

УДК 524.7–32/52, 524.5

## ИОНИЗОВАННЫЙ ГАЗ В ГАЛАКТИКЕ NGC 3077

© 2020 Д. В. Опарин<sup>1\*</sup>, О. В. Егоров<sup>2,1\*\*</sup>, А. В. Моисеев<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 6 июля 2020 года; после доработки 28 июля 2020 года; принята к публикации 28 июля 2020 года

Близкая карликовая галактика NGC 3077 известна своей пекулярной морфологией, включающей многочисленные пылевые прожилки и эмиссионные области. Межзвездная среда в ней находится под воздействием нескольких возмущающих факторов. Прежде всего, к ним относятся центральная вспышка звездообразования и приливные структуры в группе M 81. В статье представлено комплексное исследование состояния ионизации, кинематики и химического состава ионизованного газа NGC 3077, включающее как области звездообразования, так и диффузный ионизованный газ (DIG) на периферии. Движения газа в эмиссионной линии H $\alpha$  изучались методом 3D-спектроскопии со сканирующим интерферометром Фабри–Перо в составе прибора SCORPIO-2 на 6-м телескопе САО РАН с высоким спектральным разрешением ( $R \approx 15\,000$ ). Изображения в основных оптических эмиссионных линиях были получены с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром MaNGA на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ. Спектрофотометрия с длинной щелью с разрешением  $R \approx 1\,000$  выполнена со SCORPIO-2. Наша оценка металличности газа  $Z = 0.56Z_{\odot}$  существенно ниже полученного ранее значения, но согласуется с зависимостью «светимость–металличность». Пространственно-разрешенные диагностические диаграммы отношения эмиссионных линий не выявляют корреляции между состоянием ионизации газа и его дисперсией скоростей, что, скорее всего, связано с мощной фотоионизацией молодыми звездами, в то время как вклад ударных волн в возбуждение эмиссионных линий менее существенен. Изучены области локализации многокомпонентных профилей H $\alpha$ . Приводятся аргументы в пользу того, что в основном они связаны не с расширяющимися оболочками, как считалось ранее, а с отдельными кинематическими компонентами вдоль луча зрения. Здесь наблюдается комбинация ветрового истечения из областей звездообразования и аккреции из облаков межгалактического газа в группе M 81.

Ключевые слова: галактики: карликовые — галактики: межзвездная среда — галактики: кинематика и динамика — галактики: звездообразование

## 1. ВВЕДЕНИЕ

NGC 3077 — карликовая галактика, принадлежащая к группе M 81, ее абсолютная звездная величина  $M_B = -17.62$ , принятое расстояние 3.85 Мпк (Kaisina et al. 2012). Среди близких галактик NGC 3077 выделяется своей пекулярной морфологией: многочисленными филаментами в линиях ионизованного газа и связанными с ними пылевыми полосами, заметными на оптических изображениях (рис. 1). Наблюдения в линии нейтрального водорода показывают, что галактика расположена рядом с гигантской приливной структурой, соединяющей ее с M 81 и M 82 (Sorgho et al. 2019, Yun et al. 1994), всю систему иногда называют «триплетом M 81» (de Blok et al. 2018). С южной стороны от галактики наблюдается цепочка

из скоплений голубых звезд и компактных областей H II — карликовая приливная галактика «Гирлянда» (Garland) (Karachentsev et al. 1985, Makarova et al. 2002), находящаяся в области повышенной плотности H I. Темп текущего звездообразования NGC 3077, оцененный по светимости в линии H $\alpha$ , и масса нейтрального водорода составляют  $SFR \approx 0.1 M_{\odot}/\text{год}$  и  $M_{\text{HI}} = 6.3 \times 10^8 M_{\odot}$  соответственно (Karachentsev and Kaisin 2007, Karachentsev et al. 2013), что довольно существенно для карликовой галактики.

Martin (1998) с помощью H $\alpha$ -эшеллеграмм показал наличие в NGC 3077 областей уширения и раздвоения эмиссионной линии, трактуемых как несколько расширяющихся оболочек ионизованного газа. Оценка вириальных скоростей показала, что их энергии недостаточно, чтобы выбросить вещество из галактики. По данным наблюдений H I построена кривая вращения галактики, скорость

\*E-mail: doparin2@gmail.com

\*\*E-mail: egorov@sai.msu.ru

вращения достигает  $50 \text{ км с}^{-1}$ . В то же время, наблюдения в линии  $\text{H}\alpha$  не обнаруживают признаков вращения (Epinat et al. 2008).

Ott et al. (2005) показали наличие скопления компактных рентгеновских источников в центре галактики, пространственно связанных с одной из ранее обнаруженных в оптическом диапазоне расширяющихся оболочек. Можно сделать предположение, что речь идет об остатках сверхновых. Отмечается, что видимые в оптических эмиссионных линиях оболочки заполнены оптически тонким горячим газом. При этом, в отличие от остальных семи карликовых галактик со вспышкой звездообразования, рассмотренных в статье, NGC 3077 имеет околосолнечную металличность (Storchi-Bergmann et al. 1994) и довольно низкую яркость в рентгеновском диапазоне.

При изучении состояния ионизации газа важным инструментом являются диаграммы отношений потоков в ярких оптических эмиссионных линиях ( $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$ ,  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  и  $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ) — BPT-диаграммы, предложенные в классической работе Baldwin, Phillips и Terlevich (Baldwin et al. 1981), позже развитые в статье Veilleux and Osterbrock (1987). Использование отношений близких линий, слабо зависящих от межзвездного поглощения, позволяет применять их для исследования разнообразных эмиссионных объектов. С их помощью можно уверенно разделять области газа, ионизованного излучением OB-звезд, от тех, где основной вклад в возбуждение газа вносят другие источники ионизации (излучение активного галактического ядра, ударные волны). В то же время на данных диаграммах не всегда удается разделить вклад ионизации ударными волнами от излучения старых звезд асимптотической ветви гигантов или галактических ядер типа LINER.

Используя полученные Calzetti et al. (2004) данные оптической узкополосной фотометрии на телескопе Хаббла, Hong et al. (2013) провели анализ BPT-диаграмм для отдельных областей NGC 3077, который продемонстрировал наличие вклада ударного возбуждения в ионизацию газа в областях, расположенных ближе к периферии галактики. Авторами отмечается, что слабые проявления ударных волн в ионизованном газе могут теряться на фоне мощного излучения ярких областей H II.

Оценить вклад ударных волн в состояние ионизации газа позволяет добавление к классическим BPT-диаграммам дополнительного параметра — дисперсии скоростей ионизованного газа по лучу зрения ( $\sigma$ ), рост которой связан с увеличением турбулентных скоростей газа за фронтом ударной волны. Однако для точных измерений величины  $\sigma$  требуется относительно высокое спектральное

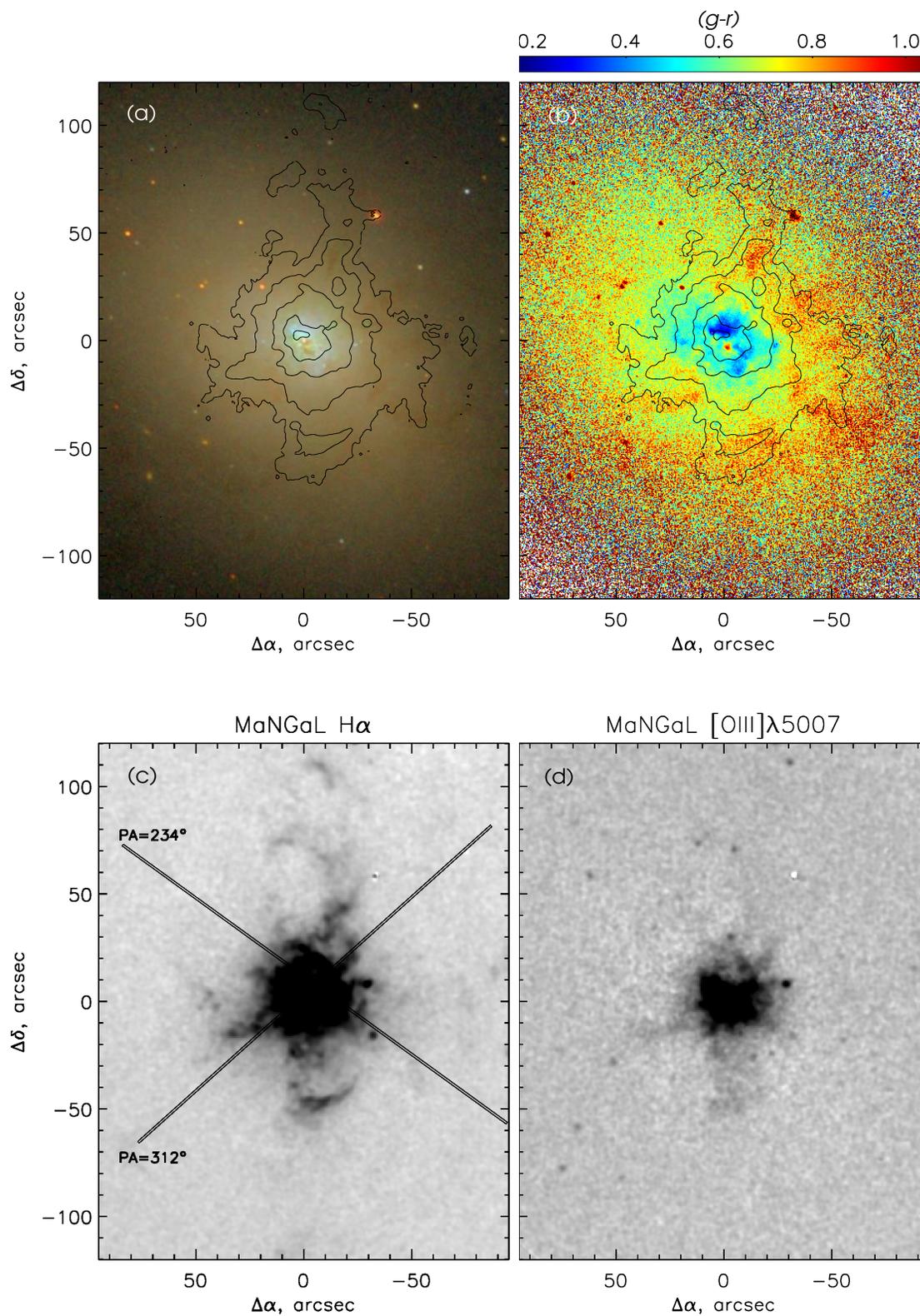
разрешение  $R > 5000\text{--}6000$ . Поэтому в большинстве обзоров такой подход применяется для исследования объектов с достаточно большими значениями дисперсий лучевых скоростей (галактики с активными ядрами или мощным звездообразованием, где  $\sigma > 100\text{--}200 \text{ км с}^{-1}$ ), оставаясь малодействительным при изучении карликовых галактик, а также протяженных областей диффузного ионизованного газа (diffuse ionized gas, DIG) с низкой поверхностной яркостью.

