

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

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»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук
Буренин Родион Анатольевич

Москва — 2025

Оглавление

Стр.

Введение	5
Глава 1. Измерение красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка	16
1.1 Введение	16
1.2 Методика оптического отождествления и измерения красных смещений скоплений галактик из обзора Планка	17
1.2.1 Используемые данные обзоров неба в оптическом и ближнем ИК-диапазоне	17
1.2.2 Процедура отождествления скоплений галактик и отбор галактик для спектроскопических наблюдений	19
1.2.3 Процедура обработки данных наблюдений	24
1.2.4 Измерение красных смещений галактик	26
1.3 Проведение наблюдений скоплений галактик на оптических телескопах	28
1.3.1 6-м телескоп БТА	29
1.3.2 1.6-м телескоп АЗТ-ЗЗИК	30
1.3.3 1.5-м российско-турецкий телескоп РТТ-150	35
1.3.4 2.5-м телескоп <i>RC2500</i>	37
1.4 Измерение красных смещений скоплений галактик из каталога <i>PSZ2</i>	38
1.4.1 Отбор скоплений галактик	38
1.4.2 Результаты наблюдений	43
1.4.3 Замечания по отдельным объектам	43
1.5 Измерение красных смещений далеких скоплений галактик из каталога <i>PSZ2</i>	48
1.5.1 Отбор скоплений галактик	48
1.5.2 Результаты наблюдений	52
1.5.3 Замечания по отдельным объектам	60
1.6 Измерение красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога Планка	65
1.6.1 Отбор скоплений галактик	65
1.6.2 Результаты наблюдений	66

1.6.3	Замечания по отдельным объектам	74
1.7	Заключение	82
Глава 2. Измерение красных смещений скоплений галактик из		
	обзора <i>СПГ/eROSITA</i>	83
2.1	Введение	83
2.2	Измерение красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана <i>СПГ/eROSITA</i>	84
2.2.1	Отбор скоплений галактик	84
2.2.2	Результаты наблюдений	85
2.2.3	Замечания по отдельным объектам	89
2.3	Наблюдение скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка в обзоре всего неба <i>СПГ/eROSITA</i>	92
2.4	Измерение красных смещений 216 скоплений галактик из обзора всего неба <i>СПГ/eROSITA</i>	93
2.4.1	Отбор скоплений галактик	95
2.4.2	Результаты наблюдений	96
2.4.3	Замечания по отдельным объектам	110
2.5	Заключение	118
Глава 3. Оптическое отождествление скоплений галактик		
	среди протяженных рентгеновских источников	120
3.1	Введение	120
3.2	Описание алгоритма	121
3.2.1	Поиск и отождествление скоплений галактик	122
3.2.2	Оценка красных смещений скоплений	124
3.2.3	Описание природы несоответствий	125
3.2.4	Оценка масс проецируемых скоплений	126
3.2.5	Определение надежности оптического отождествления . .	126
3.3	Использование алгоритма для отождествления скоплений из обзора <i>eROSITA</i>	127
3.3.1	Фотометрические оценки красных смещений галактик . .	128
3.3.2	Используемые рентгеновские данные	129
3.3.3	Используемые данные в ИК-диапазоне	130

3.4	Измерение ИК-светимости скоплений и оценка их масс	131
3.4.1	Проверочная выборка скоплений галактик	131
3.4.2	Оценка масс скоплений по их ИК-светимости	134
3.5	Проверка статистических характеристик измерений алгоритма .	135
3.5.1	Оценка надежности оптического отождествления	136
3.5.2	Анализ точности красных смещений скоплений из проверочной выборки	138
3.5.3	Анализ надежности отождествления скоплений из проверочной выборки	140
3.6	Примеры работы алгоритма	142
3.6.1	Пример без проекции крупномасштабных структур	142
3.6.2	Пример с проекцией крупномасштабных структур	143
3.7	Заключение	145

Глава 4. Оптическое отождествление рентгеновских

	источников из обзора CPГ/<i>ART-XC</i>	146
4.1	Введение	146
4.2	Отбор объектов	147
4.3	Рентгеновские наблюдения	149
4.3.1	Спектральный анализ	149
4.3.2	Модели	152
4.4	Оптические наблюдения	154
4.4.1	Спектроскопия	155
4.4.2	Фотометрия	156
4.4.3	Результаты	157
4.5	Обсуждение	164
4.6	Заключение	165

Заключение	166
-----------------------------	------------

Список литературы	169
------------------------------------	------------

Введение

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) [2–4]. Кроме оптического диапазона, скопления галактик могут быть обнаружены по наблюдениям эффекта Сюняева–Зельдовича [5] и рентеновскому излучению горячего межгалактического газа [6; 7]. 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.

Скопления галактик состоят, преимущественно, из темной материи с небольшим количеством барионного вещества. Характерные массы богатых скоплений галактик составляют от $3 \cdot 10^{14} M_\odot$ до нескольких $10^{15} M_\odot$. В качестве массы скопления часто приводится величина M_{500} — это полная масса скопления внутри сферы радиусом R_{500} , который, в свою очередь, определяется так, чтобы средняя плотность внутри R_{500} в 500 раз превышала критическую плотность на красном смещении скопления. Барионное вещество скоплений галактик состоит из горячего межгалактического газа и галактик скоплений, которые являются, как правило, массивными эллиптическими галактиками с малым содержанием межзвездного газа. Горячий межгалактический газ скоплений галактик — это плазма, состоящая, преимущественно, из ионов водорода и гелия плотностью порядка $10^{-3} - 10^{-2}$ частиц/см³ с температурой $10^7 - 10^8$ К. Горячий межгалактический газ скоплений является источником рентгеновского тормозного излучения [6; 7]. Светимость скоплений галактик в диапазоне,

примерно, 0.5–15 кэВ, достигает 10^{45} эрг/с. Наблюдаемый угловой размер рентгеновского излучения скоплений галактик на красном смещении $z \approx 0.5$ может достигать нескольких десятков угловых секунд, поэтому современные космические рентгеновские телескопы с оптикой косого падения могут обнаруживать скопления галактик как протяженные рентгеновские источники.

Горячий межгалактический газ скоплений галактик также взаимодействует с космическим микроволновым фоном. При рассеянии фотонов космического микроволнового фона на электронах горячего межгалактического газа наблюдается искажение спектра, называемое эффектом Сюняева–Зельдовича [5]. Наблюдение эффекта Сюняева–Зельдовича позволяет обнаруживать массивные скопления галактик вне зависимости от их красного смещения, так как искажение спектра микроволнового фона зависит только от характеристик горячего межгалактического газа скопления. Впервые эффект Сюняева–Зельдовича был обнаружен еще в 1984 году [8].

Нескольких наземных телескопах, работающих в миллиметровом диапазоне, таких как Южный полярный телескоп (*SPT* [9]) и Атакамский космологический телескоп (*ACT* [10]), проводили обзоры больших участков неба с целью наблюдений космического микроволнового фона. Эти обзоры охватывают лишь часть неба, расположенного, преимущественно, на южном полушарии. Обзор неба в миллиметровом диапазоне космической обсерваторией имени Планка является единственным обзором всего неба, в котором было обнаружено множество источников сигнала Сюняева–Зельдовича [11]. Данные этой обсерватории позволили построить ограничения на параметры Λ CDM модели Вселенной при помощи построения спектра мощности температуры космического микроволнового фона [12–14]. В результате обзора обсерватории им. Планка составлено два каталога источников сигнала Сюняева–Зельдовича, [15;16]. В последней версии каталога (второй каталог Планка) насчитывается 1653 объекта, из которых 1203 источника являются подтвержденными скоплениями галактик, с массами, превышающими $M_{500} \approx 5 \times 10^{14} M_{\odot}$ на красных смещениях выше $z \approx 0.5$. Эти скопления галактик являются наиболее массивными скоплениями галактик в наблюдаемой Вселенной. Измерение функции масс скоплений этой выборки позволило уточнить ограничения на параметры Ω_M , H_0 , σ_8 [3;4].

Ограничения на космологические параметры можно улучшить, если проводить измерение функции масс скоплений с использованием выборок скоплений галактик из обзора неба рентгеновского телескопа *eROSITA*, уста-

новленного на борту космической обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма" (СРГ), например, [17–19]. Космическая обсерватория СРГ была запущена 13 июля 2019 года. На борту обсерватории установлено два рентгеновских телескопа с оптикой косого падения *eROSITA* [20] и *ART-XC* им. М. Н. Павлинского [21], 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 [22]. 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* [23], проводимого в 1990–1991 годах. Также обнаружено более десяти тысяч скоплений галактик, большая часть которых менее массивные, чем скопления из обзора обсерватории им. Планка [24;25].

Получение большой выборки скоплений с хорошо определенной функцией отбора — одна из основных задач обзора СРГ/*eROSITA* [22;26]. 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 [18].

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 [27–29]. Спектроскопический обзор *DESI* (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) планирует получить спектры свыше 30 миллионов галактик [30]. 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 [18], 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 [31; 32]. В настоящее время доступны несколько каталогов кандидатов в скопления галактик, для которых приведены фотометрические красные смещения, полученные с использованием данных больших обзоров неба [25; 31; 33–36]. 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 [31; 33; 37–42]. 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 [38].

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 [43]. 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 [21; 44]. 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 CPT/*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 [45–47], или по измерениям эффекта Сюняева-Зельдовича [15; 16; 48], а также по эффекту гравитационного линзирования (который работает и в случае возмущенных/сливающихся скоплений) [49–52]. 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 [53]. Другим интересным примером слияния является скопление Арахис [54], которое было обнаружено в обзоре всего неба CPT/*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] λ 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 [55].

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 обсерватории им. Планка, так и из обзора всего неба *СПГ/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 *СПГ/eROSITA*.

Отождествлены три ранее неизвестные катаклизмические переменные из обзора всего неба *СПГ/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 *СПГ*, для которых нами были измерены спектроскопические красные смещения. Для целей оптического отождествления далеких массивных скоплений галактик на $z > 0.7$ из обзора всего неба *СПГ/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 [31] и сравнима с результатами некоторых недавних работ [41].

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 СРГ/*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

Диссертант принимал активное участие в работе на всех ее этапах. Совместно с соавторами диссертант 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 *CPG/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.

Список публикаций в рецензируемых журналах.

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

1. 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-33ИК, 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.)
2. 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
3. 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
4. Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре SRG/eROSITA / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Бикмаев И. Ф. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2021, Т. 47, № 2, С. 79-88
5. Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа eROSITA на борту обсерватории SRG / Зазнобин И. А., Буренин Р. А., Ляпин А. Р. и др. // Письма в Астрономический журнал, 2021, Т. 47, № 3, С. 174-182
6. Identification of three cataclysmic variables detected by the ART-XC and eROSITA telescopes on board the SRG during the all-sky X-ray survey / Zaznabin I., Sazonov S., Burenin R. et al. // Astronomy & Astrophysics, 2022, Vol. 661, P. id.A39

7. 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
8. 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

Объём и структура работы. Диссертация состоит из **Введения, четырех глав и Заключения**. Полный объём диссертации составляет 186 страниц, включая 69 рисунков и 22 таблицы. Список литературы содержит 171 наименование.

В Главе 1 представлены результаты оптического отождествления и спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба обсерватории имени Планка в миллиметровом диапазоне. В Главе 2 представлены результаты оптического отождествления и спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик, обнаруженных в обзоре неба СРГ/*eROSITA* в рентгеновском диапазоне. В Главе 3 представлено описание алгоритма оптического отождествления скоплений галактик среди рентгеновских источников обзора СРГ/*eROSITA* по данным о фотометрических оценках красных смещений галактик. Приведена оценка точности и надежности отождествления на выборке наиболее массивных скоплений галактик из обзора обсерватории имени Планка. В Главе 4 представлены результаты отождествления рентгеновских источников, обнаруженных в обзоре СРГ/*ART-XC*.

Глава 1. Измерение красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка

1.1 Введение

Второй каталог источников Сюняева–Зельдовича обзора всего неба космической обсерватории им. Планка выпуска 2015 года (*PSZ2*) [16] включает в себя 1653 объекта, которые были найдены в результате измерения эффекта Сюняева–Зельдовича [5]. Среди всех этих объектов 1203 источника являются подтвержденными массивными скоплениями галактик. Это наиболее массивные скопления галактик, массы которых на красных смещениях выше $z \approx 0.5$ превышают $M_{500} \gtrsim 5 \times 10^{14} M_{\odot}$, которые наблюдаются равномерно на всем небе в наблюдаемой части Вселенной [15; 16]. Эта выборка активно используется для измерения функции масс скоплений галактик и ограничения на параметры космологической модели по этим данным [3; 4]. В будущем все эти скопления галактик, скорее всего, войдут в космологические выборки обзора всего неба космической обсерватории СРГ. Поэтому важно заранее отождествить эти скопления и измерить их спектроскопические красные смещения. Среди неотожествленных источников сигнала Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка имеются скопления галактик, а так же некоторое количество ложных обнаружений.

На момент публикации каталога *PSZ2* в нем содержалось 258 скоплений галактик с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями [56]. Наша научная группа обладает достаточным количеством наблюдательного времени на телескопах БТА, АЗТ-3ЗИК, РТТ-150 для измерений спектроскопических красных смещений скоплений галактик этой выборки за разумное время. Наша группа принимает активное участие в работах по оптическому отождествлению и измерению красных смещений скоплений галактик из обзора Планка [15; 16; 25; 32; 57–59]. Телескопы расположены в северном полушарии преимущественно на умеренных широтах, поэтому мы проводили наблюдения только скоплений галактик, расположенных выше склонения $\delta > -20^{\circ}$. Мы проводили измерения красных смещений скоплений галактик с момента публикации каталога *PSZ2* без определенного приоритета наблюдений до тех пор,

пока в результате нашей работы и работы других научных групп в каталоге *PSZ2* практически не осталось скоплений галактик с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями.

1.2 Методика оптического отождествления и измерения красных смещений скоплений галактик из обзора Планка

Источники Сюняева–Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка имеют область локализации с угловым радиусом примерно равным $5'$ [16]. Радиус скопления галактик R_{500}^1 с массой $3 \times 10^{14} M_{\odot}$ на красном смещении $z = 0.6$ составляет около $2'$, то есть размер области локализации источника из каталога *PSZ2* может значительно превышать размеры скопления. Поэтому для измерения красного смещения скопления галактик необходимо сначала найти область расположения скопления галактик внутри области локализации источника Планка, а затем отобрать галактики скопления для их последующих наблюдений на оптических телескопах. Эта процедура называется оптическим отождествлением скоплений галактик из обзора Планка.

1.2.1 Используемые данные обзоров неба в оптическом и ближнем ИК-диапазоне

Для оптического отождествления скоплений галактик внутри области локализации источника Сюняева–Зельдовича мы использовали данные нескольких больших обзоров неба в оптическом и ближнем ИК-диапазоне: Слоановского обзора неба, *Pan-STARRS1*, *DESI LIS*, а также обзора *WISE*. Ниже приведено краткое описание обзоров и их применимость для решения задачи оптического отождествления.

Слоановский цифровой обзор неба (*SDSS*, *Sloan Digital Sky Survey*) — фотометрический и спектроскопический обзор неба, который проводился 2.5-м широкоугольным телескопом, установленным в обсерватории Апачи-Поинт,

¹область с плотностью выше критической плотности Вселенной в 500 и более раз

США [27;60]. В обзоре получены прямые изображения больших участков северного внегалактического неба в фильтрах *ugriz* Слоановской системы, а также получены спектры различных галактических и внегалактических объектов. На конец 2022 года опубликовано 17 выпусков данных, охватывающих северное внегалактическое небо площадью 14500 квадратных градусов. В обзоре были получены спектры и измерены красные смещения примерно 2.8 миллиона галактик и чуть менее миллиона квазаров². В настоящее время это крупнейший спектроскопический обзор северного неба.

Pan-STARRS1 (*Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System*) — фотометрический обзор неба, проводимый 1.8-м широкоугольным телескопом на Гавайских островах, США [61]. Обзор проводится в фильтрах *grizy*, покрывая все небо севернее $\delta > -30^\circ$ (3/4 от площади всего неба), глубина обзора составляет примерно 23^m в фильтрах *gri*. Первые данные обзора были опубликованы в 2016 году, на настоящее время опубликованы 2 выпуска обзора. Этот обзор покрывает все небо, доступное для наблюдений на оптических телескопах, наблюдательное время на которых предоставлено нашей группе. Глубина обзора позволяет детектировать только самые яркие галактики на красных смещениях $0.7 < z < 0.9$ [62]. На умеренных красных смещениях скоплений до $z < 0.7$ глубины обзора достаточно для обнаружения множества галактик скоплений [63–65].

DESI LIS (*Dark Energy Spectroscopic Instrument Legacy Imaging Surveys*) — совокупность трех фотометрических обзоров неба *BASS*, *DECaLS* и *MzLS* [66]. Обзор *BASS* (*Beijing-Arizona Sky Survey*) выполнялся в фильтрах *gr* 2.3-м телескопом Бок обсерватории Китт Пик, США. Обзор *MzLS* (*Mayall z-band Legacy Survey*) выполнялся в фильтре *z* 4-м телескопом им. Николаса Мэйолла обсерватории Китт Пик, США. Обзор *DECaLS* (*Dark Energy Camera Legacy Survey*) выполнялся в фильтрах *grz* 4-м телескопом имени Виктора Бланко обсерватории Серро-Тололо, Чили. Совокупность обзоров представляет собой 14000 квадратных градусов внегалактического неба ($|b| > 18^\circ$) на склонениях, приблизительно от -18° до $+84^\circ$. Глубина обзоров составляет, приблизительно $g = 24.7$, $r = 23.9$, $z = 23.0$ ³. В настоящее время, среди больших фотометрических обзоров неба в оптическом диапазоне, этот обзор имеет самую большую глубину. Отметим, что этот обзор не полностью покрывает все северное вне-

²<https://www.sdss.org/dr17/scope/>

³<https://www.legacysurvey.org/dr10/description/>

галактическое небо, к тому же в этом обзоре нет фотометрических данных в фильтре i . С начала работы обзора было выпущено 10 выпусков данных. Кроме того, фотометрические каталоги обзора содержат в себе ИК-данные обзора *WISE*.

WISE (*Wide-Field Infrared Survey Explorer*) — космическая обсерватория с 40-см широкоугольным телескопом на борту [67]. В 2010 году обсерватория завершила обзор всего неба в ИК-диапазоне в полосах 3.4 мкм, 4.6 мкм, 12 мкм, 22 мкм. Наиболее яркие и массивные галактики скоплений видны на изображениях *WISE* в полосе 3.4 мкм вплоть до красных смещений $z \approx 1-2$ [68]. Поэтому во всех работах по оптическому отождествлению скоплений галактик используются данные принудительной фотометрии обзора *WISE* для галактик, координаты которых взяты из обзора *Pan-STARRS1* [69].

1.2.2 Процедура отождествления скоплений галактик и отбор галактик для спектроскопических наблюдений

Одним из наиболее распространенных методов оптического отождествления галактик является поиск галактик красной последовательности на диаграмме цвет–величина. Наиболее яркие галактики скоплений, расположенные в их центральных областях, находятся на диаграмме цвет–абсолютная величина в области, называемой красной последовательностью [70; 71]. На диаграмме цвет–величина можно обнаружить красные последовательности галактик скоплений и по их показателю цвета можно оценить их красные смещения [25; 31; 32]. На рисунке 1.1 приведен пример красной последовательности галактик из работы [32]. На нем изображена диаграмма цвет–величина галактик около центра скопления галактик PSZ1 G101.52–29.96 из первого каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка (*PSZ1*) [15].

Скопления галактик хорошо видны на изображениях *WISE* в полосе 3.4 мкм. На рисунке 1.2 приведены изображения поля скопления галактик 05 00.7 – 00 52. На этом изображении приведен пример как выглядит массивное скопление галактик на изображениях *WISE* в полосе 3.4 мкм и на изображениях обзора *Pan-STARRS1*. Также показано изображение *WISE* поля скопления галактик, очищенное от звезд, положение которых определено по

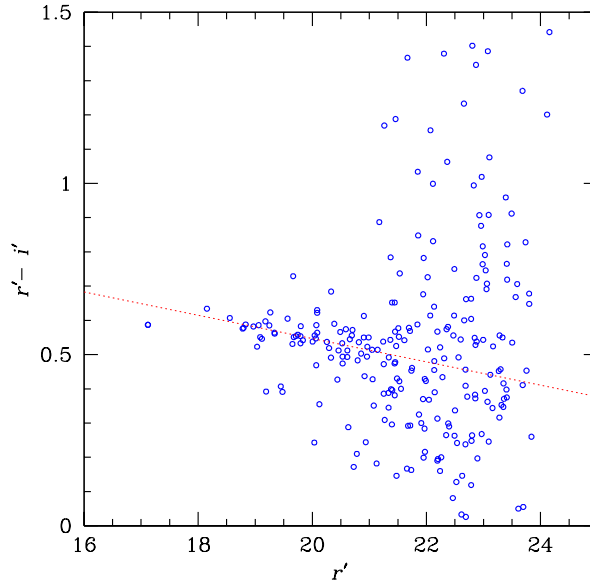


Рисунок 1.1 — Пример красной последовательности галактик. На рисунке изображена диаграмма цвет–величина галактик около центра скопления галактик PSZ1 G101.52 – 29.96 из каталога *PSZ1* [15] на красном смещении $z = 0.227$, взятая из работы [32]. Красной пунктирной линией обозначена наилучшая аппроксимация красной последовательности галактик.

данным Слоановского обзора [69], а также изображение, очищенное от звезд, и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Видно, что на изображении *WISE*, очищенного от звезд и свернутом с β -моделью, галактики скопления локализованы в области повышенной ИК-яркости. Если наиболее яркие галактики красной последовательности расположены в области повышенной ИК-яркости, то можно утверждать, что эти галактики входят в скопление галактик.

В случае, если для одной или нескольких наиболее ярких галактик красной последовательности есть измеренные спектроскопические красные смещения из Слоановского обзора, то красное смещение скопления галактик принималось равным среднему арифметическому значению спектроскопических красных смещений ярких галактик красной последовательности. Если в центральной области скопления присутствует *cD*-галактика, то красное смещение скопления принималось равным ее красному смещению. *cD*-галактика — это подкласс гигантских эллиптических галактик, которые можно обнаружить в центральных областях некоторых скоплений галактик. В скоплении галактик 05 00.7 – 00 52 присутствует *cD*-галактика WISEA J050043.03 – 005158.1, для которой в Слоановском обзора нет измеренного спектроскопического крас-

ного смещения. На рисунке 1.2 на псевдоцветном изображении *Pan-STARRS1* ее можно увидеть как яркую галактику красного цвета в центре изображения. Яркость cD -галактики на изображении значительно превышает яркость окружающих галактик красной последовательности, к тому же видно, что эта галактика находится в самом центре области повышенной ИК-яркости на изображениях *WISE*.

Так как cD -галактика является наиболее массивной галактикой и расположена в центральной области скопления, ее красное смещение с большой точностью совпадает с красным смещением скопления, поэтому красное смещение скопления принимается равным красному смещению ее cD -галактики. Если в спектроскопических обзорах отсутствуют измерения красных смещений наиболее ярких галактик красной последовательности скопления, включая измерения красного смещения cD -галактики при ее наличии, то проводились спектроскопические наблюдения наиболее ярких галактик красной последовательности для уточнения красного смещения скопления. Наблюдения проводились на длиннощелевых спектрографах, поэтому положение щели (центр щели и позиционный угол) подбиралось таким образом, чтобы как можно большее число ярчайших объектов красной последовательности попало на щель спектрографа. Как правило, для одного скопления подбиралось только одно положение щели. В случае, если наблюдаемая галактика тусклая и предполагается, что отношение сигнала к шуму на спектральных изображениях будет низким, щель нужно ориентировать таким образом, чтобы на нее попадал свет как минимум одной яркой звезды. Это необходимо для того, чтобы при обработке спектральных изображений точно совместить спектры изображений. Чаще всего это требуется для наблюдений далеких скоплений галактик.

Данный подход к отбору объектов для последующих спектроскопических наблюдений экономит значительное количество наблюдательного времени. Однако существует целый ряд случаев, когда на довольно малом поле можно выделить несколько красных последовательностей галактик, ниже будут подробно описаны подобные примеры. В этих случаях нельзя ограничиться спектроскопическими наблюдениями малого количества объектов, поэтому для спектроскопических наблюдений выбиралось несколько объектов каждой красной последовательности. Так как инфракрасная светимость скоплений галактик хорошо коррелирует с их массой [25; 72–74], то в случае нахождения нескольких

PSZ1 G083.81–50.74

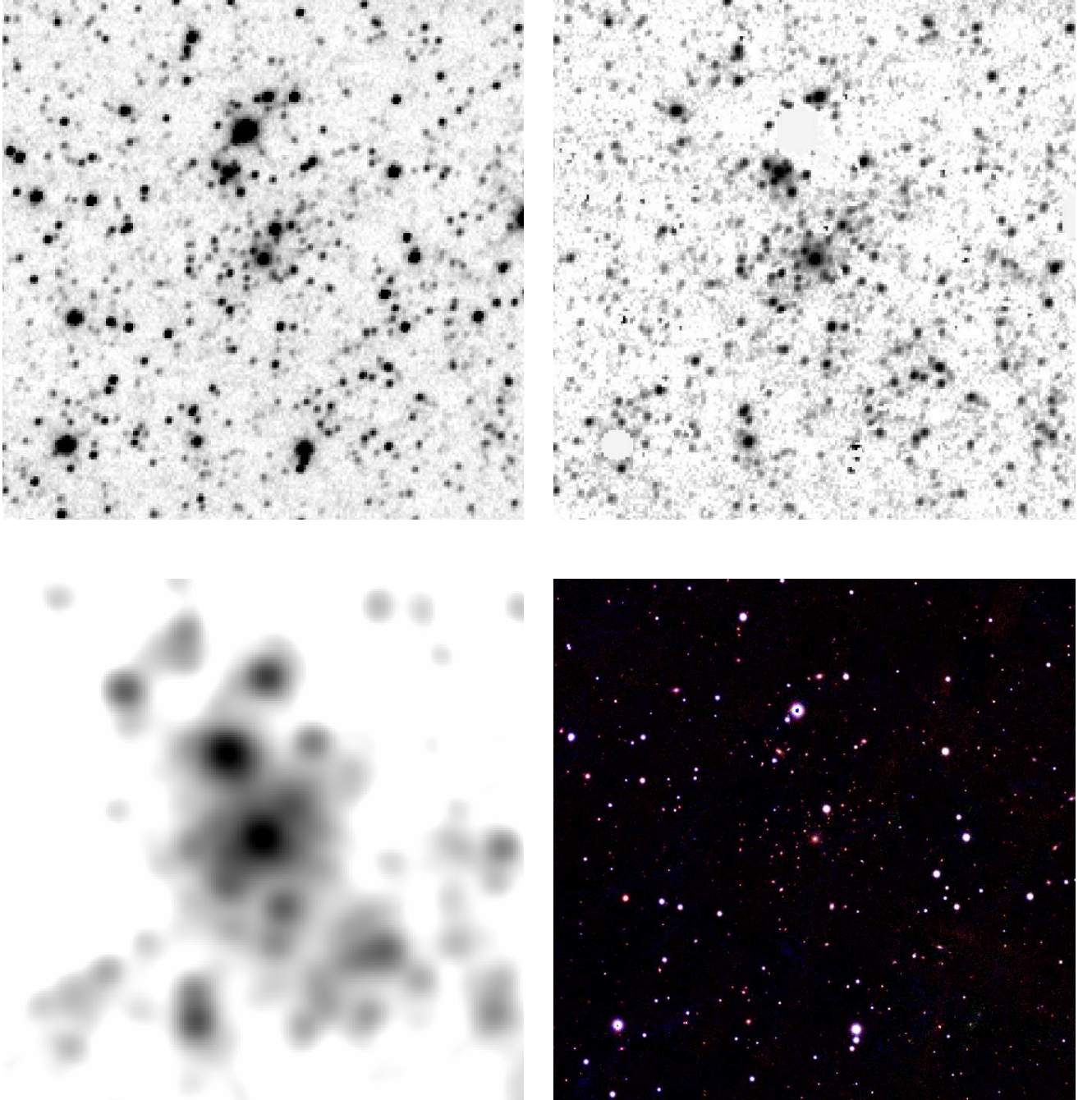


Рисунок 1.2 — Изображения поля скопления галактик 05 00.7–00 52 из расширенного каталога Планка [25]. Слева сверху: изображение из обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм. Справа сверху: то же изображение, очищенное от звезд. Слева снизу: то же изображение, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Справа снизу: псевдоцветное изображение обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Центр и размеры поля изображений совпадают с оптическим центром скопления. Размер изображений $10' \times 10'$.

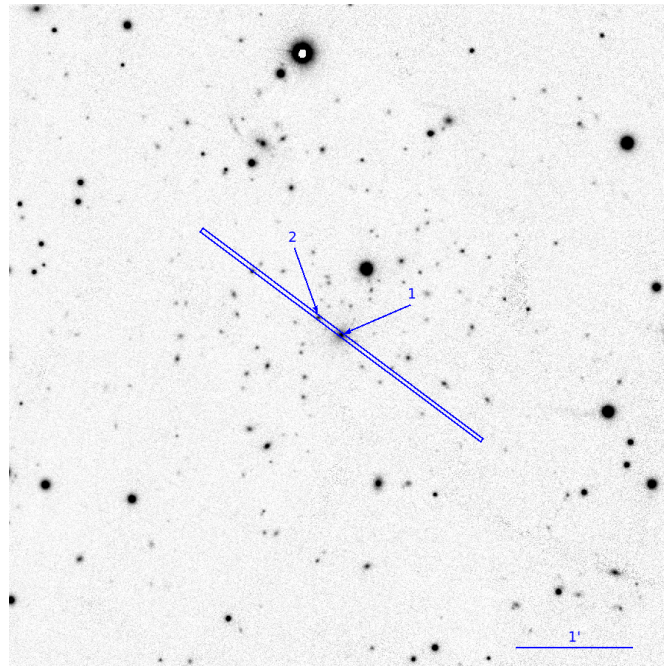


Рисунок 1.3 — Пример карты наведения для скопления 05 00.7 –00 52. На изображении стрелкой с номером 1 обозначена *cD*-галактика скопления, номером 2 обозначена другая яркая галактика красной последовательности центральной области скопления. Синим прямоугольником обозначено изображение положения щели спектрографа на небе, которое необходимо установить перед началом получения спектроскопических наблюдений. Ширина изображения щели $2''$, центр положения щели соответствует координатам *cD*-галактики. Размер изображения $5.6' \times 5.6'$.

