


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



ГУСЕВ Александр Сергеевич

**Звёздное население и процессы
современного звёздообразования
в галактиках**

01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

11 июл 2018

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук



Москва — 2018

Работа выполнена в Отделе внегалактической астрономии Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Вибе Дмитрий Зигфридович

зав. Отделом физики и эволюции звезд
Институт астрономии РАН

доктор физико-математических наук,
профессор РАН

Макаров Дмитрий Игоревич

зав. Лабораторией внегалактической астрофизики
и космологии

Специальная астрофизическая обсерватория РАН

доктор физико-математических наук,
профессор

Хонерсков Александр Валентинович

зав. кафедрой Информационных систем
и компьютерного моделирования

Волгоградский государственный университет

Защита диссертации состоится 04 октября 2018 года в 14:00 на заседании Диссертационного Совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, д. 13, конференц-зал.

E-mail: gusev@sai.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27) и на сайте ИАС "ИСТИНА":
<https://istina.msu.ru/dissertations/122252623/>.

Автореферат разослан 05 июля 2018 года.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета МГУ.01.02,
кандидат физико-математических наук



М.В. Пружинская

Актуальность темы исследования

Нобелевский лауреат В.Л. Гинзбург выделил в 1992 г. ряд наиболее важных и интересных проблем физики и астрофизики (Гинзбург, 1992). Одна из восьми астрофизических проблем посвящена вопросам внегалактической астрономии: “квазары и ядра галактик; образование галактик; проблема скрытой массы (темной материи) и ее детектирования”. За истекшие четверть века задачи, сформулированные В.Л. Гинзбургом, решаются на новом качественном и техническом уровне, но так до конца и не разрешены. Существуют значительные нестыковки между космологическими и астрофизическими теориями образования и ранней эволюции галактик; значимость влияния темного гало, межгалактического газа и близких галактик в эволюции звездных систем не вызывает сомнений, но не поддается однозначной общепринятой интерпретации (см., например, обзор Сильченко (2017)). Возьмем на себя смелость констатировать, что во внегалактической астрономии в настоящее время идет эпоха бурного накопления новых наблюдательных данных, несколько опережающее их теоретическое объяснение.

Определение состава звездного населения галактик и их отдельных крупных составных элементов является ключевой задачей при изучении вопросов эволюции галактик. Современный уровень развития приемной аппаратуры, методов обработки и хранения данных позволяет, в принципе, получить детальное распределение параметров звездного населения (возраст, металличность, дисперсия скоростей) в галактиках, неразрешимых на отдельные звезды. Это, однако, требует комплексных наблюдений: поверхностной фотометрии и спектрофотометрии в максимально широком диапазоне длин волн, одномерной и двумерной спектроскопии с высоким разрешением. Такие исследования успешно проводятся для близких ярких галактик (см., например, Gavazzi et al. (2002); Chilingarian et al. (2009)), но не являются массовыми.

Знание фотометрических параметров галактик и, в первую очередь, их дисковых компонент является необходимым для изучения динамики и эволюции галактик и позволяет оценить изменение состава звездного населения вдоль радиуса, распределение пыли, общей и скрытой массы в галактиках. Подобные исследования вносят важный вклад в решение вопросов, связанных с образованием и

эволюцией дисков галактик различных морфологических типов, от линзовидных до экстремально поздних спиральных.

Одним из основных инструментов изучения эволюции галактик является исследование химического состава звезд и межзвездной среды. Радиальные распределения содержания химических элементов в областях II отражают химическую эволюцию дисковых галактик и являются обязательными при изучении различных аспектов формирования и эволюции спиральных галактик. Результаты исследований химического состава газа обеспечили разработку моделей химической эволюции галактик (Chiappini et al., 2003; Marcon-Uchida et al., 2010). При исследовании химической эволюции галактик важным представляется изучение радиального градиента азота, позволяющего оценить скорость и историю звездообразования в дисках галактик (Mollá et al., 2006). Такие измерения имеются лишь для ограниченного числа (≈ 130) соседних галактик (Pilyugin et al., 2014).

К сожалению, спектральные и фотометрические наблюдения галактик плохо пересекаются друг с другом. Поэтому проведение спектральных наблюдений для галактик с имеющимися фотометрическими данными и фотометрических наблюдения для галактик, изученных с помощью спектроскопии, является весьма актуальным при исследовании процессов звездообразования.

Информацию о процессах современного звездообразования дает нам изучение областей звездообразования (звездных комплексов, молодых звездных скоплений, OB-ассоциаций, областей II) в галактиках. Знание физических параметров молодого звездного населения и межзвездной среды в таких областях крайне важно для проверки и уточнения наших представлений о физических условиях существования материи в дисках галактиках в современную эпоху. Создание и развитие однородной и полной базы фотометрических и спектральных данных областей звездообразования даст возможность приступить к массовым оценкам физических параметров молодого звездного населения и межзвездной среды в этих областях и создает необходимые предпосылки для изучения систематических свойств начальной функции масс и истории звездообразования в галактиках разных типов.

Проблемой создания такой базы является отсутствие надежных

методов разделения вклада звезд, газа и пыли в спектральные и фотометрические потоки для далеких областей звездообразования. Если для областей звездообразования в ближайших галактиках мы можем разрешить молодые звездные группировки на отдельные звезды или, по крайней мере, пространственно разделить молодое звездное скопление (звездный комплекс, ОБ-ассоциацию) и окружающее его облако пониженного водорода (Whitmore et al., 2011; Kim et al., 2012), то для более далеких областей отделить излучение новообразованных звезд от излучения окружающей их газо-пылевой оболочки не представляется возможным. Разработка методики, позволяющей оценивать физические характеристики областей звездообразования используя комбинацию двух наиболее простых и массовых видов наблюдений: многоцветную поверхностную фотометрию галактик и спектроскопию низкого разрешения областей H II, даст возможность увеличить количество областей звездообразования с известными физическими параметрами звездного населения и межзвездной среды на несколько порядков.

В настоящее время мы достаточно хорошо на качественном уровне представляем себе как общую картину эволюции галактик (разницу в истории звездообразования эллиптических, линзовидных, спиральных и неправильных галактик, роль окружения (включая эффекты “мерджинга”), роль углового момента и т.д.), так и картину образования звезд из газа (роль облаков H₂, пыли, магнитного поля). Физика явлений на промежуточном масштабе порядка сотен парсек известна нам хуже. Мы имеем представление о механизмах образования и индивидуальных и статистических параметрах областей современного звездообразования, но не знаем ответов на целый ряд вопросов, имеющих фундаментальное значение для физики галактик. К наиболее актуальным нерешенным вопросам можно отнести: поведение начальной функции масс в области маломассовых ($< 1 M_{\odot}$) звезд; характерные масштабы областей звездообразования; встречающаяся регулярность в расположении зон звездообразования в спиральных и роль в этом магнитного поля (Elmegreen & Elmegreen, 1983; Efremov et al., 1987; Efremov & Elmegreen, 1998; Elmegreen et al., 2006; Efremov, 2010).

Цели и задачи диссертационной работы

В рамках диссертационного исследования мы решаем две основные задачи. Первая задача заключается в анализе состава звездного населения и истории звездообразования дисковых галактик различных морфологических типов на основе данных многоцветной поверхностной фотометрии. Особое внимание при этом уделяется изучению параметров галактических дисков.

Второй задачей, решаемой в диссертационной работе, является определение и изучение физических параметров звездного населения и межзвездной среды в областях звездообразования и исследование процессов современного звездообразования в спиральных галактиках.