При исследованиях подобных объектов López-Cobá et al. (2017), Oparin and Moiseev (2018) использовал отношения линий, полученные классическими методами панорамной спектроскопии, в комбинации с данными наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри–Перо (ИФП) с достаточно высоким для оценки дисперсии лучевых скоростей спектральным разрешением.

Мы представляем результаты комплексного исследования состояния ионизованного газа в NGC 3077 на основе нового наблюдательного материала: длиннощелевой и 3D-спектроскопии со сканирующим интерферометром Фабри–Перо (ИФП) на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) и узкополосной фотометрии с прибором MaNGaL на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ). Проведенные нами наблюдения и их обработка описаны в разделе 2. Раздел 3 содержит описание основных полученных наблюдательных результатов. В частности, в разделе 3.1 приводятся результаты анализа кинематики ионизованного газа по данным наблюдений с ИФП; раздел 3.2 посвящен анализу эмиссионного спектра галактики и металличности газа по данным длиннощелевой спектроскопии; в разделе 3.3 проводится анализ состояния ионизации газа по данным узкополосной фотометрии с MaNGaL. Раздел 4 суммирует полученные нами выводы.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Сведения о деталях проведенных наблюдений приводятся в таблице 1. В столбцах указаны: режим наблюдений, дата, число и длительность экспозиций, качество изображений  $\theta$ , спектральный диапазон  $\Delta\lambda$  и разрешение  $\delta\lambda$ , а также масштаб изображений.



**Рис. 1.** Верхний ряд: (а) — композитное цветное изображение NGC 3077 из обзора SDSS DR15 и (б) — карта показателя цвета  $(g - r)$ . Показаны изофоты в линии  $H\alpha$ , построенные по данным наблюдений с ИФП на 6-м телескопе. Нижний ряд: (с) — изображения, полученные с MaNGaL на 2.5-м телескопе,  $H\alpha$  с положением щелей спектрографа SCORPIO-2 и (д) — [O III].

Таблица 1. Журнал наблюдений NGC 3077

Режим	Дата	$T_{\text{exp}}$ , с	$\theta$ , arcsec	$\Delta\lambda$ , Å	$\delta\lambda$ , Å	Scale, "/px
LS $PA = 312$	Oct 11, 2013	$6 \times 1200$	1.6	3650–7250	5.2	0.35
LS $PA = 234$	Feb 21, 2014	$6 \times 1200$	2.8	3650–7250	5.2	0.35
FPI-1	Nov 09, 2013	$40 \times 300$	2.0	8.7 вокруг $H\alpha$	0.4	0.71
FPI-2	Nov 10, 2013	$40 \times 300$	1.6	8.7 вокруг $H\alpha$	0.4	0.71
MaNGaL	Apr 10, 2018	$3 \times 300$	1.8	$H\alpha$	15	0.66
	Apr 10, 2018	$6 \times 300$	1.8	[N II] $\lambda$ 6583	15	0.66
	Apr 10, 2018	$6 \times 150$	1.8	$H\alpha$ cont1	15	0.66
	Apr 10, 2018	$5 \times 150$	1.8	$H\alpha$ cont2	15	0.66
	Apr 10, 2018	$4 \times 300$	1.9	[S II] $\lambda$ 6717	15	0.66
	Apr 10, 2018	$4 \times 300$	1.9	[S II] $\lambda$ 6731	15	0.66
	Apr 10, 2018	$3 \times 300$	1.9	[S II] cont.	15	0.66
	Apr 10, 2018	$7 \times 300$	2.0	[O III] $\lambda$ 5007	15	0.66
	Apr 10, 2018	$5 \times 300$	2.0	[O III] cont.	15	0.66

### 2.1. 3D-спектроскопия со сканирующим ИФП

Исследование кинематики ионизованного газа в эмиссионной линии  $H\alpha$  выполнялось в первичном фокусе 6-м телескопа САО РАН с помощью многорежимного фокального редуктора SCORPIO-2 (Афанасьев и Моисеев 2011) в режиме сканирующего интерферометра Фабри–Перо (ИФП). Интерферометр IFR751 обеспечивал свободный спектральный диапазон между соседними порядками интерференции  $\Delta\lambda = 8.7 \text{ \AA}$  при масштабе  $0.22 \text{ \AA}$  на канал. Рабочий диапазон вокруг красномещенной линии  $H\alpha$  выделялся узкополосным фильтром #77В с центральной длиной волны  $CWL = 6571 \text{ \AA}$ . Сканирование состояло из последовательности 40 интерферограмм, получаемых при различных расстояниях между пластинами интерферометра и равномерно заполняющих спектральный диапазон. Поле зрения составляло  $6'.1 \times 6'.1$  при масштабе  $0''.7$  на пиксель. Результатом обработки, выполненной с помощью пакета программ, описанного в статьях Моисеев (2015), Моисеев and Egorov (2008), являлся куб данных, где каждый пиксель в поле зрения содержит 40-канальный спектр. Наблюдения выполнялись при двух различных разворотах поля зрения прибора, полученные кубы данных затем складывались с целью удаления паразитных бликов (см. Моисеев and Egorov 2008).

### 2.2. Длиннощелевая спектроскопия

С помощью того же прибора SCORPIO-2 6-м телескопа САО РАН в режиме спектроскопии

с длинной щелью (размер щели  $6'.1 \times 1''$ ) были получены спектрограммы разрезов при двух позиционных углах ( $PA = 234^\circ$  и  $312^\circ$ ), проходящих через полость в распределении ионизованного газа в линии  $H\alpha$  на севере центральной части галактики. Локализация щелей спектрографа показана на рис. 1. Использовалась решетка VPHG 1200@540, обеспечивающая спектральное разрешение  $\delta\lambda \approx 5 \text{ \AA}$  в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda = 3650\text{--}7250 \text{ \AA}$ .

Обработка наблюдений проводилась стандартным образом с помощью пакета программ, написанного для редукции длиннощелевых данных со SCORPIO-2 на языке IDL. Основные этапы обработки включали вычитание тока смещения, чистку следов космических частиц, деление на спектр плоского поля, линеаризацию, вычитание эмиссионного спектра ночного неба. Для привязки к шкале длин волн использовался спектр сравнения He-Ne-Ag лампы, снятый в ту же ночь. Для калибровки за спектральную чувствительность и привязки к абсолютным энергетическим единицам были использованы спектрофотометрические стандарты BD+28d4211 и BD+33d2642, спектры которых были получены в одну ночь с NGC 3077 на близком зенитном расстоянии.

С помощью пакета программ ULySS<sup>1</sup> (Koleva et al. 2009) мы смоделировали спектр подстилающего звездного населения для каждого положения

<sup>1</sup><http://ulyss.univ-lyon1.fr>

вдоль щелей и вычли его из полученных спектров. Это позволило нам провести анализ эмиссионного спектра ионизованного газа в галактике. Для измерения потоков в эмиссионных линиях мы проводили аппроксимирование наблюдаемого профиля линии в каждом положении вдоль щели однокомпонентной гауссианой с помощью написанного нами в IDL пакета программ, основанного на процедуре MPFIT (Markwardt 2009). Показанные ниже в тексте и на графиках ошибки измерения потоков являются квадратичной суммой ошибок, связанных с шумом и первичной редукицией, и погрешностью аппроксимирования функцией Гаусса.

Все приведенные в статье величины потоков исправлены за межзвездное поглощение внутри NGC 3077. При этом избыток цвета  $E(B - V)$  был определен для каждой области из наблюдаемого Бальмеровского декремента ( $H\alpha/H\beta$ ) и сравнения с теоретическим отношением потоков  $H\alpha/H\beta = 2.86$  для  $T_e = 10000$  К. Для исправления за покраснение мы использовали кривую поглощения Cardelli et al. (1989), параметризованную в работе Fitzpatrick (1999).

### 2.3. Узкополосная фотометрия с MaNGaL

Узкополосные изображения галактики в эмиссионных линиях [O III] $\lambda$  5007,  $H\alpha$ , [N II] $\lambda$  6583, [S II] $\lambda$  6717, 6731 были получены на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Kornilov et al. 2014) в фокусе Несмит-2 с помощью фотометра с перестраиваемым фильтром Mapper of Narrow Galaxy Lines (MaNGaL), разработанного в CAO РАН (Moiseev et al. 2020). Прибор представляет собой афокальный редуктор светосилы, перед камерой которого в сходящемся пучке лучей от телескопа установлен сканирующий пьезоэлектрический ИФП низкого разрешения (порядок интерференции около 20 в линии  $H\alpha$ ). Ширина инструментального контура (т.е. узкополосного фильтра) составляла в используемом спектральном диапазоне  $FWHM = 13 \pm 1 \text{ \AA}$ . Центральную длину волны ( $CWL$ ) можно было задавать с помощью управляемого дистанционно контроллера CS-100<sup>2</sup> с точностью около 0.4  $\text{\AA}$ . В качестве детектора использовалась низкошумящая ПЗС камера iKon-M934 форматом 1024  $\times$  1024 пикселя. Для экономии времени считывания и уменьшения шумов наблюдения выполнялись в режиме аппаратного биннинга 2  $\times$  2.