скоплений галактик на разных красных смещениях в малом поле, выбиралось красное смещения скопления галактик с большей инфракрасной светимостью.

Для спектров эллиптических галактик характерно резкое понижение плотности потока в коротковолновой части спектра около фраунгоферовых линий *H, K CaII* (так называемый $4000\text{\AA}$ провал). Также на спектрах галактик можно отчетливо различить G линию и натриевый дублет, а так же небольшое падение потока около дублета линий *MgI*. Поэтому гризмы для наблюдений скоплений галактик подбирались таким образом, чтобы с учетом их фотометрического красного смещения, в диапазон призмы попал $4000\text{\AA}$ провал и часть спектра до дублета линий *MgI*. Экспозиции на всех телескопах выбирались равными не более 1200 с, количество экспозиций определялось исходя из того условия, чтобы отношение сигнала к шуму превышало значение, равное примерно 5.

1.2.3 Процедура обработки данных наблюдений

Обработка данных фотометрических и спектроскопических наблюдений проведена при помощи программного пакета *IRAF*, а также собственного математического обеспечения.

Обработка фотометрических данных. Во время обработки фотометрических данных к каждому изображению применялись поправки на смещение тока усилителя и на плоское поле. После чего у каждого изображения вычитался уровень фона, который аппроксимировался двумерным полиномом второго порядка, исключая поток источников. Изображения совмещались и складывались, при этом использовались алгоритмы, которые позволяют уменьшить систематические ошибки калибровок плоского поля. Фотометрические измерения выполнялись методом апертурной фотометрии, при этом фотометрические калибровки были получены по наблюдениям фотометрических стандартов, либо при помощи вторичных стандартов, взятых из данных Слоановского обзора или обзора *Pan-STARRS1*.

Обработка спектроскопических данных. Для обработки спектральных изображений использовалась стандартная процедура обработки. Для каждого изображения применялась процедура вычитания тока смещения усилителя. Вычитание темнового тока не производилось из-за его малой величины у всех используемых ПЗС матриц. После получения необходимого количества спектральных изображений выполнялась съемка калибровочных изображений ламп непрерывного и линейчатого спектра, необходимых для поправки спектральных изображений на плоское поле и двумерное дисперсионное решение. Для калибровки плотности потока спектральных изображений были получены спектры спектрофотометрических стандартов, взятых из списка стандартов Европейской южной обсерватории⁴.

Для некоторых далеких галактик, наблюдавшихся на телескопе БТА, и находящихся на красном смещении порядка $z \sim 0.9$, участок спектра с $4000 \text{ \AA}$ провалом попадает в область сильной полосы поглощения атмосферным кислородом ($7580 - 7700 \text{ \AA}$). Данное обстоятельство затрудняет использование этой

⁴<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>

спектральной детали в методах оценок красных смещений таких источников. В особенности это важно при оценках расстояний до скоплений галактик, когда исследуются спектры слабых галактик позднего класса без эмиссионных линий. Наблюдения спектрофотометрических стандартов ранних спектральных классов позволяет получить оценку поглощения атмосферного кислорода в области полосы 7580–7700 Å и восстановить спектры слабых источников.

Для этого стандарты наблюдались в близком к объектам участках неба на одинаковом зенитном расстоянии. Однако в силу различных причин стандарты и объекты могут наблюдаться на разных воздушных массах. В данном случае при условии, что наблюдения проводились в спектрофотометрических условиях, атмосферное поглощение в указанной кислородной полосе оценивается как:

$$P(\lambda) = \left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right)^{\sqrt{\frac{M_{obj}}{M_{std}}}},$$

где $I(\lambda)$ – регистрируемая интенсивность, $I_0(\lambda)$ – интенсивность без поглощения атмосферным кислородом, M_{obj} – воздушная масса наблюдаемого объекта, M_{std} – воздушная масса наблюдаемого стандарта. Квадратный корень учтен ввиду так называемого *закона квадратного корня* для существенно насыщенных теллурических линий, каковой является полоса поглощения кислорода.

В основном проводились наблюдения стандартов, которые являются звездами ранних спектральных классов и имеют гладкий профиль без деталей на данном участке спектра. Также в этом же месте изменение распределения рэлеевского рассеяния вместе с чувствительностью принимающей аппаратуры в первом приближении можно принять линейными. Тогда $I_0(\lambda)$ есть линейная подгонка непрерывного спектра на участках свободных от теллурических линий поглощения.

Мы выделяли два участка $7440 < \lambda < 7560$ Å и $7760 < \lambda < 7840$ Å для подгонки континуума в данной области спектра. На рис. 1.4 показаны примеры инструментального спектра спектрофотометрического стандарта BD+25d4655, линейной подгонки непрерывного спектра (синий пунктир) и области свободные от влияния теллурических линий, по которым проводилась подгонка.

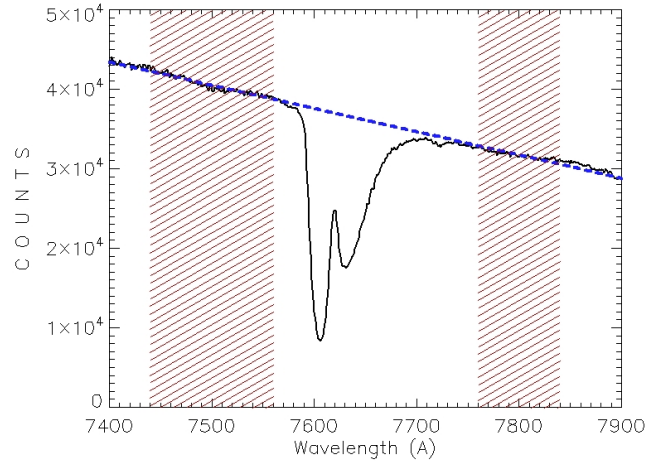


Рисунок 1.4 — Инструментальный спектр спектрофотометрического стандарта BD+25d4655 в области полосы поглощения молекулярного кислорода O_2 (7580–7700 Å).

1.2.4 Измерение красных смещений галактик

Измерения красных смещений галактик проводилось методом сравнения полученного спектра с шаблонным, взятым из работы [75]. Использовался шаблон синтетического спектра звездного населения возрастом 11 миллиардов лет и металличностью $Z = 0.02$ (см. рис. 1.5). Архив с шаблонами спектров взят с сайта авторов⁵. Использования различных шаблонов звездного населения разного возраста и металличности не проводилось, так как это слабо влияет на точность измерения красных смещений галактик. Красное смещение измерялось как значение минимума χ^2 – распределения (χ^2_{min}), полученного при сравнении спектра галактики с шаблонным спектром. Точность измерения красных смещений галактик измерялась как полуширина χ^2 – распределения на значении $\chi^2_{min} + 4$, ее значение для полученных нами спектров составляет приблизительно $\delta z \approx 0.001$ – 0.003 . Пример сравнения спектра ярчайшей галактики скопления PSZ2 G093.41–16.26 из каталога *PSZ2* с шаблонным, приведен на рисунке 1.6.

⁵http://www.bruzual.org/bc03/Original_version_2003/bc03.templates.tar.gz

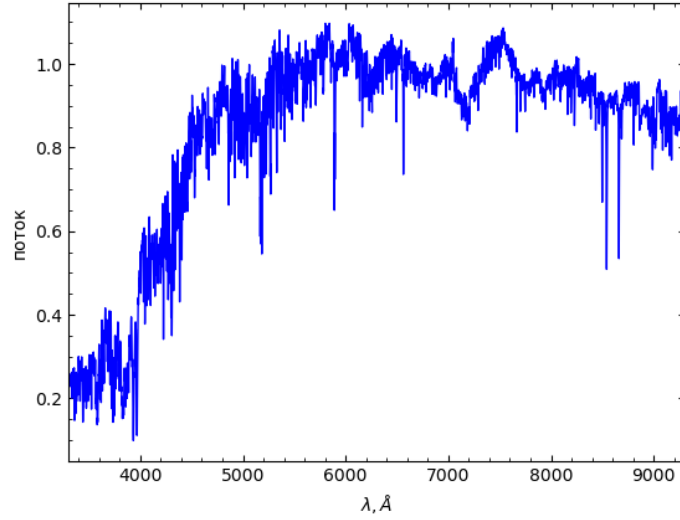


Рисунок 1.5 — Шаблон синтетического спектра звездного населения возрастом 11 миллиардов лет и металличностью $Z = 0.02$ из работы [75]. Потоки приведены в относительных единицах.

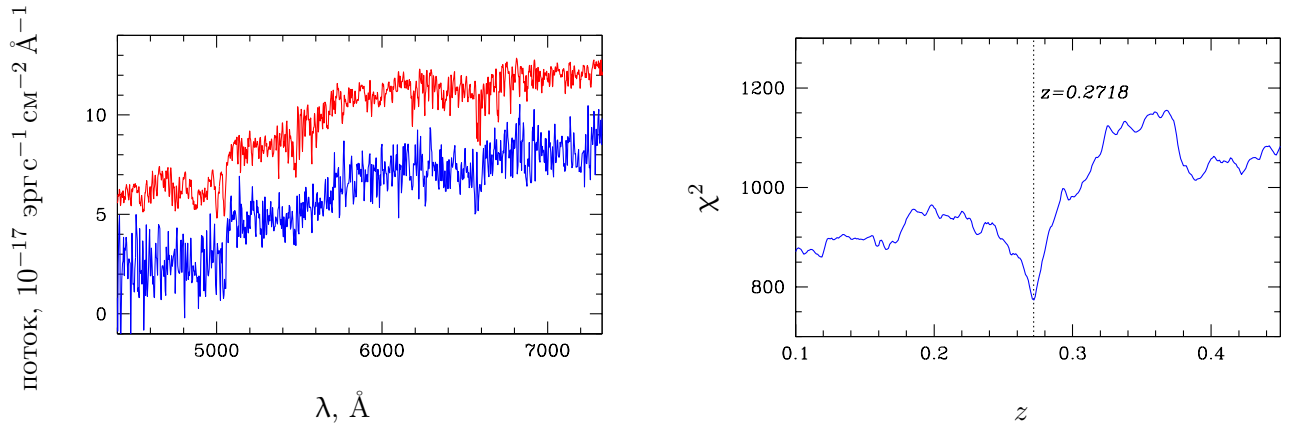


Рисунок 1.6 — Пример спектроскопического измерения красного смещения скопления галактик. Слева: синим цветом — спектр ярчайшей галактики скопления G093.41-16.26 из каталога *PSZ2*, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК при помощи спектрографа АДАМ, красным — спектр шаблона, смещенный на красное смещение $z = 0.2718$. Значения потока шаблона увеличено на постоянную величину. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

1.3 Проведение наблюдений скоплений галактик на оптических телескопах

Все наблюдения проводились на 6-м телескопе БТА (Большой Телескоп Азимутальный) Специальной астрофизической обсерватории РАН, п. Нижний Архыз, Россия, на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН, п. Монды, Россия и на 1.5-м Российско-Турецком телескопе обсерватории TÜBİTAK, Анталья, Турция. Спектры нескольких скоплений галактик из каталога *PSZ2* были получены на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто, Испания. С начала 2020 года наблюдения скоплений галактик проводятся на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерваторий ГАИШ МГУ (далее по тексту *RC2500*).

Для получения спектральных изображений использовались длиннощелевые спектрографы низкого разрешения с пропускающими дифракционными решетками в комбинации с призмами (гризмы). Эти типы спектрографов позволяют получить спектры низкого разрешения, в т. ч. слабых звездообразных объектов, что подходит для задачи измерения красных смещений. На телескопе БТА проводились наблюдения, преимущественно, наиболее далеких скоплений галактик с фотометрическими оценками красных смещений $z \gtrsim 0.6$, так как наиболее яркие галактики этих скоплений зачастую слабее 20 величины и их спектроскопические наблюдения требуют большой экспозиции на телескопах с апертурой 1.5 – 2.5 метра. Общее время экспозиции глубоких прямых изображений подбиралось так, чтобы достичь предельной величины не хуже, чем примерно 25^m в полосе r и 24^m в полосе i (на уровне 5σ). Для этого требовались экспозиции в каждом фильтре в пределах 1-2 ч на 1.5-м телескопе РТТ-150, 15-30 мин на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто и 5-10 мин на 6-м телескопе БТА. Между экспозициями в одном фильтре ось наведения телескопа сдвигалась на $10'' - 20''$ в случайном направлении.

Отбор объектов из обзора СРГ/*eROSITA* для последующих наблюдений проводился из списков, доступных наблюдателям в системе ТРИТОН (Таблица Рентгеновских Источников, для которых Требуются Оптические Наблюдения)⁶. Система представляет собой сайт, на котором размещены данные для оптических наблюдений рентгеновских источников, обнаруженных в обзоре СРГ.

⁶<https://www.srg.cosmos.ru/triton/welcome>

Основная задача системы — сбор, хранение и систематизация данных об оптических наблюдениях объектов СРГ и результатах их обработки. Система позволяет отслеживать наблюдателям проводимую или планируемую наблюдательную работу на различных телескопах в режиме реального времени. Это позволяет избежать повторных или одновременных наблюдений объектов, что очень важно при одновременных наблюдениях на нескольких телескопах.

1.3.1 6-м телескоп БТА

На телескопе БТА наблюдения проводились при помощи спектрографов *SCORPIO* [76] и *SCORPIO-2* [77] с использованием длинной щели. Подробное описание спектрографов *SCORPIO*⁷ и *SCORPIO-2*⁸ доступно на сайте лаборатории спектроскопии и фотометрии внегалактических объектов САО РАН. В таблицах 1 и 2 приведены характеристики гризм, которые устанавливались на спектрографы *SCORPIO* и *SCORPIO-2* для наблюдений скоплений галактик. Выбор этих гризм обусловлен их широким спектральным диапазоном, что позволяет уверенно подобрать необходимую для наблюдений гризму для каждого скопления галактик. Вся информация, приведенная в таблицах 1 и 2 взята с сайта лаборатории.

При наблюдениях на спектрографе *SCORPIO* использовались гризмы VPHG550R и VPHG550G. Для спектрографа *SCORPIO-2* использовалась преимущественно гризма VPHG940@600 спектрального диапазона 3500–8500 Å, реже VPHG1026@735 с диапазоном 5800–9500 Å, а для скоплений галактик с $z_{phot} > 1$ использовалась гризма VPHG1200@860 диапазона 7445–10900 Å. Ширина щели выбиралась равной 1'' или 2''. Щель шириной 2'' использовалась, если это позволяло получить спектры большего числа галактик красной последовательности при одном положении щели. Смещение объектов вдоль щели между экспозициями выполнялось при наблюдениях на спектрографе *SCORPIO*, чтобы избежать появления интерференционной картины на тонкой подложке матрицы, которая может возникать при наблюдениях в ИК-диапазоне. При получении спектров на спектрографе *SCORPIO-2* смещение

⁷<https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/scorpio.html>

⁸<https://relay.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/index.html>

Таблица 1 — Характеристики гризм *SCORPIO*, которые используются для получения спектров галактик.

Название	Штрихов/мм	Спек. диапазон, Å	Спек. разрешение, Å	Разрешение ¹ , Å/пикс.
VRHG550G	550	3500–7200	10	2.1
VRHG550R	550	6000–10000	10	2.1

¹ – разрешение показано для ПЗС приемника EEV42-40.

Таблица 2 — Характеристики гризм *SCORPIO-2*, которые используются для получения спектров галактик.

Название	Штрихов/мм	Спек. диапазон, Å	Разрешение ¹ , Å/пикс.	Спек. разрешение, Å ¹
VRHG940@600	940	3500–8500	1.16	7.0
VRHG1026@735	1026	5800–9500	1.02	6.1
VRHG1200@860	1200	7445–10900	0.85	5.1

¹ – для щели шириной 1".

выполнялось только при наблюдениях в ближнем ИК-диапазоне с использованием гризмы VRHG1200@860.

1.3.2 1.6-м телескоп АЗТ-3ЗИК

Телескоп АЗТ-3ЗИК Саянской солнечной обсерватории находится в пос. Монды, респ. Бурятия на широте 51.6° с. ш. и эксплуатируется Институтом солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск. Обсерватория расположена на высоте 2000 метров над уровнем моря в зоне влияния Сибирского антициклона, который создает область высокого атмосферного давления в зимнее время года. Высокое атмосферное давление в зимнее время благоприятно сказывается на общей длительности наблюдательного времени. Сезонные изменения количества ясных ночей приведены на рисунке 1.7, эти данные были взяты из работы [78]. По данным измерений качества изображений прибора *DIMM* [79] в 2013–2015 гг. в безоб-

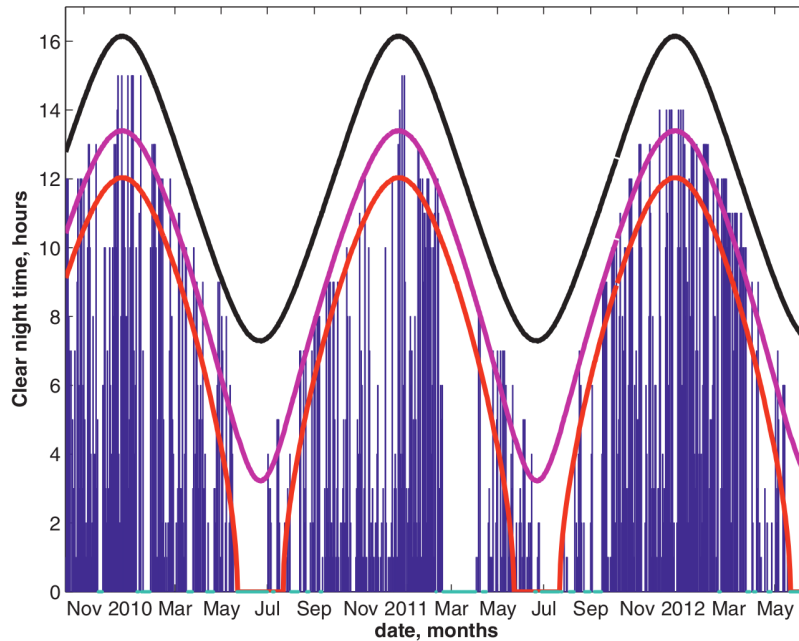


Рисунок 1.7 — Сезонные изменения количества часов чистого ночного неба в Саянской солнечной обсерватории [78].

лачное ночное время сотрудниками ИКИ РАН, ГАИШ МГУ и ИСЗФ, среднее качество ($FWHM$) равно $1.8''$ (см. рис. 1.8). Изображения прибора *DIMM* и телескопа, на который он был установлен, приведены на рисунке 1.9.

Характеристики телескопа АЗТ-ЗЗИК, взятые из работы [80]:

1. Оптическая схема – Ричи-Кретьен
2. Диаметр главного зеркала – 1600 мм
3. Диаметр вторичного зеркала – 210.5 мм
4. Фокусное расстояние – 30 м
5. Эквивалентное фокусное расстояние – 6876 мм
6. Поле зрения – $12'$
7. Линейное поле зрения – 105 мм

Спектроскопические наблюдения на АЗТ-ЗЗИК. На телескопе АЗТ-ЗЗИК для получения спектров используется спектрограф АДАМ [81; 82]. Спектрограф предназначен для спектроскопии слабых звездобразных объектов вплоть до 21^m в диапазоне $3600\text{--}10000\text{\AA}$ с разрешением до $R \sim 1300$. В спектрографе используется ПЗС-приемник *E2V CCD30-11* производства фирмы *Andor*, Северная Ирландия, подробно характеристики приемника описаны

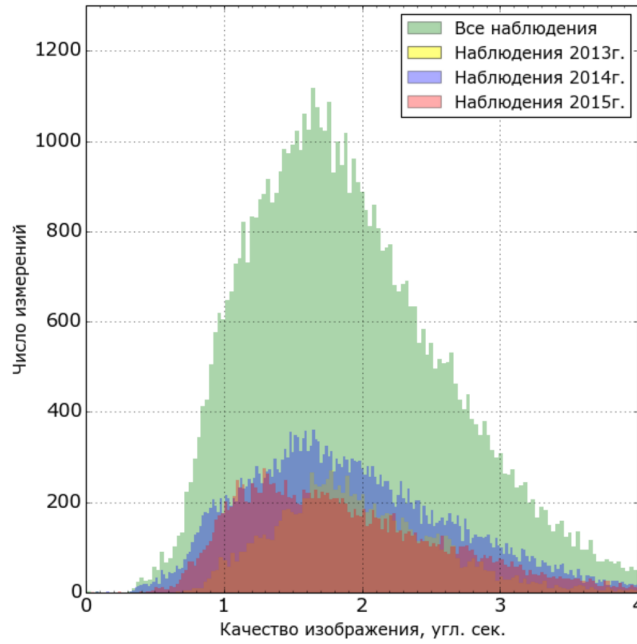


Рисунок 1.8 — Качество изображений, полученных прибором *DIMM* [79] и количество измерений. Измерения проводились сотрудниками ИКИ РАН в 2013–2015 годах.

в таблице 3. Характеристики гризм, приведенные в работе [82] и в руководстве по эксплуатации, показаны в таблице 4. В 2018 году решетка VPHG300 была заменена на решетку VPHG400 большего спектрального разрешения. В турели светофильтров установлены фильтры *griz* Слоановской системы, а также фильтр *OS11*, позволяющий убрать влияние второго порядка интерференции гризмы VPHG600R. Наблюдения проводились с использованием длинных щелей шириной 2'' и 3'' с позиционным углом щели равным 0°. Удержание объектов на щели спектрографа выполнялось с использованием изображений, получаемых КМОП камерой *Andor Neo 5.5*, получающей изображения в поле зрения телескопа вне рабочего поля спектрографа при помощи диагонального зеркала [82].

Список установленного оборудования в турели спектрографа:

1. Турель щелей: 1'', 1.5'', 2'', 3'', 10''
2. Турель светофильтров: g' , r' , i' , z' , *OS11*
3. Турель гризм: VPHG400, VPHG600G, VPHG600R

Гризмы подбирались для каждого объекта отдельно в зависимости от его фотометрического красного смещения. Гризма VPHG600G с разрешени-

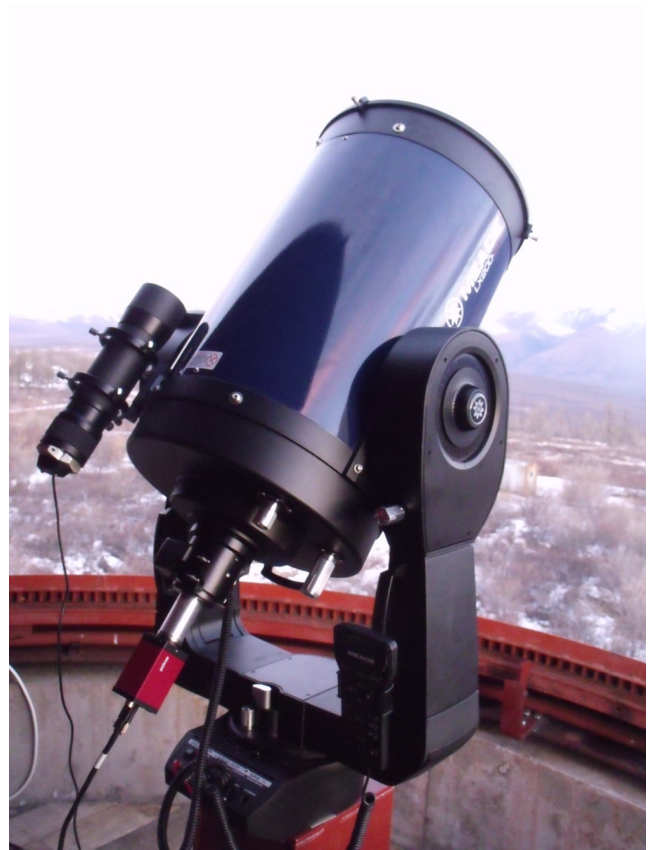


Рисунок 1.9 — Изображения прибора *DIMM* и телескопа, на который он был установлен в Саянской солнечной обсерватории. Левое верхнее — телескоп, на который устанавливался прибор *DIMM*. Левое нижнее — прибор *DIMM*. Правое верхнее — установленный в куполе телескоп с подключенным прибором *DIMM*. Правое нижнее — вид купола снаружи с установленным телескопом.

Таблица 3 — Характеристики ПЗС матрицы *EEV-42-40*.

Тип	Thin, back-illuminated
Размер изображения	1024×256
Размер пикселя	25×26 мкм
Масштаб пикселя	$0.81''/\text{пиксель}$
Поле зрения	$3.46' \times 3.46'$
Макс. кван. эфф.	95%
Gain	2.6 (high), 5.2 (normal), 11 (low) e^-/ADU
Минимальный шум считывания	$3.5 e^-$ ($T=-100^\circ\text{C}$)
Темновой ток	$< 0.3e^-/\text{пиксель}/\text{мин}$
Минимальная температура эксплуатации	-100°C

Таблица 4 — Характеристики используемых гризм в спектрографе АДМ.

Название	штрих/мм	Диапазон $\text{\AA}$	Разрешение $\text{\AA}/\text{pix}$	Спектр. разрешение $\text{\AA}$, щель $1''$
VRHG300 ¹	400	3900–10500	10.6	273–678
VRHG600G	600	3700–7340	4.3	561–980
VRHG600R	600	6520–10100	6.1	1005–1319

¹ — в 2018 году была заменена на решетку VRHG400.

ем 600–900 в диапазоне 3600–7250 $\text{\AA}$, использовалась для получения спектров скоплений галактик с фотометрической оценкой красного смещения $z_{\text{phot}} < 0.55$. Для далеких скоплений галактик с $z_{\text{phot}} > 0.65$ использовалась гризма VRHG600R с немного более высоким разрешением в диапазоне от 6430–10000 $\text{\AA}$. Для скоплений галактик с красными смещениями $0.55 < z_{\text{phot}} < 0.65$ использовалась гризма VRHG400 широкого спектрального диапазона, с меньшим разрешением, чем у VRHG600G и VRHG600R. Гризмы VRHG600G и VRHG600R содержат 600 штрихов на миллиметр, VRHG400 соответственно 400 штрихов на миллиметр. При наблюдениях в решетке VRHG600R положение объекта смещалось между экспозициями вдоль щели для минимизации вклада в спектр интерференции на подложке матрицы.

Фотометрические наблюдения на АЗТ-ЗЗИК. Прямые изображения на телескопе АЗТ-ЗЗИК были получены на камере *Andor iKon-M 934* с детектором *BD_DD* в фильтрах Слоановской системы *griz*. Ниже указаны характеристики

камеры, взятые с сайта производителя⁹, и расчетные значения масштаба изображения. Ввиду отсутствия гидирования при наблюдениях на камере время экспозиции не превышает 120 с.

1. Размер изображения – 1024×1024 пикселей
2. Масштаб изображения – $0.372''/\text{пиксель}$
3. Поле зрения $6.3' \times 6.3'$
4. Размер матрицы – 13.3×13.3 мм
5. Размер пикселя – 13×13 мкм
6. Частота считывания – 0.05 МГц, 1 МГц, 3 МГц, 5 МГц
7. Шум считывания – $2.9 e^-$ при 0.05 МГц
8. Температура охлаждения матрицы – -100°C

1.3.3 1.5-м российско-турецкий телескоп РТТ-150

Российско-турецкий телескоп (РТТ-150) — оптический телескоп системы Ричи-Кретьена с монолитным главным зеркалом диаметром 1.5-м. Телескоп расположен в национальной обсерватории TÜBİTAK на широте 36.8° на горе Бакырлытеп на высоте около 2500 метров в 50 километрах от г. Анталя, Турция. Телескоп эксплуатируется TÜBİTAK (Турция), КФУ и ИКИ РАН (Россия). Главное зеркало телескопа изготовлено из ситалла, с центральным отверстием диаметром 580 мм.

Характеристики телескопа, приведенные для установленного вторичного зеркала со светосилой $F/8$ [83]:

1. Эквивалентное фокусное расстояние – 11611 мм
2. Относительное отверстие – $F/7.7$
3. Линейное поле зрения – 90 мм
4. Угловое поле зрения – $26'40''$

Для получения прямых и спектроскопических изображений использовался спектрограф *TFOSC* (*TUBITAK Faint Objects Spectrometer and Camera*), изготовленный в Дании в Астрономической обсерватории Копенгагенского университета по заказу Национальной обсерватории TÜBİTAK, Турция. На спектрографе установлен набор фильтров систем *BESSEL* (*UBVRcIc*) и *SDSS*

⁹<https://andor.oxinst.com/products/ikon-xl-and-ikon-large-ccd-series/ikon-m-934>

(*u'g'r'i'z'*). В настоящее время (2024 г.) в качестве приемника излучения спектрографа установлена камера *Andor iKon-L DZ936*¹⁰ с детектором *BR-DD*, изготовленным по технологии глубокого обеднения с подавлением интерференционной картины на подложке матрицы в ИК-диапазоне. В качестве диспергирующих элементов в спектрографе используются пропускающие и отражающие дифракционные решетки. Характеристики дифракционных решеток, используемых на *TFOSC* приведены в таблице 5. Информация взята с сайта отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН¹¹. Спектрограф имеет фотогид, работающий в поле зрения телескопа вне рабочего поля спектрографа, и позволяющий удерживать объекты на щели спектрографа во время получения спектроскопических изображений.

Спектрограф имеет следующие характеристики:

1. Поле зрения – $13' \times 13'$
2. Масштаб изображения – $0.4''$ на пиксель
3. Разрешение пропускающих дифракционных решеток – $5\text{--}15\text{\AA}$
4. Разрешение эшелювых спектров $2\text{--}3\text{\AA}$
5. Предельная величина получения спектров низкого разрешения – 21^m

Камера спектрографа имеет следующие характеристики:

1. Размер изображения – 2048×2048 пикселей
2. Размер матрицы – 27.6×27.6 мм
3. Размер пикселя – 13.5×13.5 мкм
4. Частота считывания – 0.05 МГц, 1 МГц, 3 МГц, 5 МГц
5. Шум считывания – 2.9 e^- при 0.05 МГц
6. Температура охлаждения матрицы – -100°C (воздушное охлаждение до -80°C)

Для наблюдений скоплений галактик использовалась гризма №15 с широким спектральным диапазоном $3230\text{--}9120\text{\AA}$. Этого диапазона достаточно для измерения красных смещений галактик, спектры которых мы можем получить на телескопе РТТ-150. Наблюдения проводились с фиксированным позиционным углом длинной щели 90° шириной $1.8''$.