Целями работы в рамках выполнения первой задачи являлись:

- выяснение вопроса о том, какие особенности состава звездного населения и истории звездообразования в галактиках можно определить, используя данные оптической ($UBVRI$) и инфракрасной (JHK) фотометрии при отсутствии независимой информации о поглощении и химическом составе;
- изучение интегральных и радиальных параметров дисков линзовидных галактик и сравнение их с параметрами дисков спиральных галактик.

В рамках выполнения второй задачи преследовались следующие цели:

- определение и анализ физических параметров областей звездообразования (областей HII) в спиральных галактиках на основе спектроскопических и фотометрических данных;
- создание каталога фотометрических и спектрофотометрических параметров областей звездообразования в исследованных галактиках;
- определение содержания кислорода, азота и электронной температуры в областях HII и вычисление радиальных градиентов содержания кислорода и азота в галактиках;

- поиск и анализ регулярностей в распределении областей звездообразования вдоль спиральных ветвей grand-design галактик;
- изучение отношений между темпом звездообразования вдоль спиральных ветвей и скоростями притока газа в спиральные рукава галактик;
- исследование различий между процессами звездообразования в двух противоположных спиральных рукавах галактики NGC 628;
- изучение иерархии и распределения по размерам областей звездообразования в спиральной галактике NGC 628.

Поскольку данная диссертационная работа основана на оригинальных наблюдательных данных, большая часть которых была получена на 1.5-метровом телескопе АЗТ-22 Майданакской обсерватории (Узбекистан), одной из целей диссертационного исследования являлось:

- исследование качества изображения и величины атмосферной экстинкции на Майданакской обсерватории.

Научная новизна

Для Майданакской обсерватории (Узбекистан) получена оценка характерного времени установления стабильной атмосферы (3.5-4 часа после заката). Данный параметр для обсерваторий бывшего СССР получен и опубликован впервые.

Получен оригинальный наблюдательный материал для 26 спиральных и линзовидных галактик: поверхностная $UBVRI$ -фотометрия галактик с хорошим угловым разрешением ($1 - 1.5''$), спектрофотометрия в линии $H\alpha$ ($H\alpha+[NII]$), спектроскопия областей HII в диапазоне $3100 - 7300\text{\AA}$ со спектральным разрешением 10\AA .

Анализ данных многоцветной поверхностной фотометрии для большинства исследованных галактик проведен впервые. Среди детально изученных в диссертации восьми галактик, для шести (NGC

524, NGC 532, NGC 783, NGC 2336, NGC 5585 и NGC 7280) — многоцветная поверхностная фотометрия ранее не проводилась, а галактика NGC 1138 вообще не исследовалась фотометрически.

Анализ положения галактик и их структурных компонент на двухцветных диаграммах показал, что 40% (10 из 26) галактик нашей выборки имеют пекулярную историю звездообразования. В пяти из них (NGC 266, NGC 6217, NGC 6340, NGC 7351 и IC 1525) при этом не наблюдается каких-либо структурных отклонений. Для четырех галактик (кроме NGC 6340) подобный результат получен впервые.

Разработаны оригинальные методики:

- поиска и идентификации областей звездообразования в галактиках путем сопоставления положений областей H II с положениями голубых звездных конденсаций в коротковолновых фотометрических полосах;
- оценки физических параметров звездного населения в областях звездообразования на основе комбинации данных многоцветной фотометрии и эмиссионных спектров областей H II;
- поиска пространственной регулярности звездообразования в спиральных рукавах галактик на основе анализа функции яркости вдоль логарифмической спиральной ветви.

Получено содержание кислорода и азота и электронной температуры в 80 областях H II семи галактик. Для 73 областей H II значения O/H, N/H и T_e найдены впервые. Также впервые получены радиальные градиенты кислорода и азота в галактиках NGC 783, NGC 2336 и NGC 7678 и значения O/H, N/H и T_e в галактике NGC 6217.

Составлен каталог фотометрических параметров, размеров и особенностей структуры 1510 областей звездообразования в 19 галактиках. Получены оценки возраста для 57 и массы для 63 областей звездообразования.

В классической grand-design галактике NGC 628:

- найдено характерное расстояние между зонами повышенного звездообразования вдоль спиральных ветвей, оказавшееся равным ≈ 400 пк в обоих основных спиральных рукавах галактики, при этом более крупные комплексы звездообразования рас-

полагаются на больших расстояниях друг от друга, кратных 400 пк;

- в более длинном спиральном рукаве галактики с крупными звездными комплексами (Elmegreen & Elmegreen, 1983) звездообразование идет активнее в настоящее время, но было слабее в недалеком прошлом по сравнению с относительно коротким противоположным рукавом, не имеющем крупных звездных комплексов;
- найдена корреляция между темпом звездообразования в областях звездообразования и скоростью втекания газа в спиральные рукава галактики;
- показано, что распределение областей звездообразования по размерам подчиняется единому степенному закону с показателем степени -1.5 на масштабах от 2 пк до ≈ 1 кпк.

Теоретическая и практическая значимость

Важное значение имеют разработанные или развитые в диссертационной работе методики. Метод оценки физических параметров звездного населения в областях звездообразования (ОЗО) на основе комбинации данных многоцветной фотометрии и спектроскопии низкого разрешения позволяет существенно увеличить глубину выборки таких объектов. Если при стандартных методах определить параметры молодых звездных группировок возможно для галактик на расстояниях до 5 – 10 Мпк, то разработанный в рамках диссертации метод применим для ОЗО в галактиках на расстояниях до ~ 100 Мпк.

Развитый нами метод оценки состава звездного населения и истории звездообразования в галактиках на основе сопоставления положения их структурных компонент с нормальной последовательностью интегральных цветов галактик на двухцветных диаграммах позволяет, применяя лишь данные многоцветной поверхностной фотометрии в оптике, выявить для дальнейшего, более детального изучения другими методами галактики с нестандартной историей звездообразования. Данный метод позволяет находить галактики с осо-

бенностями эволюции среди звездных систем, не выделяющихся по своим структурным характеристикам.

Метод определения пространственной регулярности звездообразования в спиральных рукавах галактик на основе Фурье-анализа функции яркости вдоль спиральных ветвей позволяет находить регулярности в распределении зон повышенного звездообразования и вычислять характерные длины волн звездообразования вдоль спиральных рукавов галактик пользуясь объективным математическим алгоритмом. Ранее подобные регулярности находились и исследовались визуально (Elmegreen & Elmegreen, 1983).

Результаты исследования содержания кислорода и азота в областях II II, полученные в диссертации, являются существенным вкладом в общепровую базу данных по содержанию и радиальным градиентам химических элементов в галактиках. Среди примерно 130 галактик с измеренными градиентами O/H и N/H (Pilyugin et al., 2014), в трех градиенты построены опираясь исключительно на наши данные, еще в трех — данные, полученные нами в рамках диссертации, используются наряду с измерениями других авторов.

Каталог физических параметров 63 ОЗО в семи галактиках и каталог фотометрических и морфологических параметров 1510 ОЗО в 19 галактиках, полученных по единой методике, вносят заметный вклад в общую базу знаний о параметрах звездного населения в областях звездообразования и межзвездной среды в областях II II галактик, удаленных на расстояния до 70 Мпк от нас.

Важную практическую ценность имеет найденное для Майда-накской обсерватории (Узбекистан) время установления стабильной атмосферы. Данный параметр важен при планировании и составлении программ наблюдений, требующих относительно высокого углового разрешения. Нахождение и учет времени установления стабильной атмосферы на других обсерваториях и, в первую очередь, на Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, может способствовать более эффективному распределению и использованию наблюдательного времени.