Принятая оптическая схема, в отличие от классической установки ИФП в коллимированном пучке, позволяет получить относительно большой

диаметр монохроматического пятна (пятна Жакино, (Jones et al. 2002)). В нашем случае  $CWL$  пропускания ИФП изменяется не более чем на  $\pm 0.5 FWHM$  по всему полю зрения размером 5'6  $\times$  5'6. Поэтому вариациями  $CWL$  вдоль видимого изображения NGC 3077 можно пренебречь. Отметим также, что согласно полученному нами полю лучевых скоростей (рис. 3), доплеровские изменения длины волны эмиссионных линий не превышают 2–3  $\text{\AA}$ , т.е. малы по сравнению с шириной фильтра.

Во время наблюдений последовательно выполнялись накопления изображений при настройке полосы фильтра на эмиссионную линию (с учетом средней скорости галактики и гелиоцентрической поправки) и на континуум, смещенный на 30–50  $\text{\AA}$ . Наблюдения такими сериями позволяют усреднить вклад от вариаций атмосферной прозрачности и качества изображения (seeing). Пики пропускания от соседних порядков интерференции блокировались с помощью среднеполосных фильтров с шириной полосы около 250  $\text{\AA}$ . Отдельные фильтры использовались для наблюдений в линиях [O III]+континуум,  $H\alpha$ + [N II]+континуум и [S II]+континуум. В случае линий  $H\alpha$ + [N II] изображения в континууме наблюдались в спектральных полосах по обе стороны от линии и затем усреднялись, в остальных линиях — только в одной полосе.

Обработка полученных изображений мало отличалась от стандартной редукиции прямых снимков. После учета тока смещения и плоского поля (засветка прибора лампой накаливания через интегрирующую сферу) кадры, полученные в одной спектральной полосе, совмещались, выполнялось их суммирование с чисткой следов космических частиц. Совмещение проводилось по реперным звездам. Из изображений в эмиссионных линиях вычитались изображения в континууме, умноженные на коэффициент, близкий к единице, определяемый так, чтобы результирующий поток от изображений звезд фона был нулевым. Благодаря тому, что континуум наблюдался на очень близких длинах волн, качество его вычитания заметно лучше, чем при стандартных наблюдениях с фильтрами шириной полосы 50–200  $\text{\AA}$ .

Привязка изображений к шкале абсолютных потоков проводилась по наблюдениям спектрофотометрических стандартов, по методике, описанной в работе Moiseev et al. (2020).

На построенном нами изображении в линии  $H\alpha$  (рис. 1) видны практически все слабые эмиссионные детали, что и на самом глубоком из опубликованных снимков в этой линии, полученном на 6-м телескопе (Karachentsev and Kaisin 2007). Но при этом звезды переднего фона и звездное

<sup>2</sup>Все используемые для наблюдений ИФП и контроллеры изготовлены IC Optical Systems Ltd, Великобритания

население самой галактики вычтены явно лучше. На изображении в линии [O III] заметны многочисленные компактные объекты, почти отсутствующие в  $H\alpha$ . Они рассматриваются нами как кандидаты в планетарные туманности и остатки сверхновых. Их изучению будет посвящена отдельная работа (Syrkova and Moiseev, подана в *Astrophysical Bulletin*).

С помощью сервиса Astrometry.net<sup>3</sup> (Lang et al. 2010) для изображений MaNGaL и куба данных ИФП была выполнена астрометрическая привязка. Это позволило с высокой пространственной точностью сопоставить данные длиннощелевой и панорамной спектроскопии и фотометрии с перестраиваемым фильтром. Построенная по данным MaNGaL карта отношения потоков в близких эмиссионных линиях  $I([\text{N II}])/I(H\alpha)$  исправлялась за эффект низкого спектрального разрешения согласно соотношению, приведенному в работе Moiseev et al. (2020).

#### 2.4. Учет поглощения и карта яркости в линии $H\beta$

Для построения диагностических диаграмм, разделяющих вклад от разных источников ионизации, важно измерить отношение эмиссионных линий  $I([\text{O III}]\lambda 5007)/I(H\beta)$ . Мы не проводили наблюдений с MaNGaL в линии  $H\beta$ , так как наблюдаемый поток в ней в несколько раз слабее, чем в  $H\alpha$ , и потребовались бы слишком длительные экспозиции. Вместо этого мы попробовали расчитать распределение яркости в  $H\beta$ , используя изображение в линии  $H\alpha$  и оценку поглощения по данным оптической фотометрии SDSS DR9, с помощью двух различных методов.

Метод 1 интерпретирует уменьшение яркости  $I$  в данной точке относительно среднего на данном радиусе  $I_0$  в фильтре  $g$  как пылевое поглощение:  $A_g = -2.5 \lg I/I_0$ . Профиль  $I_0(r)$  усреднялся в эллипсах, соответствующих ориентации внешних изофот ( $PA = 50^\circ$ ,  $a/b = 0.85$ ). На исходном изображении маскировались звезды фона, области звездообразования и наиболее заметные пылевые прожилки. Из-за асимметрии в пылевом поглощении усреднение выполнялось отдельно по разные стороны от большой оси, для получения итоговой карты  $A_g$  обе половинки совмещались. Избыток яркости относительно  $I_0$  интерпретировался как отсутствие поглощения.

В Методе 2 за основу бралась карта показателя цвета  $(g - r)$ , по которой строился средний радиальный профиль показателя цвета  $(g - r)_0$  звездного населения, полученный усреднением

в таких же эллиптических кольцах, как в Методе 1. Аналогично выполнялось и маскирование пекулярных областей. Пылевое поглощение мы определяли здесь как  $A_g = 3.1E(g - r)$ , где  $E(g - r) = (g - r) - (g - r)_0$ .

Оба использованных метода могут давать систематическую ошибку в оценках поглощения. Причина, прежде всего, в том, что пыль в NGC 3077 распределена сложно и неравномерно по сравнению со звездами, видны отдельные филаменты, сложным образом связанные с областями H II и диффузным газом. Поэтому мы сравнивали полученные обоими методами карты «фотометрического» поглощения  $A_{g,phot}$  со спектральными оценками  $A_{g,sp}$  вдоль двух имеющихся спектральных разрезов, вычисленных стандартным методом Бальмеровского декремента, это описано выше в разделе 2.2. Сравнение показало, что в обоих случаях требуется введение некоторого поправочного коэффициента  $k = A_{g,sp} - A_{g,phot}$ . При таком определении  $k$  учитывает также поглощение по лучу зрения в Млечном пути. Однако Метод 1 лучше описывает вариации поглощения, наблюдаемые вдоль щели спектрографа, а поправочный коэффициент имеет меньшую величину. Поэтому расчет карты распределения яркости в  $H\beta$  выполнялся Методом 1.

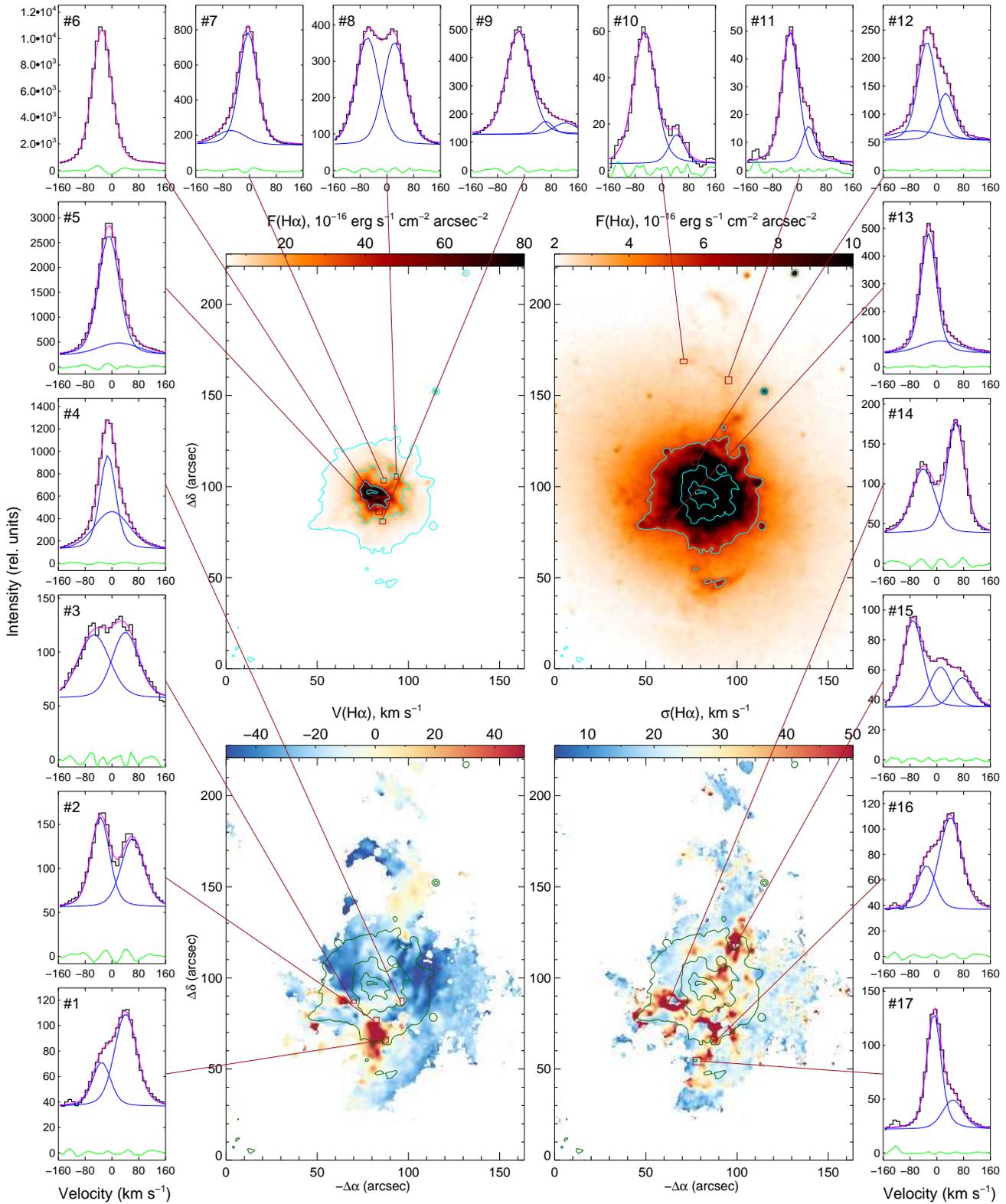
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