¹⁰<https://andor.oxinst.com/products/ikon-xl-and-ikon-large-ccd-series/ikon-l-936>

¹¹<http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/en/index.php?page=tfosc>

Таблица 5 — Характеристики дифракционных решеток, установленных в спектрографе *TFOSC*.

Номер решетки	$\lambda/\delta\lambda$	$\delta\lambda$, Å	Диапазон, Å	Примечания
7	1300	4.1	3900–6800	
8	2300	3.0	5850–8270	
9	5300	1.2	3350–9400	эшельная
10	280	17	3300–6400	кросс-дисперсионная
11	450	13	4000–7600	кросс-дисперсионная
12	210	37	5300–10200	кросс-дисперсионная
14	900	5.4	3270–6120	
15	500	12.0	3230–9120	
17	800	12.0	6500–12000	

1.3.4 2.5-м телескоп *RC2500*

Спектроскопические наблюдения на *RC2500*. Наблюдения на телескопе *RC2500* проводились с помощью двухлучевого спектрографа *TDS* (*Transient Double-beam Spectrograph*¹² [84]). Спектральный диапазон голубого канала 3600–5770Å, спектральное разрешение 1.21Å, разрешающая сила 1300. Спектральный диапазон красного канала 5673–7460Å, спектральное разрешение 0.87Å, разрешающая сила 2500. В спектрографе установлена ПЗС матрица *E2V 42-10*. Более подробное описание процедур наблюдений и обработки спектральных изображений приведены в работе [85].

Фотометрические наблюдения на *RC2500*. Прямые изображения на телескопе *RC2500* были получены при помощи ИК-камеры *AstroNIRCam* [86;87]. Камера оборудована *HgCdTe* детектором *HAWAII-2RG* размером 2048 × 2048 пикселей, а также ИК-фильтрами *J* (1249нм), *H* (1635 нм) и *K* (2143 нм) системы *2MASS*. На этой камере были получены глубокие прямые изображения нескольких наиболее удаленных скоплений галактик $z_{spec} \gtrsim 1$ из обзора всего неба СРГ/*eROSITA*.

¹²<http://lnfm1.sai.msu.ru/kgo/instruments/tds>

1.4 Измерение красных смещений скоплений галактик из каталога *PSZ2*

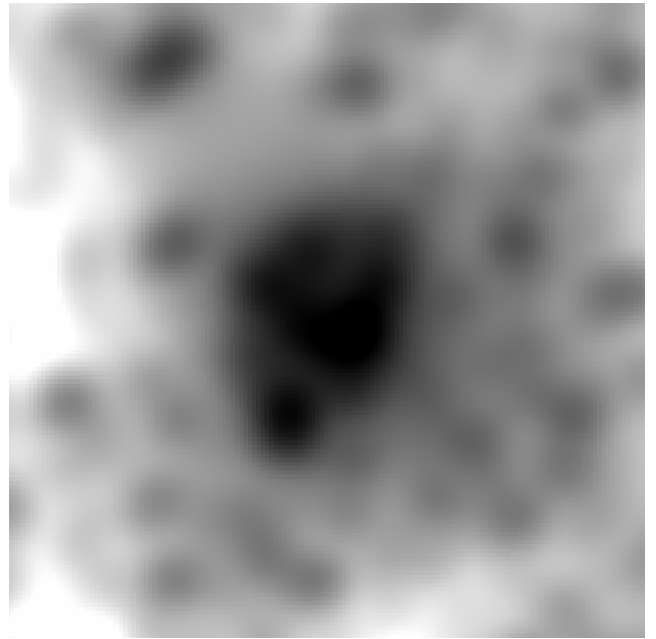
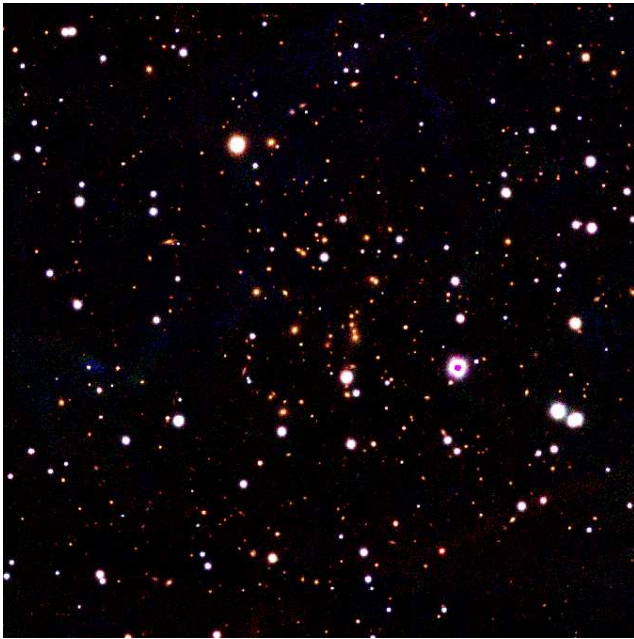
В этом разделе представлены результаты оптического отождествления и измерения красных смещений 38 скоплений галактик из каталога *PSZ2* на умеренных красных смещениях $z < 0.7$, которые мы отождествили стандартным способом поиска галактик красной последовательности, описанным в разделе 1.2.2, используя доступные нам данные обзоров неба в оптическом и ближнем ИК-диапазоне.

1.4.1 Отбор скоплений галактик

Примеры отождествления скоплений галактик из каталога *PSZ2* приведены на рисунке 1.10. На рис. 1.11 приведены примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений для спектрографа *SCORPIO-2* телескопа БТА и на рис. 1.12 показаны примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений для спектрографа АДАМ телескопа АЗТ-33ИК. Слева показан измеренный спектр ярчайшей галактики скопления с указанием положения отождествленных линий фраунгоферовской серии и линий водорода и гелия, справа — значение χ^2 , которое получено в результате сравнения данного спектра с шаблоном синтетического спектра звездного населения возрастом 11 млрд. лет, металличностью $Z = 0.02$, взятого из работы [75].

Пример *sD*-галактики приведен на рис. 1.10 для скопления PSZ2 G179.45–43.92. На рисунке слева приведено псевдоцветное *RGB* изображение *Pan-STARRS1*. В центре изображения находится яркая галактика, цвет которой совпадает с цветом окружающих ее галактик, находящихся в области повышенной ИК-яркости на сглаженном β -моделью радиусом $24''$ изображении *WISE* в полосе 3.4 мкм справа. Положение галактики на сглаженном инфракрасном изображении *WISE* совпадает с центром яркости, поэтому для спектроскопических наблюдений скопления PSZ2 G179.45–43.92 выбрали только *sD*-галактику.

PSZ2 G131.15–14.72



PSZ2 G179.45–43.92

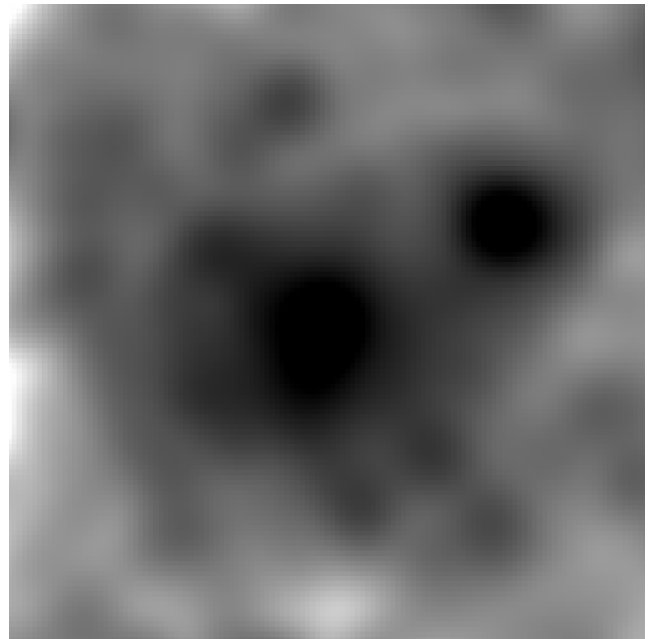
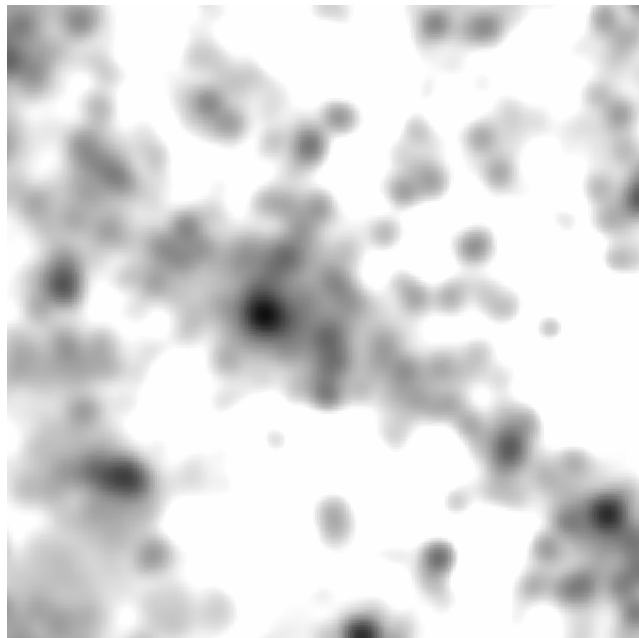


Рисунок 1.10 — Слева: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Справа: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений.

PSZ2 G147.17+42.67



PSZ2 G098.44+56.59

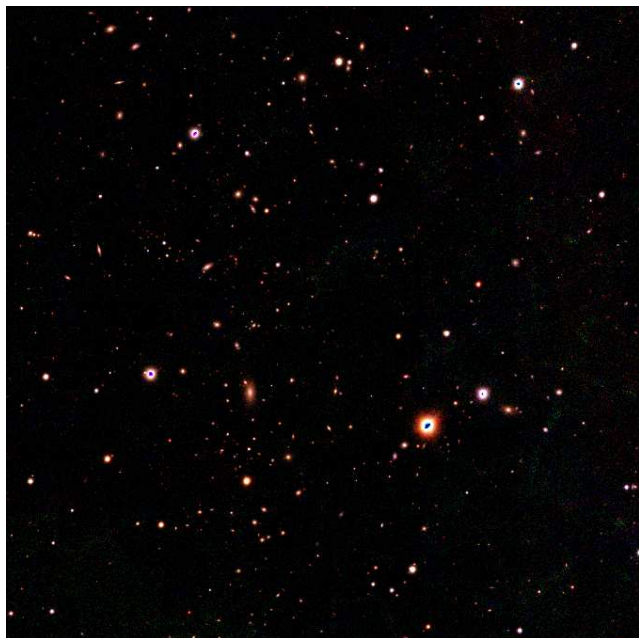


Рисунок 1.10 — Продолжение.

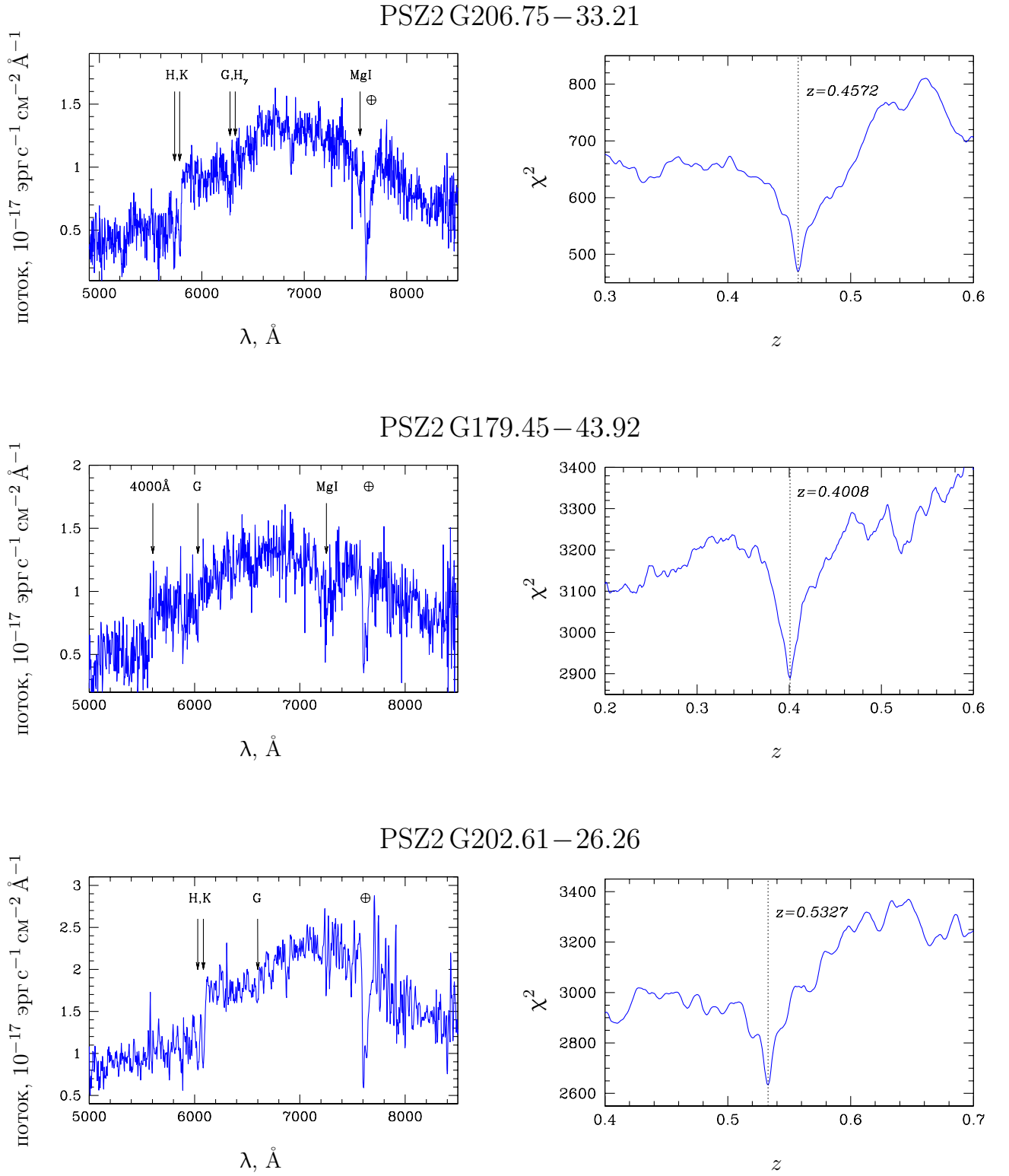


Рисунок 1.11 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из каталога *PSZ2*. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа *SCORPIO-2*. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

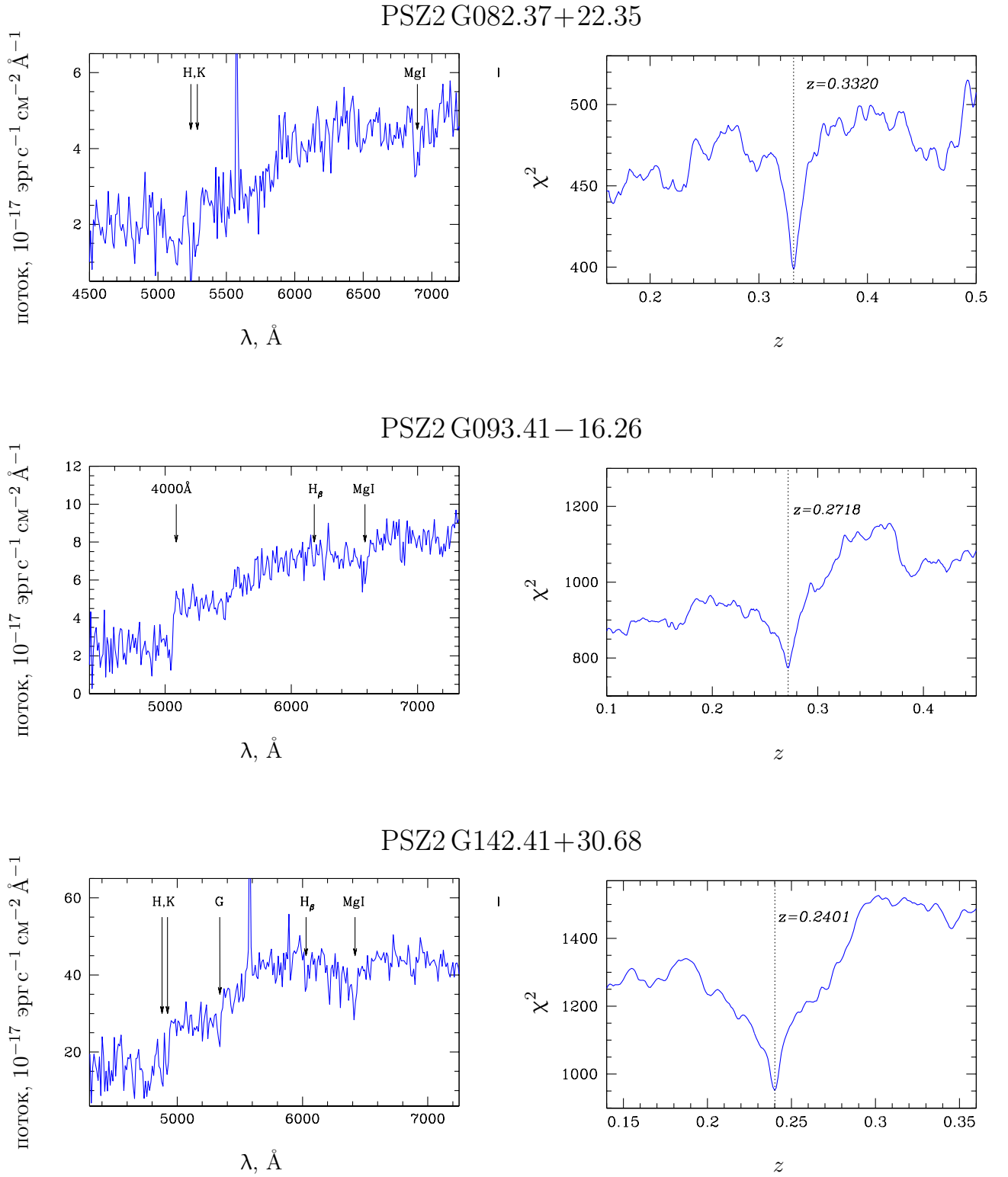


Рисунок 1.12 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из каталога *PSZ2*. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

1.4.2 Результаты наблюдений

В таблице 6 ниже приведены результаты спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик, расположенных, большей частью, на северном внегалактическом небе на склонении $\delta > -20^\circ$. В первом столбце приведены названия скоплений галактик согласно каталогу *PSZ2*. Во втором и третьем столбце приведены координаты (α, δ) оптического центра скоплений в экваториальной системе координат на эпоху J2000.0. В четвертом столбце приведены значения спектроскопических красных смещений, полученных по измерениям одной или нескольких галактик. В пятом столбце приведено количество галактик скоплений. В шестом столбце приведены замечания отдельно для каждого объекта, ниже после таблицы даны пояснения замечаний.

В таблице приведены результаты спектроскопических измерений красных смещений 38 скоплений галактик из каталога *PSZ2*, для которых ранее это значение было неизвестно. Измерения красных смещений нескольких скоплений галактик уже были опубликованы в работах [88–90], но наблюдения этих объектов выполнялись в одно время с нашей группой, и некоторые измерения являются фотометрическими оценками красных смещений.

1.4.3 Замечания по отдельным объектам

PSZ2 G069.47 – 29.06. В поле этого источника Сюняева–Зельдовича найдены две красные последовательности на диаграмме цвет–величина по данным *Pan-STARRS1*. Для двух самых ярких галактик красной последовательности с меньшим значением фотометрической оценки красного смещения, проводились спектроскопические наблюдения на телескопе АЗТ-33ИК, они указаны стрелочками под номером 2 и 3 на рис. 1.13. Результаты спектроскопических измерений красных смещений этих галактик согласуются, их красное смещение равно $z = 0.190$. Галактика под номером 1 является ярчайшей галактикой красной последовательности, расположенной на большем красном смещении. Значение красного смещения этой галактики $z = 0.392$, что фактически означает, что эта галактика является CD-галактикой вдвое более далекого скопления.

Таблица 6 — Результаты измерений спектроскопических красных смещений скоплений галактик из каталога *PSZ2*.

Название	Координаты (J2000)		z	N_{gal}	Замечания
	α	δ			
PSZ2 G009.04+31.09	16 18 25.4	−04 11 46.6	0.242	3	[90] z_{phot}
PSZ2 G033.83−46.57	21 45 12.3	−18 42 58.8	0.441	1	[88]
PSZ2 G045.20+15.63	18 16 04.6	+17 46 58.6	0.133	1	
PSZ2 G045.47+17.80	18 08 14.7	+18 51 53.2	0.376	1	
PSZ2 G056.38+23.36	18 01 16.5	+30 23 20.4	0.298	1	
PSZ2 G066.85+22.48	18 20 13.0	+39 17 34.3	0.249	2	
PSZ2 G067.21−20.49	21 13 22.7	+17 59 38.3	0.366	2	[90] z_{phot} , [25]
PSZ2 G069.35−15.58	21 02 38.0	+22 42 27.0	0.096	1	[90]
PSZ2 G069.47−29.06	21 46 02.1	+14 01 25.8	0.392	1	*, [90] z_{phot}
PSZ2 G079.36+38.06	16 59 18.6	+52 04 48.3	0.301	4	
PSZ2 G082.37+22.35	18 44 26.6	+53 00 48.3	0.332	1	
PSZ2 G086.35−13.94	21 49 42.5	+35 43 07.9	0.279	2	
PSZ2 G090.12−13.87	22 03 36.2	+38 04 46.2	0.073	1	
PSZ2 G093.41−16.26	22 24 00.1	+38 00 55.7	0.268	2	[90] z_{phot}
PSZ2 G094.31−11.31	22 12 59.2	+42 35 03.0	0.204	1	[90] z_{phot}
PSZ2 G098.44+56.59	14 27 25.0	+55 44 59.9	0.131	1	<i>SDSS</i>
PSZ2 G100.22+33.81	17 13 42.0	+69 21 33.4	0.599	5	[90] z_{phot}
PSZ2 G105.00+39.68	15 52 52.9	+70 31 38.7	0.199	2	
PSZ2 G106.11+24.11	19 21 31.8	+74 33 26.2	0.101	1	fg , [89], z_{phot}
PSZ2 G106.21+26.32	18 48 31.2	+75 03 30.3	0.114	1	fg
PSZ2 G118.49+48.17	13 23 55.0	+68 39 30.9	0.355	1	
PSZ2 G118.56−13.14	00 25 13.4	+49 30 35.4	0.278	1	
PSZ2 G120.30+44.47	13 16 38.1	+72 32 17.6	0.261	1	
PSZ2 G125.84−18.72	01 06 56.0	+44 03 38.9	0.188	5	*, рассеянное, [90] z_{phot}
PSZ2 G126.36−19.11	01 09 26.7	+43 37 05.6	0.200	1	C18 z_{phot}
PSZ2 G126.72−21.03	01 10 24.9	+41 41 18.0	0.198	1	*, fg , [90] z_{phot} , [25]
PSZ2 G131.15−14.72	01 38 44.4	+47 22 38.5	0.223	1	[90] z_{phot}
PSZ2 G142.41+30.68	07 56 35.8	+72 35 31.2	0.240	1	
PSZ2 G147.17+42.67	09 50 00.6	+64 55 27.4	0.440	1	<i>SDSS</i>
PSZ2 G159.40−40.67	02 42 23.0	+14 15 15.0	0.254	1	
PSZ2 G171.22−26.03	03 52 47.1	+19 21 50.6	0.358	2	
PSZ2 G179.45−43.92	03 19 18.4	+02 05 35.2	0.401	1	[25] z_{phot}

Таблица 6 — Продолжение.

Название	Координаты (J2000)		z	N_{gal}	Замечания
	α	δ			
PSZ2 G188.33–34.98	04 04 18.0	+02 23 55.5	0.273	1	
PSZ2 G202.61–26.26	04 59 51.9	–03 24 41.6	0.533	3	
PSZ2 G206.75–33.21	04 41 39.2	–09 46 31.6	0.457	1	
PSZ2 G210.57–44.61	04 03 33.5	–17 06 48.5	0.142	1	
PSZ2 G323.96+43.81	13 54 04.6	–16 30 07.9	0.363	1	
PSZ2 G325.19+49.12	13 49 57.7	–11 13 39.8	0.205	2	

Замечания:

SDSS — красное смещение подтверждается спектроскопическими данными Слоановского обзора

fg — ископаемая группа;

z_{phot} — фотометрическая оценка красного смещения

* — имеется обсуждение в тексте;

Подробно поле источника показано на рисунке 1.14, где на изображении *WISE* отмечено их взаимное расположение.

На основе имеющихся данных потоков в инфракрасном диапазоне трудно оценить, какое скопление является более массивным. Однако, по данным координат (α, δ) центров скоплений, более далекое скопление галактик расположено ближе к центру источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47–29.06. Поэтому в этом случае принято решение отождествить источник со скоплением на красном смещении $z = 0.392$.

PSZ2 G125.84–18.72. На рис. 1.16 справа показано инфракрасное изображение *WISE* поля источника Сюняева–Зельдовича. На инфракрасном изображении множество ярких источников. Очевидно, что нельзя однозначно утверждать в какой именно области поля источника локализовано скопление галактик. В этом случае данные фотометрии в фильтрах *gr* обзора *Pan-STARRS1* были взяты для множества областей, в которых наблюдалась повышенная инфракрасная яркость. Среди всех объектов данной области на диаграмме цвет–величина была выделена красная последовательность. Было отобрано несколько наиболее ярких галактик красной последовательности, которые находятся в центральных областях повышенной ИК-яркости.

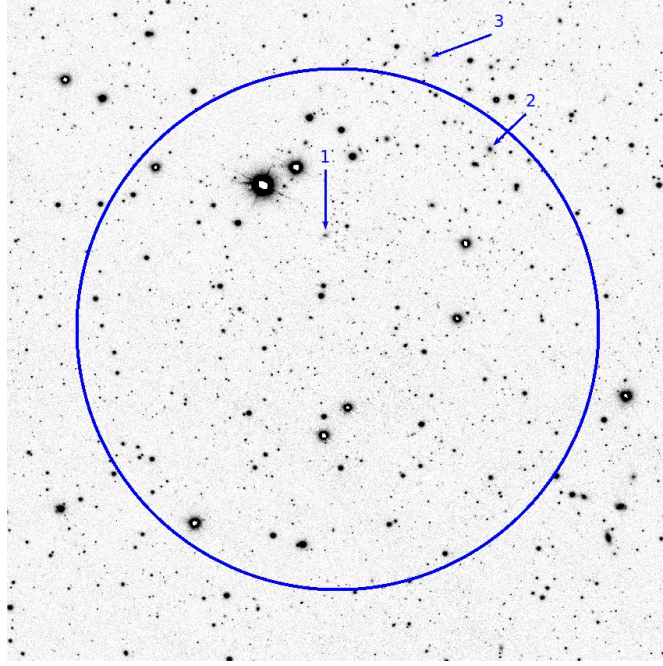


Рисунок 1.13 — Изображение поля источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47 – 29.06 в фильтре i , взятое из обзора *Pan-STARRS1*. Центр синей окружности совпадает с центром источника Сюняева–Зельдовича, радиус окружности $6'$. Пронумерованными стрелочками отмечены объекты, для которых проводились спектроскопические наблюдения на телескопе АЗТ-ЗЗИК.

На рис. 1.15 пронумерованными стрелочками обозначены отобранные для наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК галактики. Для галактик под номерами 1,2,3,5,6,7 были получены спектроскопические изображения. Данные спектроскопических измерений красных смещений этих галактик не являются достоверными для галактики под номером 3, для остальных галактик данные измерений достоверные и согласуются между собой. Среднее значение красного смещения скопления галактик PSZ2 G125.84 – 18.72 по данным измерений красных смещений пяти ярчайших галактик красной последовательности равно $z = 0.1883$. Точное положение центра скопления галактик, или нескольких близко расположенных скоплений галактик, может быть определено по данным наблюдений в рентгеновском диапазоне.

PSZ2 G126.72 – 21.03. Этот объект является примером остатка группы (англ. *fossil group*) [91; 92]. Для таких скоплений галактик характерно наличие яркой *cD*-галактики и отсутствие галактик, близких к ней по яркости.

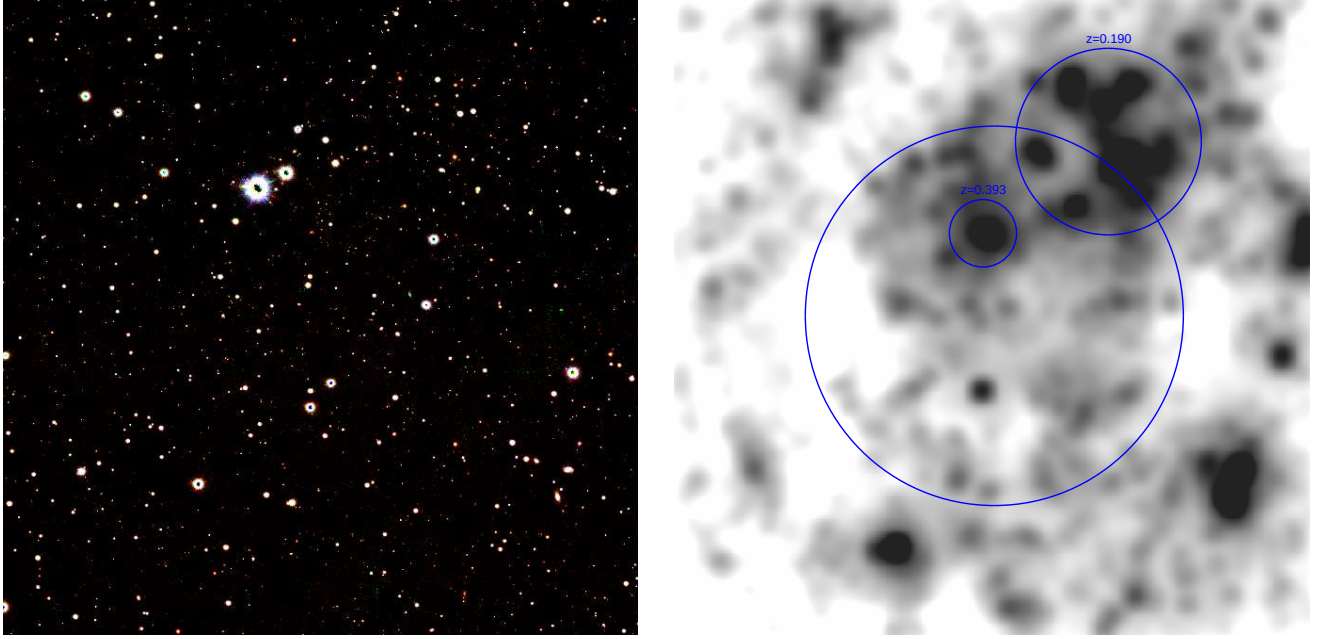


Рисунок 1.14 — Изображения поля источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47 – 29.06. Слева: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Справа: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Центры изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа $5'$. На изображении справа видно, что скопление на красном смещении $z = 0.392$ находится значительно ближе к центру источника.