Полученные в рамках диссертации результаты и разработанные методики способствуют решению ряда фундаментальных задач физики галактик и межзвездной среды. Анализ фотометрических параметров звездного населения галактик в целом и их дисков и хи-

мических параметров газа вносит существенный вклад в решение вопросов общей и химической эволюции галактик. Анализ физических параметров газа и звезд в областях звездообразования, таких как масса, возраст, металличность, размер звездной системы, и параметров систем ОЗО в галактиках (взаимное расположение, сгущенность, структурированность и т.д.) дает наблюдательный материал для решения основополагающих вопросов роли и влияния различных физических механизмов на современное состояние и эволюцию межзвездной среды в дисках галактик: роли гравитационной и магнито-гидродинамической неустойчивостей на процессы звездообразования, эффективности звездообразования в молекулярных облаках на различных масштабах, взаимодействия спиральной волны плотности с газом, фрактальной размерности областей звездообразования и облаков газа в галактиках на разных масштабах и др.

Представленные в диссертации результаты могут применяться в астрономических и физических учреждениях, занимающихся вопросами физики галактик и межзвездной среды, областями звездообразования, фотометрическими и спектральными наблюдениями слабых объектов с высоким угловым разрешением (ГАИШ и физический факультет МГУ, ИНАСАН, АКЦ ФИАН, СПбГУ, САО РАН, КрАО РАН, ИПФ РАН, УрФУ, ВолГУ, ЮФУ, а также в зарубежных астрофизических институтах и обсерваториях).

Основные результаты, выносимые на защиту

1. По данным 10-летних наблюдений на телескопе АЗТ-22 диссертантом определено качество изображения на Майдапакской обсерватории. В результате проведенных диссертантом исследований впервые определено характерное время установления стабильной атмосферы на Майдапакской обсерватории, составляющее, по данным наблюдений на телескопе АЗТ-22, около 2-2.5 часов с момента окончания астрономических сумерек (или 3.5-4 часа после заката). Это время одинаково как в свободной атмосфере, так и в подкуольном пространстве АЗТ-22.
2. Диссертантом на количественном уровне был выяснен вопрос о

том, какие особенности состава звездного населения и истории звездообразования в галактиках можно определить, используя данные многоцветной фотометрии при отсутствии независимой информации о поглощении и химическом составе. Автором диссертации показано, что вторичная вспышка звездообразования сменяет положение галактики на двухцветных диаграммах вправо или влево от нормальной последовательности интегральных цветов галактик и линии поглощения. При этом, при характерной точности определения показателей цвета $\approx 0.05 - 0.1^m$, по положению звездной системы на двухцветных диаграммах можно обнаружить мощность вторичную вспышку звездообразования (с отношением масс вторичной и основной вспышек $M_2/M_1 \geq 1$), произошедшую в последние 10^9 лет, или вспышку умеренной мощности ($M_2/M_1 \geq 0.1$), произошедшую $\leq (1-3) \cdot 10^8$ лет назад. Применяя полученные результаты эволюционного моделирования, диссертантом найдено, что положение структурных компонент на двухцветных диаграммах в 10 из 26 исследованных галактик объясняется в рамках моделей с вторичной вспышкой звездообразования, причем среди 10 галактик со сложной историей звездообразования лишь пять имеют признаки некуляриности в морфологии.

3. На основе данных оптической и ИК-фотометрии диссертантом изучена структура и истории звездообразования в пяти спиральных и трех линзовидных галактиках. В результате проведенного исследования сделаны выводы: о явном или вероятном присутствии пыли во всех галактиках, включая линзовидные; о некуляриной структуре и эволюции галактики низкой поверхностной яркости NGC 5585. Диссертантом определены параметры дисков (линейная шкала падения яркости, центральная поверхностная яркость, показатели цвета) в оптических и ИК-полосах для 12 галактик и исследовано изменение параметров дисков вдоль хаббловской последовательности. В результате проведенного исследования обнаружено, что диски S0-галактик являются более однородными по своим фотометрическим параметрам, чем диски спиральных галактик. При этом, в S0-галактиках изменение цвета с удалением от центра происходит перпендикулярно эволюционным трекам звездных

систем почти вдоль линии градиента металличности, а изменение цвета в спиральных галактиках, наоборот, больше связано с изменением среднего возраста звездного населения. Диссертантом показано отсутствие резкой границы в свойствах дисков линзовидных и спиральных галактик.

4. Диссертантом определено содержание кислорода и азота и электрофильная температура в 80 областях II и семи галактик и радиальные градиенты O/H и N/H в шести из них. Полученный в диссертации массив данных составляет примерно 5% от общемировой базы данных радиальных градиентов O/H и N/H в галактиках. Диссертантом обнаружен более резкий градиент падения содержания азота в дисках по сравнению с радиальным распределением кислорода во всех изученных галактиках. Диссертантом разработана методика поиска и идентификации областей звездообразования (ОЗО) в галактиках путем сопоставления положений областей II с положениями голубых звездных конденсаций в коротковолновых фотометрических полосах. На основе данной методики составлен каталог фотометрических параметров, размеров и особенностей структуры 1510 ОЗО в 19 галактиках. Диссертантом разработана методика оценки физических параметров звездного населения в ОЗО на основе комбинации данных многоцветной фотометрии и эмиссионных спектров областей II. С помощью разработанной методики диссертантом оценены возрасты для 57 и массы для 63 ОЗО в семи галактиках.
5. Диссертантом разработана оригинальная методика поиска пространственной регулярности звездообразования в спиральных рукавах галактик на основе анализа функции яркости вдоль логарифмической спиральной ветви. Применяя данную методику, было найдено характерное расстояние между зонами повышенного звездообразования вдоль спиральных ветвей NGC 628, равное ≈ 400 кпк в обоих спиральных рукавах галактики, при том, что более крупные комплексы звездообразования располагаются на больших расстояниях друг от друга, кратных 400 кпк. В результате проведенных диссертантом исследований сделан вывод о том, что в более длинном спиральном рукаве

NGC 628 с крупными звездными комплексами звездообразование идет активнее в настоящее время, но было слабее в недалеком прошлом по сравнению с относительно коротким противоположным рукавом, не имеющим крупных звездных комплексов. Это подтверждается данными фотометрии, спектроскопии и эволюционного моделирования. Диссертантом найдено, что фотометрический возраст крупных звездных комплексов больше возраста менее крупных ОЗО. Диссертантом впервые обнаружено существование корреляции между средним темпом звездообразования в ОЗО в спиральных ветвях и скоростью втекания газа в спиральные рукава NGC 628. Обе величины достигают максимума на расстоянии 4.5-5 кпк от центра галактики.

6. Диссертантом показано, что большинство ОЗО в диске NGC 628 объединено в более крупные структуры на нескольких иерархических уровнях, причем молодые звездные группировки галактики имеют три характерных размера: ОВ-ассоциации (диаметр $d = 66 \pm 18$ пк), звездные агрегаты ($d = 240 \pm 90$ пк) и звездные комплексы (583 ± 84 пк). Диссертантом найдено, что интегральная функция распределения по размерам ОЗО в NGC 628 удовлетворяет степенному закону с показателем степени (наклоном) $\gamma \approx -1.5$ на масштабах от 45 до 900 пк, которые соответствуют размерам ассоциаций, агрегатов и комплексов. Вместе с результатом Elmegreen et al. (2006), результат, полученный в диссертации, показывает, что распределение по размерам молодых звездных структур в галактике подчиняется степенному закону с постоянным $\gamma \approx -1.5$ во всем диапазоне изученных масштабов от ≈ 2 пк до ≈ 1 кпк. Диссертантом показано, что игнорирование иерархических структур (т.е. учет ОЗО только одного иерархического уровня) дает наклоны $-5 \leq \gamma \leq -3$.