#### 3.1. Анализ кинематики в линии $H\alpha$

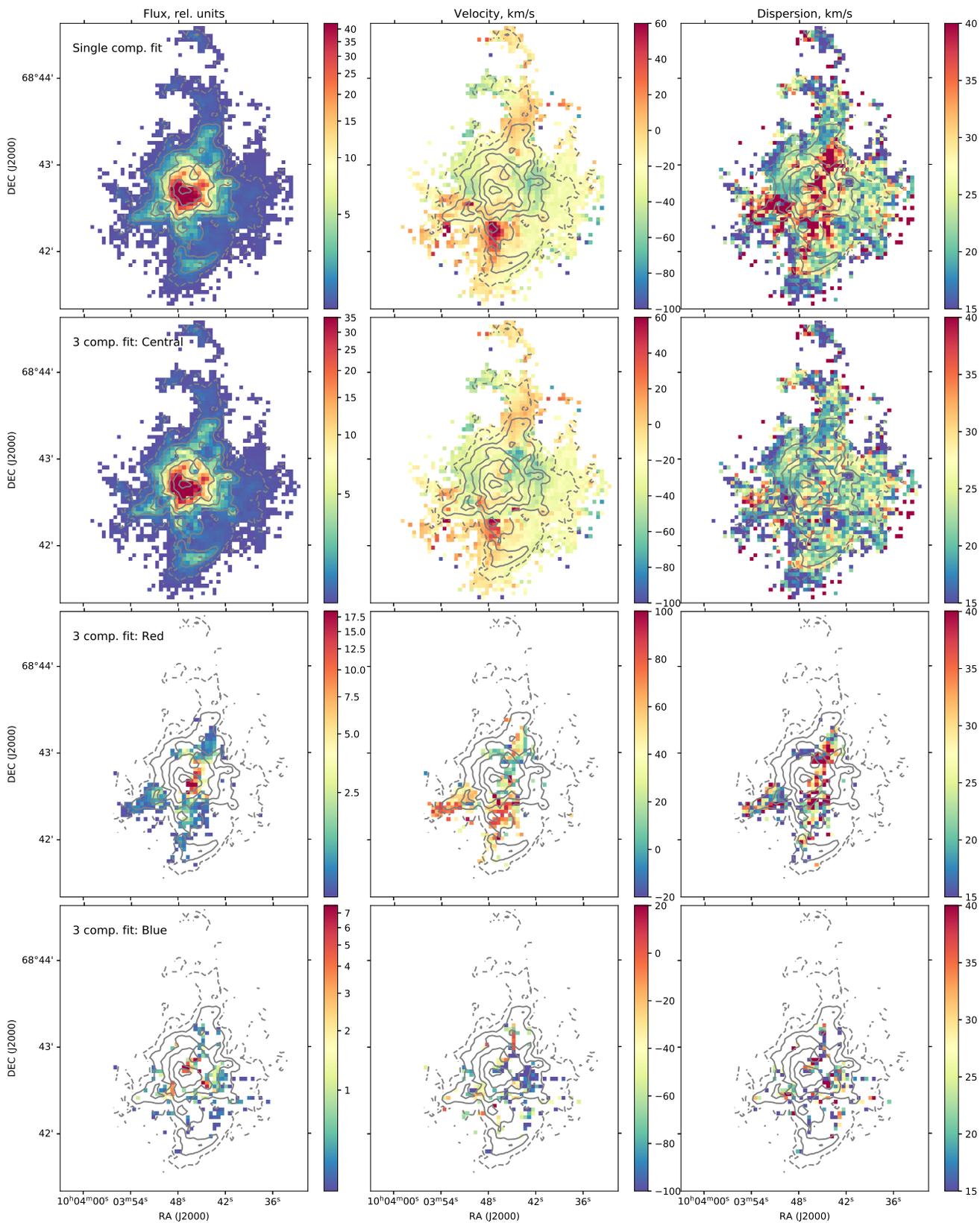
Профили эмиссионных линий ионизованного газа, наблюдаемые с ИФП, как правило, хорошо описываются функцией Фойгта (Moiseev 2015, Moiseev and Egorov 2008). Результат такой аппроксимации индивидуальных спектров в кубе данных позволяет построить изображения галактики в эмиссионной линии и в континууме, а также карты лучевых скоростей и дисперсий скоростей  $\sigma$ , свободных от аппаратного уширения. На нижних панелях рис. 2 показаны карты распределения лучевой скорости и дисперсий скоростей  $\sigma$ , полученные путем аппроксимации куба данных однокомпонентным профилем Фойгта (верхние панели демонстрируют распределение поверхностной яркости  $H\alpha$  по данным наблюдений с MaNGaL в том же масштабе).

Хотя на карте лучевых скоростей галактики обнаруживается некоторый ( $\approx 20 \text{ км с}^{-1}$ ) градиент с запада на восток, она не демонстрирует явно заметной вращательной структуры, выделение оси вращения и аппроксимация кругового движения четкой моделью невозможно. Это согласуется с результатами Epinat et al. (2008). Полученные нами значения дисперсии лучевых скоростей в линии  $H\alpha$

<sup>3</sup><http://astrometry.net>



**Рис. 2.** Пример наблюдаемых профилей линии H $\alpha$  и результат их декомпозиции на 1–3 функции Фойгта (соответствующие профили показаны синим цветом, а зеленым цветом — остаток от их вычитания из наблюдаемого спектра). Профили получены путем интегрирования в прямоугольных областях, отмеченных на изображениях. Верхний ряд изображений демонстрирует распределение потока в линии H $\alpha$  для разных уровней интенсивности. Нижний ряд показывает поля лучевых скоростей (слева) и дисперсии скоростей (справа), полученные путем аппроксимации наблюдаемых профилей однокомпонентной функцией Фойгта. Изофоты соответствуют постоянным уровням яркости в линии H $\alpha$  равным  $(0.2, 0.5, 1.6, 4.9, 14.6) \times 10^{-16}$  эрг/с $^{-1}$  см $^{-2}$  угл. с $^{-2}$ .



**Рис. 3.** Результаты декомпозиции куба данных ИФП в линии  $H\alpha$  для NGC 3077 на одну и три кинематически выделенных компоненты. Слева направо — карты потока, лучевой скорости, дисперсии скоростей в линии  $H\alpha$ . Верхние панели получены путем декомпозиции одиночным профилем Фойгта, в то время как нижние три панели содержат информацию о центральной и смещенных в красную и синюю сторону компонентах при декомпозиции трехкомпонентным профилем Фойгта.

в основном не превышают  $20\text{--}30\text{ км с}^{-1}$ , в отдельных компактных областях достигая  $35\text{--}60\text{ км с}^{-1}$ . В частности, некоторые из этих областей повышенной дисперсии совпадают с компактными рентгеновскими источниками из работы Ott et al. (2005).

При изучении куба данных NGC 3077 в  $\text{H}\alpha$  были выявлены многочисленные области, демонстрирующие сложную структуру профиля эмиссионной линии: несимметричность, разделение на две или три компоненты (см. примеры декомпозиции профилей на Рис. 2). В самом центре галактики наблюдается яркий выраженный однокомпонентный профиль линии  $\text{H}\alpha$ . В то же время за пределами самой яркой области II в галактике практически везде обнаруживаются сложные многокомпонентные профили. В частности, во всех областях с высокой дисперсией скоростей, полученной из аппроксимации одной компонентой, наблюдаются профили линии  $\text{H}\alpha$ , четко разделяющиеся на две или три компоненты (см., например, профили #14–17 на Рис. 2). Аналогичная картина наблюдается и в областях с наибольшими значениями лучевой скорости (профили #1–4).

Чтобы оценить характер движения газа в галактике, мы попытались осуществить декомпозицию профилей линии  $\text{H}\alpha$  на кинематически выделенные компоненты во всем кубе данных и проследить пространственное распределение каждой компоненты. Для этой цели мы аппроксимировали профиль  $\text{H}\alpha$  в каждом пространственном элементе куба данных (предварительно биннированного с размером окна в 4 пикселя для увеличения сигнал/шум) 1–3 компонентами. Процедура выполнялась итеративно, начиная с наименьшего числа компонент, и с добавлением следующей компоненты в случае, если остаток от вычитания модели трехкратно превышает уровень шума. В некоторых областях число компонент регулировалось вручную по результатам визуального контроля результатов автоматического анализа. Далее мы выделили «центральную», «синюю» и «красную» компоненты (в соответствии с их лучевыми скоростями) и рассмотрели пространственное распределение их характеристик. В случае двухкомпонентного профиля за «центральную» принималась наиболее яркая компонента. Результаты анализа представлены на рис. 3 (верхняя панель показывает прежний результат аппроксимации одной компонентой для сравнения).

Карты кинематически выделенных компонент показывают, что практически все области повышенной дисперсии на рис. 2 и верхней панели рис. 3 показывают наличие смещенной компоненты в красную (в основном) или синюю сторону. При этом дисперсия скоростей центральной компоненты в среднем совпадает с таковой в невозмущенных областях галактики. Заметим, что локализация красной и синей компонент совпадает с видимыми

на SDSS-изображениях пылевыми прожилками, а также с оболочками, найденными по данным эшелле-спектроскопии (Martin 1998).

