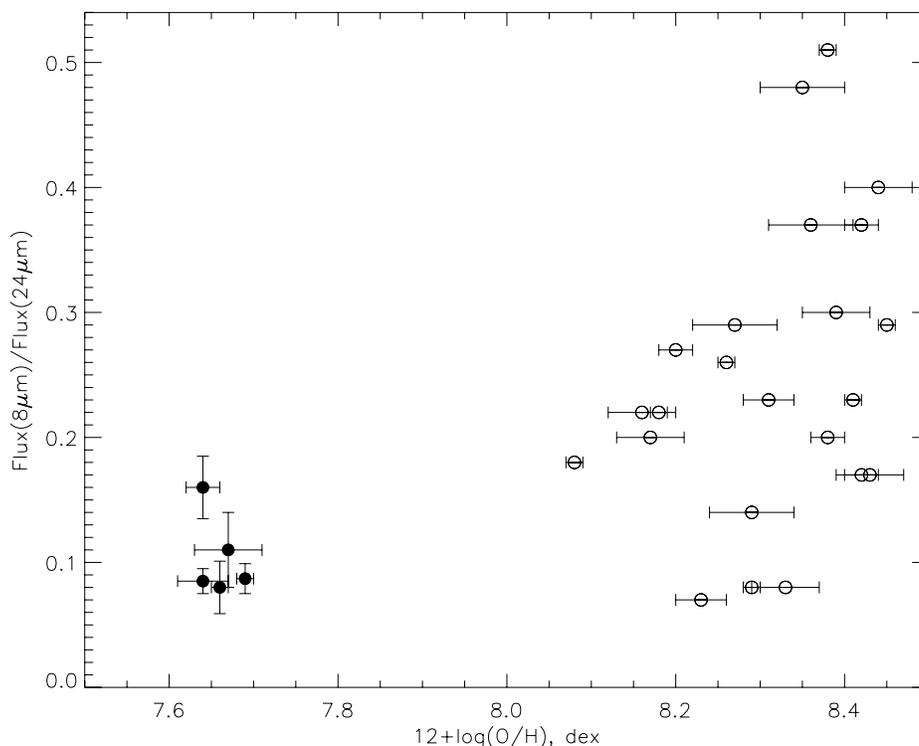


Рис. 4. Отношение потоков $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ в зависимости от содержания кислорода для отдельных областей НII по результатам исследования двух галактик — VII Zw 403 (заполненные кружки, по данным настоящей работы) и IC 10 (пустые кружки, по данным [16]). Ошибки отношения потоков для областей НII в IC 10 не превышают 0.04.

вместе, но ее наличие на уровне сравнения разных галактик между собой известно давно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ архивных данных ИК наблюдений BCD галактики VII Zw 403 на космическом телескопе “Spitzer” и повторный анализ результатов наших наблюдений на 6-м телескопе САО РАН со щелевым спектрографом и с MPFS, опубликованных в [3]. В работе [3] оценки содержания кислорода, азота и серы основывались на предположении о том, что газ в ярких НII-комплексах находится преимущественно в состояниях OIII, NII, SII. В настоящей работе учтены также другие стадии ионизации, использованы более слабые линии и оценки металличности сделаны несколькими разными методами.

Отметим, что оценки металличности в отдельных комплексах ионизованного газа в VII Zw 403, кроме нашей работы [3], ранее никем не проводились.

Найденное в настоящей работе содержание кислорода в отдельных НII-комплексах и среднее по галактике значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.66 \pm 0.03$

полностью согласуются с оценками средней металличности в VII Zw 403 другими авторами: $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.73 \pm 0.01$ согласно [27]; в работе [24] по измерениям [27] получено $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.7 \pm 0.01$; согласно [8] $Z = 0.05 - 0.06Z_{\odot}$, что соответствует $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.63 - 7.71$ при принятой в этой работе солнечной металличности $12 + \log(\text{O}/\text{H})_{\odot} = 8.93$; в работе [28] найдено значение $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 7.7 \pm 0.05$.

Одной из задач повторного анализа спектральных наблюдений, а также анализа ИК-изображений, полученных космическим телескопом “Spitzer”, был поиск корреляции массовой доли ПАУ с металличностью на уровне отдельных областей НII, заподозренной нами при исследовании галактики IC 10 [16]. Однако в НII-комплексах VII Zw 403 вариации металличности и вариации отношения $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$, которое может служить индикатором массовой доли ПАУ, оказались малы, что не позволило проверить существование такой корреляции в пределах этой галактики.

Проведенный анализ изображений в ИК-диапазоне дал оценку средней по галактике массовой доли ПАУ $q_{\text{PAU}} < 0.5\%$, что свидетельствует

об интенсивном звездообразовании в VII Zw 403. Сравнение распределения $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ в галактике с изображением в линии H_{α} обнаруживает повышенное содержание ПАУ на границах и за пределами ярких HII-комплексов и, соответственно, пониженное — в их внутренних областях. Сходный эффект наблюдается и в других галактиках, в частности в ММО [15] и в IC 10 [16].

Сопоставление карты $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ с излучением в линии H I 21 см не показало отчетливой корреляции содержания ПАУ с распределением нейтрального газа в галактике VII Zw 403. Тем не менее мы отмечаем, что наибольшее значение $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ наблюдается в направлении западной части гигантского плотного облака H I. Возможно, более низкое значение $F_{8\mu m}/F_{24\mu m}$ в других частях этого облака обусловлено разрушением ПАУ под действием ионизирующей радиации расположенных там OB ассоциаций.