Красная последовательность для таких скоплений слабо выражена. Яркость *cD*-галактики значительно превышает яркость других галактик красной последовательности. Красная последовательность галактик этого остатка группы приведена на рис. 1.17. Остатки группы образуются в результате большого количества слияний галактик в центральных областях скопления. На рис. 1.18 справа показано инфракрасное изображение *WISE* поля источника Сюняева–Зельдовича. Центр окружности совпадает с центром источника Сюняева–Зельдовича, его радиус $5'$, в центре окружности находится яркий ИК-источник, который отождествлен со скоплением галактик. В поле найден только один более яркий ИК-источник, отождествленный с близкой галактикой, и находящейся на значительном удалении от центра источника Сюняева–Зельдовича. На изображении слева показано псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Видно, что другие более тусклые источники поля в инфракрасном диапазоне на оптическом изображении видны как яркие

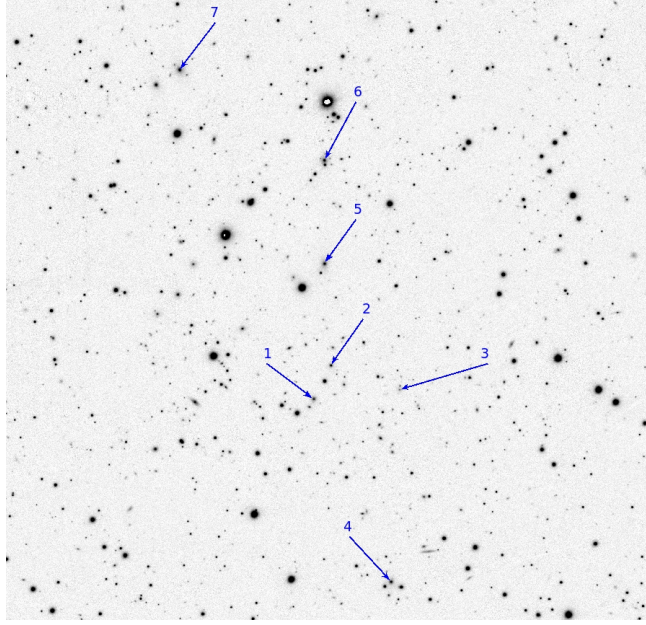


Рисунок 1.15 — Изображение поля источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G125.84 – 18.72 в фильтре i . Пронумерованными стрелочками отмечены объекты, которые были включены в программу спектроскопических наблюдений на телескопе АЗТ-3ЗИК.

галактики переднего плана. Следовательно, они не могут являются членами массивного скопления.

1.5 Измерение красных смещений далеких скоплений галактик из каталога *PSZ2*

1.5.1 Отбор скоплений галактик

В этом разделе представлены результаты работ по оптическому отождествлению и спектроскопическим измерениям красных смещений далеких скоплений галактик ($z \approx 0.7\text{--}0.9$) из каталога *PSZ2*. На изображениях обзоров *DESI LIS*, *SDSS* и *Pan-STARRS1* можно обнаружить только наиболее яркие галактики скоплений, расположенные на красных смещениях $z \approx 0.7\text{--}0.9$. Однако, по цвету этих галактик можно получить грубую оценку их красных смещений. На рис. 1.19 показаны медианные цвета $i - z$ наиболее ярких галак-

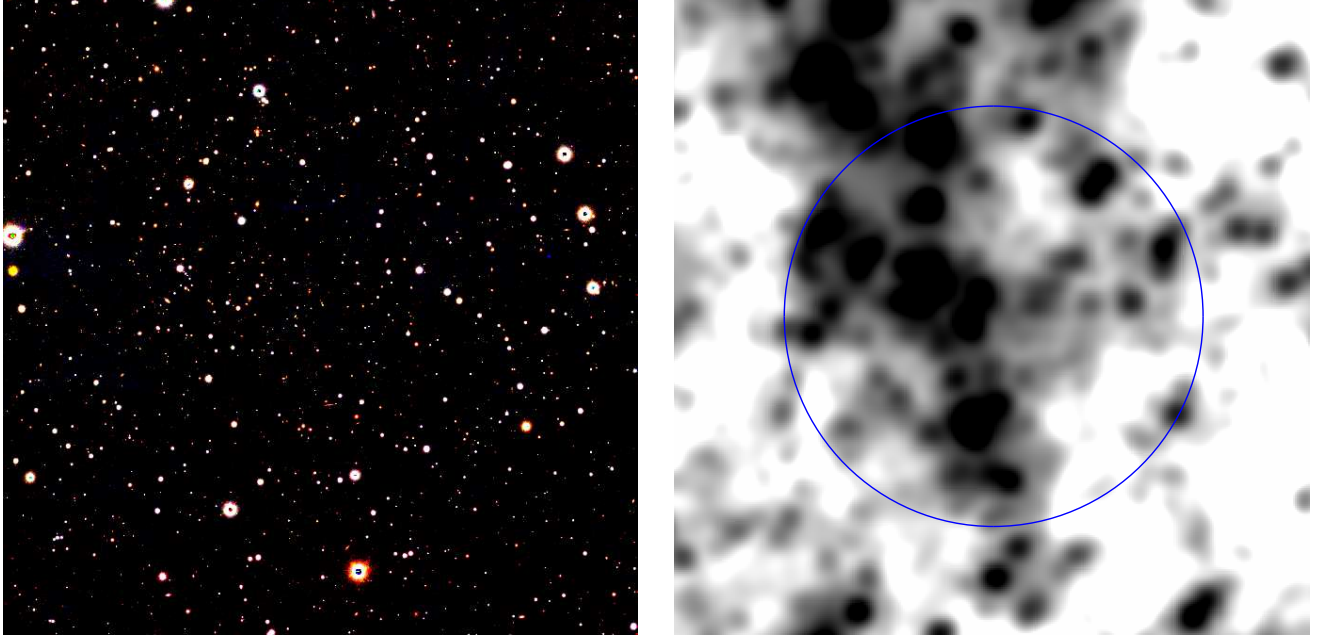


Рисунок 1.16 — Изображение поля источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G125.84 – 18.72. Слева: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Справа: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Центры изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа $5'$. На изображениях видно, что скопление галактик является рассеянным.

тик в скоплениях в зависимости от их спектроскопических красных смещений. Список далеких скоплений галактик взят из рентгеновского обзора телескопа *ROSAT* площадью 400 кв. градусов [93] и каталога *PSZ2* [16]. Красной линией показан цвет синтетического спектра звездного населения возрастом 11 млрд. лет, металличностью $Z = 0.02$, взятого из работы [75].

Скопления, расположенные на красных смещениях ниже $z \approx 0.6$ могут быть отобраны по данным Слоановского обзора [31]. Использование дополнительных данных обзора всего неба обсерватории *WISE* позволяет обнаруживать скопления галактик на более высоких красных смещениях [25]. Однако, для обнаружения скоплений на $z \gtrsim 0.7$, требуются более глубокие фотометрические данные в красном и ближнем ИК-диапазонах. В нашей работе для этой цели использовались данные наших наблюдений на различных телескопах, а при их отсутствии использовались крон-величины [94] в фильтрах *iz* обзора *Pan-STARRS1*. Выбор этих фильтров обусловлен тем, что $4000\text{\AA}$ провал в спектре

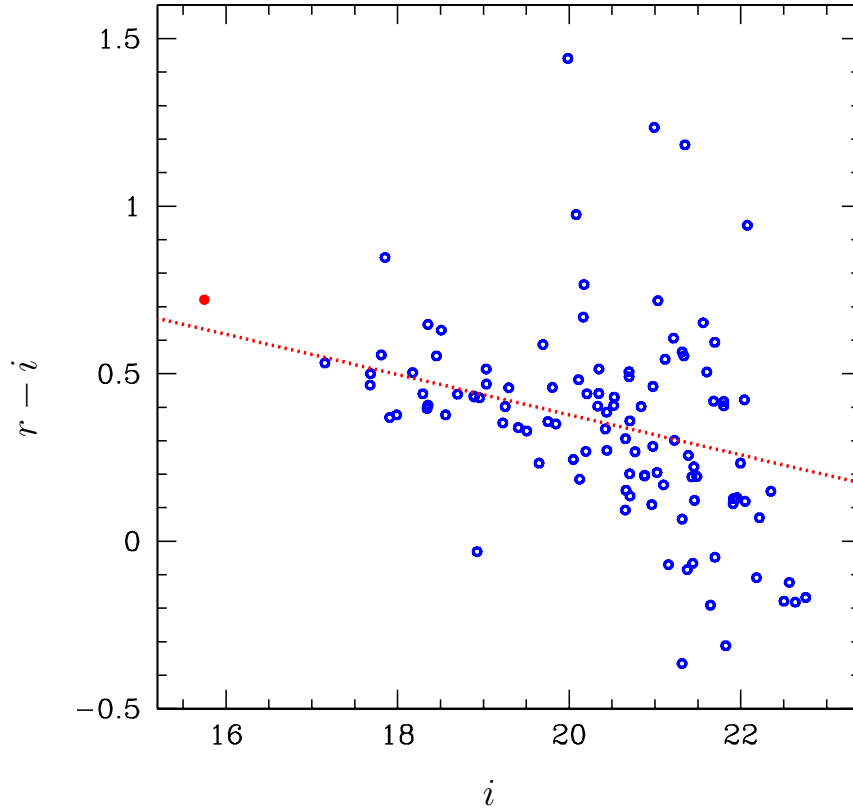


Рисунок 1.17 — Диаграмма цвет–величина галактик в поле источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G126.72–21.03 по данным *Pan-STARRS1*. Прерывистой линией на диаграмме обозначено приближение положения красной последовательности галактик. Красным кругом обозначена *cD*-галактика.

скоплений галактик на красных смещениях $0.75 < z < 1.1$ приходится на полосу пропускания фильтра i . Данные обзора *DESI LIS* не использовались, так как в них отсутствуют фотометрические данные в фильтре i .

Примеры изображений, использовавшихся для отождествления скоплений, приведены на рисунке 1.20. Отметим, что для большинства объектов, т.е. для всех объектов, кроме PSZ2 G092.69+59.92 и PSZ2 G237.68+57.83, наличие увеличенной поверхностной плотности числа галактик по данным обзора *WISE* было отмечено в каталоге *PSZ2*.

Полученные данные зависимости медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик в центральных областях повышенной ИК-яркости поля источников Сюняева–Зельдовича, использовались для отбора кандидатов в далекие скопления галактик из каталога *PSZ2*. На псевдоцветных изображениях рис. 1.20 видно, что эти галактики являются слабыми в оптическом диапазоне и имеют

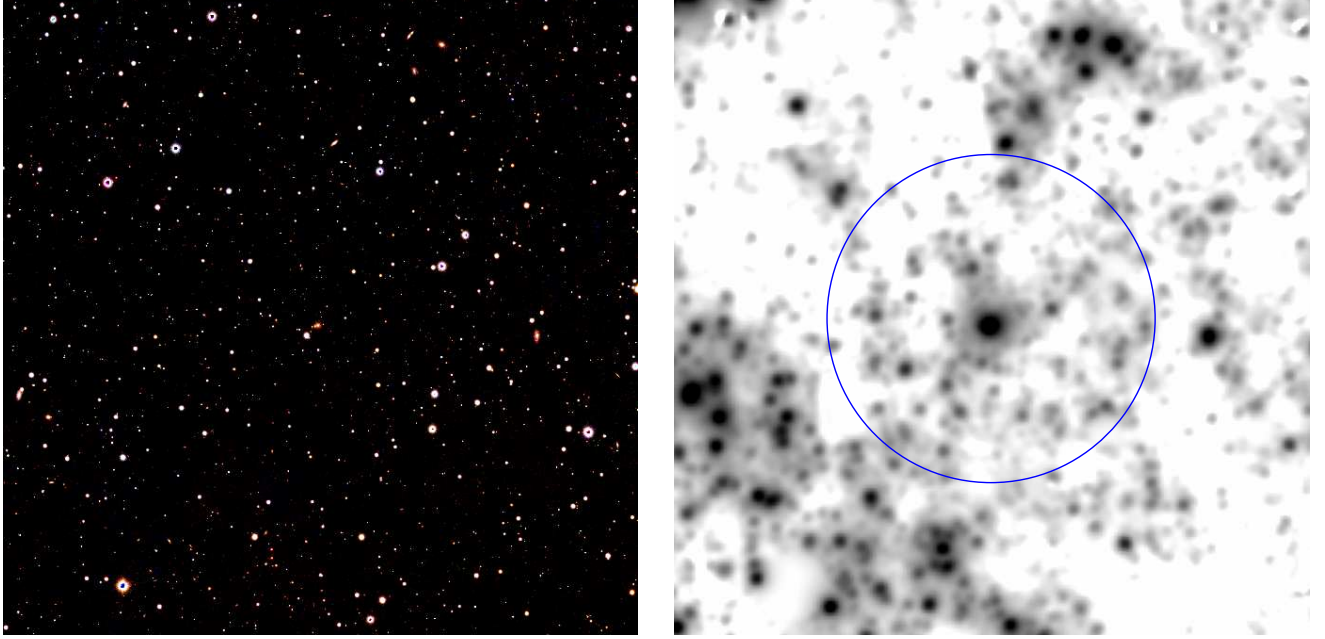


Рисунок 1.18 — Изображение поля источника Сюняева–Зельдовича PSZ2 G126.72 – 21.03. Слева: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Справа: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Центры изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа $5'$.

примерно одинаковый красный цвет, т. е. являются наиболее яркими галактиками красной последовательности скоплений. По цветам этих галактик, включая также сведения о цвете $i - z$ (см. рис. 1.19), можно получить фотометрическую оценку их красных смещений, которая для всех объектов оказывается выше $z_{phot} > 0.7$.

По этим данным было отобрано 18 объектов, из них три объекта были отброшены по данным глубоких прямых изображений этих полей. Семь источников Сюняева–Зельдовича были отождествлены с далекими скоплениями галактик, расположенными на красных смещениях выше $z \approx 0.7$. Для ярчайших галактик этих семи скоплений были получены спектры, которые позволили получить спектроскопические измерения красных смещений скоплений.

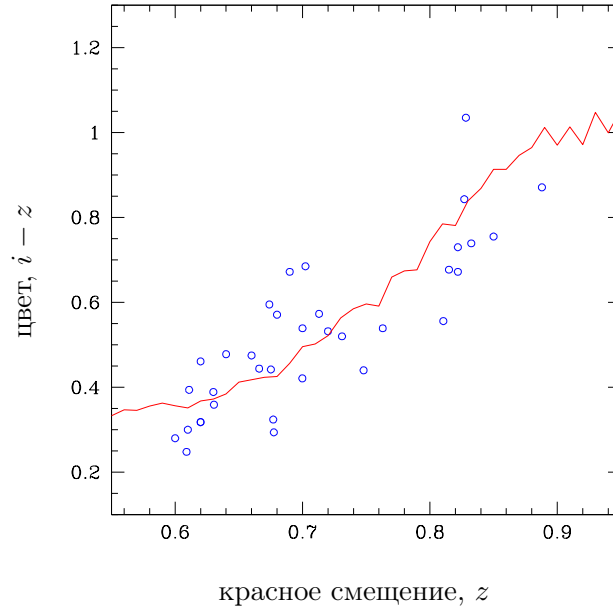


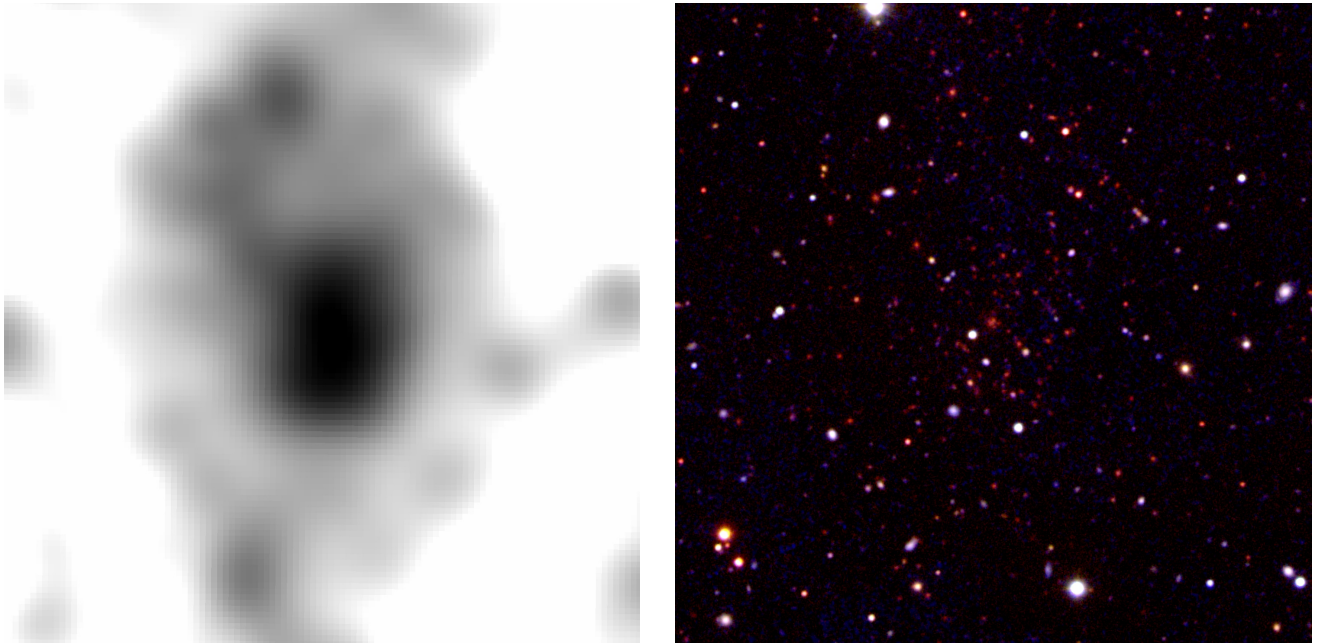
Рисунок 1.19 — Медианные цвета $i - z$ по данным обзора *Pan-STARRS1* наиболее ярких галактик в скоплениях в зависимости от красных смещений. Красной линией показан цвет синтетического спектра звездного населения возрастом 11 млрд. лет, металличностью $Z = 0.02$ из работы [75].

1.5.2 Результаты наблюдений

Спектроскопические наблюдения проводились на телескопах БТА и АЗТ-ЗЗИК, измерены красные смещения для семи далеких скоплений галактик, включая одно скопление, PSZ2 G126.57 + 51.61, которое входит в космологическую выборку обзора Планка. Примеры спектров ярчайших галактик скоплений, полученных на 6-м телескопе БТА, представлены на рисунке 1.21. В центральных областях двух скоплений PSZ2 G069.39 + 68.05 и PSZ2 G087.39–34.58 обнаружены дуги сильного гравитационного линзирования далеких галактик. Для линзируемой галактики в поле PSZ2 G069.39 + 68.05 мы измерили красное смещение $z = 4.262$. Глубокие прямые изображения скоплений в фильтрах фотометрической системы Слоановского обзора ri были получены на РТТ-150, БТА и 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. В некоторых случаях, когда фильтры ri были недоступны, использовались фильтры системы Бесселя RI .

Ниже в таблице 7 приведены результаты измерений спектроскопических красных смещений скоплений галактик. В первом столбце приведены названия скоплений галактик согласно каталогу *PSZ2*. Во втором и третьем столбце при-

PSZ2 G069.39+68.05



PSZ2 G087.39–34.58

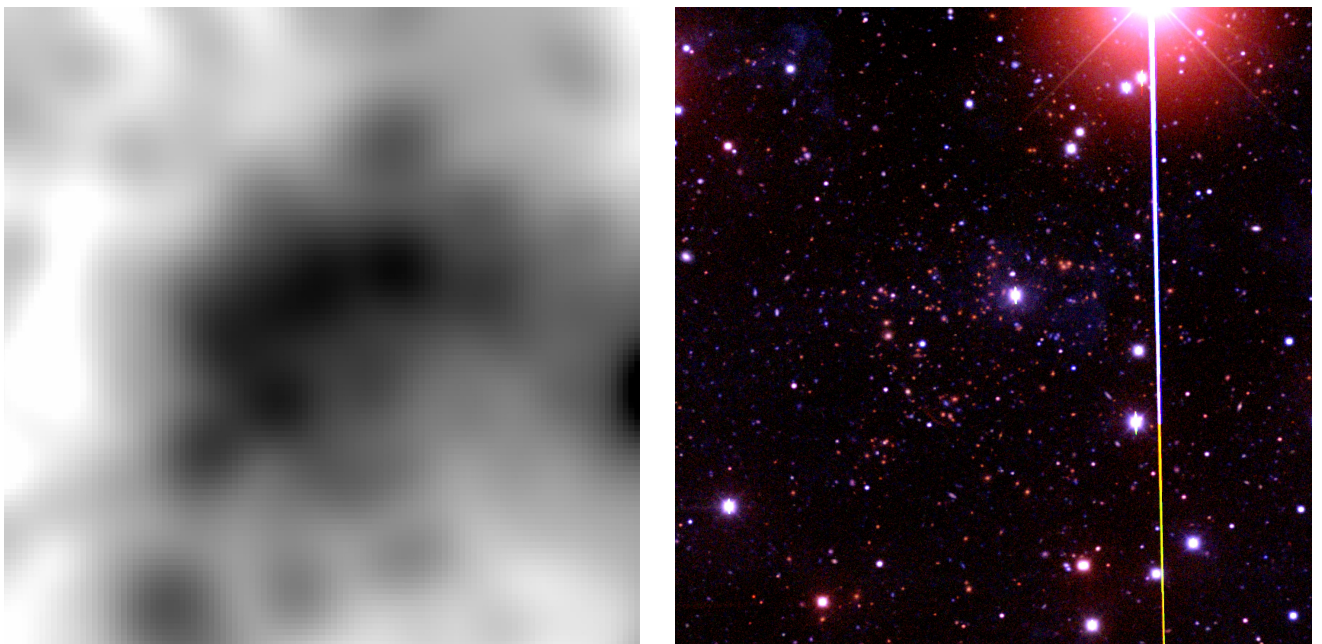
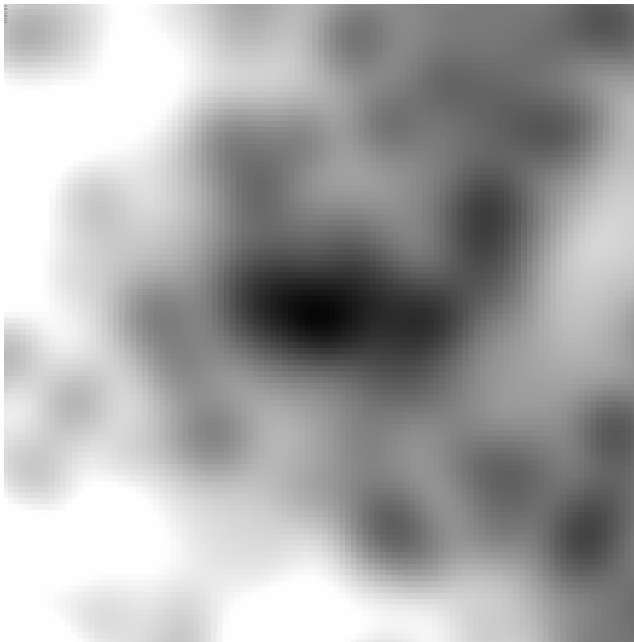


Рисунок 1.20 — Слева: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Справа: псевдоцветное изображение поля в фильтрах *irg* (*RGB*). Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер изображений составляет $5' \times 5'$.

PSZ2 G092.69+59.92



PSZ2 G126.28+65.62

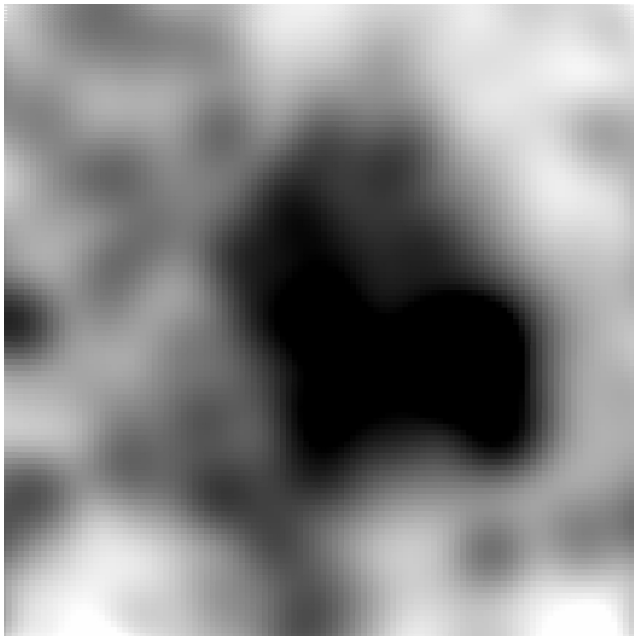
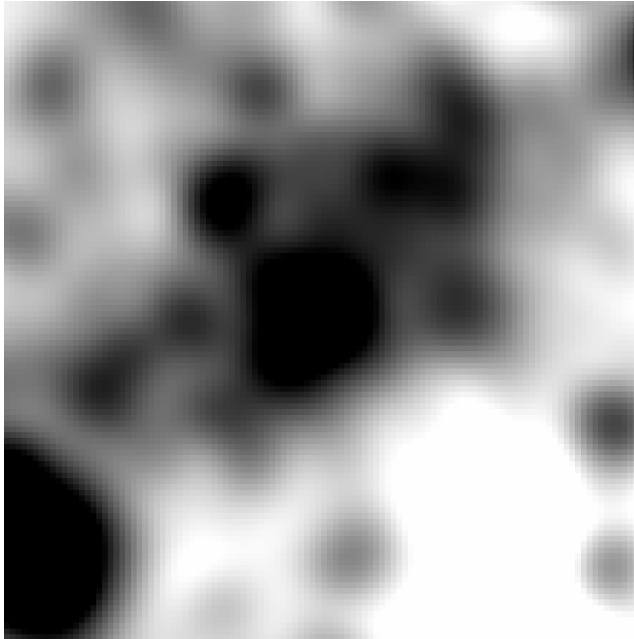


Рисунок 1.20 — Продолжение.

PSZ2 G126.57+51.61



PSZ2 G237.68+57.83

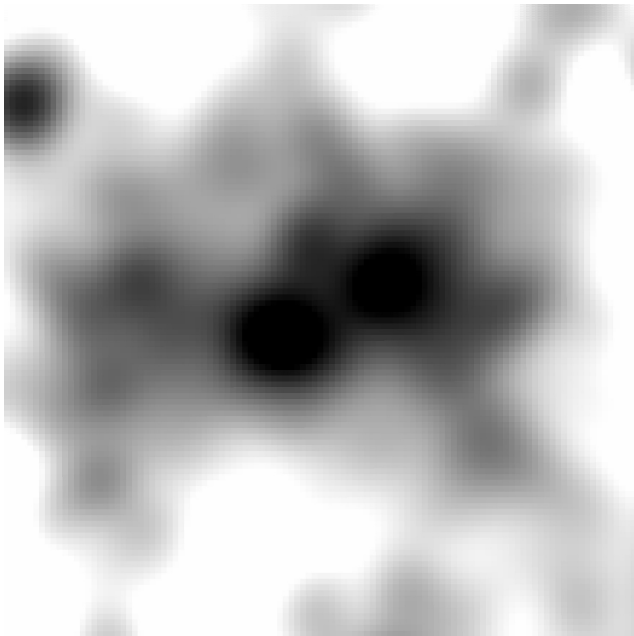


Рисунок 1.20 — Продолжение.

PSZ2 G343.46+52.65

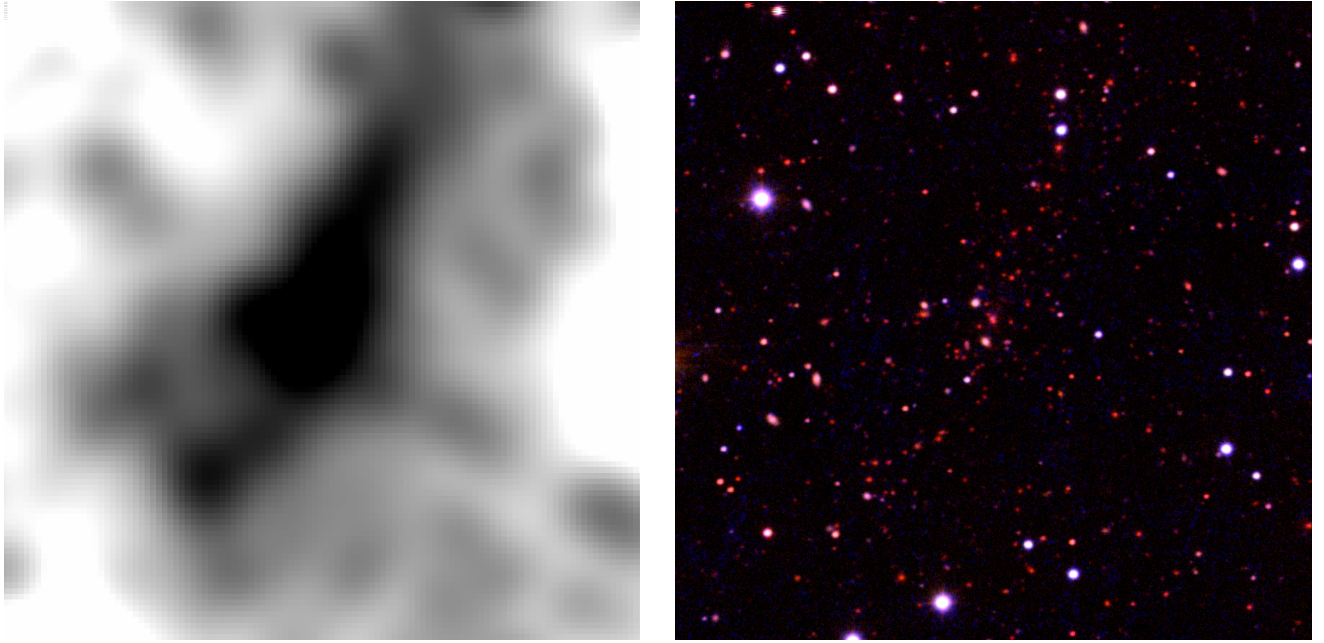
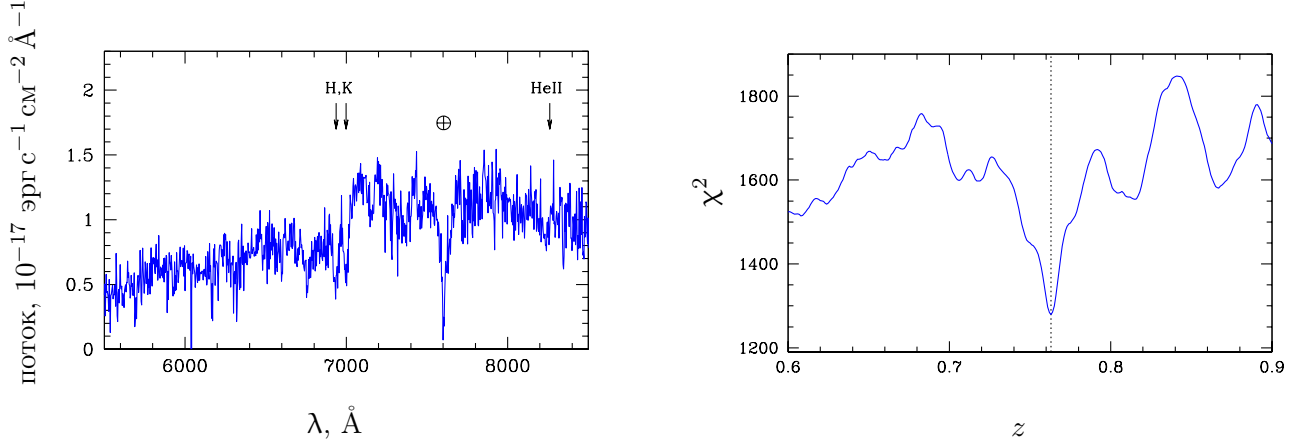


Рисунок 1.20 — Продолжение.