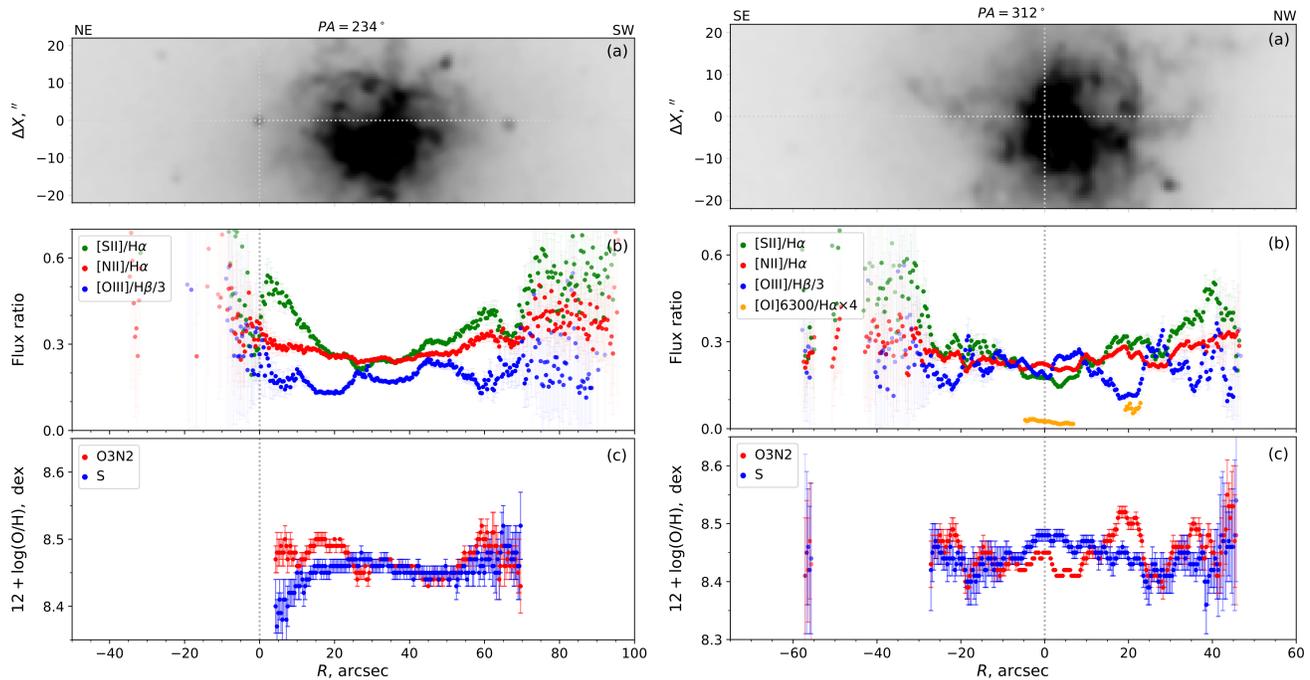
Отметим, что ввиду сложной структуры профиля линии, однозначное разделение компонент и построение картины их пространственного распределения сильно затруднены, что не позволяет нам надежно восстановить объемную структуру ионизованного газа. Тем не менее, мы не наблюдаем картины распределения лучевых скоростей, характерной для расширяющихся сверхоболочек, где разница скоростей между компонентами максимальна в центре оболочки и убывает по краям. В то же время нельзя исключать существования компактных оболочечных структур, как, например, в статьях Egorov et al. (2014; 2018), или же наличия расширяющихся оболочек в существенно неоднородной среде (Egorov et al. 2010, Lozinskaya et al. 2003).

Заметим также, что некоторые из профилей, показанных на рис. 3 (#5, 7, 12, 13), демонстрируют наличие широкой подложки с низкой яркостью, которая на самом деле может быть выделена для существенной части галактики, но ее вклад не учитывался на рис. 3. Таким образом, может идти речь об еще одной компоненте с низкой яркостью,  $\sigma > 100\text{--}150\text{ км с}^{-1}$ . Указанная оценка дисперсии скоростей получена в предположении, что  $FWHM$  сравнима или превышает рабочий диапазон ИФП и поэтому не может быть оценена. Отметим, что недавно наличие широких компонент в нескольких гигантских областях звездообразования в галактике M 101 было достоверно показано в работе Bresolin et al. (2020). Ширина этих компонент, измеренная по уровню нулевой интенсивности ( $FWZI$ , Full Width at Zero Intensity), достигала  $750\text{--}1300\text{ км с}^{-1}$ , что дает нам оценку дисперсии скоростей  $\sigma = 100\text{--}200\text{ км с}^{-1}$  (в предположении, что  $FWHM \approx FWZI/3$ ). Наличие такой широкой компоненты в областях активного звездообразования может быть связано с действием ветра массивных звезд на окружающие молекулярные облака.

### 3.2. Анализ длиннощелевых спектров

На рис. 4 показаны результаты анализа распределения отношений потоков в некоторых эмиссионных линиях и металличности вдоль щелей спектрографа, локализация которых показана горизонтальной линией на верхней панели.

До настоящего времени металличность межзвездной среды в NGC 3077 была исследована только в работе Storchi-Bergmann et al. (1994) по интегральному оптическому спектру центральной



**Рис. 4.** Результаты анализа эмиссионного спектра, полученного при положениях щели спектрографа  $PA = 234^\circ$  (слева) и  $PA = 312^\circ$  (справа). Панели сверху вниз: (a) карта галактики в линии  $H\alpha$ , полученная с MaNGaL (горизонтальная линия соответствует локализации щели спектрографа); (b) распределение отношений потоков в линиях; (c) распределение относительного содержания кислорода  $12 + \lg(O/H)$ , оцененного двумя эмпирическими методами.

части галактики в большой апертуре. Для кислорода, который является индикатором металличности газа в межзвездной среде, относительное содержание было оценено как  $12 + \lg(O/H) = 8.64$ . Такая величина указывает на солнечное содержание тяжелых элементов, что не характерно для карликовых галактик такой светимости (галактика отклоняется от зависимости «светимость–металличность» (Pilyugin et al. 2004)). Используя тот же спектр, Calzetti et al. (2004) получили еще большее значение  $12 + \lg(O/H) = 8.9$ . Столь существенное различие связано, в первую очередь, с тем, что авторы использовали разные семейства методов сильных линий (калиброванные по H II областям с надежными оценками электронной температуры  $T_e$  и по фотоионизационным моделям), что может приводить к разногласию до 0.6 dex (см., например, Kewley and Ellison 2008). По нашим данным длиннощелевых наблюдений мы можем не только уточнить значение металличности газа в NGC 3077, но и проследить ее распределение вдоль щелей.

Для оценки относительного содержания кислорода  $12 + \lg(O/H)$  мы использовали два эмпирических метода — O3N2 (Marino et al. 2013) и S (Pilyugin and Grebel 2016), базирующихся на отношениях ярких эмиссионных линий  $[O III]/H\beta$ ,  $[N II]/H\alpha$  и  $[S II]/H\alpha$  (только в случае S-метода).

Оба метода калиброваны по областям H II с имеющимися надежными измерениями электронной температуры  $T_e$  и металличности, выполненными  $T_e$ -методом. Мы исключали из анализа пиксели вдоль щелей, не попадающие в области H II на ВРТ-диаграммах (см. ниже) или имеющие эквивалентную ширину  $EW(H\alpha) < 6 \text{ \AA}$ . Как следует из рис. 4, оба метода демонстрируют сходные значения без признаков градиента металличности, но с небольшими вариациями, которые могут быть связаны с вариацией ионизационного параметра из-за вклада DIG и просто с погрешностью методов, составляющей около 0.10–0.15 dex.

Оценки, полученные двумя методами по интегральному спектру центральной части (от  $-5$  до  $+7$  угл. с от центра щели вдоль нее при  $PA = 312^\circ$ ), составляют  $12 + \lg(O/H)_{O3N2} = 8.43 \pm 0.02$  и  $12 + \lg(O/H)_S = 8.47 \pm 0.03$  (ошибки не учитывают погрешность методов). В данной области сигнал/шум в синей части спектра был достаточен, чтобы включить в анализ также отношение  $[OII] \lambda 3727/H\beta$ . Добавив его к анализу металличности, мы использовали метод R из работы Pilyugin and Grebel (2016) и получили согласующуюся с указанными значениями оценку  $12 + \lg(O/H)_R = 8.49 \pm 0.05$ . Таким образом, в отличие от того, что считалось ранее, согласно нашим измерениям, металличность газа в галактике значительно ниже

солнечной и составляет  $Z = 0.6Z_{\odot}$ . Существенных вариаций содержания кислорода вдоль щели мы не выявили. Однако, как сказано далее в разделе 3.3, более обогащенный газ, связанный с приливным потоком от M 81, может наблюдаться на периферии галактики. Полученная нами оценка металличности газа хорошо согласуется с зависимостью «светимость—металличность» из работы Pilyugin et al. (2004) для принятого для NGC 3077 значения  $M_B = -17.62$ .

