

На правах рукописи

Зазнобин Игорь Альбертович

**Оптическое отождествление скоплений галактик и
других объектов в обзорах всего неба космических
обсерваторий им. Планка и СРГ**

Специальность 1.3.1 — физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

Научный руководитель: **Буренин Родион Анатольевич**,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Института космических исследований Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Макаров Дмитрий Игоревич**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, заведующий лабораторией внегалактической астрофизики и космологии

Гусев Александр Сергеевич
доктор физико-математических наук, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник отдела Внегалактической астрономии

Ведущая организация: Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится **03 декабря 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.04.25 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. Иоффе и на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru

Автореферат разослан «____» _____ 2025 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н.

П. С. Штернин

Актуальность темы исследования

Задача оптического отождествления рентгеновских источников и измерения расстояний/красных смещений до них является важным звеном в исследовании физической природы этих объектов. Именно с нее начинается более детальное исследование любых объектов, будь то далеких скоплений галактик или катаклизмических переменных в нашей Галактике. В настоящее время модель плоской Вселенной с холодной темной материей (Λ CDM) и космологической постоянной является общепринятой космологической моделью. Измерение функции масс скоплений галактик [1] позволяет получить ограничения на параметры Λ CDM-модели, такие как плотность материи (Ω_M), амплитуда спектра мощности на масштабе 8 Мпк (σ_8), а также параметр уравнения состояния темной энергии (w) [2; 3]. Кроме оптического диапазона, скопления галактик могут быть обнаружены по наблюдениям эффекта Сюняева–Зельдовича [4] и рентгеновскому излучению горячего межгалактического газа [5; 6]. Для составления подобных выборок разрабатываются методики поиска и отождествления скоплений галактик с использованием данных больших обзоров неба в миллиметровом, инфракрасном (ИК), оптическом и рентгеновском диапазонах.

Ограничения на космологические параметры можно улучшить, если проводить измерение функции масс скоплений с использованием выборок скоплений галактик из обзора неба рентгеновского телескопа *eROSITA*, установленного на борту космической обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма" (СРГ), например, [7]. Космическая обсерватория СРГ была запущена 13 июля 2019 года. На борту обсерватории установлено два рентгеновских телескопа с оптикой косоугольного падения *eROSITA* [8] и *ART-XC* им. М. Н. Павлинского [9], работающих в перекрывающихся диапазонах энергий 0.2–8 кэВ и 4–30 кэВ, соответственно.

Основная научная задача космической обсерватории (СРГ) — обзор всего неба с рекордной чувствительностью в рентгеновском диапазоне 0.2–30 кэВ [10]. Такой обзор позволил создать большие выборки рентгеновских источников по всему небу: как внегалактических (скопления галактик, активные галактические ядра), так и Галактических (катаклизмические переменные, нейтронные звезды и черные дыры в двойных системах, остатки сверхновых и др.). Оптические наблюдения рентгеновских источников из обзора СРГ позволяют отождествить эти объекты, определить расстояния, а также дать дополнительные ограничения на их свойства. Например, для космологических исследований необходимы выборки скоплений галактик с известными красными смещениями.

Обсерватория с 12 декабря 2019 года по март 2022 года проводила обзор всего неба. За обработку данных *eROSITA*, расположенных на галактической долготе $0^\circ < l < 180^\circ$, отвечают российские ученые. Данные телескопа *ART-XC* обрабатываются российскими учеными. К концу 2022

года обсерватория провела 4 полных и один частичный обзор всего неба. В декабре 2023 года был возобновлен обзор всего неба, проводимый телескопом *ART-XC*. В мягком диапазоне рентгеновского излучения (0.2–2.3 кэВ) при помощи телескопа *eROSITA* было обнаружено несколько миллионов источников рентгеновского излучения, что примерно в 30 раз больше, чем было задетектировано во время обзора всего неба космической обсерваторией *ROSAT* [11], проводимого в 1990–1991 годах. Также обнаружено более десяти тысяч скоплений галактик, большая часть которых менее массивные, чем скопления из обзора обсерватории им. Планка [12; 13].

Получение большой выборки скоплений с хорошо определенной функцией отбора — одна из основных задач обзора *СПГ/eROSITA* [10; 14]. Ожидается, что измерение функции масс скоплений космологических выборок *eROSITA* позволит уточнить ограничения на параметры Ω_M , σ_8 , w . Точность ограничений этих параметров зависит от ошибки на определение расстояний до наиболее массивных скоплений галактик в наблюдаемой части Вселенной. Поэтому желательно определять их красные смещения спектроскопическим методом, который является наиболее точным способом измерения красных смещений скоплений [7].

Существуют большие обзоры неба, включающие спектроскопические измерения красных смещений галактик. В частности, в Слоановском цифровом обзоре неба (*SDSS*) были получены спектроскопические красные смещения для более чем миллиона галактик в северном внегалактическом небе [15]. Спектроскопический обзор *DESI* (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) планирует получить спектры свыше 30 миллионов галактик [16]. Начатый в 2021 году обзор (спустя два года после запуска обсерватории *СПГ*) продлится около 5 лет и будет завершен, ориентировочно, в 2026 году. Все эти обзоры не направлены на получение спектров объектов, отождествленных с рентгеновскими источниками. Потому нельзя рассчитывать, что данных этих обзоров будет достаточно для проведения космологических исследований, связанных со скоплениями галактик из обзора *СПГ/eROSITA*.

В 2017 году группой оптической поддержки *СПГ* при непосредственном участии автора настоящей диссертации была организована программа оптического отождествления и спектроскопических измерений красных смещений наиболее массивных скоплений галактик, не имевших на тот момент спектроскопически измеренных красных смещений. Программа предусматривала спектроскопические наблюдения скоплений галактик, обнаруженных в обзорах обсерватории им. Планка и обзора телескопа *eROSITA* после начала выполнения обзора неба обсерваторией *СПГ*.

Как уже отмечено ранее, число наиболее массивных скоплений сильно зависит от космологических параметров. Для таких объектов необходимы спектроскопические измерения красных смещений. Однако как продемонстрировано в работе [7], точность измерения функции масс для

менее массивных скоплений не сильно ухудшается при использовании фотометрических оценок красных смещений, если число объектов в выборке достаточно велико.