Степень достоверности и апробация результатов

При обработке наблюдательных данных применялись стандартные алгоритмы и методы. На основе этих методов при определяющем участии соискателя были разработаны три задачи астрофизического практикума для студентов 4 курса физического факультета МГУ. Эти задачи используются в учебном процессе уже более 15 лет.

Оригинальные методы и алгоритмы, разработанные соискателем, приводят к непротиворечивым результатам, хорошо согласующимся с выводами, полученными независимыми авторами. Отметим, что наблюдательные результаты, полученные в рамках диссертации, находятся в согласии не только с работами, вышедшими ранее, но и с более поздними публикациями.

Важным свидетельством достоверности полученных результатов является их апробация на национальных и международных конференциях и публикации в высокорейтинговых астрономических журналах.

Основные результаты диссертации докладывались соискателем на различных семинарах в ГАИШ МГУ, а также на национальных и международных конференциях: Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент, Москва, Россия, 13-15 ноября 2017; Современная звездная астрономия-2017, Екатеринбург, Россия, 14-16 июня 2017; Stellar aggregates over mass and spatial scales, Wilhelm und Else Heraeus-Seminar 631, Бад Хоннеф, Германия, 5-9 декабря 2016; The role of feedback in the formation and evolution of star clusters, Сесто, Италия, 18-22 июля 2016; European Week of Astronomy and Space Science (EWASS 2015), Ла Ларуна, Тенерифе, Испания, 22-26 июня 2015; Астрономия от ближнего космоса до космологических далей, Москва, Россия, 25-30 мая 2015; Comprehensive characterization of astronomical sites, Кисловодск, Россия, 4-9 октября 2010; От эпохи Галилея до наших дней, Всероссийская астрономическая конференция (ВАК-2010), Пущинский Архыз, Россия, 13-18 сентября 2010; Dynamics and evolution of disc galaxies, Москва-Пущино, Россия, 31 мая – 4 июня 2010; Star Clusters: Basic Galactic Building Blocks Throughout Time and Space, IAU Symposium No. 266, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 10-14 августа 2009; Астроно-

мня и астрофизика начала XXI века, Москва, Россия, 1-5 июля 2008; Formation and Evolution of Galaxy Disks, Рим, Италия, 1-5 октября 2007; Физика космоса, 36-я Международная студенческая научная конференция, Екатеринбург, Россия, 29 января – 2 февраля 2007; Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies, IAU Symposium No 241, Ла Пальма, Испания, 10-16 декабря 2006; Астрономия 2005 – современное состояние и перспективы, Москва, Россия, 1-6 июня 2005; Международное сотрудничество в астрономии: актуальные проблемы и перспективы, Москва, Россия, 25 мая – 2 июня 2002; Конференция Корейского астрономического общества, Чонджу, Корея, 12-13 октября 2001; Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM-2001), Мюнхен, Германия, 10-15 сентября 2001; Extragalactic Star Clusters, IAU Symposium No 207, Пунто, Чили, 12-16 марта 2001; Distribution and Evolution of Matter in the Universe through Numerical Simulations, Феникс Парк, Корея, 26-28 февраля 2001; Galaxy Disks and Disk Galaxies, Рим, Италия, 12-16 июня 2000; Joint European and National Astronomical Meeting (JENAM-2000), Москва, Россия, 29 мая – 3 июня 2000.

Публикации и личный вклад автора

Результаты диссертации представлены в 36 работах, из которых 25 работ [1-25] опубликовано в рецензируемых журналах и 11 - в сборниках трудов конференций [26-36]. Все журналы, где были опубликованы оригинальные статьи [1-25], входят в базу данных Web of Science (для российских журналов – их англоязычные версии). Некоторые работы [26-36] также опубликованы в рецензируемых журналах и/или изданиях, индексируемых Web of Science. Публикации в сборниках трудов конференций являются, как правило, сокращенными версиями оригинальных журнальных статей, однако, в работах [26-28] приведены некоторые дополнительные результаты, не вошедшие в публикации [1] и [15].

Последняя по времени работа, [26], была опубликована в мае 2018 года.

Во всех работах, кроме [29], соискатель являлся корреспондирующим автором. Работы [4, 15-17, 32-36] написаны соискателем единолично.

1. Gusev A.S., Sakhibov F., Piskunov A.E., Kharchenko N.V., Bruevich V.V., Ezhkova O.V., Guslyakova S.A., Lang V., Shimanovskaya E.V., Efremov Y.N. "A spectral and photometric study of 102 star-forming regions in seven spiral galaxies" **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, V.457, N3, pp. 3334-3355 (2016). DOI: 10.1093/mnras/stw212. Импакт-фактор 4.961.
2. Гусев А.С., Гусликова С.А., Новикова А.П., Храмцова М.С., Бруевич В.В., Ежкова О.В. "Исследование звездного населения галактик с использованием двухцветных диаграмм" **Астрономический Журнал**, Т.92, №10, с. 779-799 (2015). DOI: 10.1134/S1063772915100029. Импакт-фактор 0.592.
3. Gusev A.S., Sakhibov F., Efremov Yu.N. "Star formation rates and the kinematics of gas in the spiral arms of NGC 628" **Astronomische Nachrichten**, V.336, N4, pp. 401-408 (2015). DOI: 10.1002/asna.201512170. Импакт-фактор 0.916.
4. Gusev A.S. "Hierarchy and size distribution function of star formation regions in the spiral galaxy NGC 628" **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, V.442, N4, pp. 3711-3721 (2014). DOI: 10.1093/mnras/stu1095. Импакт-фактор 4.961.
5. Gusev A.S., Egorov O.V., Sakhibov F. "Parameters of the brightest star formation regions in the two principal spiral arms of NGC 628" **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, V.437, N2, pp. 1337-1351 (2014). DOI: 10.1093/mnras/stt1970. Импакт-фактор 4.961.
6. Gusev A.S., Efremov Yu.N. "Regular chains of star formation complexes in spiral arms of NGC 628" **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, V.434, N1, pp. 313-324 (2013). DOI: 10.1093/mnras/stt1019. Импакт-фактор 4.961.
7. Гусев А.С., Сахибов Ф.Х., Додонов С.П. "Спектроскопия областей II в спиральной галактике позднего типа NGC 6946" **Астрофизический бюллетень**, Т.68, №1, с. 42-55 (2013). DOI: 10.1134/S1990341313010045. Импакт-фактор 1.021.
8. Gusev A.S., Pilyugin I.S., Sakhibov F., Dodonov S.N., Ezhkova O.V., Khramtsova M.S. "Oxygen and nitrogen abundances of H II