Построенные по результатам спектральных наблюдений диагностические диаграммы [O III]/H $\beta$  vs [N II]/H $\alpha$ , [S II]/H $\alpha$  и [OI]/H $\alpha$  приведены на рис. 5. На верхних панелях цветом показана поверхностная яркость в линии H $\alpha$ , черные линии отмечают положение кривой из работы Kewley et al. (2001), отделяющей области, где излучение может объясняться фотоионизацией, от областей с другим механизмом излучения (AGN, ударные волны). Серая линия на левой панели из работы Kauffmann et al. (2003) отделяет области H II от областей с композитным механизмом ионизации. Прямая на диаграмме [O III]/H $\beta$  — [S II]/H $\alpha$  из работы Kewley et al. (2006) разделяет области Seyfert и LINER. На рисунке также показаны модели ударных волн, взятые из работы Allen et al. (2008) для металличности  $Z = 0.6Z_{\odot}$ , соответствующей нашей оценке для NGC 3077. Различные цветные кривые соответствуют моделям для разной скорости ударных волн. При этом на верхних панелях показаны модели с учетом вклада прекурсора, а на нижних — только ударных волн. Как следует из диаграмм, вся наблюдаемая яркая эмиссия связана с фотоионизацией массивными звездами в областях звездообразования, в то время как в области композитного возбуждения и LINERs лежат только точки, соответствующие DIG с низкой поверхностной яркостью. Как видно из сопоставления диагностических диаграмм с моделями ударных волн, их действие может объяснить ионизацию областей низкой поверхностной яркости (рассогласование моделей ударных волн и наблюдений в случае [OI]/H $\alpha$  связано с отсутствием данных в линии [OI] от областей DIG). Следует заметить, что модели ударных волн без учета прекурсора от фотоионизации хуже объясняют наблюдаемые данные. Этот факт позволяет сделать вывод, что утечка ионизирующих квантов из областей звездообразования играет существенную роль в ионизации DIG в областях, попавших на щели. При этом роль ударных волн должна быть несущественна в ионизации наблюдаемых ярких областей ионизованного газа, в том числе протяженных филаментов и оболочечных структур.

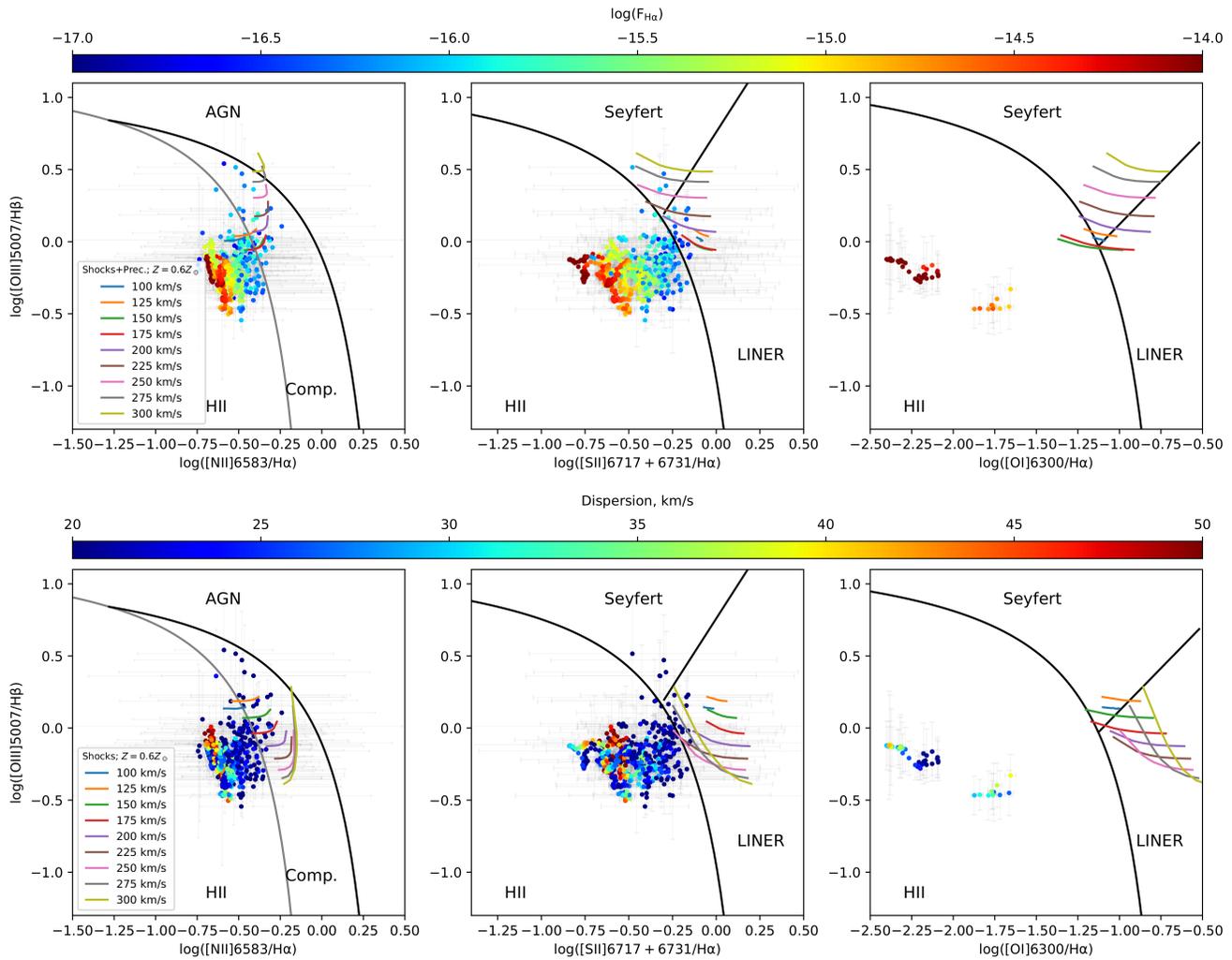
Нижние панели рис. 5 демонстрируют BPT- $\sigma$  диаграммы, на которых цветом показана диспер-

сия лучевых скоростей (измеренная по спектрам ИФП в результате декомпозиции однокомпонентным профилем), измеренная вдоль щели спектрографа. Как видно из данных диаграмм, в случае NGC 3077 области повышенной дисперсии скоростей связаны не с ударными волнами, а с областями звездообразования. Тем не менее, на диаграмме [S II]/H $\alpha$  небольшое смещение областей высокой дисперсии в сторону повышенного отношения линий выявляется.

### 3.3. BPT-диаграммы по данным узкополосной фотометрии

BPT-диаграммы, построенные по данным длиннощелевой спектроскопии, не позволяют провести анализ состояния ионизованного газа во всей галактике, поэтому мы строим отношения эмиссионных линий по данным фотометрии с перестраиваемым фильтром.

На рис. 6 представлены диагностические BPT-диаграммы, полученные для отношения линий [O III]/H $\beta$ , [N II]/H $\alpha$  и [S II]/H $\alpha$  при помощи картирования с MaNGaL. Цветовая маркировка соответствует дисперсии лучевых скоростей, полученных по данным ИФП. На рисунке представлены три набора диаграмм для различных областей галактики (см. ниже). Карты дисперсии лучевых скоростей для областей, включенных в каждый набор, представлены на правых панелях. Параметризация кривых, разделяющих области с разным типом ионизации (области фотоионизации — H II, объекты со смешанным типом ионизации — Comp., активные сейфертовские галактики — Seyfert, объекты типа LINER), взята из работы Kewley et al. (2006). Цветные линии, как и на рис. 5, соответствуют моделям ударных волн для разных скоростей из работы (Allen et al. 2008), однако на нижней панели приведены значения для солнечной металличности (на верхней — для  $Z = 0.56Z_{\odot}$ ). На верхней панели рис. 6 показаны диаграммы, построенные для всей галактики по данным с оригинальным размером пикселя. Подавляющее большинство точек на диаграммах попадает в области, характерные для фотоионизации излучением OB-звезд и не демонстрирует заметного вклада ударного возбуждения. Лишь незначительная их часть оказывается в областях смешанной ионизации. Данный результат согласуется с результатами наших длиннощелевых наблюдений, однако в то же время по сравнению с диаграммами, представленными в работах Calzetti et al. (2004), Hong et al. (2013), точки оказываются смещены вниз. По нашему мнению это связано с особенностями применяемой техники фотометрии в узко- и среднесплошных фильтрах на космическом телескопе HST. В частности, в них для учета