Одним из наиболее распространенных способов оценки красных смещений скоплений галактик является измерение показателя цвета галактик красной последовательности. В настоящее время доступны несколько каталогов кандидатов в скопления галактик, для которых приведены фотометрические красные смещения, полученные с использованием данных больших обзоров неба [13; 17; 18]. Наивысшая точность фотометрических оценок красных смещений как для отдельных галактик, так и скоплений галактик в настоящее время достигается при применении методов машинного обучения к данным больших фотометрических и спектроскопических обзоров неба [19–22]. Нами был разработан алгоритм отождествления и фотометрической оценки красных смещений скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба *СПГ/eROSITA*, использующий фотометрические красные смещения галактик, которые в свою очередь получены с применением методов машинного обучения [20].

Обзор, проводимый космической обсерваторией *СПГ*, позволяет обнаружить множество объектов в жестком рентгеновском диапазоне. В 2021 году был опубликован каталог, содержащий 867 источников, обнаруженных в диапазоне 4–12 кэВ телескопом *ART-XC* в ходе первого года обзора всего неба [23]. Данный каталог представляет собой выборку, которую можно использовать для исследования популяций объектов с жесткими рентгеновскими спектрами без значимых эффектов потери полноты, характерных для обзоров, выполненных в мягком рентгеновском диапазоне [9]. Большинство объектов в обзоре являются уже известными рентгеновскими источниками, обнаруженными другими космическими рентгеновскими обсерваториями. Однако каталог содержит несколько источников с неизвестной природой, не отождествленных с оптическими источниками. Для таких объектов был проведен поиск оптических компаньонов таких источников, которые по своим характеристикам (наличие переменности, оцениваемый рентгеновский поток и т.п.) могут быть катаклизмическими переменными звездами.

Цели диссертационной работы

1. Оптическое отождествление и измерение красных смещений массивных скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и выборки *СПГ/eROSITA*.
2. Разработка алгоритма отождествления протяженных рентгеновских источников со скоплениями галактик, оценка масс отождествленных скоплений и фотометрических красных смещений.
3. Отождествление рентгеновских источников в обзоре *СПГ/ART-XC*, природа которых ранее не была установлена.

Научная и практическая значимость

Создание представительной выборки скоплений галактик для исследования функции масс и её эволюции составляет одну из важных научных задач обзора всего неба *СПГ/eROSITA*. В рентгеновском обзоре неба *СПГ/eROSITA* уже обнаружено несколько десятков тысяч скоплений галактик. И следующим шагом, необходимым для оценки масс скоплений и построения функции масс, является оптическое отождествление этих объектов и измерение их красных смещений. В диссертационной работе представлены спектроскопические измерения красных смещений 360 массивных скоплений галактик, обнаруженных в обзорах всего неба обсерваторий им. Планка и *СПГ/eROSITA*. В выборке отождествленных скоплений присутствуют как регулярные (с точки зрения морфологии), так и кандидаты в сливающиеся скопления.

Для регулярных скоплений существуют надежные методы оценки их массы, например, по рентгеновским данным [2] или по измерениям скоростей галактик-членов скопления [24], или по измерениям эффекта Сюняева-Зельдовича [25; 26], а также по эффекту гравитационного линзирования (который работает и в случае возмущенных/сливающихся скоплений) [27]. Сливающиеся скопления галактик интересны тем, что открывают возможность изучения свойств темной материи. Классическим примером сливающегося скопления является скопление Пуля, на основе анализа которого были получены верхние пределы на площадь сечения взаимодействия частиц темной материи [28]. Другим интересным примером слияния является скопление Арахис [29], которое было обнаружено в обзоре всего неба *СПГ/eROSITA* и измерения красного смещения для которого представлены в данной диссертационной работе.

Проведенные нами наблюдения позволили не только измерить красные смещения 360 скоплений галактик, но и выделить среди этой выборки несколько объектов, которые могут представлять интерес для более глубокого изучения. В частности, нами был обнаружен кандидат в так называемые "ископаемые" скопления — редкий тип групп/скоплений галактик, который характеризуется яркой массивной центральной галактикой, окруженной множеством тусклых спутников, при этом такие скопления в рентгеновском диапазоне проявляют свойства динамически спокойных (*relaxed*) скоплений. Кроме того, в выборке были обнаружены 7 скоплений галактик, центральная галактика которых демонстрирует яркую линию кислорода $[OII]\lambda 3727$, что свидетельствует об активном звездообразовании в этих галактиках. Такие объекты являются редкими и представляют интерес для изучения механизмов звездообразования в центральных областях скоплений галактик. Для некоторых скоплений на полученных нами прямых изображениях видны протяженные дуги, образованные вследствие эффекта сильного гравитационного линзирования далеких галактик фона на скоплении. Пример исследования

скопления-линзы SRGe CL2305.2 – 2248 из выборки, представленной в данной диссертационной работе, приведен в статье [30].

Для оптического отождествления массивных далеких скоплений галактик нами была получена зависимость медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик скоплений в диапазоне красных смещений $0.7 \lesssim z \lesssim 0.9$ от их красных смещений. Полученная зависимость использовалась для отбора кандидатов в массивные далекие скопления как из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора космической обсерватории им. Планка (*PSZ2*), так и из обзора всего неба СРГ/*eROSITA*, что позволило отождествить несколько десятков массивных скоплений с $z > 0.7$. Полученные выборки далеких скоплений галактик могут представлять интерес как для изучения эволюции скоплений галактик, так и для получения ограничений на уравнение состояния темной энергии.

Для анализа больших выборок скоплений галактик, не имеющих спектроскопических измерений красных смещений, нами был разработан алгоритм, позволяющий определять фотометрические красные смещения и оценивать массу скоплений M_{500} по совокупной инфракрасной светимости входящих в него галактик. Показано, что точность оценки красных смещений скоплений галактик составляет $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec}) \approx 0.5\%$, а точность оценки масс скоплений составляет $\sigma_{lg M_{500}} = 0.124$. Разработанный алгоритм может быть применен для анализа больших выборок скоплений галактик из обзора СРГ/*eROSITA*.

Отождествлены три ранее неизвестные катаклизмические переменные из обзора всего неба СРГ/*ART-XC*. При помощи данных *ART-XC*, а также данных спектроскопических и фотометрических наблюдений, полученных нами на телескопе АЗТ-ЗЗИК, исследованы их оптические и рентгеновские свойства. Полученная выборка будет иметь ценность для систематических популяционных исследований катаклизмических переменных звезд.

Научная новизна

Все полученные в данной диссертационной работе результаты являются новыми.

В диссертации представлена выборка 360 массивных скоплений галактик из обзоров космических обсерваторий им. Планка и СРГ, для которых нами были измерены спектроскопические красные смещения. Для целей оптического отождествления далеких массивных скоплений галактик на $z > 0.7$ из обзора всего неба СРГ/*eROSITA* получена зависимость медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик скоплений от их красных смещений.