- regions in six spiral galaxies” **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, V.424, N3, pp. 1930-1940 (2012). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21322.x. Импакт-фактор 4.961.
9. Брусевич В.В., Гусев А.С., Гуслякова С.А. “Области звездообразования в галактиках с кольцами NGC 5585 и IC 1525” **Астрономический Журнал**, Т.88, №4, с. 342-356 (2011). DOI: 10.1134/S1063772911040019. Импакт-фактор 0.592.
 10. Артамонов Б.П., Брусевич В.В., Гусев А.С., Ежкова О.В., Ибрагимов М.А., Ильясов С.П., Потанин С.А., Тиллаев Ю.А., Эгамбердиев Ш.А. “Качество изображения и атмосферная экстинкция на Майданакской обсерватории по наблюдениям с 1.5-м телескопом АЗТ-22” **Астрономический Журнал**, Т.87, №11, с. 1106-1119 (2010). DOI: 10.1134/S1063772910110077. Импакт-фактор 0.592.
 11. Брусевич В.В., Гусев А.С., Гуслякова С.А. “*UBVRI*-ПЗС-фотометрия близкой галактики низкой поверхностной яркости NGC 5585” **Астрономический Журнал**, Т.87, №5, с. 419-429 (2010). DOI: 10.1134/S106377291005001X. Импакт-фактор 0.592.
 12. Гусев А.С., Пискунов А.Э., Сахибов Ф.Х., Харченко Н.В. “Сравнение интегральных фотометрических параметров внегалактических комплексов звездообразования и рассеянных звездных скоплений в Млечном Пути” **Письма в Астрономический Журнал**, Т. 35, №10, с. 755-763 (2009). DOI: 10.1134/S1063773709100041. Импакт-фактор 0.873.
 13. Гусев А.С., Мякутин В.И., Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А. “Численное моделирование задачи определения начальной функции масс звезд и истории скорости звездообразования (обратной задачи звездообразования) с помощью сетки эволюционных моделей звездных скоплений” **Астрономический Журнал**, Т.84, №3, с. 266-277 (2007). DOI: 10.1134/S1063772907030055. Импакт-фактор 0.592.
 14. Брусевич В.В., Гусев А.С., Ежкова О.В., Сахибов Ф.Х., Смирнов М.А. “Сопоставление *UBVR*-фотометрии гигантских областей II в галактике NGC 628 с детальной сеткой эволюци-

онных моделей звездных скоплений” **Астрономический Журнал**, Т.84, №3, с. 253-265 (2007).
DOI: 10.1134/S1063772907030043. Импакт-фактор 0.592.

15. Гусев А.С. “Свойства дисков галактик в оптическом и ближнем ИК-диапазонах” **Астрономический Журнал**, Т.84, №1, с. 3-21 (2007). DOI: 10.1134/S1063772907010015. Импакт-фактор 0.592.
16. Гусев А.С. “Многоцветная ПЗС-фотометрия шести линзовидных и спиральных галактик. Звездное население галактик” **Астрономический Журнал**, Т.83, №3, с. 211-223 (2006). DOI: 10.1134/S1063772906030024. Импакт-фактор 0.592.
17. Гусев А.С. “Многоцветная ПЗС-фотометрия шести линзовидных и спиральных галактик. Особенности структуры галактик” **Астрономический Журнал**, Т.83, №3, с. 195-210 (2006). DOI: 10.1134/S1063772906030012. Импакт-фактор 0.592.
18. Гусев А.С., Кайсин С.С. “Многоцветная ПЗС-фотометрия гигантской “запыленной” спиральной галактики позднего типа NGC 5351” **Астрономический журнал**, Т.81, №8, с. 675-686 (2004). DOI: 10.1134/1.1787063. Импакт-фактор 0.592.
19. Gusev A.S., Park M.-G. “Structure and stellar population of ringed barred galaxy NGC 2336” **Astronomy and Astrophysics**, V.410, N1, pp. 117-129 (2003). DOI: 10.1051/0004-6361:20031215. Импакт-фактор 5.014.
20. Гусев А.С., Засов А.В., Кайсин С.С. “Фотометрия спиральной галактики низкой светимости NGC 4136” **Письма в Астрономический журнал**, Т.29, №6, с. 414-423 (2003). DOI: 10.1134/1.1579782. Импакт-фактор 0.873.
21. Гусев А.С., Кайсин С.С. “*BVR/II α* -ПЗС-фотометрия спиральной галактики NGC 3184” **Астрономический журнал**, Т.79, №9, с. 787-797 (2002). DOI: 10.1134/1.1508063. Импакт-фактор 0.592.
22. Гусев А.С., Засов А.В., Кайсин С.С., Бизяев Д.В. “Поверхностная *BVRI*-фотометрия галактики NGC 3726” **Астрономиче-**

- ский журнал, Т.79, №9, с. 778-786 (2002).
DOI: 10.1134/1.1508062. Импакт-фактор 0.592.
23. Артамонов Б.П., Бадан Ю.Ю., Гусев А.С. “*BVRI*-ПЗС-фотометрия искоулярных галактик NGC 5605 и NGC 5665” **Астрономический журнал**, Т.77, №9, с. 643-653 (2000).
DOI: 10.1134/1.1307552. Импакт-фактор 0.592.
 24. Артамонов Б.П., Бадан Ю.Ю., Брусвич В.В., Гусев А.С. “Поверхностная *UBVRI*-фотометрия галактики с перемычкой NGC 6217” **Астрономический журнал**, Т.76, №6, с. 438-452 (1999). Импакт-фактор 0.592.
 25. Артамонов Б.П., Брусвич В.В., Гусев А.С. “Поверхностная *UBVR*-фотометрия галактик поздних типов NGC 523 и NGC 7678” **Астрономический журнал**, Т.74, №5, с. 654-662 (1997). Импакт-фактор 0.592.
-
26. Gusev A.S., Shimanovskaya E.V., Shatsky N.I., Sakhibov F., Piskunov A.E., Kharchenko N.V. “Stellar population in star formation regions of galaxies” **Open Astronomy**, V.27, N1, pp. 98-111 (2018). DOI: 10.1515/astro-2018-0004
 27. Gusev A.S., Sakhibov F.Kh., Piskunov A.E., Kharchenko N.V., Pilyugin L.S., Ezhkova O.V., Khramtsova M.S., Guslyakova S.A., Bruevich V.V., Dodonov S.N., Lang V., Shimanovskaya E.V., Efremov Yu.N. “Study of young stellar groupings in H II regions based on the spectral and photometric data” **Astronomical and Astrophysical Transactions**, V.29, N3, pp. 293-304 (2016).
 28. Gusev A.S., Guslyakova S.A., Khramtsova M.S. “Parameters of galactic disks at optical and NIR wavelengths” **Astronomical and Astrophysical Transactions**, V.27, N2, pp. 233-244 (2012).
 29. Sakhibov F., Gusev A.S., Kharchenko N.V., Piskunov A.E. “Extragalactic star-forming regions and open clusters in the Milky Way” Star Clusters: Basic Galactic Building Blocks Throughout Time and Space, **Proceedings IAU Symposium No. 266** (R. de Grijs

& J. R. D. Lépine, eds.), p. 522 (2010).