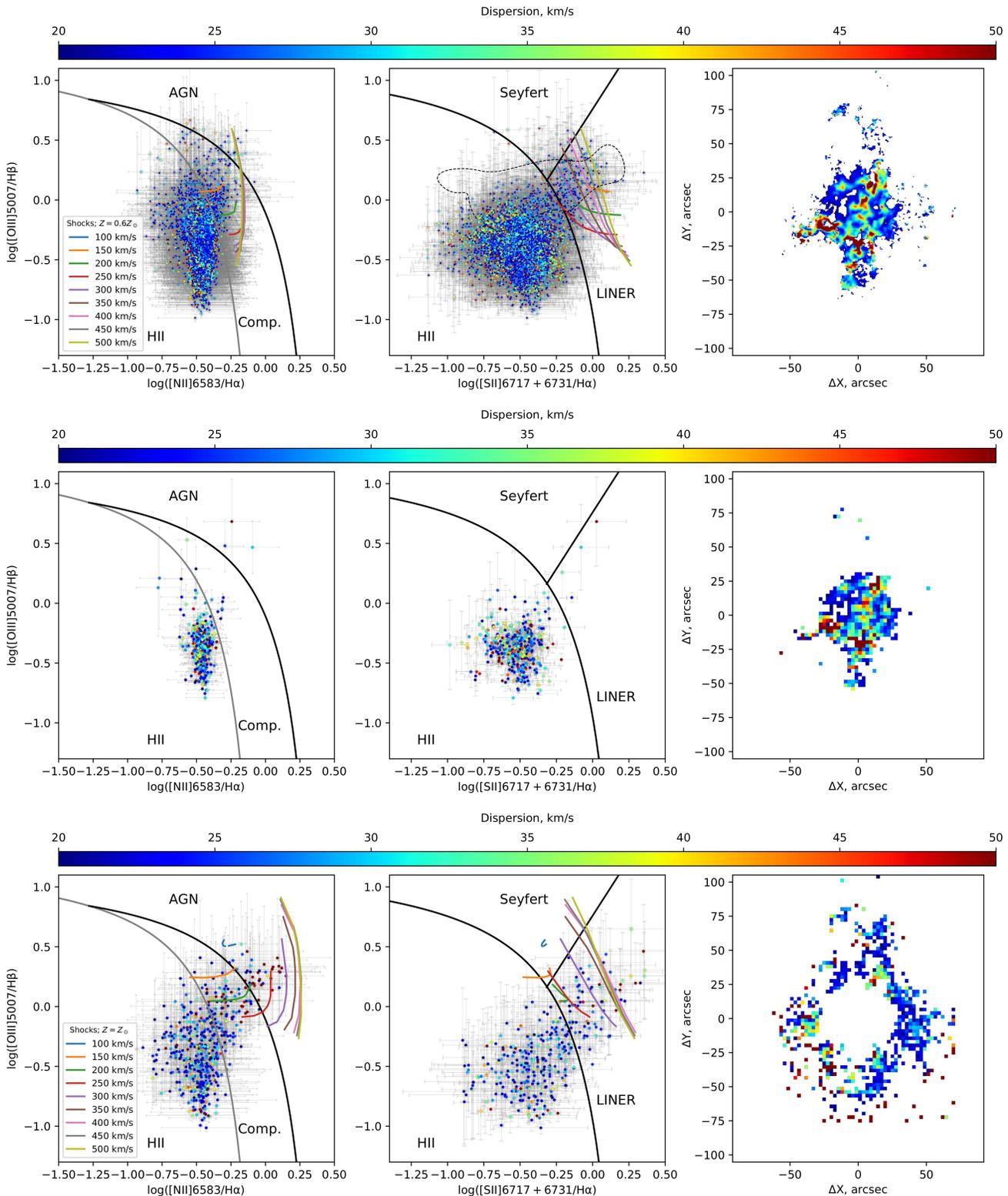


**Рис. 5.** BPT-диаграммы, построенные по данным спектральных наблюдений. Цветом закодированы логарифм поверхностной яркости в линии  $H\alpha$  (верхняя панель) и значения дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа (нижняя панель). Черные и серые кривые из работ, разделяющие области звездообразования, композитного механизма ионизации и LINERs взяты из Kewley et al. (2001) и Kauffmann et al. (2003). Диагональная линия, разделяющая области Seyfert и LINERs — из Kewley et al. (2006). Цветные линии соответствуют моделям ударных волн согласно Allen et al. (2008) для разных скоростей при металличности  $Z = 0.6Z_{\odot}$ . На верхних панелях приведены модели с учетом прекурсора, на нижних — исключительно для ударных волн.

вклада континуума звездного населения из изображений в линиях [O III] и  $H\beta$  вычитались кадры в фильтре F547M, что относительно далеко по длинам волн от изучаемых линий. Учет континуума по двум изображениям на близких длинах волн, примененный нами для фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволил с большей точностью оценить потоки в эмиссионных линиях. Кроме того, полученные нами спектры показывают, что в области  $H\beta$  существенно влияние абсорбционной линии звездного населения. Этот эффект сложно корректно учесть в фильтровых снимках, что, по видимому, также является причиной завышенного отношения [O III]/ $H\beta$  в указанных работах. Используемая же нами методика расчета распре-

ления  $H\beta$  по изображению в  $H\alpha$  с учетом карты поглощения свободна от этого недостатка, что подтверждается согласием между отношениями линий, построенными по данным SCORPIO-2, где учитывалась модель звездного населения, и по данным фотометрии с MaNGaL.

Поверхностная яркость в линии [O III] $\lambda$  5007 во внешних областях галактики значительно ниже, чем в линиях [N II] и [S II], что характерно для DIG. В нашем случае это приводит к тому, что из анализа BPT-диаграмм исключаются внешние области галактики, в которых яркость в линии кислорода оказывается ниже уровня шума, но заметен сигнал в линиях азота и серы. Чтобы обойти это ограничение, мы искусственно зада-



**Рис. 6.** BPT-диаграммы, построенные по данным наблюдений с перестраиваемым фильтром. Верхние панели — результат полученный для всей галактики с оригинальным размером пикселя. Средняя и нижние панели — диаграммы для внутренней и внешней областей по данным с биннингом 4. Цветом закодирована дисперсия скоростей  $H\alpha$ ; карта ее распределения для каждого набора областей показана на правых панелях. Цветные кривые соответствуют моделям ударных волн согласно Allen et al. (2008) для разных скоростей и металличностей  $Z = 0.56Z_{\odot}$  (верхние панели) и  $Z = Z_{\odot}$  (нижние панели). Штриховой кривой на верхней средней панели обведена область наблюдаемых отношений потоков линий согласно работе Hong et al. (2013).

ли значение потока в линии [O III]  $\lambda$  5007 равным стандартному отклонению уровня шума для тех областей, где уверенно детектируются линии [N II] и [S II] и не детектируется [O III]. Таким образом, заданное значение потока в линии [O III] является его верхней границей. Такая процедура позволяет нам отследить вариации механизма возбуждения по изменению отношений [N II]/H $\alpha$  и [S II]/H $\alpha$  на ВРТ-диаграммах в том числе и в областях с недостаточным  $S/N$  в линии [O III]  $\lambda$  5007. На рис. 6 представлены ВРТ-диаграммы и карта дисперсии скоростей для «внутренних» регионов галактики, где линия [O III]  $\lambda$  5007 уверенно детектируется (средняя панель), а также для внешних областей, где  $S/N \leq 3$  (нижняя панель).

Как видно из средней панели рис. 6, эмиссия в центральной части галактики NGC 3077 полностью может быть объяснена фотоионизацией ОВ-звездами, в том числе и в областях с наиболее высокой дисперсией скоростей. С другой стороны, во внешних частях галактики (нижние панели) прослеживается четкий тренд в правую часть ВРТ-диаграммы, за пределы области фотоионизации молодыми звездами, лежащий ниже демаркационной линии между областями Seyfert и LINER. Поскольку принятое нами значение потока в линии [O III]  $\lambda$  5007 во внешних областях является его оценкой сверху, в реальности точки на ВРТ-диаграмме должны располагаться не выше их локализации на рис. 6.

Заметим, что наблюдаемое положение на ВРТ-диаграммах в области LINER хорошо объясняется моделями ударных волн (Allen et al. 2008) как для металличности, близкой к полученной нами оценке для NGC 3077 (см. модели на верхней панели), так и для  $Z = Z_{\odot}$  (см. нижнюю панель). Добавление к этим моделям прекурсора от фотоионизации позволяет еще лучше объяснить распределение потоков на левой панели, но существенно хуже — для [S II]/H $\alpha$ , что указывает на наличие существенного вклада ударных волн в ионизацию во внешних областях. Корреляции с дисперсией скоростей ионизованного газа при этом не наблюдается. Для внешних областей положение точек на ВРТ-диаграмме может быть хорошо воспроизведено при значительно меньших скоростях ударных волн в случае, если они распространяются в среде с солнечным содержанием тяжелых элементов, чем если рассматривать металличность периферии такой же, как оценено нами по данным длиннощелевой спектроскопии в центральной части.

Анализ ВРТ-диаграммы для периферии NGC 3077 позволяет предположить, что мы наблюдаем здесь существенный вклад ударных волн, распространяющихся в среде с возможно более высокой металличностью газа, чем в центральной

части галактики. Такую картину можно объяснить как взаимодействием галактики с гигантской приливной структурой HI, так и с проявлениями галактического ветра, выбрасывающего обогащенный газ на периферию. Оба процесса могут быть ответственны за наличие ударных волн и, возможно, повышенную металличность газа на периферии. Но в случае внешней аккреции газовых облаков трудно ожидать высокоскоростных ударных волн: лучевая скорость облаков HI, согласно нашему анализу опубликованных в работе Walter et al. (2008; 2002) карт, составляет около  $-5 \pm 15 \text{ км с}^{-1}$ , что хорошо совпадает с системной скоростью NGC 3077, а предположение, что все взаимные движения происходят в картинной плоскости, является излишне смелым. С другой стороны, в случае существенного истечения вещества мы могли бы ожидать заметных проявлений ударных волн в направлении центра галактики. Однако ВРТ-диаграммы в центральной части галактики признаков ударных волн не выявляют, а основные кинематически выделенные сверхзвуковые движения газа наблюдаются вдоль крупномасштабных газо-пылевых волокон или связаны с локальными рентгеновскими источниками (сверхновыми), а не с крупномасштабным истечением газа из галактики. Мы можем заключить, что фотоионизация УФ-излучением молодых звезд в центральной части NGC 3077 явно вносит основной вклад в ионизацию газа, сравнительно с ударными волнами. Отметим, что такая картина типична для известных случаев галактического ветра: отношение  $I([\text{N II}])/I(\text{H}\alpha)$  соответствует областям H II в диске галактике, но растет к периферии, с удалением от областей центрального звездообразования López-Cobá et al. (см., например, 2019; 2017). При этом, наличие низкоконтрастной широкой компоненты в линии H $\alpha$  в центральных областях галактики свидетельствует в пользу истечения высокоскоростного газа из областей звездообразования.

Несмотря на указанные выше признаки истечения газа, мы не видим заметной корреляции между отношением линий и дисперсией скоростей  $\sigma$ , наблюдаемой в карликовых галактиках с текущим звездообразованием, прежде всего, с галактическим ветром (López-Cobá et al. 2017, Oparin and Moiseev 2018). Скорее всего, причина в том, что вдоль луча зрения мы видим «смесь» из нескольких эмиссионных компонент: газ в самих областях звездообразования, газ, истекающий из диска, и аккреционные потоки в направлении диска. Мы наблюдаем многокомпонентную структуру профилей в данных ИФП. Но нам пока не удалось однозначно сопоставить дисперсии скоростей каждого компонента с соответствующим именно ему диагностическим отношением линий, поскольку данные отношения измерены по спектрам низкого разреше-

ния. Возможно, это удастся сделать в дальнейшем, привлекая дополнительные спектральные данные и новые алгоритмы декомпозиции профилей.

#### 4. ВЫВОДЫ

На основе наблюдений, выполненных на 6-м телескопе БТА САО РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ методами длиннощелевой и 3D-спектроскопии, а также узкополосной фотометрии в эмиссионных линиях, мы провели исследование ионизованного газа в галактике NGC 3077.