Разработан алгоритм оптического отождествления и фотометрической оценки красных смещений скоплений галактик из обзора СРГ/*eROSITA*. Точность оценки красных смещений скоплений галактик, полученных с использованием алгоритма, составляет $\delta z_{phot}/(1 + z_{phot}) \approx$

0.5%, доля больших отклонений — 1.3%. Достигнутая точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик является высокой по сравнению с точностью оценки красных смещений по цвету красной последовательности [17] и сравнима с результатами некоторых недавних работ [21].

Разработана методика измерения ИК-светимости скоплений галактик. Предложена методика оценки массы скоплений галактик по их ИК-светимости, полученная на основе известного соотношения между ИК-светимостью скоплений галактик и их массой. Полученная точность оценки массы по ИК-светимости $\sigma_{\lg M_{500}} = 0.124$ сравнима с точностью оценки масс скоплений по их рентгеновской светимости $\sigma_{\lg M_{500}} = 0.107$, что позволяет независимо от рентгеновских данных оценивать массы скоплений.

Представлены оптические и рентгеновские спектры, а также оптические кривые блеска катаклизмических переменных звезд из обзора всего неба *SRG/ART-XC*, природа которых ранее не была установлена.

Апробация результатов

1. XV Конференция молодых ученых *"Фундаментальные и прикладные космические исследования"*, 2018 г., Москва, Россия
2. XVI Конференция молодых ученых *"Фундаментальные и прикладные космические исследования"*, 2019 г., Москва, Россия
3. Всероссийская астрономическая конференция *"Астрономия в эпоху многоканальных исследований"* (ВАК-2021), 2021 г., Москва, Россия
4. Всероссийская конференция *"Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2021)"*, 2021 г., Москва, Россия
5. Всероссийская конференция *"Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2022)"*, 2022 г., Москва, Россия
6. Всероссийская конференция *"Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (HEA-2023)"*, 2023 г., Москва, Россия

Личный вклад автора.

Соискатель принимал активное участие в работе на всех ее этапах. Совместно с соавторами соискатель участвовал в постановке задач, отборе объектов для последующих наблюдений на оптических телескопах, проводил наблюдения и обрабатывал полученные данные, занимался анализом полученных результатов и разработкой алгоритмов. Было опубликовано 8 статей в рецензируемых журналах. Во всех выносимых на защиту результатах личный вклад автора диссертационной работы является основным и определяющим.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проведено оптическое отождествление и получены спектроскопические измерения красных смещений 360 массивных скоплений

- галактик из обзоров космических обсерваторий им. Планка и СРГ/*eROSITA*.
2. В результате проведенной работы по оптическому отождествлению далеких и массивных скоплений галактик из обзора космической обсерватории им. Планка выборка известных массивных скоплений из каталога *PSZ2* на красных смещениях $z > 0.7$ увеличилась вдвое.
 3. Предложена модификация метода оптического отождествления скоплений галактик по красной последовательности галактик. Получена зависимость медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик скоплений на $0.7 < z < 0.9$ от красных смещений, которая может быть использована для оптического отождествления скоплений галактик на больших красных смещениях.
 4. Предложен алгоритм, позволяющий отождествлять массивные скопления галактик из рентгеновских обзоров и оценивать их фотометрические красные смещения. Достигнута точность определения фотометрических красных смещений $\delta z_{phot}/(1 + z_{phot}) \approx 0.5\%$, при этом доля больших отклонений составила 1.3%. Показано, что такие большие отклонения возникают, в основном, из-за проекций скоплений галактик и других крупномасштабных структур на разных красных смещениях в поле рентгеновского источника.
 5. Показано, что оценка масс M_{500} скоплений галактик на основе измерений их инфракрасной светимости имеет точность $\sigma_{lg M_{500}} = 0.124$, что сравнимо с точностью оценки массы скоплений галактик по измерениям рентгеновской светимости $\sigma_{lg M_{500}} = 0.107$.
 6. С помощью оптических наблюдений отождествлены три ранее неизвестных рентгеновских источника из обзора всего неба телескопа *ART-XC* им. М. Н. Павлинского обсерватории СРГ. Показано, что они являются катаклизмическими переменными звездами. Для объекта SRGA J204547.8+672642 измерен орбитальный период, равный 2.98 часа.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и списка литературы. Полный объём работы составляет 186 страниц, включая 68 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 171 наименование.

Содержание работы

Во **Введении** описываются актуальность темы исследования, цели диссертационной работы, научная и практическая значимость, и научная новизна.

В **Первой главе** представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 133 скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка. Эта выборка включает в себя 61 скопление галактик из каталога *PSZ2* [26], среди которых 7 далеких скоплений галактик на $z \gtrsim 0.7$, и 72 скопления галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка [13], не входящих в каталог *PSZ2*. Следует отметить, что в каталоге *PSZ2* на момент его публикации для 258 скоплений отсутствовали измерения спектроскопических красных смещений. В результате проведенных нами спектроскопических наблюдений на телескопах БТА, АЗТ-33ИК, РТТ-150, а также вследствие работы других научных групп, в этом каталоге практически не осталось скоплений галактик с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями. Эта выборка активно используется для оценки космологических параметров [3]. В будущем все эти скопления галактик, скорее всего, войдут в космологические выборки обзора всего неба космической обсерватории СРГ. Поэтому важно было заранее отождествить и измерить их спектроскопические красные смещения.

Наибольшая ценность проделанной работы заключается в том, что число известных далеких массивных скоплений на красных смещениях $z > 0.7$ из обзора Планка увеличилось примерно вдвое. Также была получена зависимость медианных цветов $i - z$ (см. Рис. 1) наиболее ярких галактик скоплений от их красных смещений. Для построения этой зависимости были использованы полученные нами спектроскопические измерения красных смещений, а также выборка далеких скоплений из каталога *PSZ2* с известными спектроскопическими красными смещениями. Полученная зависимость успешно использовалась во **Второй главе** диссертации для поиска и отождествления далеких скоплений галактик из обзора СРГ/*eROSITA*.

Во **Второй главе** представлены результаты работы по оптическому отождествлению и спектроскопическим измерениям красных смещений наиболее массивных скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба и в ходе калибровочных наблюдений СРГ/*eROSITA*. После выведения космической обсерватории на гало-орбиту вокруг точки L_2 проводились калибровочные наблюдения и наблюдения в рамках программы подтверждения характеристик телескопов обсерватории. Так, в ноябре 2019 года были проведены наблюдения поля Локмана [32] телескопом *eROSITA*, в ходе которого было обнаружено около 200 скоплений галактик.