Выявленные закономерности согласуются с предположением об образовании молекул ПАУ в гигантских молекулярных облаках и их разрушении под действием ультрафиолетового излучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 10-02-00091). О. В. Егоров благодарит за финансовую поддержку Фонд некоммерческих программ “Династия” и “ФЦП Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” (госконтракт 14.740.11.0800).

Авторы благодарны анонимному рецензенту за полезные замечания, а также В. П. Архиповой и Д. З. Вибе за стимулирующие дискуссии.

Работа основана на наблюдательном материале, полученном на 6-м телескопе САО РАН, финансируемом Миннауки РФ (регистрационный номер 01-43). В процессе работы над статьей мы использовали базу внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным Управлением Аэронавтики и Космонавтики (США).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Zhao, Q. Gu, and Y. Gao, *Astronom. J.* **141**, 68 (2011).
2. G. Kauffman, S. D. M. White, and B. Guiderdoni, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **264**, 201 (1993).
3. В. П. Архипова, Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев и О. В. Егоров, *Астрон. ж.* **84**, 963 (2007).
4. Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев, В. Ю. Авдеев и О. В. Егоров, *Письма в АЖ* **32**, 403 (2006).
5. R. Lynds, E. Tolstoy, E. J. O’Neil, and D. A. Hunter, *Astrophys. J.* **116**, 146 (1998).
6. R. E. Schulte-Ladbeck, U. Hopp, M. M. Crone, and L. Greggio, *Astrophys. J.* **525**, 709 (1999).
7. H. H. Loose and T. X. Thuan, in *Star-forming Dwarf Galaxies and Related Objects*, Ed. by D. Kunth, T.X. Thuan, and Tran Thanh Van (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1985), p.73.
8. R. E. Schulte-Ladbeck, U. Hopp, L. Greggio, and M.M. Crone, *Astronom. J.* **118**, 2705 (1999).
9. T. X. Thuan, J. E. Hibbard, and F. Levrier, *Astronom. J.* **128**, 717 (2004).
10. T. Ashley and C. Simpson, *JSARA (Journal of the Southeastern Association for Research in Astronomy)* **2**, 30 (2008).
11. C. L. Martin, *Astrophys. J.* **491**, 561 (1997).
12. T. X. Thuan, T. B. Williams, and E. Malumuth, in *Starburst and Galaxy Evolution, Proc. of the 22-th Moriond Astroph. Meeting, Les Arcs, France* (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1987), p.151.
13. S. Silich, G. Tenorio-Tagle, C. Munoz-Tunon, and L. M. Cairós, *Astronom. J.* **123**, 2438 (2002).
14. A. G. G. M. Tielens, *Ann. Rev. Astron. Astroph.* **46**, 289 (2008).
15. K. M. Sandstrom, A. D. Bolatto, B. Draine, et al., *Astrophys. J.* **715**, 701 (2010).
16. Д. З. Вибе, О. В. Егоров и Т. А. Лозинская, *Астрон. ж.* **88**, 637 (2011).
17. B. T. Draine, D. A. Dale, G. Bendo, et al., *Astrophys. J.* **663**, 866 (2007).
18. В. Л. Афанасьев и А. В. Моисеев, *Письма в АЖ* **31**, 269 (2005).
19. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Stellar dynamics: from classic to modern*, Ed. by L. P. Osipkov and I. I. Nikiforov (Saint-Petersburg Univ. press, 2001), p.103.
20. Y. I. Izotov, G. Stasinska, G. Meynet, et al., *Astronom. and Astrophys.* **448**, 955 (2006).
21. M. De Robertis, R. Dufour, and R. Hunt, *J. Roy. Astron. Soc. Canada* **81**, 195 (1987).
22. L. S. Pilyugin and T. X. Thuan, *Astrophys. J.* **631**, 231 (2005).
23. M. Pettini and B. E. J. Pagel, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **348**, 59 (2004).
24. T. Nagao, R. Maiolino, and A. Marconi, *Astronom. and Astrophys.* **459**, 85 (2006).
25. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. X. Thuan, *Astronom. J.* **720**, 1738 (2010).
26. L. S. Pilyugin and L. Mattsson, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **412**, 1145 (2011).
27. Yu. I. Izotov, T. X. Thuan, and V. A. Lipovetsky, *Astrophys. J. Suppl.* **108**, 1 (1997).
28. E. Pérez-Montero and A.I. Díaz, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **346**, 105 (2003).
29. D. R. Garnett, in *New views of the Magellanic Clouds*, IAU Simposium **190**, 266 (1999).

30. M. Peña, G. Stasińska, and M. G. Richer, *Astronom. and Astrophys.* **476**, 745 (2007).
31. C. W. Engelbracht, G. H. Rieke, K. D. Gordon, et al., *Astrophys. J.* **678**, 804 (2008).
32. B. T. Draine and A. Li, *Astrophys. J.* **657**, 810 (2007).
33. J. Ott, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **115**, 141 (2003).

GAS AND DUST IN THE BCD GALAXY VII ZW 403 (UGC 6456)

O.V. Egorov, T.A. Lozinskaya

Based on the results of the earlier spectroscopic observations with the 6-m BTA telescope of the SAO RAS we refine the metallicity estimates of the complexes of ionized gas in the VII Zw 403 galaxy. Infrared observations from the Spitzer Space Telescope are used to search for a possible correlation of the mass fraction distribution of the polycyclic aromatic hydrocarbons (ПАУ) with the distribution of ionized and neutral hydrogen, and with the metallicity of gas in the HII regions of the galaxy.

Key words: *galaxies: abundances—galaxies: individual: VII ZW 403 (UGC 6456)*