DOI: 10.1017/S1743921309991918

30. Gusev A.S., Ezhkova O.V., Novikova A.P., Shimanovskaya E.V., Khrantsova M.S. "Photometric Properties of Galactic Disks" Formation and Evolution of Galaxy Disks, Proceedings of the International Conference, Rome, Italy, 1-5 October 2007 (J.G. Funes, S.J. & E.M. Corsini, eds.), **ASP Conference Series**, V.396, San Francisco: ASP, pp. 65-66 (2008).
31. Gusev A.S., Myakutin V.I., Sakhibov F.K., Smirnov M.A. "Comparison of *UBVR* photometry of giant H II regions in NGC 628 with a detailed grid of evolution models of star clusters" Stellar populations as bulding blocks of galaxies, **Proceedings IAU Symposium** No. 241 (A. Vazdekis & R.F. Peletier, eds.), Cambridge: Cambridge University Press, pp. 513-514 (2007).
DOI: 10.1017/S1743921307008952
32. Гусев А.С. "Поверхностная фотометрия галактик: цели и методы" Физика космоса, **Труды 36-й Международной студенческой научной конференции**, Екатеринбург: УрГУ, с. 45-59 (2007).
33. Gusev A.S. "The Young Star Clusters Parameters in Late Type Spiral Galaxies" Extragalactic Star Clusters, **Proceedings of the IAU Symposium** 207th, held in Pucon, Chile, 12-16 March, 2001 (ed. Geisler D., Grebel E., Minniti D.), San Francisco: ASP, pp. 450-452 (2002).
34. Gusev A.S. "Sizes and ages of star forming regions in galaxies" **Astronomical and Astrophysical Transactions**, V.21, N1-3, pp. 75-78 (2002).
35. Gusev A.S. "Disposition, Sizes and Ages of Star Forming Regions in Disks of Galaxies" Galaxy Disks and Disk Galaxies, Proceedings of the International Conference, Rome, Italy, 12-16 June, 2000 (ed. Funes J.G., Corsini E.M.), **ASP Conference Series**, V.230, San Francisco: ASP, pp. 313-314 (2001).

36. Gusev A.S. "Star forming regions in disks of galaxies" **Astronomical and Astrophysical Transactions**, V.20, N1, pp. 169-172 (2001).

Поскольку в диссертацию вошли не все результаты, представленные в публикациях, и структура диссертационной работы не полностью повторяет структуру статей, мы описываем личный вклад автора по главам диссертации.

Глава 1 (статьи [1-6, 8, 13, 15, 32]). Составлена соискателем самостоятельно на основе обзоров (введений) в упомянутых статьях. Обзоры были написаны соискателем при участии Ф.Х. Сахибова, Ю.Н. Ефремова и Л.С. Пилюгина.

Глава 2 (статья [10]). Соискателем самостоятельно выполнена обработка данных и оценка качества изображения на телескопе АЗТ-22 и времени установления стабильных условий в подкупольном пространстве АЗТ-22. Сравнительная оценка времени установления стабильных условий в свободной атмосфере и в подкупольном пространстве АЗТ-22 выполнена соискателем совместно с Б.П. Артамоновым и Ю.А. Тилласвым, а изучение атмосферной экстинкции на Майдапакской обсерватории – совместно с Ю.А. Тилласвым. Также соискателем была получена примерно десятая доля наблюдательного материала.

Глава 3 (статьи [2, 7, 8, 11, 14, 16-25, 27, 28, 30, 32]). Соискателем проведено 25% фотометрических и 75% спектрофотометрических и 100% спектроскопических наблюдений. Большая часть фотометрических наблюдений проведена Б.П. Артамоновым, В.В. Бруевичем и О.В. Ежковой на Майдапаке и С.С. Кайсшим – в САО. Обработка всех данных была сделана соискателем самостоятельно, за исключением обработки фотометрических наблюдений 8 из 26 галактик, проведенных студентами (С.А. Гусяковой, А.П. Новиковой и М.С. Храпцовой) под руководством соискателя.

Главы 4 (статья [2]), **5** (статьи [11, 16, 17, 19]) и **6** (статьи [15, 28, 30]). Результаты получены соискателем единолично.

Глава 7 (статьи [7, 8, 27]). Соискателем были определены потоки в эмиссионных линиях. Расчеты содержания химических элементов, электронной температуры и градиентов металличности, а также обсуждение результатов выполнены соискателем совместно с Л.С. Пилюгиным и Ф.Х. Сахибовым.

Глава 8 (статьи [1, 9, 13, 26, 31]). Методика определения размеров, светимостей и показателей цвета областей звездообразования и альтернативный метод определения физических параметров ОЗО с помощью эволюционных моделей предложены соискателем. Метод определения физических параметров ОЗО путем нахождения минимума функционала отклонений на сетке эволюционных моделей звездных систем ИНАСАН разработан Ф.Х. Сахибовым и М.А. Смирновым при участии В.И. Мякутина. Методика определения возрастов и масс ОЗО с использованием комбинации фотометрических и спектральных данных разработана соискателем совместно с Ф.Х. Сахибовым.

Глава 9 (статьи [1, 9, 12, 14, 26, 27, 29, 31, 33-36]). Соискателем проведены поиск, идентификация и фотометрия областей звездообразования. Им же составлен и каталог фотометрических и морфологических параметров ОЗО (Приложение). Расчет и проверка достоверности фотометрических параметров ОЗО, исправленных за поглощение света и вклад газа, используя данные спектроскопии областей HII проведен Ф.Х. Сахибовым при участии соискателя. Им же были получены оценки масс и возрастов ОЗО. Сравнение внегалактических ОЗО с рассеянными звездными скоплениями нашей Галактики проведено А.Э. Пискуновым и Н.В. Харченко при участии соискателя и Ф.Х. Сахибова. Анализ фотометрических и физических параметров ОЗО и обсуждение результатов проведены соискателем при участии Ф.Х. Сахибова.

Глава 10 (статьи [3-6]). Идея исследования регулярности звездообразования в спиральных ветвях grand-design галактики NGC 628 принадлежит Ю.Н. Ефремову. Им же проведена интерпретация полученных результатов. Обработка данных и расчетная часть работы, включая разработанную оригинальную методику, осуществлена соискателем. Исследование комплексов звездообразования в противоположных спиральных рукавах NGC 628 проведено соискателем при участии О.В. Егорова, определившего химический состав комплексов, и Ф.Х. Сахибова, рассчитавшего для них эволюционные модели. Совместно с Ф.Х. Сахибовым было также исследовано влияние движения газа за звездообразование в спиральных ветвях NGC 628. Изучение иерархии ОЗО в галактике проведено соискателем самостоятельно.

Отметим, что главы 1, 3 и 8 носят информационно-справочный и методический характер. В них отсутствуют положения, выносимые на защиту.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения, приложения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 470 страниц (из них Приложение занимает 31 страницу). Диссертация содержит 149 иллюстраций, 36 таблиц и 1 каталог. Список цитируемой литературы включает 451 ссылку.

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обсуждается актуальность работы, цели и задачи проведенного исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Формулируются положения, выносимые на защиту. Обсуждена степень достоверности и апробация результатов, приводится список работ, в которых опубликованы результаты диссертационного исследования, показан личный вклад автора. Представлено краткое содержание диссертации.

В **Главе 1 “Наблюдательные проявления эволюции галактик. Современное состояние исследований”** дан обзор литературы по теме диссертации. Особое внимание уделено современному состоянию исследований фотометрических свойств дисков галактик, областей современного звездообразования в галактиках на различных масштабах, связи процессов звездообразования с кинематикой и физическими параметрами межзвездной среды. Освещены вопросы, связанные с различными методами оценки содержания химических элементов и эволюционного моделирования звездного населения.