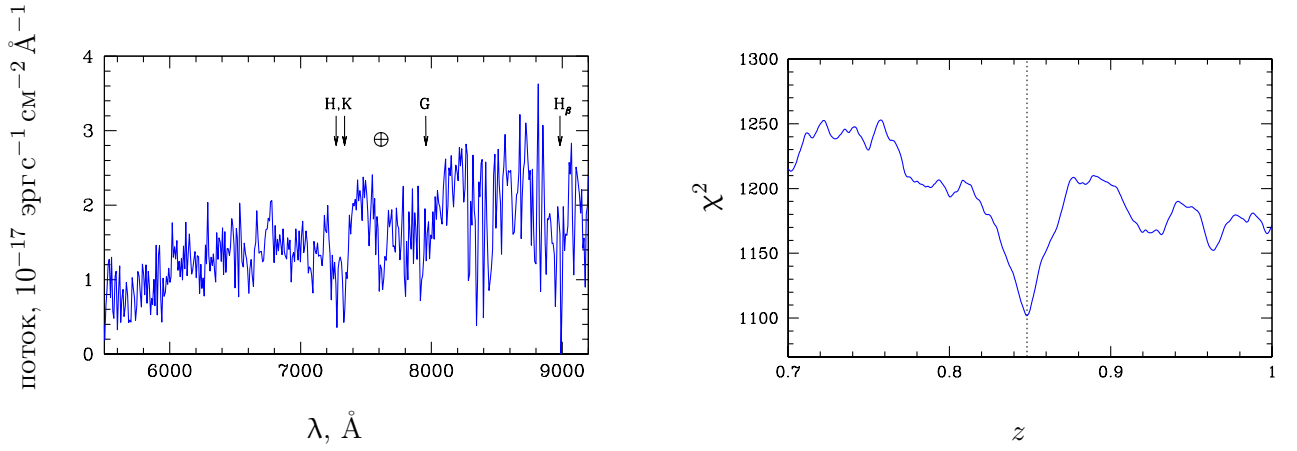
ведены прямое восхождение и склонение в экваториальной системе координат на эпоху J2000.0. В четвертом столбце приведены значения спектроскопических красных смещений, полученных по измерениям одной или нескольких галактик. В пятом столбце приведено количество галактик скоплений, для которых получены спектры и подтвержден факт принадлежности галактики к скоплению. В шестом столбце приведены замечания отдельно для каждого объекта, ниже после таблицы даны пояснения замечаний.

На рисунке 1.20 приведен пример изображений в оптическом и ближнем ИК-диапазоне, которые использовались для оптического отождествления скопления PSZ2 G126.57+51.61, а также для подготовки программы наблюдения на телескопах БТА и АЗТ-33ИК. Спектр этого скопления был получен на телескопе БТА, однако измерение его красного смещения было недостоверным из-за плохих погодных условий во время наблюдений, что привело к получению спектра с высоким уровнем фона. После чего спектр этого скопления был получен на телескопе АЗТ-33ИК в решетке VRHG600R, было накоплено 6 часов общей экспозиции спектров. Ярчайшая галактика этого скопления имеет величину $r' = 20.3$ и $i' = 18.9$, поэтому при измерении красного смещения этой галактики на 1.6-м телескопе потребовались большие времена накопления спектров. Спектр cD -галактики скопления и χ^2 – распределение свертки с

PSZ2 G069.39+68.05



PSZ2 G092.69+59.92



PSZ2 G126.28+65.62

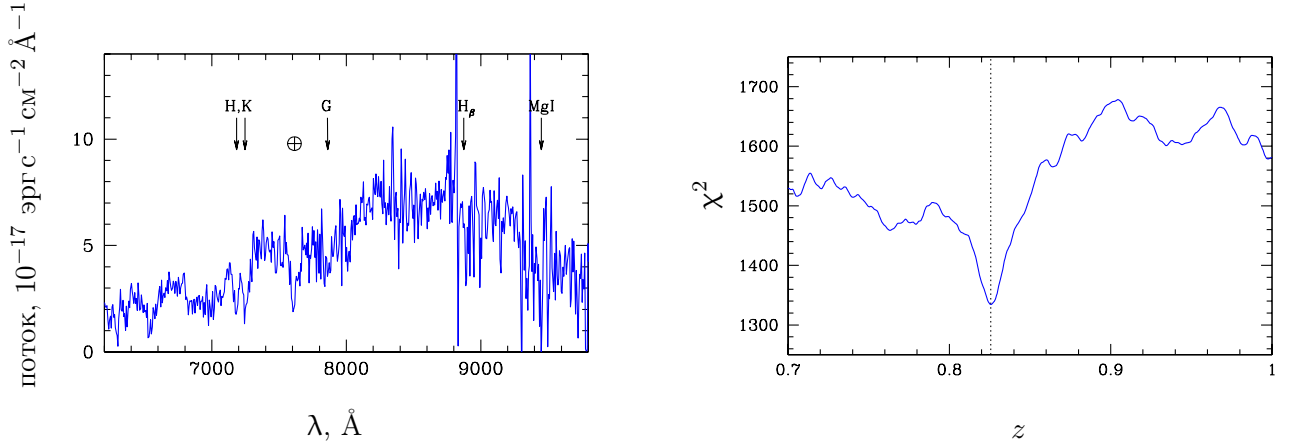


Рисунок 1.21 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографов *SCORPIO* и *SCORPIO-2*. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики. Вертикальная линия соответствует измеренному значению красного смещения.

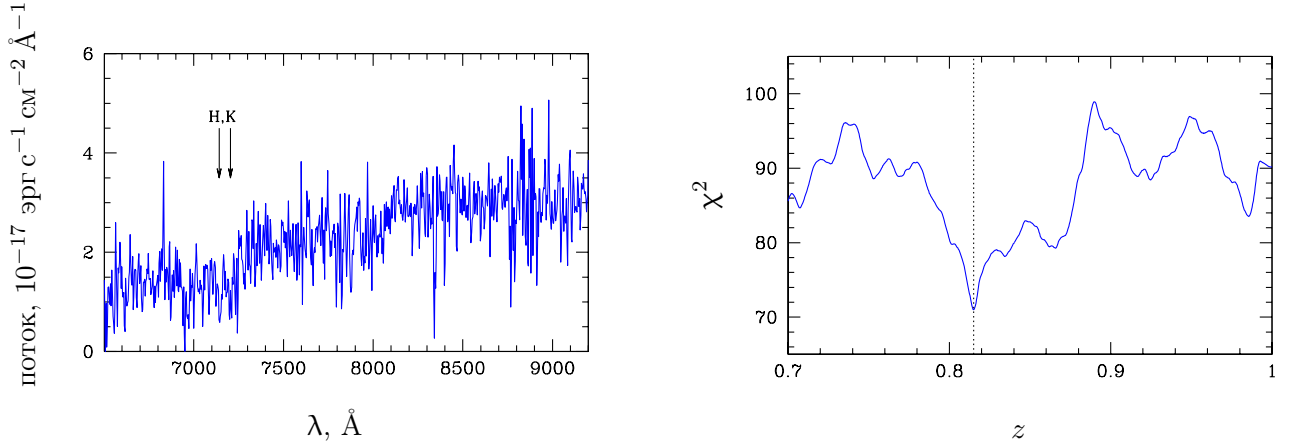


Рисунок 1.22 — Спектроскопическое измерение красного смещения для скопления PSZ2 G126.57 + 51.61. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления, полученный на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории с помощью спектрографа АДАМ, с полной экспозицией 6 ч. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

Таблица 7 — Скопления галактик на высоких z

Название	Координаты (J2000)		z	N_{gal}	замечания
	α	δ			
PSZ2 G069.39+68.05	14 21 37.9	+38 21 16	0.763	3	l_*
PSZ2 G087.39−34.58	22 49 09.7	+19 43 57	0.771	3	l_*
PSZ2 G092.69+59.92	14 26 36.1	+51 15 51	0.848	2	*
PSZ2 G126.28+65.62	12 42 23.4	+51 26 22	0.820	7	
PSZ2 G126.57+51.61	12 29 47.8	+65 21 13	0.815	1	c
PSZ2 G237.68+57.83	10 53 16.3	+10 52 46	0.892	1	*
PSZ2 G343.46+52.65	14 24 23.1	−02 43 48	0.713	3	

Замечания:

l — обнаружена гравитационная линза;

*

 — имеется обсуждение в тексте;

c — скопление входит в космологическую выборку обзора обсерватории им. Планка;

шаблонным спектром приведены на рисунке 1.22. Этот объект примечателен тем, что это очень массивное скопление галактик, входящее в космологическую выборку Планка, к тому же ее cD -галактика является наиболее удаленной ($z = 0.815$) галактикой без активного ядра, спектр которой был получен на телескопе АЗТ-33ИК с использованием спектрографа АДАМ. Результаты измерений подтверждаются спектроскопическими измерениями, представленными в работе [36], опубликованных позднее.

Четыре скопления: PSZ2 G069.39 + 68.05, PSZ2 G087.39 – 34.58, PSZ2 G092.69 + 59.92 и PSZ2 G126.28 + 65.62, были отождествлены в качестве далеких скоплений галактик в расширенном каталоге Планка [25]. Скоплениям PSZ2 G069.39+68.05 и PSZ2 G087.39–34.58 в этой работе были приписаны красные смещения, взятые из данных Слоановского обзора. Хотя при этом были использованы одиночные галактики в стороне от оптического центра скопления, эти красные смещения подтверждаются нашими измерениями. Кроме того, в случае скопления PSZ2 G087.39–34.58, в 14-м выпуске данных Слоановского обзора появилось измерение красного смещения центральной галактики скопления, которое хорошо согласуется с нашими измерениями. Скопление PSZ2 G092.69 + 59.92, по-видимому, является проекцией двух скоплений, при этом красное смещение далекого скопления, $z = 0.848$, подтверждается последними спектроскопическими данными Слоановского обзора (см. ниже). Для скопления PSZ2 G126.28 + 65.62 в расширенном каталоге Планка дана фотометрическая оценка красного смещения, которая также согласуется с нашими измерениями. Остальные скопления не были включены в расширенный каталог Планка, поскольку в этой работе не рассматривались скопления с фотометрическими оценками красных смещений выше $z = 0.7$.

На красных смещениях выше $z \approx 0.5$ в обзоре всего неба обсерватории им. Планка, среди источников Сюняева–Зельдовича из каталога *PSZ2*, могут быть обнаружены только наиболее массивные скопления галактик, с массами выше $M_{500} \approx 5 \times 10^{14} M_{\odot}$. Такие объекты являются очень редкими на высоких красных смещениях. Так, например, на красных смещениях $z > 0.7$ в каталоге *PSZ2* содержится 12 скоплений галактик, а на красных смещениях $z > 0.8$ — 5 скоплений. В этой статье представлены оптические отождествления и спектроскопические измерения красных смещений для семи скоплений галактик, из которых все находятся на $z > 0.7$ и 4 — на $z > 0.8$. Примерное место этих скоплений на соотношении красное смещение – масса показано на рис. 1.23,

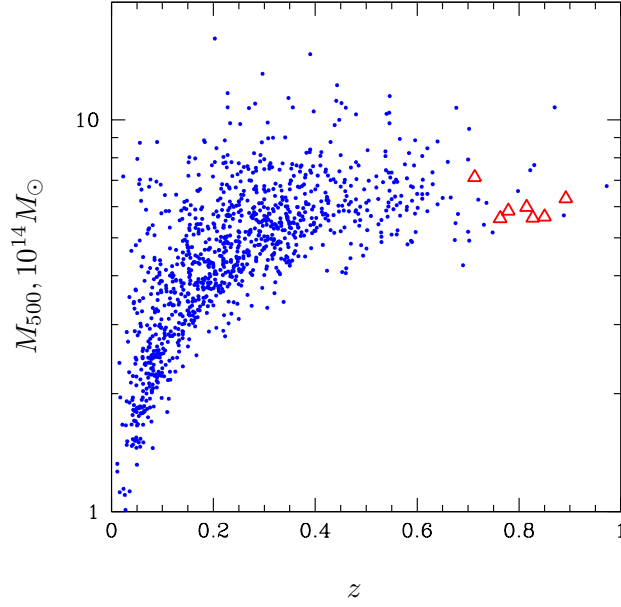


Рисунок 1.23 — Соотношение между красным смещением и массой скоплений галактик, отождествленных в каталоге *PSZ2* (синие точки) и в нашей работе (красные треугольники).

здесь использована упрощенная оценка массы M_{500} из карт параметра комптонизации [95]. Таким образом, видно, что в результате работы число известных массивных скоплений в каталоге *PSZ2* на высоких красных смещениях, $z > 0.7$, примерно удваивается.

Некоторое количество далеких скоплений должно быть среди объектов из каталога *PSZ2* на южном небе. В целом, можно предположить, что среди источников Сюняева–Зельдовича из каталога *PSZ2*, должно быть еще порядка 10 неотожествленных скоплений галактик на красных смещениях примерно $z > 0.7$. Поэтому, некоторая неполнота каталога *PSZ2* для таких скоплений должна сохраняться. Однако, уже сейчас можно утверждать, что в результате нашей работы полнота оптического отождествления объектов из каталога *PSZ2* скоплений галактик на северном небе, на склонениях выше $\delta > -20^\circ$, значительно выросла.

1.5.3 Замечания по отдельным объектам

PSZ2 G069.39 + 68.05. На оптических изображениях центральной области скопления обнаружена гравитационно-линзированная галактика, изображение

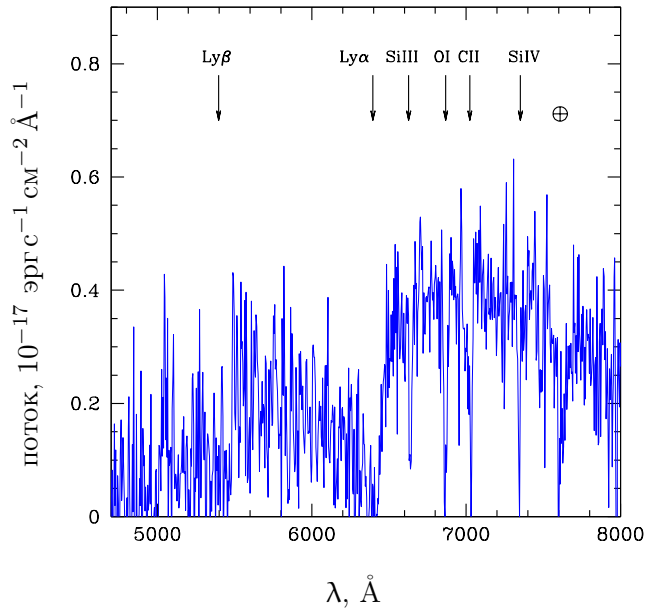
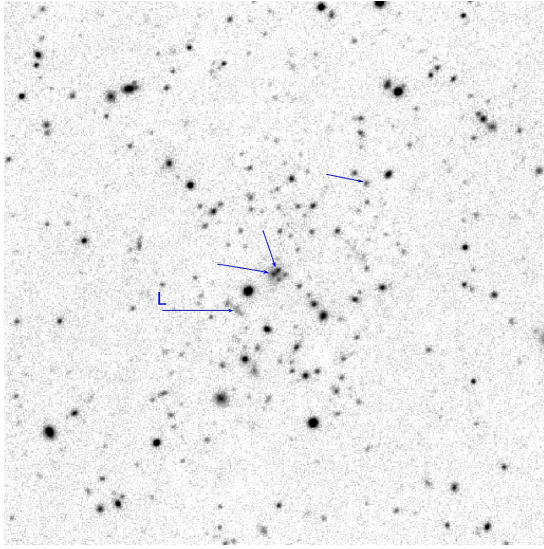


Рисунок 1.24 — Слева: изображение центральной области ($3' \times 3'$) скопления PSZ2 G069.39+68.05 в полосе I , полученное на 6-м телескопе БТА при помощи прибора *SCORPIO-2* с экспозицией 150 с. Стрелками указаны объекты, для которых были получены спектры. Буквой L обозначена дуга гравитационно линзированной галактики. Справа: спектр этой дуги, полученный на 6-м телескопе БТА с помощью прибора *SCORPIO-2* с экспозицией 3600 с. Отмечены спектральные особенности, которые наблюдаются на красном смещении $z = 4.262$.

которой растянута в дугу длиной около $7''$ (см. рис. 1.24, слева). В спектре этой галактики, который был получен на 6-м телескопе БТА с помощью прибора *SCORPIO-2* с экспозицией 3600 с (рис. 1.24, справа), видны линии поглощения Лаймановской серии водорода, а также узкие линии поглощения ионизованного кремния, кислорода и углерода. Красное смещение галактики, определенное по узким линиям поглощения, составляет $z = 4.262$. Отметим, что в этих наблюдениях щель спектрографа была расположена поперек направления линзы, поэтому в нее попадало только около 30% потока излучения линзированной галактики. Поток, просуммированный по всей площади линзы, соответствует звездной величине около 20.7^m в полосе I .

В данных Слоановского обзора имеется спектр галактики, расположенной на расстоянии около $2'$ в направлении на север от оптического центра скопления ($\alpha, \delta = 14:21:39.9, +38:23:07$, J2000). В данных 13-го выпуска этот спектр был отождествлен со спектром галактики на $z = 0.7617$, а в данных 14-го выпуска — со спектром квазара на $z = 4.230$. Учитывая то, что этот объект является

протяженным и цвет этой галактики согласуется с цветом красной последовательности скопления, скорее всего верным является более раннее измерение, которое согласуется с нашим спектроскопическим измерением красного смещения для этого скопления, выполненным по спектрам галактик, указанных стрелками на рис. 1.24.

PSZ2 G087.39 – 34.58. В центральной области скопления на оптических изображениях видна гравитационно-линзированная галактика, изображение которой растянуто в дугу длиной около $14''$ (см. рис. 1.25). Поток излучения, просуммированный по всей площади линзы, соответствует звездной величине около 21.7^m в полосе i .

На рис. 1.25 стрелками показаны галактики, спектры которых были получены на 6-м телескопе БТА с помощью спектрографа *SCORPIO*. Отметим, что на тот момент в последнем (14-м) выпуске данных Слоановского обзора было приведено два измерения красных смещений для галактик этого скопления, которые согласуются с результатами наших наблюдений. В расширенном каталоге Планка для этого скопления красное смещение было измерено, используя всего одно спектроскопическое измерение из Слоановского обзора, доступное на время выхода каталога. В табл. 7 приводится значительно более надежное измерение z скопления, полученное с учетом всех имеющихся данных.

PSZ2 G092.69 + 59.92. Этот источник Сюняева–Зельдовича может быть отождествлен с проекцией двух скоплений галактик. Одно из них, расположенное на красном смещении $z = 0.463$, было обнаружено в обзоре *redMaPPer* [31]. В расширенном каталоге Планка этот источник был автоматически отождествлен именно с этим объектом, поскольку в этой работе не рассматривались скопления на красных смещениях выше $z \approx 0.7$. Однако в поле этого источника имеется еще одно скопление, расположенное на красном смещении $z = 0.848$, изображение которого приведено на рис. 1.20. Оба эти скопления вместе хорошо видны на изображении поля источника PSZ2 G092.69 + 59.92 из обзора *WISE*, очищенном от звезд и свернутом с β -моделью, которое показано на рис. 1.26. Скопление на $z = 0.848$ расположено ближе к центру источника Сюняева–Зельдовича и имеет гораздо более высокую светимость в ИК-диапазоне. Поэтому, скорее всего, именно это скопление является гораздо более массивным и дает основной вклад в сигнал Сюняева–Зельдовича.

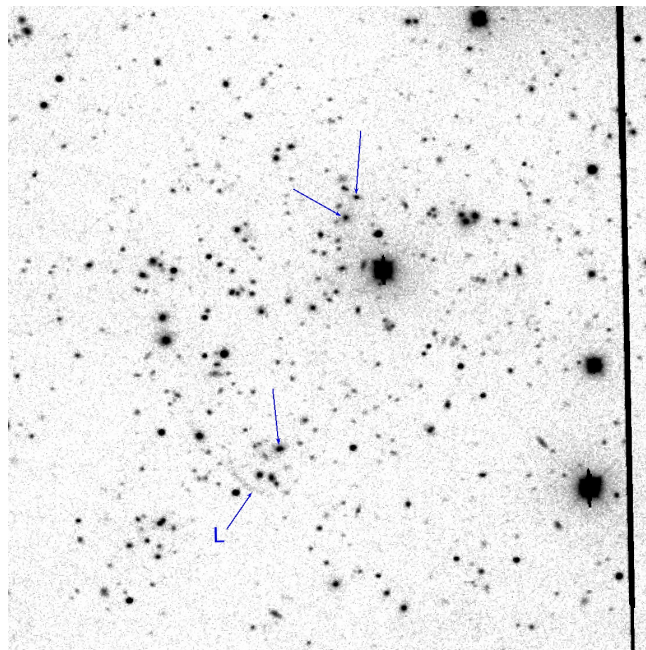


Рисунок 1.25 — Изображение центральной области ($3' \times 3'$) скопления PSZ2 G087.39 — 34.58 в полосе i , полученное на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто с помощью прибора *MOSCA* с экспозицией 900 с. Стрелками указаны галактики скопления, для которых были получены спектры, буквой L обозначена гравитационная линза.

Отметим, что для галактик обоих скоплений имеются спектроскопические данные в Слоановском обзоре. Для более далекого скопления имеется одно спектроскопическое измерение красного смещения ($z = 0.8421$) для галактики, расположенной на расстоянии примерно $3'$ от оптического центра скопления, в направлении NW , которое хорошо согласуется с результатами наших измерений.

PSZ2 G237.68 + 57.83. В поле этого источника Сюняева–Зельдовича можно обнаружить несколько скоплений галактик, как показано на рис. 1.27. Красные смещения для скоплений на $z = 0.373$ и $z = 0.355$ взяты из спектроскопических данных Слоановского обзора. Скопление на $z = 0.89$, по-видимому, имеет наиболее высокую светимость в ИК-диапазоне, а значит является наиболее массивным и дает наибольший вклад в суммарный сигнал Сюняева–Зельдовича. Однако, и другие скопления также могут давать заметный сигнал. Для того чтобы уточнить вклад каждого отдельного скопления, требуются дополнительные данные в рентгеновском и (или) мм-диапазонах.

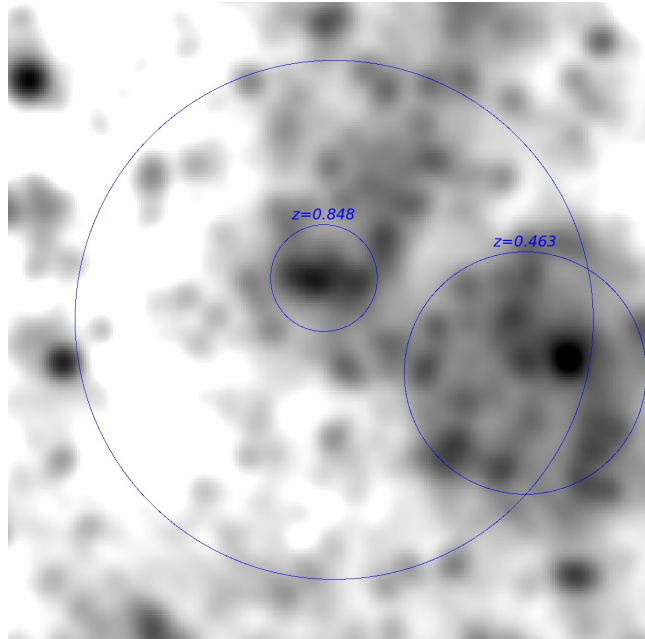


Рисунок 1.26 — Изображение поля скопления PSZ2 G092.69 + 59.92 из обзора *WISE*, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Большим кругом обозначена область локализации источника Сюняева–Зельдовича из каталога *PSZ2* радиусом $5'$. Круги меньшего размера показывают скопления галактик, которые можно обнаружить в этом поле.

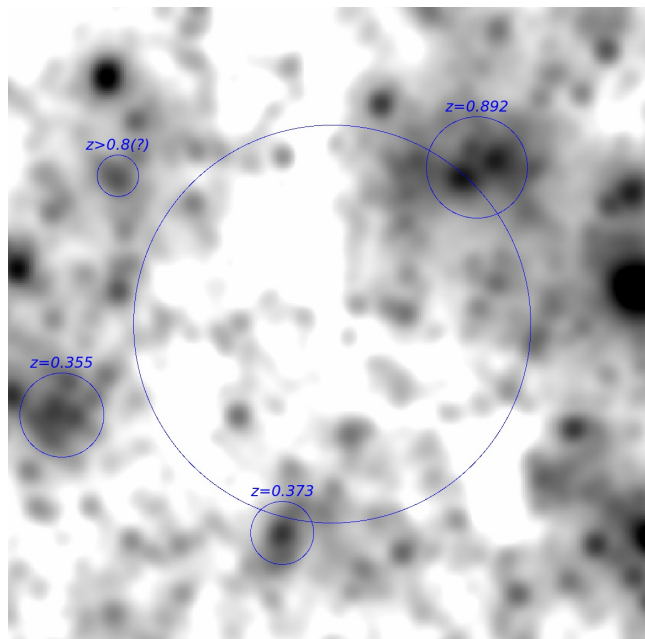


Рисунок 1.27 — Изображение поля скопления PSZ2 G237.68 + 57.83 из обзора *WISE*, очищенное от звезд и свернутое с β -моделью радиусом $24''$. Большим кругом обозначена область локализации источника Сюняева–Зельдовича из каталога *PSZ2* радиусом $5'$. Круги меньшего размера показывают скопления галактик, которые можно обнаружить в этом поле. Остальные яркие ИК-источники связаны с близкими галактиками.

1.6 Измерение красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога Планка

Измерение красных смещений скоплений галактик из каталога *PSZ2* проводилось несколькими научными группами [62; 63; 88; 90; 96–98]. На момент публикации каталога, скоплений галактик с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями было 258 [56]. Очевидно, что через некоторое время количество скоплений галактик из каталога *PSZ2* с неизмеренными красными смещениями значительно сократится, поэтому для измерений космологических параметров с наибольшей точностью нам потребуется расширять выборку массивных скоплений. Сделать это за счет данных обзора *СПГ/eROSITA* на тот момент не представлялось возможным, так как обсерватория в то время только готовилась к запуску в космос. Поэтому до начала составления каталогов наиболее массивных скоплений обзора *СПГ/eROSITA* проводились наблюдения кандидатов в скопления галактик, отобранных среди источников Сюняева–Зельдовича с низкой статистической значимостью из обзора Планка.

1.6.1 Отбор скоплений галактик

Выборка скоплений, которые могут быть обнаружены по данным обзора всего неба обсерватории им. Планка, может быть расширена с использованием дополнительных данных в оптическом и ИК-диапазоне. Таким способом, при помощи данных карт параметра комптонизации обзора всего неба обсерватории им. Планка, Слоановского обзора и обзора *WISE*, в работе [25] был получен расширенный каталог скоплений обзора им. Планка, который включает в себя около 3000 скоплений галактик с массами выше примерно $3 \times 10^{14} M_{\odot}$ на красных смещениях выше $z \approx 0.5$, в том числе включает в себя скопления галактик из каталога *PSZ2*. Примерно для 400 скоплений из этой выборки в Слоановском обзоре не имеется спектроскопических измерений красных смещений.

По результатам оптического отождествления и спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога Планка нами было опубликовано две работы [64; 65]. Отбор объектов для

спектроскопических наблюдений осуществлялся по данным каталога, опубликованного на сайте отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН¹³. В первую очередь отбирались скопления, где в поле источника Сюняева–Зельдовича из обзора Планка было обнаружено только одно богатое скопление, а галактики которого не имели спектроскопических измерений красных смещений. На рисунке 1.28 изображены приведенные в работах [64; 65] псевдоцветные изображения обзора *Pan-STARRS1* полей скоплений галактик в фильтрах *irg* (*RGB*) и изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью. На рисунках 1.29 и 1.30 приведены примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений, полученных на телескопах АЗТ-ЗИК и РТТ-150. Для оптического отождествления использовались данные фотометрической оценки красных смещений, взятые из [62].

1.6.2 Результаты наблюдений

В результате наблюдений с марта 2017 года до начала 2021 года мы получили спектроскопические измерения красных смещений 88 скоплений галактик из расширенного каталога, из которых только 16 скоплений галактик входят в каталог *PSZ2*. Нами были опубликованы 2 статьи с результатами измерений красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога [64; 65]. В таблице 8 приведены результаты спектроскопических измерений красных смещений. В первом и втором столбце таблицы указаны координаты оптического центра скоплений в экваториальной системе координат на эпоху J2000.0. В третьем столбце указано количество галактик скопления, для которых были получены спектры. В четвертом указано измеренное спектроскопическое красное смещение. В пятом столбце приведены примечания.