Поле Локмана имеет довольно хорошее спектроскопическое покрытие в Слоановском обзоре [33], где красные смещения скоплений известны вплоть до $z \approx 0.5$. Основную сложность здесь представляют измерения красных смещений более далеких скоплений. Поэтому нашей группой была организована программа оптического отождествления и измерения красных смещений далеких скоплений галактик в поле Локмана. В результате

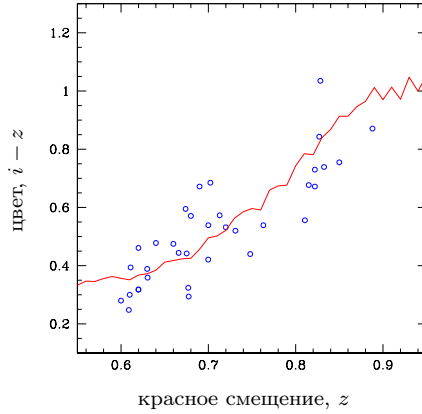


Рис. 1 — Медианные цвета $i - z$ по данным обзора *Pan-STARRS1* наиболее ярких галактик в скоплениях в зависимости от красных смещений. Красной линией показан цвет синтетического спектра звездного населения возрастом 11 млрд. лет, металличностью $Z = 0.02$ из работы [31].

этой работы были получены спектроскопические измерения красных смещений для 11 скоплений галактик, включая четыре скопления на $0.7 < z < 1.0$. Для всех этих скоплений галактик спектроскопические красные смещения публикуются впервые.

Одновременно с первым обзором всего неба СРГ/*eROSITA* проводились наблюдения на оптических телескопах 23 скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка, из них 14 расположены на половине неба, где права на данные обзора неба телескопа *eROSITA* принадлежат российской стороне. Все эти скопления были обнаружены в рентгеновском диапазоне при помощи телескопа *eROSITA* в ходе обзора неба в течение 2020 г.

Используя данные первого обзора всего неба СРГ/*eROSITA*, был составлен предварительный каталог протяженных рентгеновских источников. Наша группа отождествила эти источники со скоплениями галактик и составила наблюдательную программу измерения спектроскопических красных смещений наиболее массивных скоплений галактик обзора. Программа наблюдений постепенно дополнялась с увеличением количества завершенных полных обзоров всего неба.

В результате выполнения этой программы в период с июня 2020 г. по сентябрь 2023 г. были получены спектры и измерены красные смещения 216 скоплений галактик, из которых 139 обнаружены впервые. Спектры 106 скоплений галактик были получены на телескопе БТА, 45 — на телескопе RC2500, 51 — на АЗТ-ЗЗИК и 26 — на РТТ-150. В том числе, были измерены красные смещения 22 далеких скоплений галактик на $z > 0.7$. Полученные нами спектры ярчайших галактик некоторых далеких скоплений

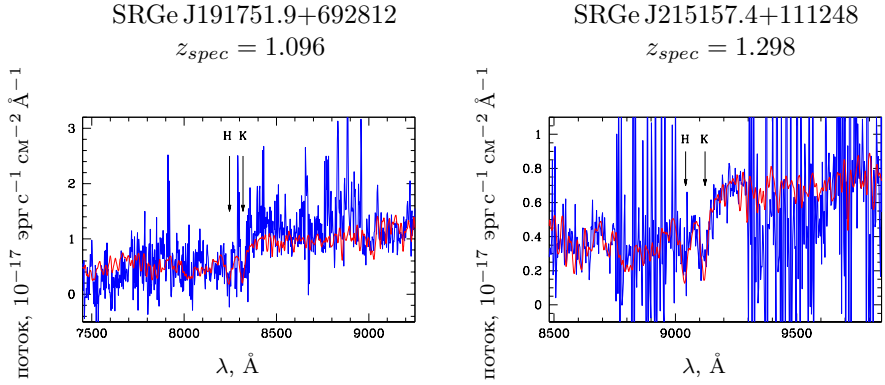


Рис. 2 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений ярчайших галактик наиболее удаленных далеких скоплений, обнаруженных в обзоре всего неба CPG/*eROSITA*. Синей линией обозначены спектры галактик, полученные на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*, красной линией обозначены шаблоны спектров сравнения. Для скопления SRGB J191751.9+692812 приведена сумма спектров двух галактик скопления.

с $z_{spec} > 0.9$ приведены на Рис. 2. Наиболее далекое скопление галактик в нашей выборке находится на $z_{spec} = 1.298$. Для некоторых далеких скоплений галактик были получены глубокие прямые изображения на телескопах БТА, АЗТ-33ИК и РТТ-150 в фильтрах *riz* Слоановской системы и в фильтре *J* на телескопе *RC2500*. В центральных галактиках 7 скоплений обнаружены линии излучения [OII] $\lambda 3727$, которые являются индикаторами звездообразования в галактике. При просмотре прямых изображений из обзора DESI LIS полей 4 скоплений галактик были обнаружены дуги, которые вероятнее всего являются линзированными галактиками фона.

В **Третьей главе** описывается разработанный нами алгоритм оптического отождествления скоплений галактик среди протяженных рентгеновских источников, который позволяет получить фотометрические оценки красных смещений большого числа скоплений галактик. Известно, что функция масс скоплений чувствительна к космологическим параметрам. Причем наибольшая чувствительность достигается на больших массах [34], так как число наиболее массивных (и редких) скоплений сильно зависит от амплитуды начальных возмущений и её эволюции с красным смещением. Оценку масс скоплений можно получить, например, при помощи соотношения между рентгеновской светимостью и массой скопления [35], однако для вычисления светимости необходима информация о красном смещении скопления. Поэтому нами и была выполнена описанная в **Первой и Второй главах** работа по измерению

спектроскопических красных смещений наиболее массивных скоплений, обнаруженных в обзорах обсерваторий им. Планка и СРГ. Точность оценки космологических параметров улучшается с ростом числа объектов, но падает с уменьшением точности измеренных красных смещений [7]. Таким образом, можно было бы уже имеющиеся выборки наиболее массивных скоплений галактик с измеренными спектроскопическими красными смещениями значительно расширить за счет отождествления большого числа менее массивных скоплений, для которых доступны только фотометрические оценки красных смещений.