Картирование со сканирующим ИФП позволило построить карты распределений лучевых скоростей и дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа галактики с высоким пространственным разрешением. По результатам длиннощелевой спектроскопии мы оценили относительное содержание кислорода в межзвездной среде центральной области галактики  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.43\text{--}8.49$  ( $Z \approx 0.6Z_{\odot}$ ), что существенно ниже полученной ранее оценки  $Z = Z_{\odot}$  и соответствует ожидаемому значению для NGC 3077 при ее светимости. Мы не выявили радиального градиента металличности. Диаграммы отношений эмиссионных линий, построенные по данным длиннощелевой спектроскопии и фотометрии с перестраиваемым фильтром, позволили уточнить результаты, опубликованные ранее в работе Hong et al. (2013). Хорошее согласие ВРТ-диаграмм, полученных двумя разными методами, показывает, что использование фотометрии с перестраиваемым фильтром для изучения состояния ионизации может служить хорошей альтернативой классическим методам спектроскопии при изучении источников ионизации газа протяженных объектов, в том числе и объектов с низкой поверхностной яркостью.

Несмотря на наличие в NGC 3077 отдельных областей относительно высокой, до  $\sigma \approx 60 \text{ км с}^{-1}$ , дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа мы, как и в случае карликовой галактики VII Zw 403 (Orpin and Moiseev 2018), не наблюдаем здесь корреляции между расположением точек на ВРТ-диаграмме и дисперсией скоростей  $\sigma$ . В центральных частях NGC 3077 вообще не обнаруживается сколь-нибудь заметного вклада ударных волн в ионизацию газа. Скорее всего, это связано с мощной фотоионизацией непосредственно в областях звездообразования: слабый вклад ударных волн в возбуждение [N II] и [S II] может быть не заметен в крыльях яркой линии  $\text{H}\alpha$ , смещая отношения [N II]/ $\text{H}\alpha$ , [S II]/ $\text{H}\alpha$  на ВРТ-диаграмме влево. Повышенная дисперсия скоростей  $\text{H}\alpha$  при этом объясняется наложением нескольких компонент на луче зрения. Проведенная декомпозиция куба данных, полученного с ИФП в линии  $\text{H}\alpha$ , позволила проследить

распределение как минимум трех кинематически выделенных компонент в галактике. При этом во многих областях наблюдается вклад широкой компоненты ( $\sigma > 100 \text{ км с}^{-1}$ ) низкой поверхностной яркости, вероятно связанной с проявлением ветра массивных звезд в областях звездообразования.

Полученная нами картина распределения лучевых скоростей позволяет предполагать, что часть ранее обнаруженных по данным эшелле-спектроскопии (Martin 1998) областей с ярко выраженным многокомпонентным профилем эмиссионных линий является не расширяющимися сверхоболочками, а отдельными кинематическими компонентами, что подтверждается также совпадением части из них с пылевыми прожилками на оптических изображениях. По нашему мнению, речь идет о выпадении холодного газа из приливной структуры на диск галактики. Это провоцирует звездообразование в центре NGC 3077.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовалась база внегалактических данных NASA/IPAC (NED), управляемая Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением авиации и космических исследований (США), а также публичные данные обзора SDSS (сайт <http://www.sdss3.org/>), который финансируется Фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, Национальным научным фондом, Министерством энергетики США, Национальной Администрацией авиации и космоса (NASA), японским фондом Monbukagakusho, обществом Макса Планка и Финансирующим Советом высшего образования Англии.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 17-12-01335 «Ионизованный газ в галактических дисках и за пределами оптического радиуса»). Авторы благодарны А. М. Татарникову и Н. И. Шатскому за организацию наблюдений в КГО ГАИШ МГУ, В. Л. Афанасьеву и А. Н. Буренкову, выполнивших наблюдения на БТА, Т. А. Лозинской за содействие в получении данных и обсуждение работы. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №05.619.21.0016, проект ID RFMEFI61919X0016).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
2. M. G. Allen, B. A. Groves, M. A. Dopita, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178** (1), 20 (2008).
3. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
4. F. Bresolin, L. Rizzi, I. T. Ho, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **495** (4), 4347 (2020).
5. D. Calzetti, J. Harris, I. Gallagher, John S., et al., *Astron. J.* **127** (3), 1405 (2004).
6. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989).
7. W. J. G. de Blok, F. Walter, A. M. N. Ferguson, et al., *Astrophys. J.* **865** (1), 26 (2018).
8. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, and A. V. Moiseev, *Astronomy Reports* **54**, 277 (2010).
9. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and G. V. Smirnov-Pinchukov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444** (1), 376 (2014).
10. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and G. V. Smirnov-Pinchukov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478** (3), 3386 (2018).
11. B. Epinat, P. Amram, M. Marcelin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **388** (2), 500 (2008).
12. E. L. Fitzpatrick, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (755), 63 (1999).
13. S. Hong, D. Calzetti, I. Gallagher, John S., et al., *Astrophys. J.* **777** (1), 63 (2013).
14. D. H. Jones, P. L. Shopbell, and J. Bland-Hawthorn, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **329** (4), 759 (2002).
15. E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin, *Astrophysical Bulletin* **67** (1), 115 (2012).
16. I. D. Karachentsev and S. S. Kaisin, *Astron. J.* **133** (5), 1883 (2007).
17. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and F. Boerngen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **217**, 731 (1985).
18. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, and E. I. Kaisina, *Astron. J.* **145** (4), 101 (2013).
19. G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **346** (4), 1055 (2003).
20. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556** (1), 121 (2001).
21. L. J. Kewley and S. L. Ellison, *Astrophys. J.* **681** (2), 1183 (2008).
22. L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 961 (2006).
23. M. Koleva, P. Prugniel, A. Bouchard, and Y. Wu, *Astron. and Astrophys.* **501**, 1269 (2009).
24. V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126** (939), 482 (2014).
25. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, et al., *Astron. J.* **139** (5), 1782 (2010).
26. C. López-Cobá, S. F. Sánchez, J. Bland-Hawthorn, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 4032 (2019).
27. C. López-Cobá, S. F. Sánchez, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (4), 4951 (2017).
28. T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and N. Y. Podorvanyuk, *Astronomy Letters* **29**, 77 (2003).
29. L. N. Makarova, E. K. Grebel, I. D. Karachentsev, et al., *Astron. and Astrophys.* **396**, 473 (2002).
30. R. A. Marino, F. F. Rosales-Ortega, S. F. Sánchez, et al., *Astron. and Astrophys.* **559**, A114 (2013).
31. C. B. Markwardt, *ASP Conf. Ser.*, **411**, 251 (2009).
32. C. L. Martin, *The Astrophysical Journal* **506** (1), 222 (1998).
33. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **70** (4), 494 (2015).
34. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63** (2), 181 (2008).
35. A. V. Moiseev, A. E. Perepelitsyn, and D. V. Oparin, *Experimental Astronomy* (in press), arXiv:2005.14598 (2020).
36. D. V. Oparin and A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **73** (3), 298 (2018).
37. J. Ott, F. Walter, and E. Brinks, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **358** (4), 1453 (2005).
38. L. S. Pilyugin and E. K. Grebel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **457** (4), 3678 (2016).
39. L. S. Pilyugin, J. M. Vilchez, and T. Contini, *Astron. and Astrophys.* **425**, 849 (2004).
40. A. Sorgho, T. Foster, C. Carignan, and L. Chemin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (1), 504 (2019).
41. T. Storchi-Bergmann, D. Calzetti, and A. L. Kinney, *Astrophys. J.* **429**, 572 (1994).
42. S. Veilleux and D. E. Osterbrock, *Astrophys. J. Suppl.* **63**, 295 (1987).
43. F. Walter, E. Brinks, W. J. G. de Blok, et al., *Astron. J.* **136** (6), 2563 (2008).
44. F. Walter, A. Weiss, C. Martin, and N. Scoville, *Astron. J.* **123**, 225 (2002).
45. M. S. Yun, P. T. P. Ho, and K. Y. Lo, *Nature* **372** (6506), 530 (1994).

**Ionized Gas in the NGC 3077 Galaxy****D. V. Oparin<sup>1</sup>, O. V. Egorov<sup>1,2</sup>, and A. V. Moiseev<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia<sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

The nearby dwarf galaxy NGC 3077 is known for its peculiar morphology, which includes numerous dust lanes and emission-line regions. The interstellar medium in this galaxy is subject to several perturbing factors. These are primarily the central starburst and tidal structures in the M81 group. We present a comprehensive study of the state of ionization, kinematics, and chemical composition of ionized gas in NGC 3077, including both star-forming regions and diffuse ionized gas (DIG) at the periphery. We study gas motions in the H $\alpha$  line via high-resolution ( $R \approx 15\,000$ ) 3D spectroscopy with the scanning Fabry–Perot interferometer installed into SCORPIO-2 instrument attached to the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Science. Images in the main optical emission lines were acquired with MaNGaL photometer with a tunable filter at the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory of Sternberg Astronomical Institute of M.V.Lomonosov Moscow State University. We also used SCORPIO-2 to perform long-slit spectroscopy of the galaxy with a resolution of  $R \approx 1\,000$ . Our estimate of the gas metallicity,  $Z = 0.6Z_{\odot}$ , is significantly lower than the earlier determination, but agrees with the “luminosity–metallicity” dependence. Spatially resolved diagnostic diagrams of the emission-line ratios do not show correlations between the gas ionization state and its velocity dispersion, and this is most likely due to strong ionization by young stars, whereas the contribution of shocks to the excitation of emission lines is less important. We also studied the locations of multicomponent H $\alpha$  profiles and provide arguments suggesting that they are mostly associated with individual kinematic components along the line of sight and not with expanding shells as it was believed earlier. We also observe there a combination of wind outflow from star-forming regions and accretion from interstellar gas clouds in the M81 group.

Keywords: *galaxies: dwarf—galaxies: ISM—galaxies: kinematics and dynamics—galaxies: starburst*