На рисунке 1.31 показано соотношение спектроскопических красных смещений, приведенных в табл. 8, с фотометрическими оценками красных смещений. По вертикали на диаграмме указаны фотометрические оценки красных смещений скоплений галактик, по горизонтали – спектроскопические красные смещения, взятые из таблицы 8.

¹³<http://hea.iki.rssi.ru/psz/en/>

12 44 55.3 −04 41 52



01 22 27.6 +42 22 05

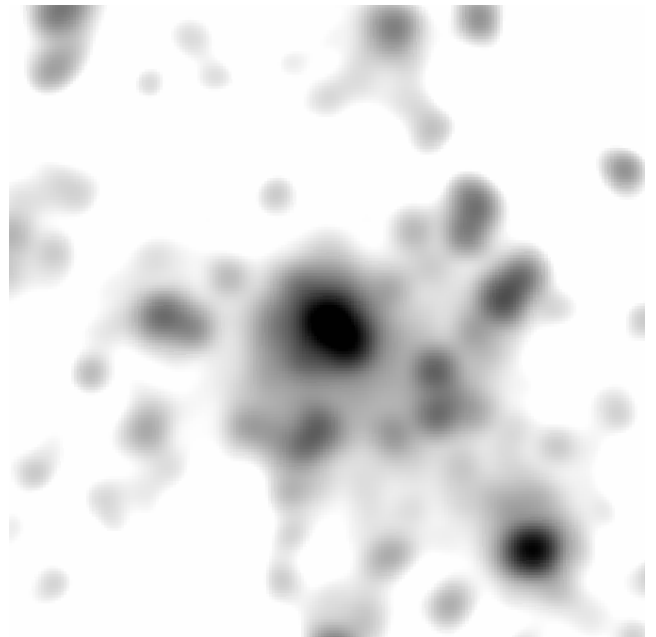
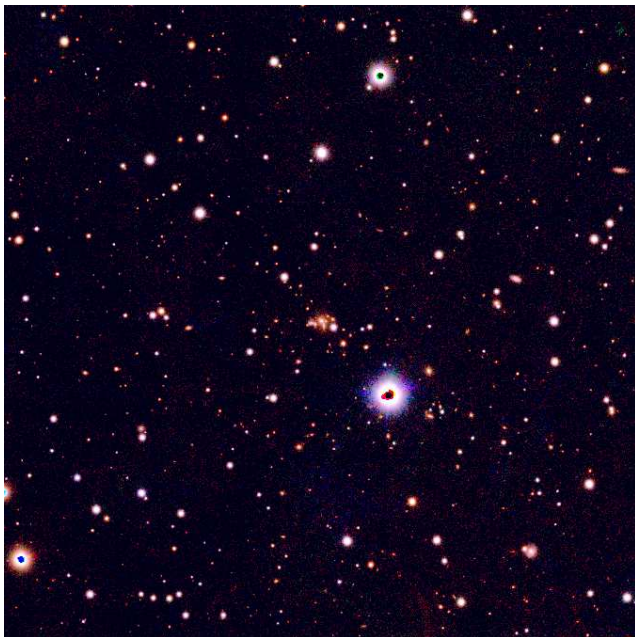
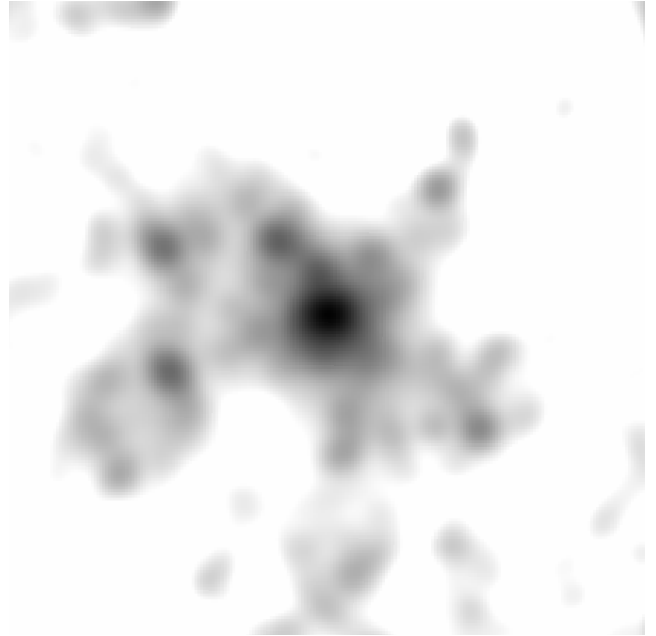
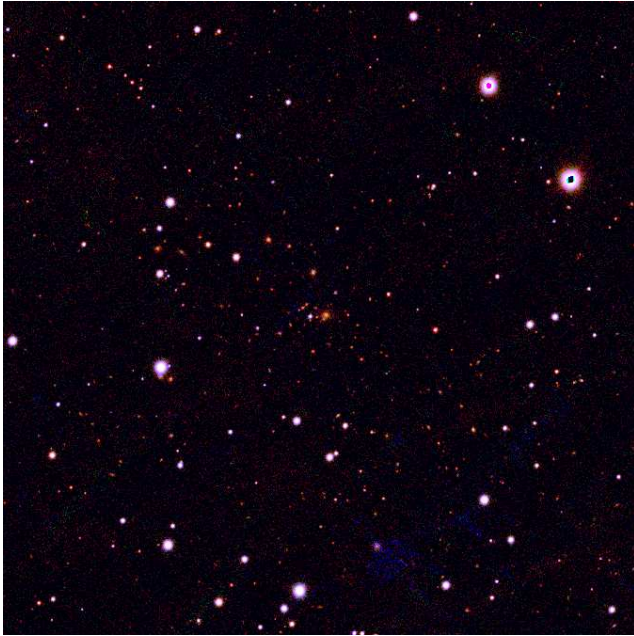


Рисунок 1.28 — Слева: псевдоцветные изображения обзора *Pan-STARRS1* полей скоплений галактик в фильтрах *irg* (*RGB*). Справа: изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом $24''$. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер полей изображений $10' \times 10'$.

17 34 37.7 +77 50 13



05 00 42.9 −00 51 57



Рисунок 1.28 — Продолжение.

08 40 20.6 +22 35 11



20 58 43.5 +06 05 28

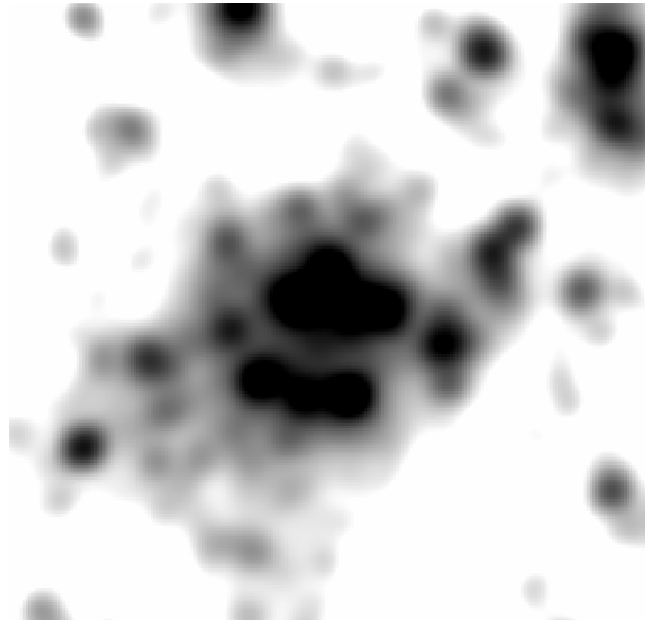
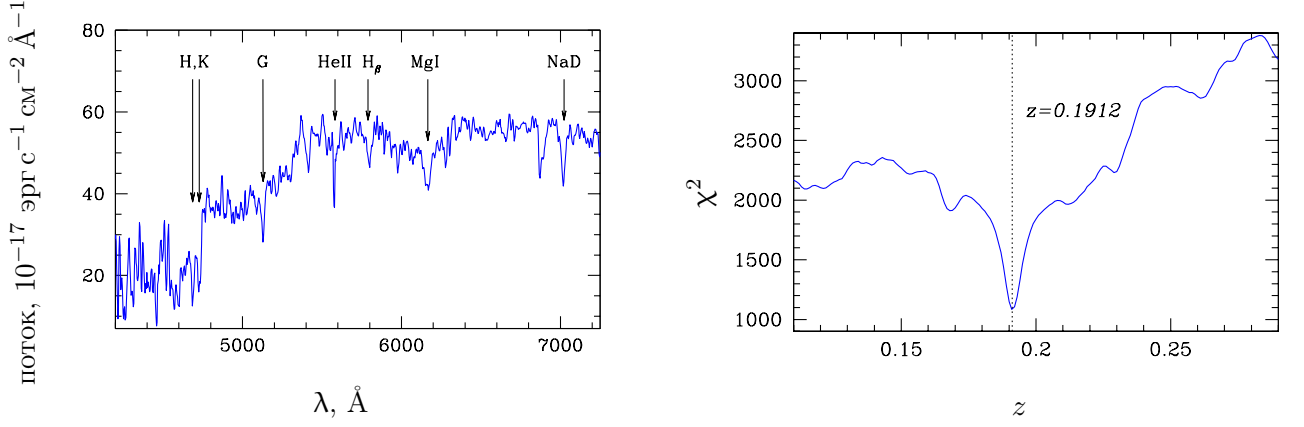
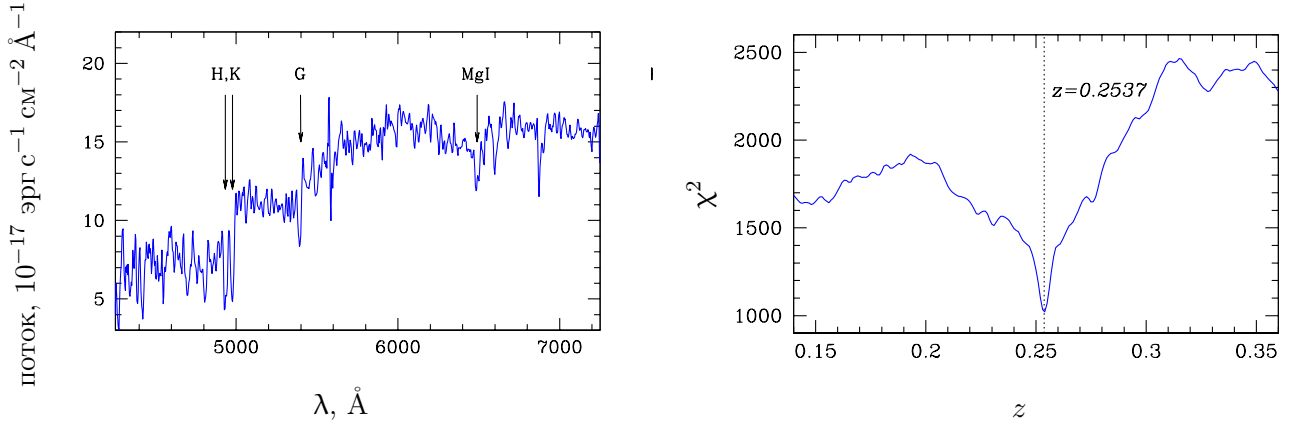


Рисунок 1.28 — Продолжение.

09 40 12.8 +81 04 25



16 29 14.9 +63 14 42



23 20 54.2 -04 34 02

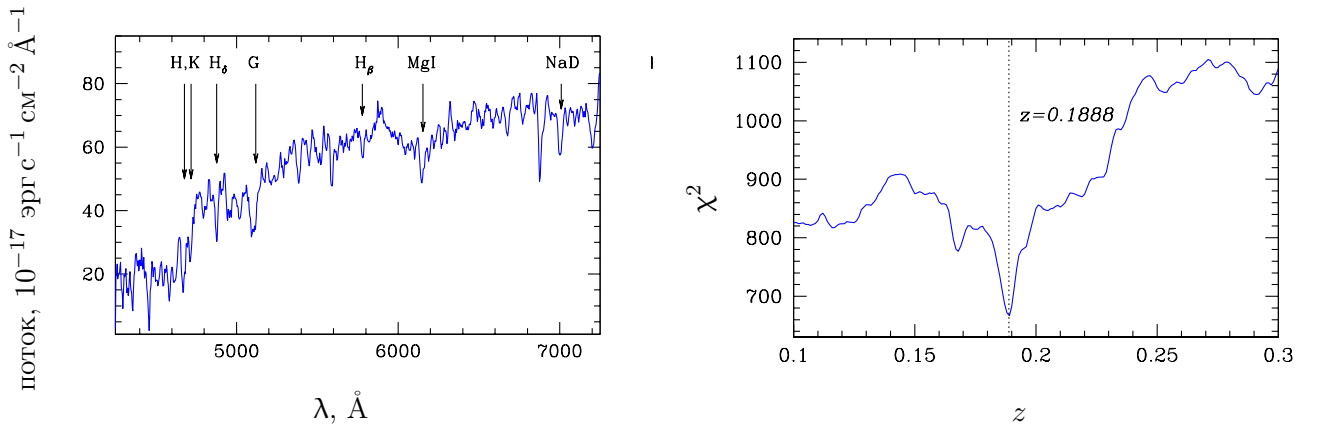
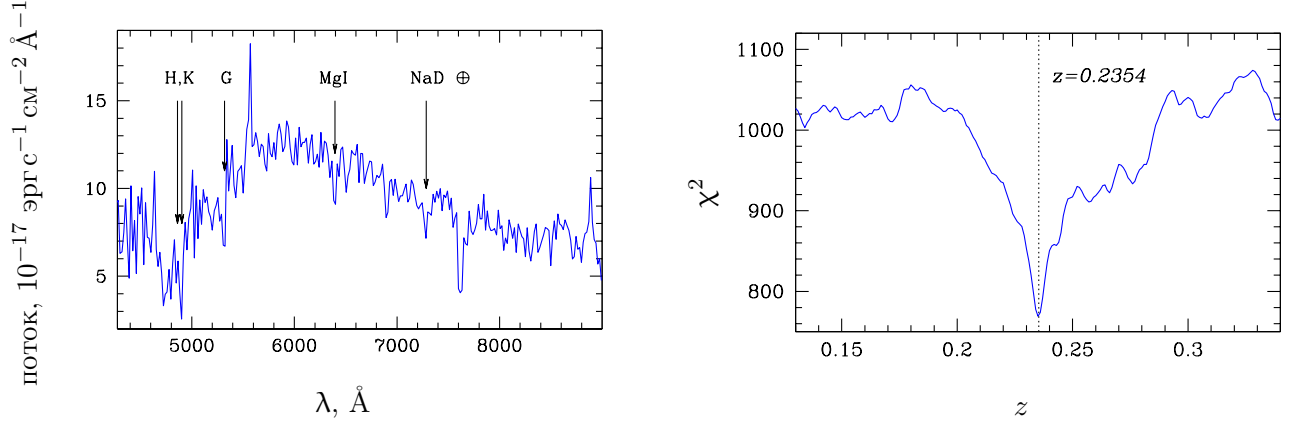
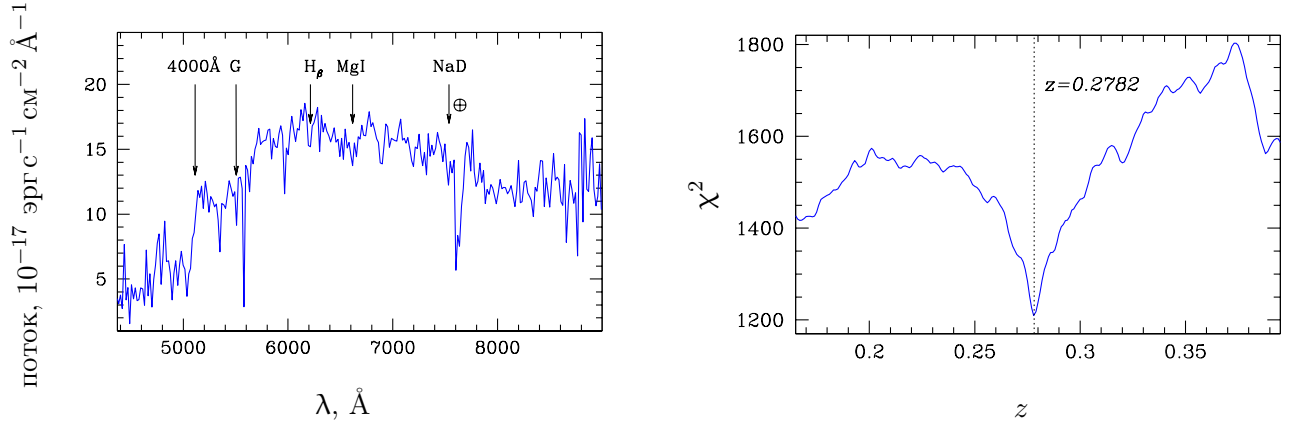


Рисунок 1.29 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений из работы [64]. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

05 00 42.9 – 00 51 57



11 29 12.2 – 07 34 21



16 14 11.5 +62 15 40

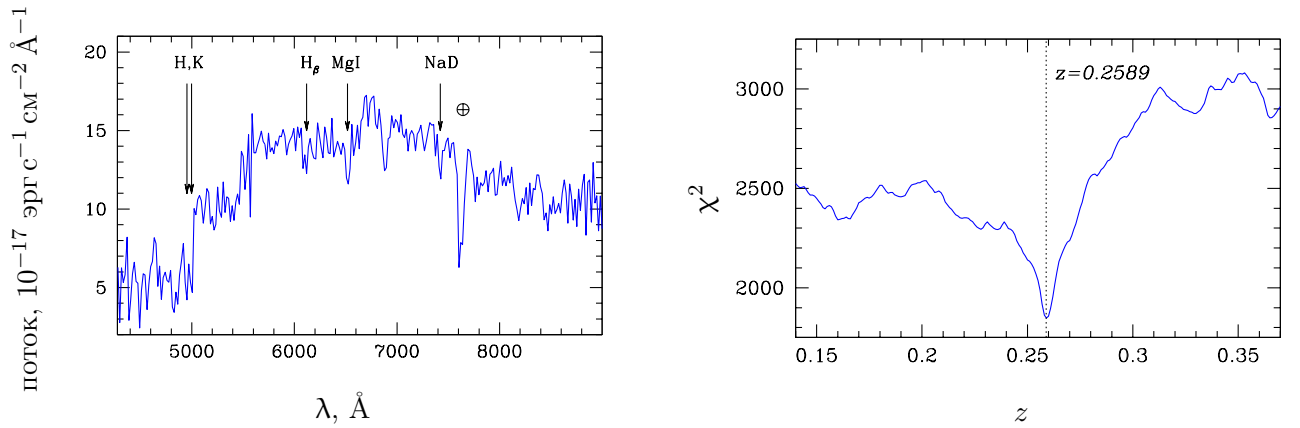


Рисунок 1.30 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений из работы [64]. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.5-м телескопе РТТ-150 при помощи спектрографа *TFOSC*. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

Таблица 8 — Результаты измерений красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога, опубликованные нами в [64; 65]

Координаты (J2000)		N	z	Примечание
α	δ			
00 49 04.4	+39 47 05	2	0.1350	
00 59 57.5	+13 19 55	1	0.4991	PSZ2 G126.07–49.55, RM J005957.6+131955.2
01 11 45.3	+33 25 57	1	0.1182	Abell 0156, RM J011145.3+332557.6
01 22 27.6	+42 22 05	1	0.1844	ZwCl 0119.4+4206
01 44 58.4	–07 09 57	1	0.1909	RM J014458.4–070956.9
02 02 40.1	+01 26 05	2	0.0907	
02 09 35.6	–12 54 56	2	0.2594	
02 17 06.1	+29 51 23	1	0.3636	
02 24 31.6	+24 13 21	1	0.3051	
02 36 33.4	–05 39 06	2	0.3010	*, <i>SDSS</i>
02 37 15.3	+06 38 34	1	0.2729	
03 19 18.4	+02 05 34	1	0.4000	PSZ2 G179.45–43.92
03 33 04.7	–06 51 23	1	0.5691	<i>SDSS</i>
03 33 54.8	–07 23 03	1	0.1950	<i>SDSS</i>
03 39 24.4	–06 16 20	1	0.5484	
04 24 36.5	–05 18 37	1	0.2071	
04 42 11.9	–06 03 32	1	0.3377	
04 51 54.6	+00 06 27	1	0.4418	
05 00 42.9	–00 51 57	1	0.2354	
05 05 15.8	–02 19 10	2	0.2291	
07 21 27.7	+36 44 28	3	0.1494	Abell 0579
07 21 25.1	+43 04 54	1	0.1208	PSZ2 G174.96+23.37
07 22 15.7	+42 47 27	1	0.3788	
07 26 50.0	+31 02 04	1	0.1874	PSZ2 G187.74+20.66
07 41 26.7	+25 58 29	2	0.1571	
07 50 15.7	–08 24 33	1	0.2398	PSZ2 G227.30+09.00
07 59 56.7	+65 12 08	2	0.3636	
08 00 45.0	+65 12 45	1	0.3894	*
08 14 59.8	+66 26 16	3	0.1459	Abell 0629
08 29 55.9	+06 46 30	1	0.3938	<i>SDSS</i>
08 34 41.6	+26 11 11	3	0.4568	RM J083441.2+261109.8, <i>SDSS</i>
08 37 01.5	+10 50 19	1	0.4691	
08 37 31.2	–04 36 03	1	0.3430	
08 39 33.4	–01 40 45	1	0.2692	PSZ2 G227.59+22.98
08 40 20.6	+22 35 11	2	0.2169	ZwCl 0837.4+2245
08 41 02.8	+12 41 54	2	0.4389	RM J084103.4+124204.7
09 01 30.7	–01 39 17	1	0.3167	*, PSZ1 G230.73+27.70 XCC J0901.5–0139 0.316
09 01 44.9	–01 38 22	1	0.2953	*, XCC J0901.7–0138
09 14 42.9	+27 58 56	1	0.4384	
09 35 24.7	+23 55 01	2	0.2635	<i>SDSS</i>
09 40 12.8	+81 04 25	1	0.1910	*
09 42 11.4	+05 35 31	2	0.2182	RM J094210.9+053541.3, <i>SDSS</i>
10 15 47.8	+80 10 54	3	0.2089	
10 19 19.2	–02 08 02	1	0.2174	RM J101919.2–020802.0
10 41 49.9	+32 56 30	1	0.4453	RM J104149.9+325631.9
10 46 29.3	+78 07 38	1	0.2266	PSZ2 G130.64+37.16, Abell 1070
11 25 51.7	+76 52 19	1	0.4738	

Таблица 8 — Продолжение.

Координаты (J2000)		N	z	Примечание
α	δ			
11 29 12.2	−07 34 21	2	0.2775	
11 30 47.8	+72 21 03	1	0.3700	*
11 47 53.0	+73 47 45	1	0.2169	
11 55 05.2	+21 26 26	1	0.1455	<i>SDSS</i>
12 09 19.7	+28 06 11	1	0.4787	RM J120918.3+280610.2, <i>SDSS</i>
12 44 55.3	−04 38 18	1	0.4178	
12 47 37.6	+22 17 51	1	0.4166	
12 51 19.3	+19 55 09	1	0.3312	
13 29 35.5	+41 23 09	1	0.6121	*, <i>SDSS</i>
13 50 15.8	−04 41 52	1	0.2676	
13 59 31.1	−09 00 40	2	0.2751	
14 12 24.0	+20 46 23	2	0.1504	*, <i>SDSS</i>
14 19 17.9	−17 10 55	1	0.2793	PSZ2 G331.10+40.81
16 00 42.3	+57 36 07	2	0.2958	
16 14 11.5	+62 15 40	2	0.2590	
16 14 37.8	+62 41 46	1	0.2557	
16 23 47.5	+06 16 59	1	0.2266	RM J162347.5+061658.6
16 27 29.7	+06 22 57	1	0.3930	
16 29 14.9	+63 14 42	2	0.2557	
16 34 06.6	+63 20 16	1	0.5172	
17 04 44.2	+09 57 00	1	0.2756	
17 10 40.3	+68 44 43	1	0.3335	PSZ2 G099.55+34.23
17 14 26.1	+68 57 30	2	0.6019	
17 34 37.7	+77 50 13	1	0.3229	
18 01 07.4	+39 52 06	4	0.6184	PSZ2 G066.34+26.14
18 34 49.2	+64 06 35	2	0.3488	
18 45 13.2	+64 17 12	1	0.4296	
20 58 43.5	+06 05 28	2	0.1641	
21 03 49.0	+04 35 45	3	0.1701	
21 11 08.2	+07 35 06	1	0.1517	
21 23 26.8	+20 59 41	4	0.3415	
21 45 46.7	+14 03 26	1	0.1908	*, PSZ2 G069.47−29.06, [90]
21 45 53.4	+20 44 14	3	0.2319	
21 52 06.0	+03 16 42	1	0.2577	RM J215200.6+031508.8, <i>SDSS</i>
21 58 29.7	−03 51 21	1	0.4031	RM J215830.0−035115.6
22 37 21.7	+41 15 57	3	0.0564	PSZ2 G097.52−14.89
22 49 06.1	−05 27 09	2	0.2401	PSZ2 G064.11−53.72, RM J224906.4−052710.7
22 59 13.1	+29 41 52	1	0.1193	RM J225913.1+294151.6
23 16 43.7	+12 47 14	1	0.5360	PSZ2 G089.99−43.91, RM J231643.0+124654.6, <i>SDSS</i>
23 20 54.2	−04 34 02	1	0.1888	PSZ2 G075.11−58.83, RM J232054.2−043402.4
23 34 03.6	−03 35 57	2	0.2600	RM J233403.6−033556.1

Примечание. * Обсуждается в этой работе; PSZ2 — объект отождествлен объектом из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка [16]; PSZ1 — объект отождествлен с объектом из первого каталога источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка [15]; Abell — объект отождествлен со скоплением галактик из работы [99]; ZwCl — объект отождествлен со скоплением галактик из серии работ [100]; RM — объект отождествлен со скоплением галактик, из работы [31]; *SDSS* — значения спектроскопического красного смещения согласуется с данными Слоановского обзора [60];

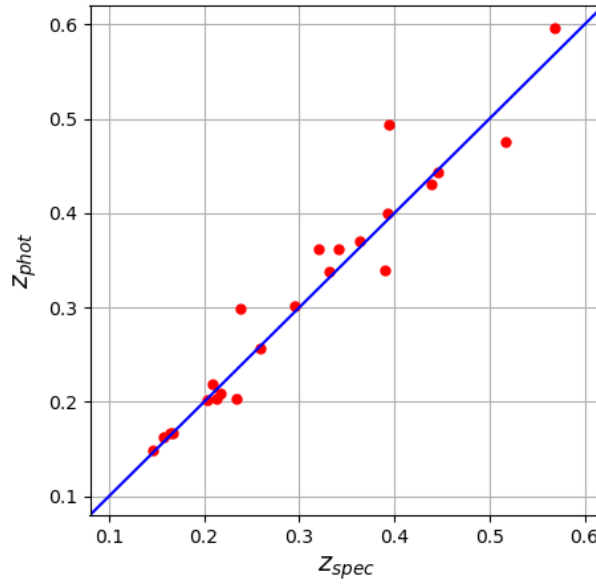


Рисунок 1.31 — Диаграмма сравнения фотометрических оценок красных смещений скоплений галактик из расширенного каталога Планка (по вертикали) со спектроскопическими красными смещениями, полученными в работе [65] (по горизонтали).

1.6.3 Замечания по отдельным объектам

02 37 – 05 39. Для одной галактики, входящей в это скопление, измерено спектроскопическое красное смещение в Слоановском обзоре $z = 0.3058$. Эта галактика находится на угловом расстоянии $2.3'$ от cD -галактики, что на красном смещении $z = 0.301$ эквивалентно расстоянию более 600 кпк ($H_0 = 69.6$ км/с/Мпк, $\Omega_M = 0.286$). В каталоге *WHL* для этого скопления галактик приведено значение спектроскопического красного смещения по одной галактике из Слоановского обзора. Для данного скопления галактик на телескопе АЗТ-ЗЗИК было получено значение $z = 0.3050$ спектроскопического красного смещения cD -галактики. Это значение согласуется с данными красного смещения по Слоановскому обзору, но является более надежным, так как оно измерено по спектру cD -галактики.

03 34 – 07 23. Для четырех галактик, входящих в это скопление, значения спектроскопических красных смещений даны в Слоановском обзоре. Для

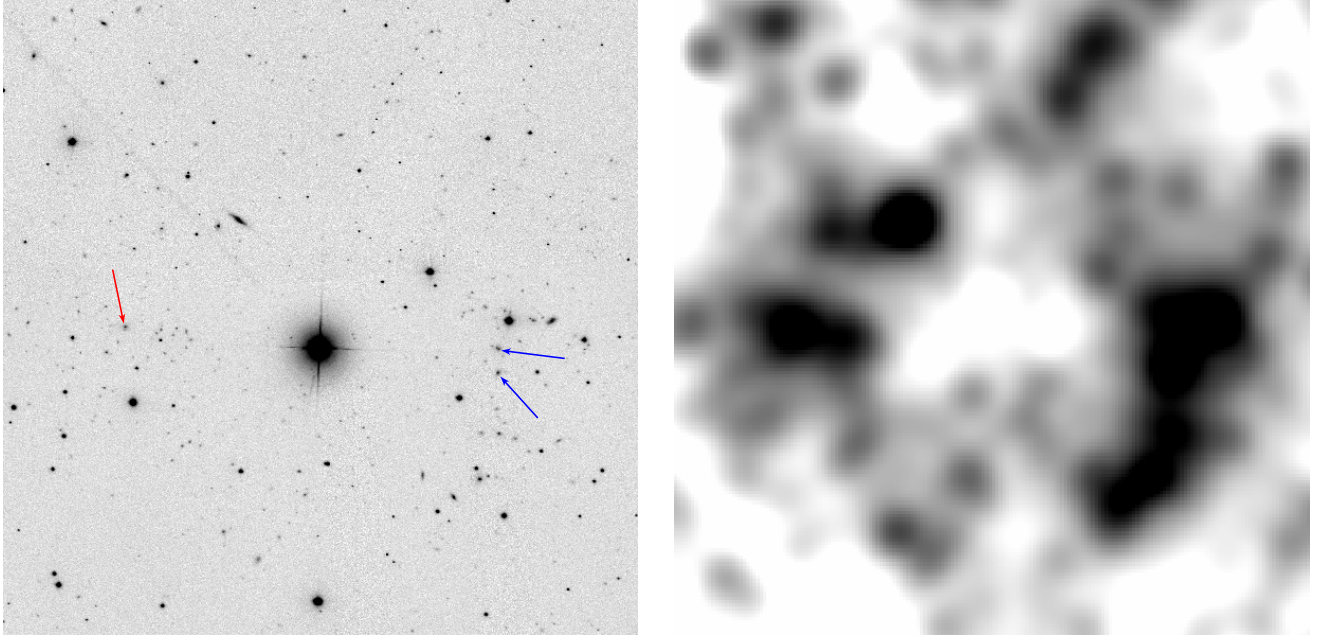


Рисунок 1.32 — Изображения поля источника Сюняева–Зельдовича с координатами $08\ 00\ 31.1\ +65\ 13\ 22$. Слева: изображения Слоановского обзора в фильтре i . Справа: изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом $24''$. Синими стрелочками указаны галактики, для которых были измерены спектроскопические красные смещения в работе [64]. Красной стрелочкой обозначена cD -галактика, для которой мы измерили спектроскопическое красное смещение в этой работе.

cD -галактики скопления нет измеренного значения спектроскопического красного смещения. Поэтому получен спектр cD -галактики скопления и измерено ее спектроскопическое красное смещение, которое согласуется с измерением в Слоановском обзоре. Красное смещение скопления галактик приняли равным красному смещению cD -галактики, исходя из предположения, что при малом количестве галактик с известными красными смещениями измерение cD -галактики, скорее всего, лучше соответствует красному смещению скопления, чем среднее значение по нескольким галактикам.