Наиболее распространенный способ оценки красных смещений скоплений галактик, не требующий спектроскопических измерений — по цвету галактик красной последовательности [17]. Можно предположить, что использование дополнительной информации о точном положении и размере скоплений, которую можно получить по данным в рентгеновском диапазоне, позволит улучшить точность и надежность оценки фотометрических красных смещений скоплений галактик. Поэтому мы разработали алгоритм, который позволяет получить оценки красных смещений скоплений галактик на основе данных о фотометрических красных смещениях галактик, а также данных в рентгеновском и ИК диапазоне.

Алгоритм разбит на два этапа: 1) поиск и отождествление скоплений галактик, 2) оценка красных смещений скоплений. На первом этапе мы строим распределение ИК-яркости галактик в скоплениях в зависимости от красного смещения. Для этого мы отбирали галактики в поисковом объеме, ограниченным конусом, направленным на центр рентгеновского источника, и имеющим раствор, зависящий от размера рентгеновского источника, а также ограниченный цилиндром радиусом 800 кпк до направления на рентгеновский источник. Красное смещение, на которое приходится максимальная суммарная ИК-яркость галактик в заданной области неба, будет считаться предварительной оценкой красного смещения скопления $z_{\text{предв.}}$. На втором этапе мы оцениваем итоговое значение красного смещения скопления z_{phot} как среднее значение красных смещений галактик, лежащих в узком диапазоне красных смещений относительно $z_{\text{предв.}}$ и удаленных от центра рентгеновского источника на расстояние, не превышающее $1.4R_{500}$ (характерных размер скопления $1.4R_{500}$ при этом определяется из рентгеновского потока и $z_{\text{предв.}}$).

Помимо фотометрических красных смещений для каждого скопления мы определяем параметр надежности оптического отождествления скопления (показатель надежности $R \in [0; 1]$) как произведение вероятности отождествления рентгеновского источника с ложным пиком ИК-яркости на вероятность наблюдаемого отношения полученного значения ИК-светимости к рентгеновскому потоку. Для определения этих вероятностей нами смоделирована выборка 10000 рентгеновских источников (ложные источники), случайным образом распределенных на полях обзора *DESI LIS*. Для

оценки точности фотометрических оценок красных смещений скоплений мы использовали выборку из 634 массивных скоплений галактик с известными спектроскопическими красными смещениями из обзора обсерватории им. Планка [13; 25; 26] и обзора всего неба СРГ/*eROSITA* на участке неба, за обработку которого отвечает российский консорциум СРГ/*eROSITA* ($0^\circ < l < 180^\circ$). Если установить пороговое значение $R \geq 0.5$, то 1.7% скоплений галактик проверочной выборки будут иметь показатель надежности R ниже порогового значения. Доля ложных источников выше порогового значения 0.5 составляет 19.8%. Если предположить, что источником 10% протяженных рентгеновских источников обзора СРГ/*eROSITA* не являются скопления галактик, то доля источников, неправильно отождествленных алгоритмом как настоящие скопления галактик, будет составлять $19.8\% \cdot 10\% \approx 2\%$.

При использовании фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI LIS*, представленных в каталоге [20], достигнутая точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик на проверочной выборке составляет 0.5% (см. Рис. 3). Для сравнения, точность популярного алгоритма *redMaPPer* [17], где красные смещения оцениваются по цвету красной последовательности, составляет $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) = 2\%$ на $z \approx 0.5$. Количество несоответствий фотометрических красных смещений скоплений галактик их спектроскопическим измерениям на уровне 5σ составляет 1.3% для нашего алгоритма. Большинство этих несоответствий возникает из-за возможных проекций крупномасштабных структур в полях рентгеновских источников. Отметим, что разработанный алгоритм оценки фотометрических красных смещений оптимизирован для работы с массивными скоплениями галактик. Для менее массивных скоплений надежность оптического отождествления может быть хуже.

Также разработана методика измерения ИК-светимости скоплений галактик, которая может применяться для оценки массы M_{500} скоплений на основе известного соотношения ИК-светимости скоплений галактик от их массы. Точность оценки масс скоплений M_{500} , полученных таким образом, относительно масс M_{500} , определенных по рентгеновской светимости, характеризуется стандартным отклонением $\sigma_{\lg M_{500}} = 0.124$ (что соответствует относительному разбросу 33%). Полученная точность оценки масс скоплений по ИК-светимости скоплений сравнима с точностью оценки масс скоплений по измерениям рентгеновской светимости. Данный подход может оказаться особенно полезным в случае проекции скоплений галактик друг на друга, когда оценить массу каждого из проецируемых скоплений по данным об их рентгеновской светимости не представляется возможным.

В Четвертой главе приведено оптическое отождествление катаклизмических переменных звезд из обзора СРГ/*ART-XC*. В 2022 году был опубликован каталог из 867 источников, обнаруженных в диапазоне 4–12 кэВ телескопом *ART-XC* в течение первого года обзора всего неба

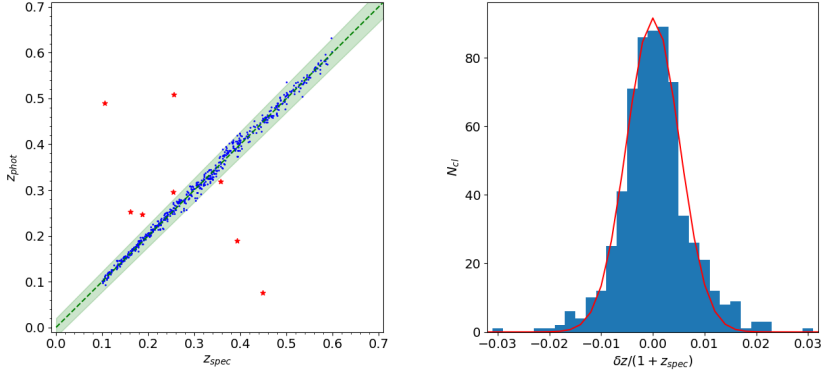


Рис. 3 — Фотометрические красные смещения скоплений галактик. Слева: сравнение z_{phot} с их спектроскопическими измерениями z_{spec} . Красными звездочками обозначены скопления галактик с возможными проекциями, зеленым обозначена область 4σ . Справа: гистограмма распределения числа скоплений галактик от $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$, красной линией показана аппроксимация распределения гауссианой.