В **Главе 2 “Астроклимат Майданакской обсерватории”** на основе ПЗС-изображений (21610 снимков) в фильтрах U , B , V , R и I , полученных в 1996-2005 гг. на 1.5-метровом телескопе АЗТ-22, оценено качество изображения и величина атмосферной экстинкции. В разделе 2.1 приводятся краткие сведения об обсерватории и

телескопе. В разделе 2.2 оценивается качество изображения на телескопе АЗТ-22: исследуется зависимость качества ПЗС-изображений от времени экспозиции и воздушной массы, определяется качество ПЗС-изображений в различных фильтрах, изучается распределение качества ПЗС-изображений по годам и месяцам. В разделе 2.3 определяется время установления стабильных условий в свободной атмосфере и в подкупольном пространстве АЗТ-22. В разделе 2.4 определяется величина атмосферной экстинкции на Майдапакской обсерватории, составившая в полосе V $0.20^m \pm 0.04^m$, что подтверждает данные исследований 70-90-х гг. прошлого века. В разделе 2.5 приводятся основные выводы Главы.

В Главе 3 “Наблюдения и обработка данных” описаны наблюдения 26 галактик различных морфологических типов (NGC 245, NGC 266, NGC 524, NGC 532, NGC 628, NGC 783, NGC 1138, NGC 1589, NGC 2336, NGC 3184, NGC 3726, NGC 4136, NGC 5351, NGC 5585, NGC 5605, NGC 5665, NGC 6217, NGC 6340, NGC 6946, NGC 7280, NGC 7331, NGC 7351, NGC 7678, NGC 7721, IC 1525, UGC 11973) и обработка данных. Для галактик были получены и обработаны данные многоцветной поверхностной фотометрии в полосах *UBVRI*; для некоторых галактик были проведены наблюдения в линии $H\alpha$, для семи галактик получены данные спектроскопии. Фотометрические и спектрофотометрические наблюдения были проведены на 1 и 1.5-метровых телескопах Майдапакской обсерватории (Узбекистан), 1.8-метровом телескопе Боянсанской оптической астрономической обсерватории (Республика Корея), 1-метровом телескопе САО РАН и 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ МГУ. Спектральные наблюдения семи галактик проводились на 6-метровом телескопе БТА САО РАН с помощью фокального редуктора SCORPIO в многоцелевом режиме с дисперсией $2.1\text{\AA}/\text{пиксель}$ и спектральным разрешением 10\AA . Дополнительно, для ряда галактик были использованы изображения в различных диапазонах длин волн, взятые из открытых баз данных; в частности, ИК-данные в полосах *JHK* были взяты из каталога 2MASS. Раздел 3.1 представляет краткое введение в Главу. В разделе 3.2 описываются фотометрические, спектрофотометрические и спектроскопические наблюдения, а также данные, взятые из открытых баз данных. Обработке наблюдений посвящен раздел 3.3.

В Главе 4 “Звездное население и история звездообразования в галактиках различных морфологических типов на основе данных фотометрии” мы исследуем изменение фотометрических параметров звездных систем в зависимости от особенностей их эволюции и состава звездного населения. Раздел 4.1 является кратким введением в Главу. В разделе 4.2 описываются эволюционные модели с основной и вторичной вспышками звездообразования (использовался набор из 7 эволюционных моделей с экспоненциальным падением темпа звездообразования и 672 моделей с вторичной вспышкой звездообразования). Анализ наблюдательных данных: параметры регулярных (ядра, балджи, диски) и нерегулярных (спиральные ветви, кольца и бары) компонент галактик и их положение на двухцветных диаграммах – проведен в разделе 4.3. В разделе 4.4 мы сравниваем модельную нормальную последовательность интегральных цветов галактик (ИПЦ) с наблюдаемыми показателями цвета компонент галактик, оцениваем возраст звездного населения и истории звездообразования в компонентах галактик по данным многоцветной фотометрии, рассматриваем особенности состава звездного населения в девяти из десяти галактик с возможной вторичной вспышкой звездообразования (NGC 245, NGC 266, NGC 3184, NGC 3726, NGC 6217, NGC 6340, NGC 7351, NGC 7678 и IC 1525; десятая галактика – NGC 5585 – рассмотрена нами подробнее в Главе 5). В разделе 4.5 формулируются выводы Главы.

В Главе 5 “Результаты поверхностной фотометрии отдельных галактик” исследуются три линзовидных (NGC 524, NGC 1138, NGC 7280) и пять спиральных галактик (NGC 532, NGC 783, NGC 1589, NGC 2336 и NGC 5585). Для двух галактик (NGC 2336 и NGC 5585) анализируются результаты фотометрии в полосах *UBV–RI*, а для остальных шести объектов – в полосах *UBVRIZHK*. Среди галактик встречаются как относительно неплохо изученные (например, – NGC 524 или NGC 2336), так и совсем неизученные (NGC 1138) звездные системы. Раздел 5.1 носит вводный характер. В разделе 5.2 приводятся основные сведения об изучаемых галактиках. Анализ результатов фотометрии: определение позиционных углов и наклонов дисков галактик, получение усредненных фотометрических профилей и декомпозиция излучения галактик на балдж и диск, исследование распределений яркости и цвета и особенно

стей структуры галактик, изучение звездного населения галактик с помощью двухцветных диаграмм, определение светимостей и интегральных показателей цвета балджей и дисков – дан в разделе 5.3. Обсуждению полученных результатов посвящен раздел 5.4. В разделе 5.5 формулируются основные выводы Главы.

Глава 6 “Фотометрические свойства дисков галактик” посвящена анализу параметров (радиальной шкалы, центральной поверхностной яркости и цвета) дисков 404 галактик различных типов. Для 12 галактик (NGC 524, NGC 532, NGC 783, NGC 1138, NGC 1589, NGC 2336, NGC 4136, NGC 5351, NGC 5585, NGC 7280, NGC 7721 и IC 1525) значения шкалы падения яркости и центральной яркости дисков были получены с использованием двумерной декомпозиции фотометрических изображений на балдж и диск в полосах *UBVR1JK*. Для остальных 392 галактик использовались значения параметров дисков, взятые из литературных источников. Раздел 6.1 является введением к Главе. Раздел 6.2 посвящен выборке галактик. Анализ результатов (центральных поверхностных яркостей и показателей цвета дисков и их положений на двухцветных диаграммах, абсолютных и относительных размеров дисков, отношений линейных шкал дисков, измеренных в различных фотометрических полосах, оценок центральной поверхностной плотности и отношения масса/светимость для дисков) приводится в разделе 6.3. Полученные результаты обсуждаются в разделе 6.4. Основное внимание уделяется здесь изменениям параметров дисков вдоль хаббловской последовательности галактик. Выводы Главы приводятся в разделе 6.5.

В Главе 7 **“Спектроскопия областей H II и градиенты металличности в спиральных галактиках”** описываются результаты спектроскопических наблюдений 102 областей H II в семи спиральных галактиках (NGC 628, NGC 783, NGC 2336, NGC 6217, NGC 6946, NGC 7331 и NGC 7678). Для этих областей получены величины оптического поглощения в газе (по измерениям балмеровского декремента), а для областей H II в галактике NGC 6946 – и отношение линий серы – индикатора электронной плотности в областях H II. Методом “сильных линий” (NS-калибровка) определены содержания кислорода и азота, а также электронной температуры в 80 областях H II. Получены параметры радиальных распределе-

ний содержания кислорода и азота в дисках шести галактик (всех, кроме NGC 6217) и электронной температуры – в диске NGC 6946. Раздел 7.1 представляет краткое введение в Главу. В разделе 7.2 приводятся результаты измерений потоков и эквивалентных ширины эмиссионных линий и сравнение полученных результатов с данными предыдущих исследований. В разделе 7.3 описывается метод оценки химического состава. В разделе 7.4 мы анализируем содержание химических элементов и электронную температуру в областях H II и определяем радиальные градиенты кислорода и азота в галактиках. Обсуждению полученных результатов посвящен раздел 7.5; в частности, нами показано, что исследованные галактики хорошо соответствуют общей зависимости на диаграмме “интегральная светимость – металличность” для спиральных и неправильных галактик. В разделе 7.6 формулируются основные выводы Главы.