$07\ 50\ -08\ 24$. Это скопление галактик PSZ2 G227.30+09.00 из каталога *PSZ2*. Получен спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{spec} = 0.2398$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{phot} = 0.24 \pm 0.03$ из работы [97].

08 00 +65 12. В работе [64] были опубликованы результаты измерения спектроскопического красного смещения $z = 0.3636$ для скопления галактик с координатами оптического центра 07 59 56.7 +65 12 08. В поле этого источника Сюняева–Зельдовича обнаружена еще одна область превышения ИК-яркости с координатами центра 08 00 45.0 +65 12 45, которая может быть отождествлена со скоплением галактик. Эти скопления галактик находятся на угловом расстоянии около $5'$ друг относительно друга (рис. 1.32) и, скорее всего, дают сравнимый вклад в сигнал Сюняева–Зельдовича, который наблюдается в обзоре обсерватории им. Планка.

Были проведены спектроскопические наблюдения cD -галактики этого скопления на телескопе АЗТ-33ИК с использованием решетки VPHG600G на спектрографе АДАМ. Спектроскопическое красное смещение этой галактики оказалось равным $z = 0.3894$. Скорость удаления этого скопления более чем на 5000 км/с превышает скорость удаления скопления галактик с координатами 08 00 45.0 +65 12 45. Поэтому эти скопления, скорее всего, не являются гравитационно связанными.

09 02 – 01 41. Скопление галактик входит в каталоги *PSZ1* и *PSZ2* под названием G230.73 + 27.70. В поле этого источника Сюняева–Зельдовича обнаружены три области превышения ИК-яркости по данным *WISE*. Они были отождествлены со скоплениями галактик, в центрах которых находятся яркие cD -галактики. В радиусе $2'$ от каждой cD -галактики были отобраны фотометрические данные всех протяженных источников из обзора *Pan-STARRS1*. На диаграмме цвет–величина для каждого набора данных выделена красная последовательность галактик. Оказалось, что показатели цвета красных последовательностей для этих трех областей слабо отличаются.

На рис. 1.33 стрелочками указаны три галактики, для которых были получены спектроскопические изображения на телескопе РТТ-150. На рис. 1.34 показано изображение поля объекта в полосе 3.4 мкм обзора *WISE*, очищенное от звезд и сглаженное. Все три скопления галактик, которые содержат эти cD -галактики, приведены в работе [101]. Скопление галактик, отождествляемое с источником Сюняева–Зельдовича PSZ1 G230.73+27.70, отождествлено со скоплением ХСС J0901.5 – 0139. По данным этой работы, скопление обладает вириальной массой $M_{200} = (5.194 \pm 0.353) \times 10^{14} M_{\odot}$, определенной по наблюдениям в рентгеновском диапазоне по данным телескопа *XMM-Newton*.

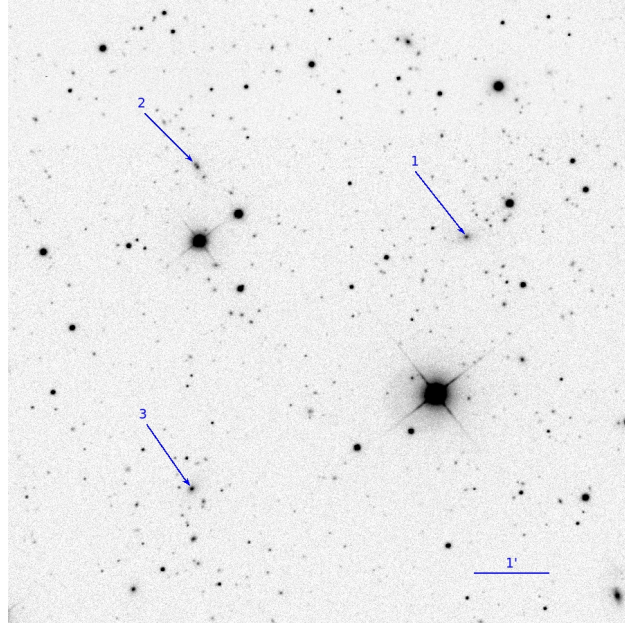


Рисунок 1.33 — Изображение поля объекта 09 01.5–01 41 в фильтре r , взятое из Слоановского обзора. Стрелочками обозначены cD -галактики, для которых были получены спектроскопические изображения на телескопе РТТ-150.

Оценка массы скопления, приведенная в каталоге *PSZ2* по измерению эффекта Сюняева–Зельдовича, составляет $M_{200} = 4.96 \pm 0.57 \times 10^{14} M_{\odot}$, что в пределах погрешности совпадает с вириальной массой скопления по данным *ХММ-Newton*. Два других скопления были также отождествлены со скоплениями галактик из каталога *CFHTLS*. Подробнее полученные результаты представлены в сравнении с каталогом *CFHTLS* в таблице 9.

Таблица 9 — Скопления галактик в поле источника Сюняева–Зельдовича 09 01.5 – 01 41.

№	Название	Координаты (J2000)		z_{RTT150}	z_{CFHTLS}	$M_{200}, 10^{14} M_{\odot}$
		α	δ			
1	ХСС J0901.5–0139	09 01 30.7	–01 39 17.4	0.3167	0.3163	5.194 ± 0.353
2	ХСС J0901.7–0138	09 01 44.9	–01 38 21.2	0.2953	—	1.426 ± 0.264
3	ХСС J0901.8–0143	09 01 45.2	–01 42 36.8	—	—	1.306 ± 0.223

Обзор 170 кв. градусов *CFHTLS* был получен на оптическом телескопе Канады–Франции–Гавайи (*CFHT*) и на рентгеновском телескопе *ХММ-Newton*. Для скопления ХСС J0901.5 – 0139 из этого обзора получены спектральные

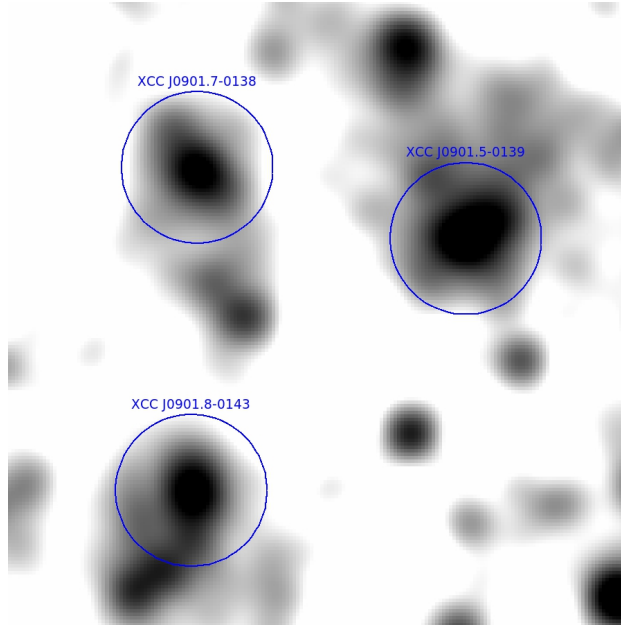


Рисунок 1.34 — Изображение поля объекта 09 01.5 – 01 41 в полосе $3.4 \mu m$ обзора *WISE*, очищенное от звезд и сглаженное β -моделью радиусом $24''$. Синими окружностями радиусом $1'$ выделены скопления галактик из каталога *CFHTLS*, центры окружностей совпадают с оптическими центрами скоплений.

изображения на телескопе РТТ-150 и измерено спектроскопическое красное смещение, которое равно $z = 0.3167$.

Данные спектроскопического красного смещения $z = 0.3163$ *cD*-галактики скопления согласуются с данными телескопа *CFHT*. Измеренное спектроскопическое красное смещение $z = 0.295$ скопления галактик XCC J0901.7 – 0138 согласуется с фотометрическими красными смещениями, взятыми из данным Слоановского обзора. Спектроскопическое красное смещение для этого скопления было получено впервые. Спектроскопические изображения третьего скопления XCC J0901.8 – 0143 неудовлетворительного качества, поэтому не было получено для этого скопления значение спектроскопического красного смещения.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что в поле источника Сюняева–Зельдовича 09 02 – 01 22, отождествляемого с источником PSZ1 G230.73+27.70 [15], содержатся три скопления галактик, расположенных на близких красных смещениях. На красном смещении $z = 0.316$ находится более массивное скопление, которое отождествляется с самим источником, на

красном смещении $z = 0.295$ – менее массивное и еще одно скопление галактик с сравнимой массой и фотометрическим красным смещением. Наблюдения третьего скопления ХСС J0901.8–0143 будут продолжены на телескопах АЗТ-ЗЗИК и РТТ-150.

09 35 +23 55. Для двух галактик этого скопления спектроскопические красные смещения приведены в Слоановском обзоре. Это скопление галактик было отождествлено со скоплением WHL J093526.1+235455 в каталоге WHL из работы [33]. В этом каталоге красное смещение этого скопления рассчитано как среднее значение между спектроскопическими красными смещениями этих галактик и равняется величине $z = 0.2630$. Однако эти галактики не являются *cD*-галактиками скопления, кроме того, одна из галактик находится на угловом расстоянии порядка $110''$ от центра оптической яркости, найденного по данным обзора *WISE*. Поэтому было решено измерить спектроскопическое красное смещение двух наиболее ярких галактик, расположенных в центре скопления.

09 40 +81 04. В поле источника Сюняева–Зельдовича находится скопление галактик ABELL 0798. Также обнаружены две области повышенной инфракрасной яркости, которые мы отождествили со скоплениями галактик. В пределах обеих областей найдены галактики красных последовательностей. Их фотометрические оценки красных смещений совпадают в пределах погрешности. Мы измерили спектроскопическое красное смещение для *cD*-галактики одного из скопления, которое обладает большей яркостью в ИК-диапазоне.

11 31 +72 21. В поле источника Сюняева–Зельдовича обнаружены две группы галактик, которые отождествлены с двумя ИК-источниками. Эти группы галактик можно найти в каталоге скоплений WHL под названиями WHL J113047.7+722103 и WHL J113124.0+721844. Для скопления WHL J113047.7+722103 было измерено спектроскопическое красное смещение *cD*-галактики $z = 0.3700$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z = 0.3347$ из каталога WHL.

Скопление галактик WHL J113124.0+721844 расположено ближе к центру источника Сюняева–Зельдовича и обладает большим значением ИК-яркости. В свою очередь, скопление галактик WHL J113047.7+722103 имеет большее значение красного смещения. Если сравнить светимость обоих скоплений

в ИК-диапазоне, то скопление WHL J113047.7 + 722103 обладает большей ИК-светимостью, следовательно, оно более массивное. Поэтому скопление из расширенного каталога Планка отождествлено со скоплением галактик WHL J113047.7 + 722103 из каталога WHL. Однако, оба скопления галактик вносят вклад в эффект Сюняева–Зельдовича.

11 55 +21 26. Для одной галактики, входящей в скопление, спектроскопическое красное смещение $z = 0.14604$ получено в Слоановском обзоре, выпуск 7. Эта галактика не является cD -галактикой скопления. Поэтому было принято решение получить спектроскопические изображения cD -галактики скопления на телескопе АЗТ-ЗЗИК, чтобы более точно измерить спектроскопическое красное смещение скопления. Полученный результат $z = 0.1455$ спектроскопического красного смещения cD -галактики скопления согласуется со спектроскопическим красным смещением $z = 0.14604$ галактики из Слоановского обзора.

13 30 +41 23. Для нескольких галактик этого скопления в Слоановском обзоре измерены спектроскопические красные смещения, но не для наиболее яркой галактики. Поэтому было измерено спектроскопическое красное смещение наиболее яркой галактики. В табл. 8 приведено среднее значение красного смещения наиболее яркой галактики, для которой измерение красного смещения не приведено в Слоановском обзоре.

14 12 +20 46. Для одной галактики, входящей в скопление, спектроскопическое красное смещение $z = 0.14877$ получено в Слоановском обзоре, выпуск 7. Эта галактика не является cD -галактикой скопления. Поэтому было принято решение получить спектроскопические изображения cD -галактики скопления на телескопе АЗТ-ЗЗИК, чтобы более точно измерить спектроскопическое красное смещение скопления. Полученный результат $z = 0.1504$ спектроскопического красного смещения cD -галактики скопления согласуется со спектроскопическим красным смещением $z = 0.14877$ галактики из Слоановского обзора.

Также в поле источника находится скопление галактик RM J141239.7 + 204802.5 на красном смещении $z = 0.3735$. Так как в Слоановском обзоре уже приведены спектроскопические измерения красных смещений для двух галактик скопления, поэтому наблюдение этого скопления галактик не проводилось.

16 27 +06 22. В радиусе $6'$ от источника Сюняева–Зельдовича находятся две области повышенной яркости в ИК-диапазоне, которые были отождествлены с двумя скоплениями галактик. Для скопления галактик, которое имеет наибольшую яркость в полосе 3.4 мкм, получено спектроскопическое красное смещение наиболее яркой галактики. Полученное на АЗТ-3ЗИК значение $z_{spec} = 0.3930$ согласуется с данными фотометрической оценки красного смещения из расширенного каталога Планка.

17 10 +68 44. Это скопление галактик PSZ2 G099.55+34.23 из каталога *PSZ2*. В поле этого скопления галактик получен спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{spec} = 0.3335$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{phot} = 0.31 \pm 0.03$ из работы [97].

18 01+39 52. Это скопление галактик PSZ2 G066.34+26.14 из каталога *PSZ2*. Для этого скопления были получены спектры четырех галактик на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Спектроскопическое красное смещение этого скопления галактик было принято равным среднему значению красных смещений этих четырех галактик: $z_{spec} = 0.6184$. Эта величина согласуется со значением $z_{spec} = 0.622$ из работы [97]. Более того, полученное красное смещение наиболее яркой галактики скопления $z_{spec} = 0.6174$ также хорошо согласуется со значением красного смещения для наиболее яркой галактики $z_{spec,BCG} = 0.6167$ из работы [97].

21 46 +14 03. Это скопление PSZ2 G069.47–29.06 из каталога *PSZ2*. В поле этого источника находятся два скопления галактик. Спектроскопическое красное смещение более массивного скопления галактик, отождествленного с источником Сюняева–Зельдовича, приведено в работе [90] $z = 0.393$. В этой работе также указано наличие второго скопления, для которого приведено значение спектроскопического красного смещения $z = 0.19$. Второе скопление галактик содержится в расширенном каталоге Планка. Для *sD*-галактики этого скопления на телескопе АЗТ-3ЗИК было измерено значение спектроскопического красного смещения $z = 0.191$, что хорошо согласуется с данными из работы [90].

1.7 Заключение

В этой главе представлены результаты спектроскопических измерений 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 Планка, не входящих в каталог *PSZ2*. В результате нашей 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. Нами было опубликовано четыре статьи, в которых представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений выборки 133 скоплений галактик из обзора Планка [62–65]. Представленная выборка скоплений галактик содержит наиболее массивные скопления в наблюдаемой части Вселенной, массы которых на красных смещениях выше $z \approx 0.5$ превышают $M_{500Z} \approx \times 10^{14} M_{\odot}$.

Наибольшая ценность проделанной работы по измерению красных смещений далеких скоплений галактик из обзора Планка состоит в том, что удалось примерно удвоить выборку далеких массивных скоплений на красных смещениях $z > 0.7$. Также была получена зависимость медианных цветов $i - z$ наиболее ярких галактик в скоплениях от красных смещений. Для калибровки этого соотношения были использованы полученные нами спектроскопические 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 *СПГ/eROSITA*.

Глава 2. Измерение красных смещений скоплений галактик из обзора *СПГ/eROSITA*

2.1 Введение

Космическая обсерватория *СПГ* была запущена 13 июля 2019 года с космодрома Байконур. 21 октября 2019 года обсерватория достигла окрестности точки Лагранжа L_2 и была выведена на гало-орбиту вокруг этой точки. В течение некоторого времени после выведения на гало-орбиту проводились калибровочные наблюдения и наблюдения в рамках программы подтверждения характеристик телескопов обсерватории. Так, в ноябре 2019 года были проведены наблюдения поля Локмана телескопом *eROSITA*, в ходе которого было обнаружено около 200 скоплений галактик. Поле Локмана имеет довольно хорошее спектроскопическое покрытие в Слоановском обзоре [60], основную сложность здесь представляют измерения красных смещений скоплений на $z > 0.5$. Нашей группой была организована программа оптического отождествления и измерения красных смещений скоплений галактик в поле Локмана. Были измерены спектроскопические красные смещения 11 массивных скоплений галактик [102], результаты измерений приведены в разделе 2.2.

В декабре 2019 года начался первый из восьми запланированных обзоров всего неба, который продлился 6 месяцев и закончился 12 июня 2020 года. К настоящему моменту телескопом *eROSITA* было проведено четыре полных обзора всего неба и один частичный. Во время проведения первого обзора всего неба, нашей научной группой выполнялась работа по измерениям спектроскопических красных смещений массивных скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка [65], коротая продолжалась вплоть до начала наблюдений скоплений галактик из обзора всего неба *СПГ/eROSITA*. В разделе 2.3 показаны примеры обнаружения скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка в обзоре всего неба *СПГ/eROSITA*.

После завершения первого обзора всего неба *СПГ/eROSITA* наша научная группа отобрала кандидаты в наиболее массивные скопления галактик с неизмеренными красными смещениями и в июне 2020 года начала их наблю-

дения на оптических телескопах. К концу 2023 года были измерены красные смещения 216 наиболее массивных скоплений галактик [74; 103; 104]. Результаты представлены в разделе 2.4.

2.2 Измерение красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана СРГ/*eROSITA*

Поле Локмана («дыра Локмана») представляет собой область с наименьшей колонкой нейтрального водорода [105; 106]. В этой области наблюдается колонковая плотность нейтрального водорода $N_H = 5.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$ [107], что позволяет с большей чувствительностью наблюдать в рентгеновском диапазоне слабые источники, такие как квазары или скопления галактик [107–110]. Наблюдение поля Локмана с помощью телескопа *eROSITA* было выполнено в ноябре 2019 г. в рамках программы подтверждения характеристик телескопов обсерватории. В результате этих наблюдений был получен обзор области площадью около 20 кв. градусов. Среднее значение экспозиции в каждой точке составило около 8 ксек или около 4.8 ксек с поправкой на виньетирование. Такой обзор поля Локмана, хотя и является менее глубоким по сравнению с обзорами телескопов Чандра и *XMM-Newton*, покрывает значительно большую площадь на небе, что, в частности, позволяет обнаружить в этой области неба значительно большее число скоплений галактик по сравнению с обзорами телескопов Чандра и *XMM-Newton*.

2.2.1 Отбор скоплений галактик

Всего в обзоре поля Локмана СРГ/*eROSITA* было обнаружено около 200 протяженных рентгеновских источников, отождествленных со скоплениями галактик. Здесь мы отметим, что поскольку поле Локмана имеет довольно хорошее спектроскопическое покрытие в Слоановском обзоре [60], красные смещения скоплений уже доступны вплоть до $z \approx 0.5$. Основную сложность здесь представляют измерения красных смещений более далеких скоплений. Таких

скоплений в выборке оказывается всего несколько десятков и поэтому имеется возможность получить спектроскопические измерения красных смещений для всей выборки за относительно небольшое время. Это позволит в дальнейшем получить надежные измерения рентгеновской функции светимости и функции масс скоплений галактик на высоких красных смещениях по данным этого обзора.

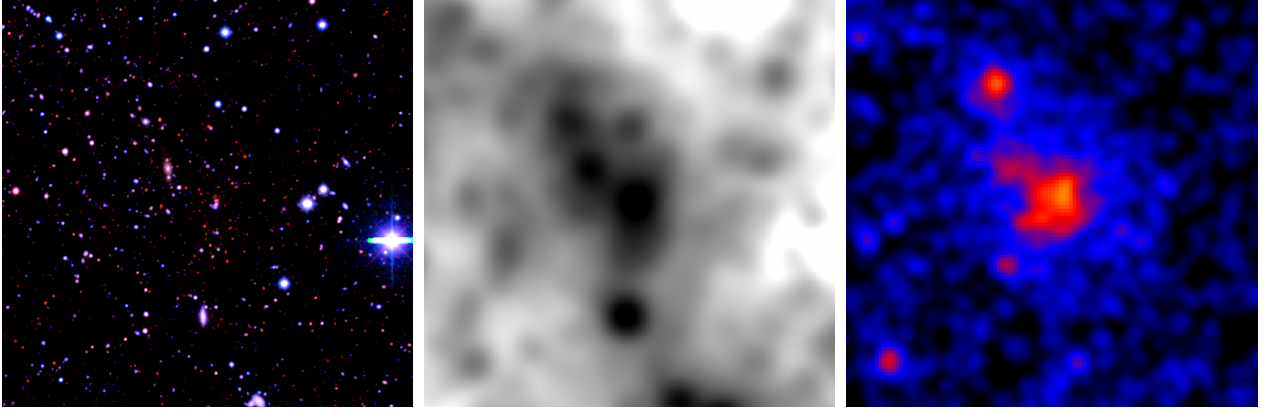
Отбор объектов проводился среди протяженных источников рентгеновского излучения обзора поля Локмана *CPG/eROSITA*. Примеры изображений этих источников для далеких скоплений галактик приведены на рисунке 2.1. Отбор объектов для последующих наблюдений проходил по стандартным процедурам, описанным в главе 1.

2.2.2 Результаты наблюдений

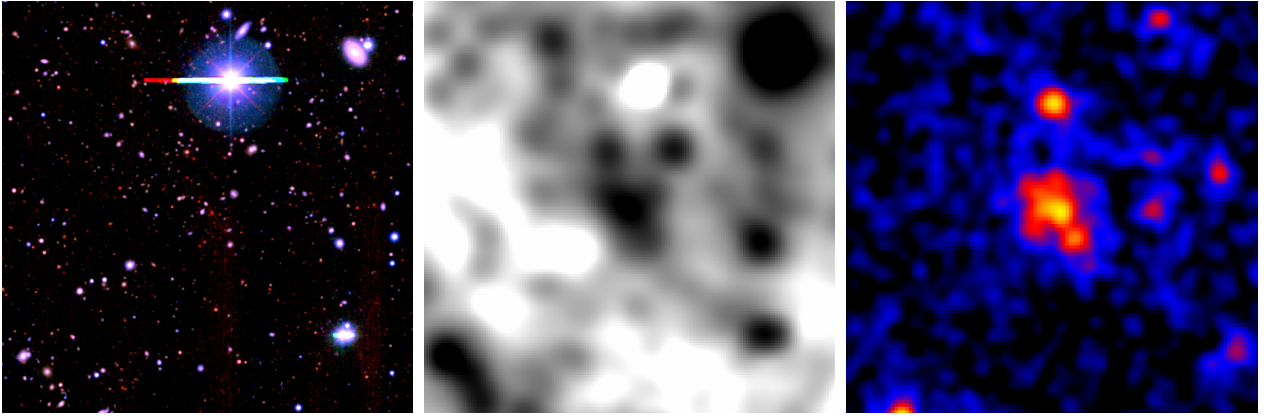
В декабре 2019 г. и первой половине 2020 г. начата программа спектроскопических наблюдений скоплений галактик из обзора поля Локмана *CPG/eROSITA* на телескопах БТА и АЗТ-3ЗИК. В этом разделе приведены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 11 скоплений галактик. Спектры наиболее ярких галактик трех наиболее удаленных скоплений, для которых мы получили спектры на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*, представлены на рисунке 2.2.

В таблице 10 приведены результаты спектроскопических наблюдений скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба *CPG/eROSITA*. В первом и втором столбце указаны координаты (α , δ) оптических центров скоплений галактик, определенных по данным изображений *WISE* и *DESI LIS*. В третьем столбце указано количество галактик, для которых были получены спектры. В четвертом столбце приведено значение красного смещение, измеренное как среднее значение красного смещения галактик за исключением некоторых скоплений галактик, что описано конкретно по каждому такому объекту отдельно в нашей работе. В пятом столбце указан телескоп, на котором проводились наблюдения. В шестом столбце приведены замечания по отдельным объектам. Оптическое отождествление, наблюдения, обработка и анализ результатов этих

10 40 +58 54, $z = 0.8236$



10 43 +55 08, $z = 0.9786$



10 43 +58 27, $z = 0.9345$

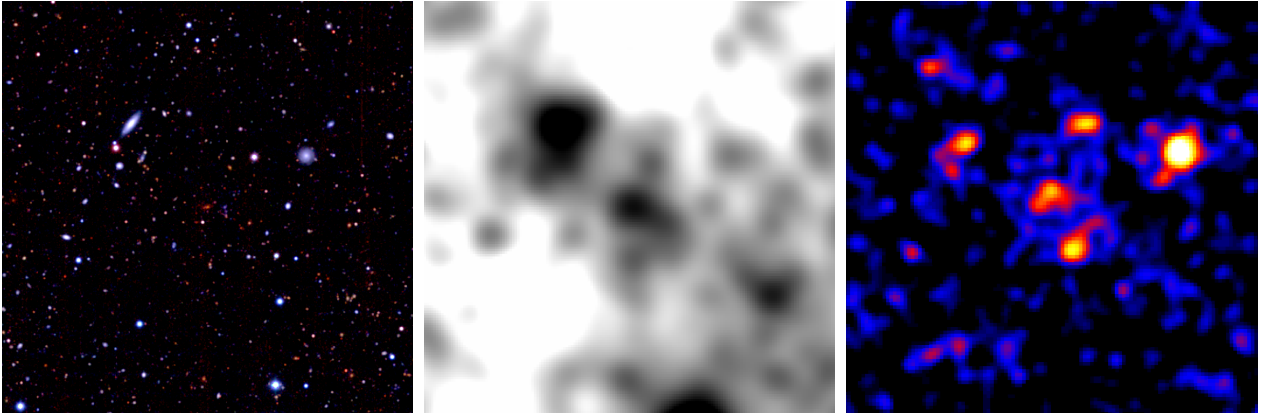


Рисунок 2.1 — Слева: псевдоцветные изображения обзора *DESI LIS* полей скоплений галактик в фильтрах *zrg* (*RGB*), в центре: изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом $24''$, справа: рентгеновское изображение обзора CPT/*eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом $12''$. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений. Размер поля $7.5' \times 7.5'$

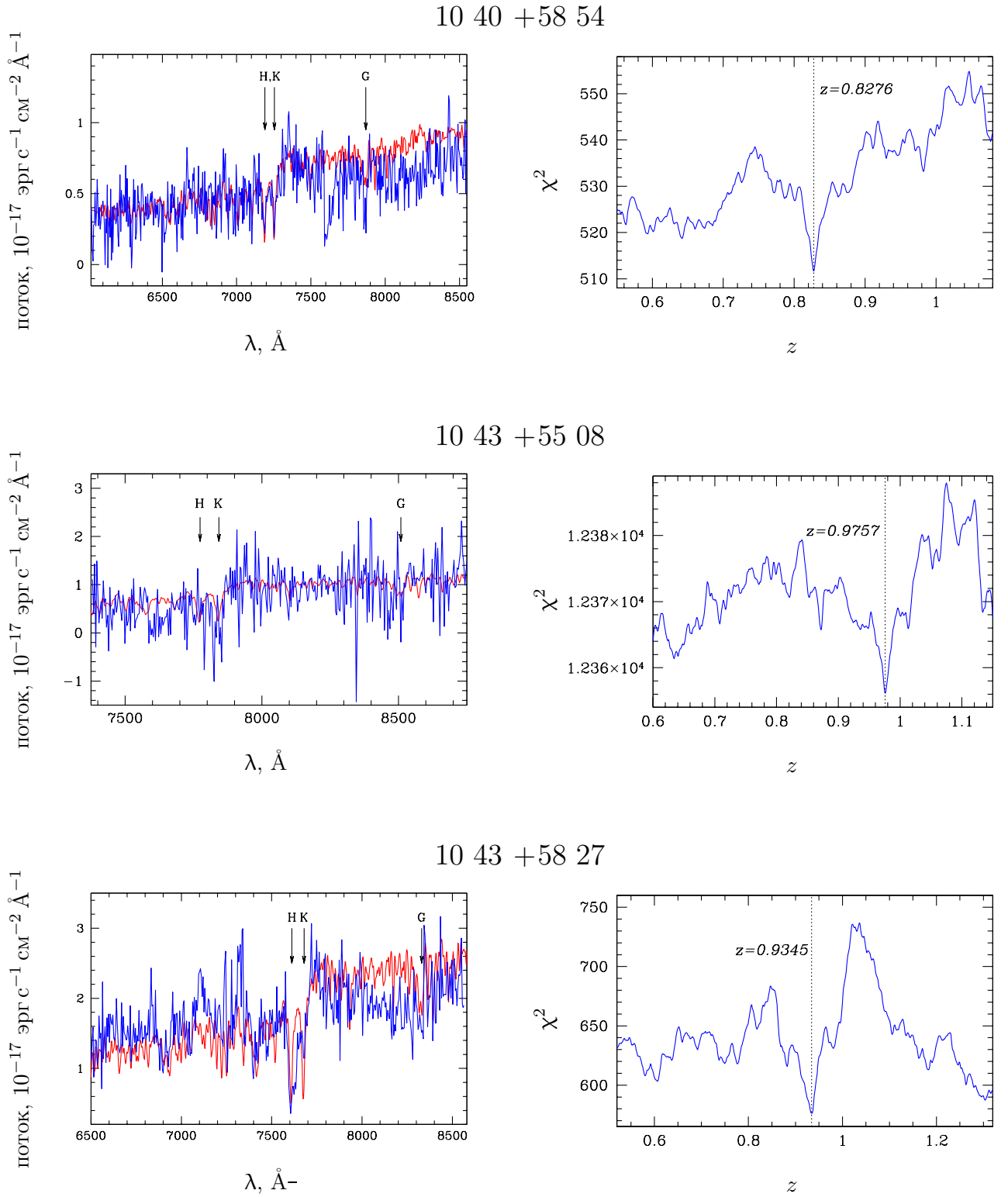


Рисунок 2.2 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений далеких скоплений из поля Локмана. Слева: спектры ярчайших галактик скоплений с указанием некоторых спектральных особенностей, полученные на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа *SCORPIO-2*. Синей линией обозначен спектр галактики, полученный нами. Красной линией обозначен шаблон спектра сравнения. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

Таблица 10 — Скопления галактик из поля Локмана

Координаты (J2000)		N_{gal}	z	Телескоп	Замечания
α	δ				
10 34 58.6	+59 05 23	1	0.7295	БТА	
10 35 14.8	+59 56 25	1	0.5561	БТА	*, <i>SDSS</i> , WHL
10 35 49.4	+55 27 59	1	0.1460	АЗТ-ЗЗИК	<i>SDSS</i>
10 39 47.3	+58 54 17	3	0.8236	БТА	*, XMM
10 40 30.0	+55 39 46	2	0.3105	АЗТ-ЗЗИК	WHL
10 40 54.4	+59 18 15	1	0.5271	АЗТ-ЗЗИК	
10 42 47.7	+55 08 03	2	0.9786	БТА	*
10 43 04.8	+58 27 01	3	0.9345	БТА	
10 46 21.0	+54 59 00	2	0.3836	АЗТ-ЗЗИК	<i>SDSS</i>
10 57 53.0	+57 43 50	2	0.3541	АЗТ-ЗЗИК	XMM
10 58 09.7	+59 22 39	2	0.6426	БТА	<i>SDSS</i>

Примечание. * Обсуждается в этой работе; *SDSS* — значения спектроскопического красного смещения согласуются с данными Слоановского обзора [27]; WHL — объект отождествлен со скоплением галактик из работы [33]; XMM — объект отождествлен с рентгеновским источником, обнаруженным космической обсерваторией XMM-Ньютон [111];

скоплений галактик проходило в полном соответствии методике, описанной в главе 1.