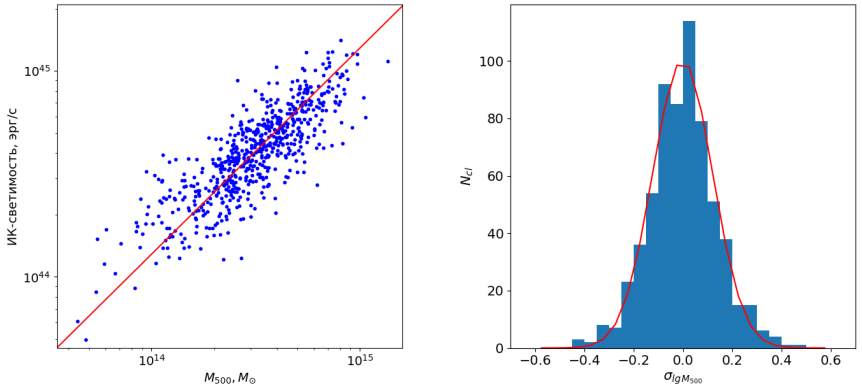


Рис. 4 — Слева: значение светимостей L_{W1} скоплений галактик проверочной выборки в фильтре $W1$ и их масс M_{500} . Красная линия — линия наилучшего соотношения $lg(L_{W1}) = lg(M_{500}) + k$. Справа: гистограмма распределения $\sigma_{lg M_{500}}$ относительно линии аппроксимации.

(*ARTSS12*) [23]. Большинство из них (~ 750) являются ранее известными астрофизическими объектами, из которых самую большую группу составляют активные галактические ядра (≈ 370), затем следуют рентгеновские двойные (≈ 170) и катаклизмические переменные звезды (≈ 100 , включая симбиотические системы). Ожидается, что *ART-XC* в течение 4-летнего обзора увеличит выборку рентгеновских катаклизмических переменных в несколько раз, до ~ 500 объектов. Эта выборка будет иметь большое значение для систематических популяционных исследований катаклизмических переменных звезд, так как диапазон энергий 4–12 кэВ идеально подходит для отбора катаклизмических переменных практически всех классов (как магнитных, так и немагнитных).

В данной главе представлены полученные нами результаты оптического отождествления трех источников *ART-XC* в диапазоне энергий 4–12 кэВ из каталога *ARTSS12*, которые оказались катаклизмическими переменными звездами. Все три объекта ранее были известны как источники рентгеновского излучения из обзора всего неба *ROSAT* и обзора *XMM-Newton slew*, а также как переменные источники в оптическом диапазоне, однако ранее их природа оставалась неизвестной. Для этих объектов проведены фотометрические и спектроскопические наблюдения в оптическом диапазоне на телескопе АЗТ-33ИК, их спектры и кривые блеска показаны на Рис. 5. Оптические свойства подтверждают то, что эти объекты являются катаклизмическими переменными звездами. Сделан вывод, что SRGA J194638.9+704552 является промежуточным поляраром, SRGA J204547.8+672642, вероятно, поляраром или промежуточным поляраром, а для SRGA J225412.8+690658 не удалось установить тип на основе имеющихся данных. Для SRGA J204547.8+672642 по архивным данным *TESS* измерен орбитальный период, равный 2.98 часа.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертации:

1. Получены спектроскопические измерения красных смещений для 61 скопления галактик из каталога *PSZ2*, включая 7 далеких скоплений галактик на красных смещениях $z \gtrsim 0.7$, и красные смещения 72 скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка, не входящих в каталог *PSZ2*. В результате проделанной работы были измерены спектроскопические красные смещения четверти всех скоплений галактик из каталога *PSZ2* с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями, число известных массивных скоплений в каталоге *PSZ2* на высоких красных смещениях ($z > 0.7$) удваивается. Представленная выборка скоплений галактик содержит наиболее массивные скопления в наблюдаемой части Вселенной, массы которых на красных смещениях выше $z \approx 0.5$ превышают $M_{500} \approx 3 \times 10^{14} M_{\odot}$.

2. Получена зависимость медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик в скоплениях от красных смещений. Для калибровки этого соотношения были использованы полученные нами спектроскопические

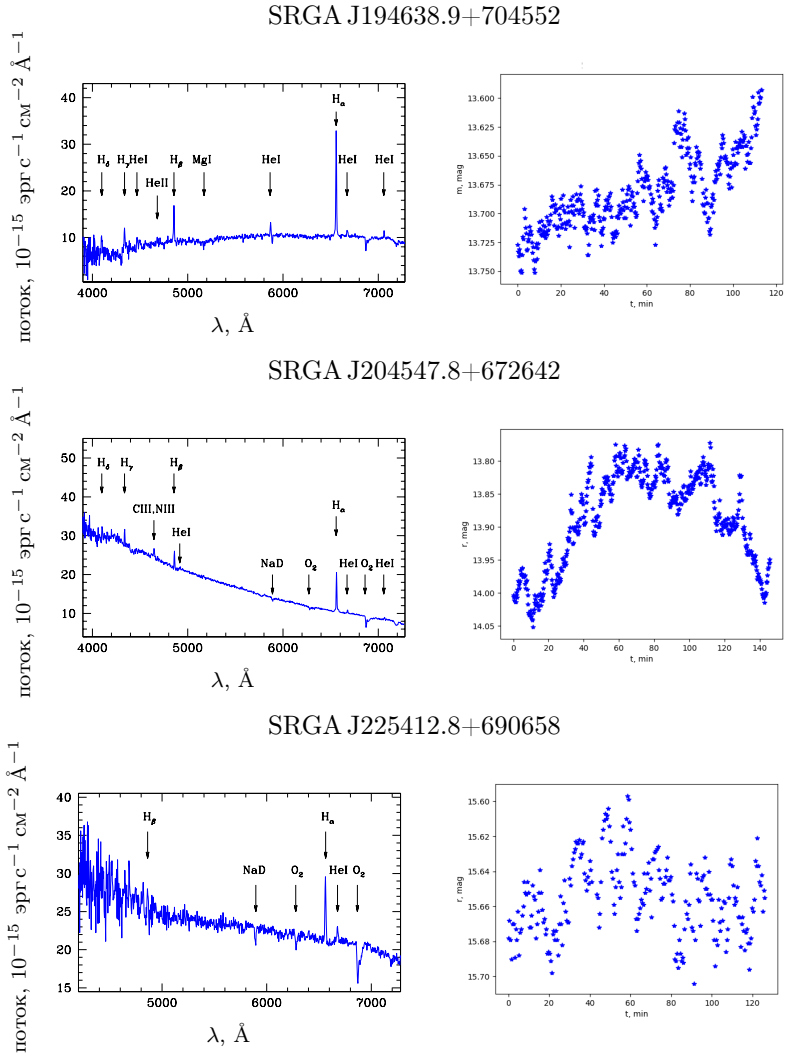


Рис. 5 — Оптические спектры (слева) и кривые блеска (справа) исследуемых объектов. Спектры поправлены на межзвездное поглощение, указаны спектральные особенности. Кривые блеска получены в фильтре r , время по горизонтальной шкале отсчитывается от начала наблюдения.