В Главе 8 описывается **“Методика определения параметров областей звездообразования”**. В разделе 8.1 приводятся алгоритмы определения размеров, светимостей и показателей цвета ОЗО. Раздел 8.2 посвящен методике определения физических параметров ОЗО по сетке эволюционных моделей звездных систем путем нахождения минимума функционала отклонений. В серии численных экспериментов показана возможность использования функционала отклонений для определения различных параметров ОЗО. В разделе 8.3 мы описываем прямой метод определения физических параметров ОЗО с помощью эволюционных моделей на основе лишь фотометрической информации об ОЗО. При данной методике оценки поглощения и возраста получаются путем совмещения наблюдаемых показателей цвета ОЗО с эволюционными треками на двухцветных диаграммах, сдвигая точки, характеризующие показатели цвета вдоль линии поглощения. На основе эволюционных моделей PEGASE.2 показаны границы применения данного метода. В разделе 8.4 мы описываем применяемый нами в диссертации метод определения возрастов и масс ОЗО используя комбинацию фотометрических и спектральных данных. В данном методе так же ищется минимум функционала отклонений, но ряд параметров: химический состав и поглощение – определяются из независимых данных спектральных наблюдений, а значения параметров начальной функции масс и режима звездообразования – являются фиксированными.

В Главе 9 “Фотометрические и физические параметры областей звездообразования” используя информацию, полученную спектроскопическими (величина поглощения, химический состав, относительный вклад эмиссии газа в общие фотометрические потоки) и фотометрическими (“истинные” показатели цвета, светимости, размеры, структура) методами, мы оценили ряд физических параметров областей звездообразования, таких как масса и возраст. Раздел 9.1 является введением в Главу. В разделе 9.2 мы проводим поиск и идентификацию ОЗО на основе разработанного метода поиска и идентификации ОЗО в галактиках путем сопоставления положений областей HII с положениями голубых звездных конденсаций в коротковолновых фотометрических полосах. Описание каталога фотометрических и морфологических параметров 1510 ОЗО в 19 галактиках дано в разделе 9.3. В разделе 9.4 мы определяем “истинные” фотометрические параметры ОЗО используя данные спектроскопии областей HII: исправляем наблюдаемые фотометрические светимости ОЗО за поглощение света, за вклад излучения газа в фотометрические полосы, оцениваем корректность наших данных путем сравнения спектрофотометрических потоков в круглой апертуре с эквивалентной шириной H α . В разделе 9.5 исследуется положение ОЗО на двухцветных диаграммах в сравнении с эволюционными моделями. В разделе 9.6 на основе оригинальной методики оценки параметров звездного населения в областях звездообразования на основе комбинации данных многоцветной фотометрии и эмиссионных спектров областей HII определяются физические параметры ОЗО. В разделе 9.7 мы сравниваем параметры внегалактических ОЗО с рассеянными звездными скоплениями Галактики. Раздел 9.8 посвящен обсуждению результатов. Дополнительно в разделе 9.9 мы приводим результаты оценок физических параметров областей звездообразования по данным классических (обратного и прямого) методов без привлечения данных спектроскопии для 60 молодых звездных скоплений (ассоциаций) в NGC 628, 44 молодых звездных скоплений (ассоциаций) в NGC 5585 и 12 комплексов звездообразования в IC 1525. В разделе 9.10 приводятся выводы Главы.

В Главе 10 “Особенности звездообразования в галактике NGC 628”, основываясь на ультрафиолетовых и оптических данных в полосах FUV, NUV, *U*, *B*, *V*, *R*, *I* и линии H α , мы изучили

фотометрические свойства спиральных рукавов в NGC 628 и расположение ОЗО внутри этих рукавов; исследовали фотометрические свойства, химический состав и размеры 30 наиболее ярких областей звездообразования в двух основных спиральных ветвях галактики; рассмотрели связь между темпом звездообразования в ОЗО в спиральных ветвях и скоростью притока газа в спиральные рукава; изучили иерархию и распределение по размерам областей звездообразования в диске NGC 628 в диапазоне шкал от 50 до 1000 пк на основе оценок размеров 297 ОЗО различных иерархических уровней. Раздел 10.1 представляет собой краткое введение в Главу. В разделе 10.2 мы изучаем регулярность звездообразования в спиральных ветвях галактики NGC 628 с помощью разработанного метода поиска пространственной регулярности звездообразования в спиральных рукавах галактик на основе анализа функции яркости вдоль логарифмической спиральной ветви. Крупнейшие комплексы звездообразования в спиральных ветвях NGC 628 рассматриваются нами в разделе 10.3. Исследуется их металличность, функция светимости, размеры и функция распределения по размерам, темп звездообразования внутри звездных комплексов. Раздел 10.4 посвящен поиску связи между темпом звездообразования внутри звездных комплексов и скоростью втекания газа в спиральные рукава NGC 628. В разделе 10.5 исследуется иерархия ОЗО в галактике и функция распределения ОЗО по размерам с учетом их иерархии. Полученные результаты обсуждаются в разделе 10.6. Выводы Главы сформулированы в разделе 10.7.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертации, выражаются благодарности.

В **Приложении** опубликован Каталог фотометрических и морфологических параметров звездного населения в областях звездообразования.

Завершает диссертацию список **Литературы**. В начале списка приводятся публикации соискателя, в которых представлены результаты диссертации. Их порядок и нумерация соответствуют порядку и нумерации списка работ, представленного во Введении и в автореферате. Следом в алфавитном порядке располагаются цитируемые работы, опубликованные на кириллице, а затем — опубликованные на латинице.

Список литературы

- Гинзбург В.Л. “О физике и астрофизике. Статьи и выступления” М.: Наука (1992)
- Сильченко О.К. “Происхождение и эволюция галактик” Фрязино: Бек 2 (2017)
- Chiappini V., Romano D., Matteucci F., 2003, MNRAS, 339, 63
- Chilingarian I.V., Novikova A.P., Cayatte V. et al., 2009, A&A, 504, 389
- Efremov Yu.N., 2010, MNRAS, 405, 1531
- Efremov Y.N., Elmegreen B., 1998, MNRAS, 299, 588
- Efremov Yu.N., Ivanov G.R., Nikolov N.S., 1987, Ap&SS, 135, 119
- Elmegreen B.G., Elmegreen D.M., 1983, MNRAS, 203, 31
- Elmegreen B.G., Elmegreen D.M., Chandar R. et al., 2006, ApJ, 644, 879
- Gavazzi G., Bonfanti C., Sanvito G. et al., 2002, ApJ, 576, 135
- Kim H., Whitmore B.C., Chandar R. et al., 2012, ApJ, 753, id. 26
- Marcon-Uchida M.M., Matteucci F., Costa R.D.D., 2010, A&A, 520, A35
- Mollá M., Vílchez J.M., Gavilán M., Díaz A.I., 2006, MNRAS, 372, 1069
- Pilyugin L.S., Grebel E.K., Kniazev A.Y., 2014, AJ, 147, id. 131
- Whitmore B.C., Chandar R., Kim H. et al., 2011, ApJ, 729, 78

Подписано в печать 23.06.2018.

Уч. изд. л. — 2.0. Формат 60×90/16. Тираж 150 экз.

Копицентр Научной библиотеки МГУ
Москва, Ломоносовский проспект, д. 27