измерения красных смещений, а также выборка далеких скоплений из каталога *PSZ2* с известными спектроскопическими красными смещениями. Полученная зависимость использовалась для поиска и отождествления далеких скоплений галактик из обзора *CPG/eROSITA*.

3. Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 11 скоплений галактик, обнаруженных в рентгеновском обзоре поля дыры Локмана *CPG/eROSITA*. Из этих скоплений четыре имеют красные смещения $0.7 < z < 1.0$, два из них расположены на красных смещениях $z > 0.9$. Для всех этих скоплений галактик спектроскопические красные смещения публикуются впервые. Для четырех скоплений галактик измерения красных смещений согласуются с данными спектроскопических измерений Слоановского обзора для некоторых галактик (не являющимися центральными) в поле скопления. Показаны примеры обнаружения скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка в обзоре всего неба *CPG/eROSITA*.

4. В результате выполнения оптического отождествления и спектроскопических наблюдений скоплений галактик, обнаруженных в ходе обзора всего неба *CPG/eROSITA*, в период с июня 2020 г. по сентябрь 2023 г. были получены спектры и измерены красные смещения 216 скоплений галактик, из которых 139 обнаружены впервые. Спектры 106 скоплений галактик были получены на телескопе БТА, 45 – на телескопе *RC2500*, 51 – на АЗТ-ЗЗИК и 26 – на РТТ-150. В том числе, были измерены красные смещения 22 далеких скоплений галактик на $z > 0.7$. Наиболее далекое скопление галактик в нашей выборке находится на $z_{spec} = 1.298$. Для некоторых далеких скоплений галактик были получены глубокие прямые изображения на телескопах БТА, АЗТ-ЗЗИК и РТТ-150 в фильтрах *riz* Слоановской системы и в фильтре *J* на телескопе *RC2500*. В центральных галактиках 7 скоплений обнаружены линии излучения [OII] $\lambda 3727$, которые являются индикаторами звездообразования в галактике. При просмотре прямых изображений из обзора DESI LIS полей 4 скоплений галактик были обнаружены дуги, которые вероятнее всего являются линзированными галактиками фона.

5. Описан оригинальный алгоритм отождествления протяженных рентгеновских источников со скоплениями галактик. Достигнутая точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик на проверочной выборке составляет 0.5%. Количество несоответствий фотометрических красных смещений скоплений галактик их спектроскопическим измерениям на уровне 5σ составляет 1.3%. Большинство этих несоответствий возникает из-за возможных проекций крупномасштабных структур в полях рентгеновских источников. Достигнутая точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик является высокой по сравнению с точностью оценки красных смещений по цвету

красной последовательности, например, алгоритма *redMaPPer*, точность которого на $z \approx 0.5$ составляет $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec}) = 0.02$.

6. Разработана методика измерения ИК-светимости скоплений галактик, которая может применяться для оценки массы M_{500} скоплений на основе известного соотношения ИК-светимости скоплений галактик от их массы. Данный подход может оказаться особенно полезным в случае проекции скоплений галактик друг на друга, когда оценить массу каждого из проецируемых скоплений по данным об их рентгеновской светимости не представляется возможным. Точность оценки масс скоплений M_{500} по ИК-светимости составляет $\sigma_{lg M_{500}} = 0.124 (\pm 33\%)$, что сравнимо с точностью оценки масс скоплений по измерениям рентгеновской светимости $\sigma_{lg M_{500}} = 0.107$.

7. Представлены полученные нами результаты оптического отождествления трех источников *ART-XC* в диапазоне энергий 4-12 кэВ, полученном после первого года обзора всего неба CPG. Все три объекта ранее были известны как источники рентгеновского излучения из обзора всего неба *ROSAT* и обзора *XMM-Newton slew*, а также как переменные источники в оптическом диапазоне, однако ранее их природа оставалась неизвестной. Для этих объектов проведены фотометрические и спектроскопические наблюдения в оптическом диапазоне на телескопе АЗТ-ЗЗИК. Оптические свойства подтверждают то, что эти объекты являются катаклизмическими переменными звездами. Сделан вывод, что SRGA J194638.9+704552 является промежуточным полярном, SRGA J204547.8+672642, вероятно, полярном или промежуточным полярном, а для SRGA J225412.8+690658 не удалось установить тип на основе имеющихся данных. Для SRGA J204547.8+672642 измерен орбитальный период, основываясь на архивных данных *TESS*, который оказался равным 2.98 часа.

Список публикаций по теме диссертации.

В публикациях, где соискатель является первым автором, вклад соискателя в работу определяющий. Для публикаций, где соискатель не является первым автором, личный вклад указан в скобках.

- [A1] Буренин Р. А., Бикмаев И. Ф., Хамитов И. М., Зазнобин И. А. и др. «Оптическое отождествление далеких скоплений галактик среди источников сигнала Сюняева-Зельдовича из обзора обсерватории им. Планка», Письма в Астрономический журнал, 2018, Т. 44, № 5, С. 317-330. (спектроскопические наблюдения на телескопе АЗТ-ЗЗИК, обработка спектров и интерпретация результатов наблюдений скопления галактик PSZ2 G126.57+51.61, определение зависимости медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик в скоплениях от красного смещения.)

- [A2] Оптическое отождествление скоплений галактик среди объектов второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Бикмаев И. Ф. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2019, Т. 45, № 2, С. 77-90
- [A3] Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик, обнаруженных по данным обзора обсерватории им. Планка / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Бикмаев И. Ф. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2020, Т. 46, № 2, С. 79-91
- [A4] Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре СРГ/еРОЗИТА / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Бикмаев И. Ф. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2021, Т. 47, № 2, С. 79-88
- [A5] Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Ляпин А. Р. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2021, Т. 47, № 3, С. 174-182
- [A6] Identification of three cataclysmic variables detected by the ART-XC and eROSITA telescopes on board the SRG during the all-sky X-ray survey / Zaznobin I., Sazonov S., Burenin R. et al. // Astronomy & Astrophysics, 2022, Vol. 661, P. id.A39
- [A7] Оптическое отождествление скоплений галактик среди рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА по данным о фотометрических оценках красных смещений галактик / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Мещеряков А. В. // Письма в Астрономический журнал, 2023, Т. 49, № 8, С. 517-531
- [A8] Оптическое отождествление и спектроскопические измерения красных смещений 216 скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/еРОЗИТА / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Белинский А. А. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2023, Т. 49, № 11, С. 695-716

Литература

1. *Tinker J. [et al.]*. Toward a Halo Mass Function for Precision Cosmology: The Limits of Universality // *The Astrophysical Journal*. — 2008. — dec. — Vol. 688, no. 2. — Pp. 709–728.
2. *Vikhlinin A. [et al.]*. Chandra Cluster Cosmology Project III: Cosmological Parameter Constraints // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — feb. — Vol. 692, no. 2. — Pp. 1060–1074.
3. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck 2015 results. XXIV. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — sep. — Vol. 594. — P. A24.
4. *Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B.* The Observations of Relic Radiation as a Test of the Nature of X-Ray Radiation from the Clusters of Galaxies // *Comments on Astrophysics and Space Physics*. — 1972. — nov. — Vol. 4. — P. 173.
5. *Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B.* Formation of Clusters of Galaxies; Protocluster Fragmentation and Intergalactic Gas Heating // *Astronomy & Astrophysics*. — 1972. — aug. — Vol. 20. — P. 189.
6. *Sarazin C. L.* X-ray emission from clusters of galaxies // *Reviews of Modern Physics*. — 1986. — jan. — Vol. 58, no. 1. — Pp. 1–115.
7. *Pillepich A. [et al.]*. Forecasts on dark energy from the X-ray cluster survey with eROSITA: constraints from counts and clustering // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — nov. — Vol. 481, no. 1. — Pp. 613–626.
8. *Predehl P. [et al.]*. The eROSITA X-ray telescope on SRG // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — mar. — Vol. 647. — P. A1.
9. *Pavlinisky M. [et al.]*. The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — jun. — Vol. 650. — P. A42.
10. *Sunyaev R. [et al.]*. SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — dec. — Vol. 656. — P. A132.
11. *Boller Th. [et al.]*. Second ROSAT all-sky survey (2RXS) source catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — apr. — Vol. 588. — P. A103.
12. *Churazov E., Vikhlinin A., Sunyaev R.* (No) dimming of X-ray clusters beyond $z \sim 1$ at fixed mass: crude redshifts and masses from raw X-ray and SZ data // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — jun. — Vol. 450, no. 2. — Pp. 1984–1989.

13. Буренин П. А. Расширение каталога скоплений галактик обзора обсерватории им. Планка // *Письма в Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 43, № 8. — С. 559–569.
14. Bulbul E. [et al.]. The SRG/eROSITA All-Sky Survey. The first catalog of galaxy clusters and groups in the Western Galactic Hemisphere // *Astronomy & Astrophysics*. — 2024. — may. — Vol. 685. — P. A106.
15. Ahumada R. [et al.]. The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2020. — jul. — Vol. 249, no. 1. — P. 3.
16. Collaboration DESI. The Early Data Release of the Dark Energy Spectroscopic Instrument // *arXiv e-prints*. — 2023. — jun. — P. arXiv:2306.06308.
17. Rykoff E. S. [et al.]. redMaPPer. I. Algorithm and SDSS DR8 Catalog // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — apr. — Vol. 785, no. 2. — P. 104.
18. Wen Z. L., Han J. L., Liu F. S. A Catalog of 132,684 Clusters of Galaxies Identified from Sloan Digital Sky Survey III // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2012. — apr. — Vol. 199, no. 2. — P. 34.
19. Мещеряков А. В. [и др.]. Измерение красных смещений скоплений галактик $z < 0.45$ с высокой точностью по фотометрическим данным SDSS-III // *Письма в Астрономический журнал*. — 2015. — Т. 41, № 7. — С. 339–349.
20. Zou H. [et al.]. Photometric Redshifts and Galaxy Clusters for DES DR2, DESI DR9, and HSC-SSP PDR3 Data // *Research in Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — jun. — Vol. 22, no. 6. — P. 065001.
21. Hernández-Lang D. [et al.]. The PSZ-MCMF catalogue of Planck clusters over the DES region // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023. — oct. — Vol. 525, no. 1. — Pp. 24–43.
22. Hilton M. [et al.]. The Atacama Cosmology Telescope: The Two-season ACTPol Sunyaev-Zel'dovich Effect Selected Cluster Catalog // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — mar. — Vol. 235, no. 1. — P. 20.
23. Pavlinsky M. [et al.]. SRG/ART-XC all-sky X-ray survey: Catalog of sources detected during the first year // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — may. — Vol. 661. — P. A38.
24. Girardi M. [et al.]. Optical Mass Estimates of Galaxy Clusters // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — sep. — Vol. 505, no. 1. — Pp. 74–95.

25. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck 2013 results. XXIX. The Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — nov. — Vol. 571. — P. A29.
26. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck 2015 results. XXVII. The second Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — sep. — Vol. 594. — P. A27.
27. *von der Linden A. [et al.]*. Robust weak-lensing mass calibration of Planck galaxy clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — sep. — Vol. 443, no. 3. — Pp. 1973–1978.
28. *Markevitch M. [et al.]*. Direct Constraints on the Dark Matter Self-Interaction Cross Section from the Merging Galaxy Cluster 1E 0657-56 // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — may. — Vol. 606, no. 2. — Pp. 819–824.
29. *Lyskova N. [et al.]*. The massive galaxy cluster CL0238.3+2005 (the Peanut cluster) at $z = 0.42$: A merger just after pericenter passage? // *Astronomy & Astrophysics*. — 2025. — jan. — Vol. 693. — P. A55.
30. *Хамитов И. М. [и др.]*. Оценка массы очень массивного скопления галактик SRGe CL2305.2-2248 по сильному линзированию // *Письма в Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 48, № 1. — С. 3–11.
31. *Bruzual G., Charlot S.* Stellar population synthesis at the resolution of 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2003. — oct. — Vol. 344, no. 4. — Pp. 1000–1028.
32. *Dickey J. M., Lockman F. J.* H I in the galaxy. // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1990. — jan. — Vol. 28. — Pp. 215–261.
33. *Albaret F. D. [et al.]*. The 13th Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-IV Survey Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2017. — dec. — Vol. 233, no. 2. — P. 25.
34. *Вихлинин А. А. [и др.]*. Скопления галактик // *Успехи физических наук*. — 2014. — Т. 57, № 4. — С. 317–341.
35. *Vikhlinin A. [et al.]*. Chandra Cluster Cosmology Project. II. Samples and X-Ray Data Reduction // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — feb. — Vol. 692, no. 2. — Pp. 1033–1059.