В этой таблице представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 11 скоплений галактик, из которых четыре имеют красные смещения $0.7 < z < 1.0$. Для шести скоплений галактик на красных смещениях $0.55 < z < 1.0$ спектры получены на 6-м телескопе БТА, еще для пяти скоплений галактик на красных смещениях $z < 0.65$ были получены на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК. Для всех этих скоплений галактик спектроскопические красные смещения публикуются впервые.

Полученные спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик 10 35 +59 56, 10 36 +55 28, 10 46 +54 59, 10 58 +57 30 согласуются с измерениями Слоановского обзора для некоторых галактик в поле скопления. Однако галактики, спектры которых были измерены в Слоановском обзоре, значительно удалены от областей локализации протяженных рентгеновских источников, отождествляемых со скоплениями галактик (см. обсуждение скопления 10 35 +59 56 ниже). Для этих скоплений мы получили спектры

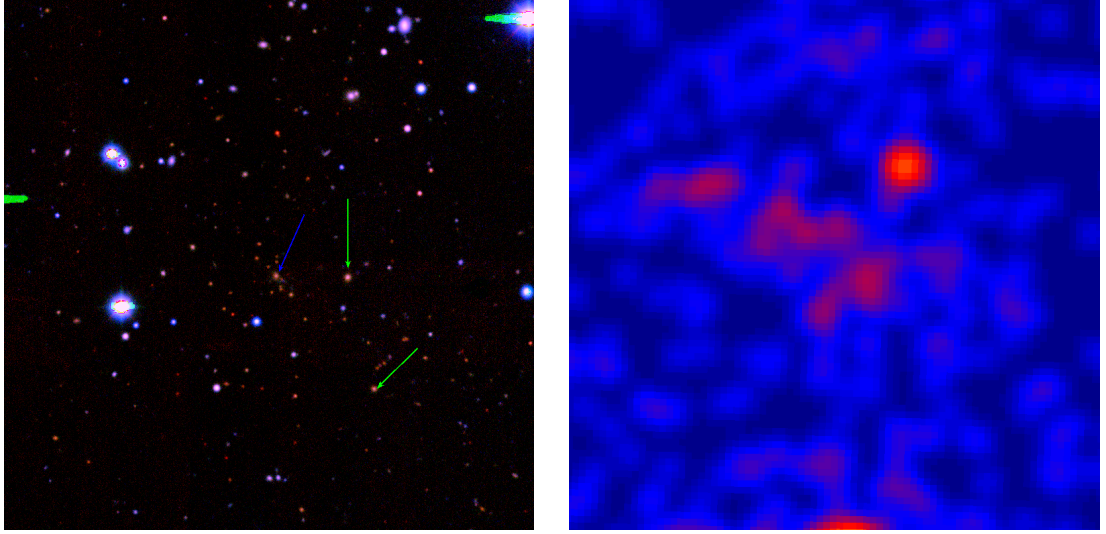


Рисунок 2.3 — Слева: Псевдоцветные изображения поля скопления 10 35 +59 56 из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg* (*RGB*). Синей стрелочкой обозначена галактика, для которой мы получили спектр на БТА. Зелеными стрелочками обозначены объекты, спектры которых получены в Слоановском обзоре. Справа: Рентгеновское изображение поля скопления 10 35 +59 56 из обзора *CPG/eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом $12''$.

ярчайших галактик красных последовательностей, расположенных в центральных областях локализации протяженных рентгеновских источников.

2.2.3 Замечания по отдельным объектам

10 35 +59 56. Для одной галактики из поля этого скопления получен спектр на телескопе БТА и измерено красное смещение, которое оказалось равным $z = 0.5561$. Ее красное смещение согласуется с красным смещением скопления *WHL J103514.3+595619* $z = 0.5543$ из каталога *WHL* [33]. Спектроскопическое красное смещение этого скопления, очевидно, определено по двум галактикам *WISEA J103506.37+595510.5* $z = 0.55631 \pm 0.00022$, *WISEA J103508.47+595617.7* $z = 0.55220 \pm 0.00011$, красное смещение которых измерено в Слоановском обзоре [27]. На рисунке 2.3 показано изображения поля скопления в оптическом диапазоне.

Галактика, для которой получен спектр на телескопе БТА, обозначена синей стрелочкой. Эта галактика расположена ближе к области локализации рентгеновского источника, изображенного на рисунке 2.3. К тому же около этой галактики находится большое количество галактик с близкими показателями цвета. Поэтому измерение красного смещения этой галактики позволяет получить гораздо более надежное измерение красного смещения скопления 10 35 + 59 56.

10 40 + 58 54. Это скопление галактик на красном смещении $z = 0.8236$, спектр которого был получен на телескопе БТА. Красное смещение этого скопления галактик было получено по трем галактикам. На рисунке 2.1 представлены изображения поля этого скопления в оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазоне.

На рентгеновском изображении обзора *СРГ/eROSITA* виден тусклый протяженный источник, находящийся слева вверху от источника скопления 10 40 + 58 54. Источник можно отождествить с областью превышения ИК-яркости на изображении *WISE* по центру, который соответствует группе галактик на оптическом изображении обзора *DESI LIS*. В центре области повышенной ИК-яркости находится галактика $\text{WISEA J103953.02+585453.6} = \text{SDSS J103953.03+585453.1}$ (см. рис. 2.4), которая является наиболее яркой галактикой. Для этой галактики было получено спектроскопическое красное смещение в Слоановском обзоре неба $z = 0.35126 \pm 0.00021$, [27]. Кроме того, эта галактика находится в центре области повышенной ИК-яркости.

Исходя из этого есть предположение, что рядом со скоплением галактик 10 40 + 58 54 расположено скопление галактик переднего плана значительно меньшей массы на красном смещении $z = 0.3513$.

Отметим, что вблизи центра области локализации протяженного рентгеновского источника находится галактика с активным галактическим ядром на красном смещении $z = 1.37793 \pm 0.00006$, обнаруженная в Слоановском обзоре неба, выпуск 16 [27]. На рисунке 2.4 зеленой окружностью обозначены ее координаты по данным Слоановского обзора. Эта галактика может излучать в рентгеновском диапазоне, что может увеличивать поток от протяженного источника, к тому же она может линзироваться скоплением галактик.

Для оценки величины усиления вследствие линзирования на скоплении галактик предположим, что плотность в скоплении распределена по закону На-

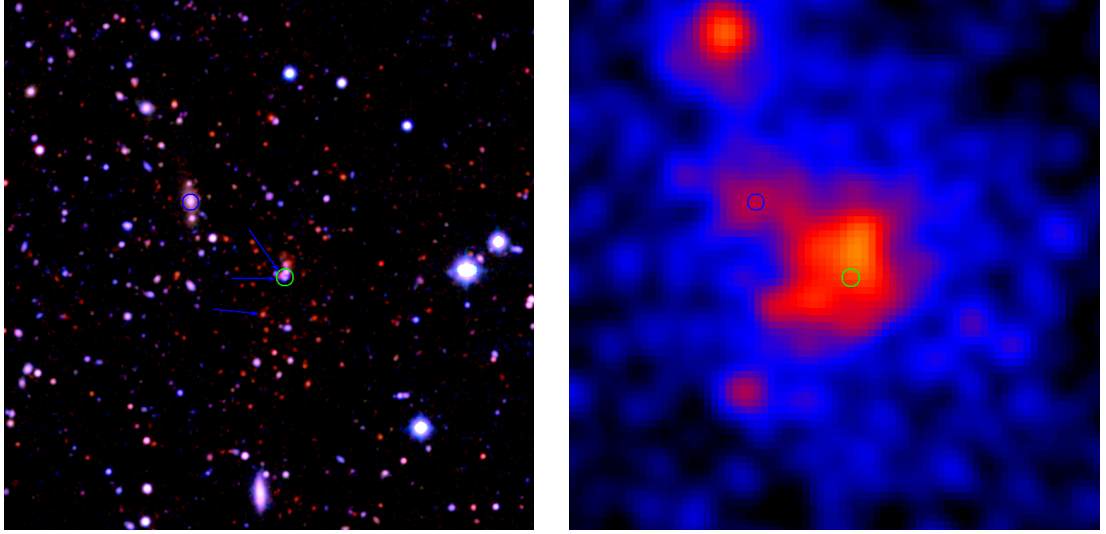


Рисунок 2.4 — Слева: Псевдоцветные изображения поля скопления 10 40 +58 54 из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg* (*RGB*). Справа: рентгеновское изображение поля скопления из обзора *CPT/eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом $12''$. Стрелочками обозначены галактики скопления, для которых были получены спектры на телескопе БТА. Центр синей окружности совпадает с координатами объекта SDSS J103953.03+585453.1. Центр зеленой окружности совпадает с координатами галактики с активным ядром на красном смещении $z = 1.37793$. Радиус окружностей $5''$.

варро-Френка-Уайта [112]. Полную массу скопления оценим из соотношения между рентгеновской светимостью и массой [2; 113], параметр концентрации — из соотношения между параметром концентрации темного гало и массой [114]. Центр скопления зафиксируем на значениях, приведенных в таблице 10. Тогда квазар, расположенный за скоплением на $z = 1.37793$, оказывается усиленным в несколько раз. Отметим, что значение усиления в значительной степени зависит от плотности распределения вещества в линзе и от взаимного расположения центра скопления и квазара.

10 43 +55 08. В поле источника 10 43 +55 08 на угловом расстоянии $1.3'$ находится галактика SDSS J104241.96 + 550907.3 (см. рис. 2.5) с измеренным в Слоановском обзоре [27] спектроскопическим красным смещением $z = 0.28685 \pm 0.00005$, отождествленная так же с галактикой WISE J104241.86+550907.8. В каталоге WHL эта галактика включена в скопление галактик

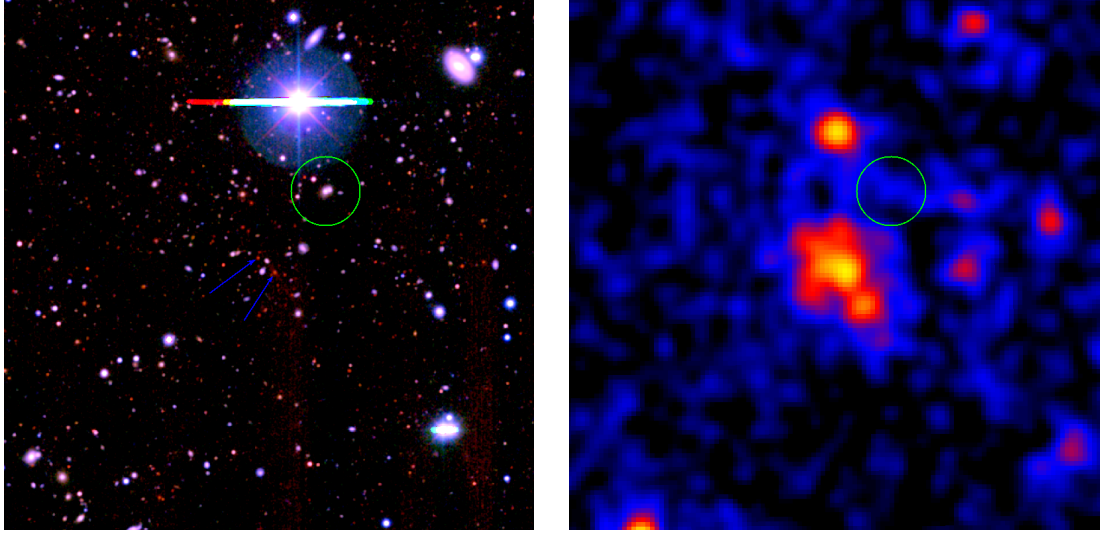


Рисунок 2.5 — Слева: псевдоцветные изображения поля скопления $10\ 43\ +\ 55\ 08$ из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg* (*RGB*). Центр окружности совпадает с объектом $\text{SDSS J104241.96} + 550907.3$, радиус окружности $30''$. Справа: Рентгеновское изображение поля скопления $10\ 43\ +\ 55\ 08$ из обзора *СПГ/eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом $12''$. Стрелочками обозначены галактики скопления, для которых были получены спектры на телескопе БТА. Центр окружности совпадает с объектом $\text{SDSS J104241.96} + 550907.3$, радиус окружности $30''$.

WHL J104242.0 + 550908. Однако, в обзоре *СПГ/eROSITA* на расстоянии, как минимум, $30''$ от положения галактики в оптике отсутствуют рентгеновские источники (см. рис. 2.5). Вероятно, это связано с тем, что эти галактики могут входить в маломассивную группу, поток в рентгеновском диапазоне от которой очень мал.

2.3 Наблюдение скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка в обзоре всего неба *СПГ/eROSITA*

В июне 2020 г. был завершен первый полный обзор всего неба обсерватории *СПГ*. Одновременно с первым обзором всего неба проводились наблюдения скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка,

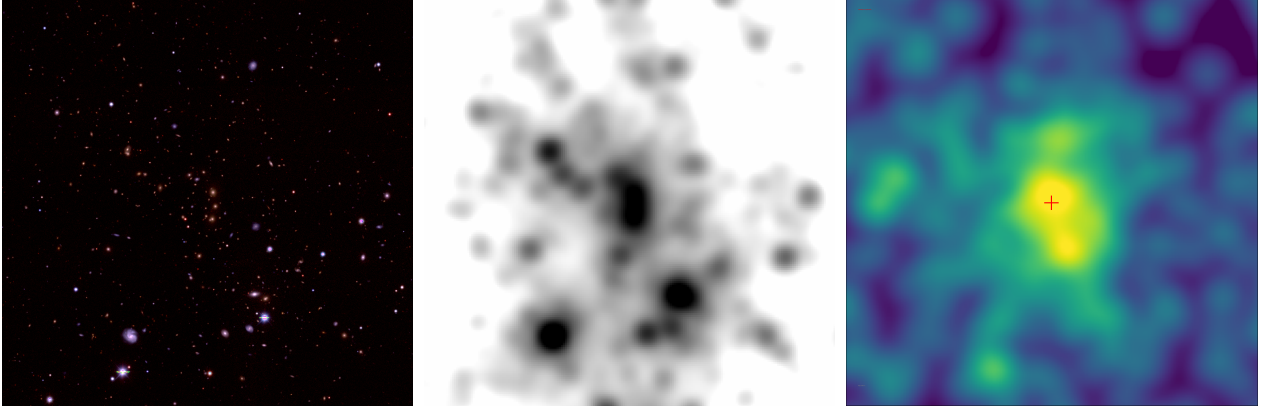
результаты измерений красных смещений которых представлены в работе [65] (см. раздел 1.6). Из 23 скоплений, приведенных в этой работе, 14 расположены на половине неба, где права на данные обзора неба телескопа *eROSITA* на борту орбитальной рентгеновской обсерватории СРГ принадлежат российской стороне. Все эти скопления были обнаружены при помощи телескопа *eROSITA* в ходе обзора неба в течение 2020 г, с потоками в диапазоне от нескольких 10^{-14} эрг/с/см² до нескольких 10^{-13} эрг/с/см². В целом, в рамках нашей программы оптического отождествления скоплений галактик из каталога обсерватории им. Планка в течение нескольких лет были измерены спектроскопические красные смещения для 133 скоплений галактик. Многие из них уже обнаружены в обзоре СРГ/*eROSITA*, точное число таких объектов будет известно после формирования каталога рентгеновских источников обзора СРГ *eROSITA*. Значительная часть этих объектов входит в число наиболее массивных скоплений галактик обзора всего неба телескопа *eROSITA* и, скорее всего, войдет в космологические выборки скоплений этого обзора.

На рис. 2.6 приведены примеры рентгеновских изображений скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка, полученных телескопом *eROSITA* в диапазоне 0.3–2.2 кэВ, для которых нашей группой ранее были получены спектроскопические измерения красных смещений. Подробное исследование рентгеновских свойств этих скоплений галактик выходит за рамки данной работы. Тем не менее это является результатом, подтверждающим важность оптического отождествления и спектроскопических измерений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка для составления космологической выборки обзора СРГ/*eROSITA*.

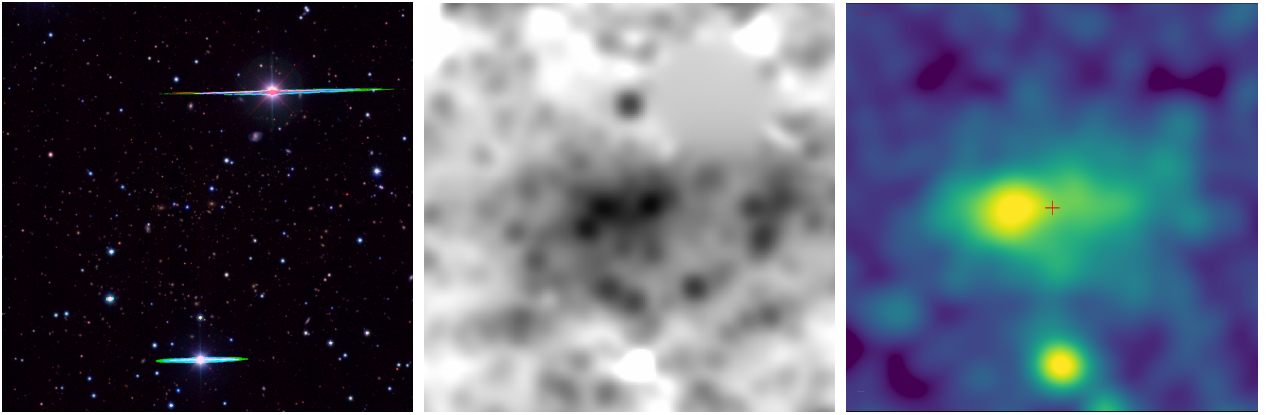
2.4 Измерение красных смещений 216 скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/*eROSITA*

После завершения в июне 2020 г. первого обзора всего неба СРГ/*eROSITA*, был составлен предварительный каталог протяженных рентгеновских источников, задетектированных в обзоре. Наша группа отождествила эти источники со скоплениями галактик и составила наблюдательную программу измерения спектроскопических красных смещений наиболее массивных скоплений галактик

02 09 −12 53, $z = 0.2594$



17 10 +68 44, $z = 0.3335$



18 01 +39 52, $z = 0.6184$

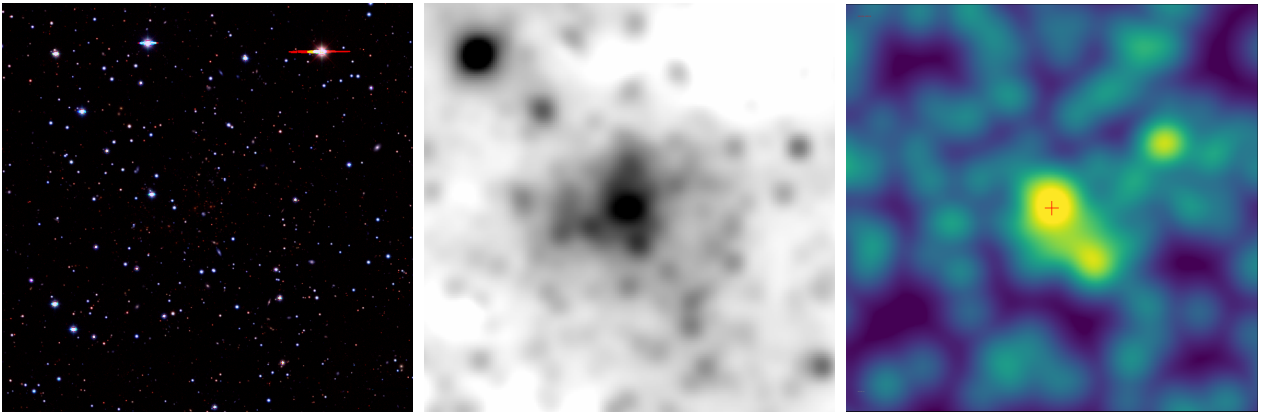


Рисунок 2.6 — Слева: псевдоцветные изображения обзора *DESI LIS* полей скоплений галактик в фильтрах *zrg* (*RGB*), в центре: изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом $22''$, справа: рентгеновское изображение обзора СРГ/*eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом $20''$, по состоянию на ноябрь 2020 г. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер полей изображений $10' \times 10'$.

обзора. Программа наблюдений постепенно дополнялась с увеличением количества завершенных полных обзоров всего неба. Также была начата программа глубоких фотометрических наблюдений кандидатов в далекие скопления галактик и измерения их фотометрических, а потом и спектроскопических красных смещений.

В этом разделе приводятся результаты выборки 216 скоплений галактик из обзора всего неба *СПГ/eROSITA* [115], для которых наша группа измерила красные смещения за период с июня 2020 г. по сентябрь 2023 г. Также представлены глубокие прямые изображения нескольких наиболее далеких скоплений галактик на $z > 0.7$, обнаруженных в обзоре *СПГ/eROSITA*. Результаты измерения красных смещений и оценки масс M_{500} для 12 наиболее массивных скоплений галактик ранее уже публиковались нашей научной группой [74; 103].

2.4.1 Отбор скоплений галактик

Оптическое отождествление скоплений галактик проводилось среди протяженных источников рентгеновского излучения, обнаруженных в результате обзора всего неба *СПГ/eROSITA* на половине неба ($0^\circ < l < 180^\circ$), за обработку данных в которой отвечают российские ученые. Исследовались скопления галактик, расположенные вдали от галактической плоскости $|b| > 20^\circ$. Поиск протяженных рентгеновских источников проводился при помощи вейвлет-разложения рентгеновских изображений [116], а также при помощи ПО *ermldet* из пакета *eSASS*. Некоторые источники можно отождествить с известными скоплениями галактик, для которых спектроскопические красные смещения были измерены ранее.

Процедура оптического отождествления скоплений галактик описана в главе 1. Для отождествления известных скоплений галактик была использована база данных внегалактических объектов НАСА (*NED*¹). В результате была получена выборка из нескольких тысяч скоплений галактик. Для значительной части массивных скоплений галактик спектроскопические измерения красных смещений были получены ранее, в основном в рамках Слоановского цифрового обзора неба [27].

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/>

Очевидно, что имеющегося у нашей группы наблюдательного времени недостаточно, чтобы за разумное время в течение нескольких лет провести спектроскопические измерения красных смещений такого большого числа скоплений галактик. Поэтому для каждого скопления галактик был определен показатель приоритета, который учитывался при наблюдениях:

$$P = 8.7\sqrt{z} + 3.3\lg(f) + 33,$$

где z – фотометрическая оценка красного смещения скопления, f – рентгеновский поток. Этот показатель определен таким образом, чтобы наибольший приоритет имели наиболее массивные скопления, и кроме того, чтобы скопления одной массы на разных красных смещениях имели примерно одинаковый приоритет. Наблюдения проводились, преимущественно, скоплений галактик с наибольшим значением показателя приоритета, у которых не измерено спектроскопическое красное смещение.

Фотометрическая оценка красных смещений далеких скоплений галактик по медианным цветам $i - z$ наиболее ярчайших галактик проводится с использованием данных, описанных в главе 1 в разделе 1.5. Для наиболее далеких скопления галактик на красных смещениях $z \gtrsim 0.7$ были получены глубокие прямые изображения на телескопах АЗТ-ЗЗИК, РТТ-150 и БТА с использованием фильтров *riz* Слоановской системы и с использованием фильтра J при наблюдениях на телескопе *RC2500*.

2.4.2 Результаты наблюдений

На сентябрь 2023 г. были получены спектры и измерены красные смещения 216 скоплений. Все эти скопления галактик ранее не имели красных смещений, измеренных спектроскопическим методом. Из них 106 скоплений галактик наблюдались на телескопе БТА, 45 на 2.5-м телескопе КГО, 51 на АЗТ-ЗЗИК и 26 на РТТ-150. Некоторые скопления галактик наблюдались на нескольких телескопах, так как из-за погодных условий были получены спектры низкого качества, по которым нельзя достоверно измерить красные смещения галактик.

Примеры изображений скоплений галактик из обзора всего неба *СР-Г/eROSITA* в оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазонах приведены на рис. 2.7. Измерение красных смещений проводилось методом, описанным в главе 1. Примеры спектров галактик из обзора всего неба показаны на рис. 2.8. Слева приведены спектры галактик, а справа их χ^2 -распределения, полученные при сравнении с шаблоном. Спектры наиболее далеких скоплений галактик из обзора всего неба, полученных на телескопе БТА, приведены в сравнении со спектрами шаблонов на рис. 2.9.

Для четырех далеких скоплений галактик на $z_{spec} > 0.7$ получены глубокие прямые изображения с использованием фильтров *rizJK*. Наблюдения этих скоплений в фильтрах *riz* проводились на телескопе БТА на приборе *SCORPIO-2* и в фильтрах *JK* на телескопе *RC2500* на приборе *AstroNIRCam*. Глубокие прямые изображения трех далеких скоплений галактик приведены ниже, а изображение скопления галактик *SRGe J041402.7+830258* ранее было приведено в работе [74].

Результаты измерений красных смещений скоплений галактик приведены в табл. 11. В первом столбце приведено рентгеновское название источника по данным телескопа *eROSITA*. В названиях рентгеновских источников приведены экваториальные координаты (α , δ) их центров на эпоху *J2000.0*. Во втором столбце приведены красные смещения скоплений галактик, в третьем столбце – количество галактик, входящих в скопления, красные смещения которых были измерены. Точность измерения красных смещений для каждого скопления галактик разная, поэтому в таблице для разных скоплений галактик приведено разное количество значащих цифр. Отметим, что учитывались красные смещения только наиболее ярких и близких к центру скопления галактик. В четвертом и пятом столбцах приведены названия телескопов, на которых проводились наблюдения, и общее время экспозиции полученных спектроскопических изображений. В случае наблюдений скоплений галактик на нескольких телескопах время экспозиции складывались. В предпоследнем столбце приведены краткие названия каталогов скоплений галактик, в которых они присутствуют. В последнем столбце приведены заметки.

В заметках табл. 11 приведены сведения о ранее подтвержденном или возможном наличии сильного линзирования галактик фона (линза). Указаны скопления галактик, в которых у одной или нескольких массивных галактик в центре скопления есть яркая эмиссионная линия [OII] λ 3727. Для нескольких та-

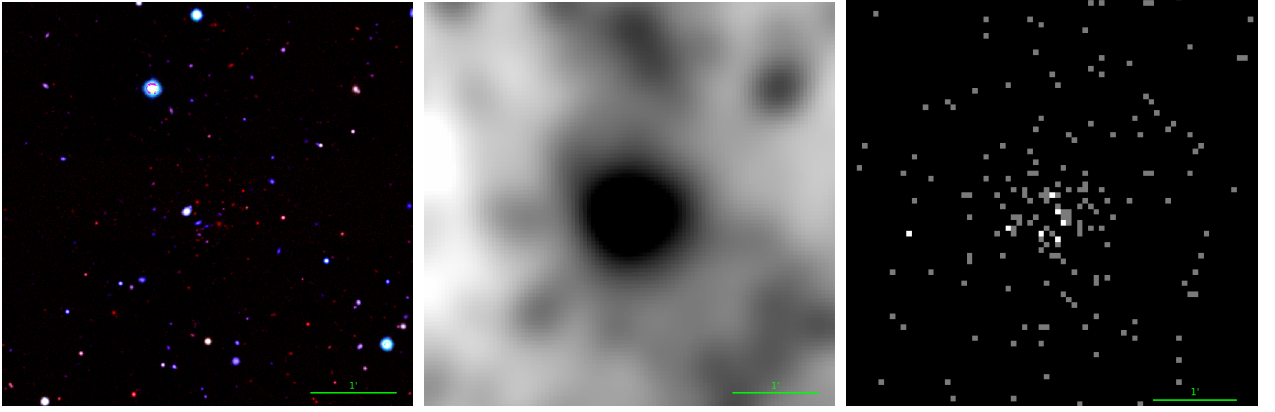
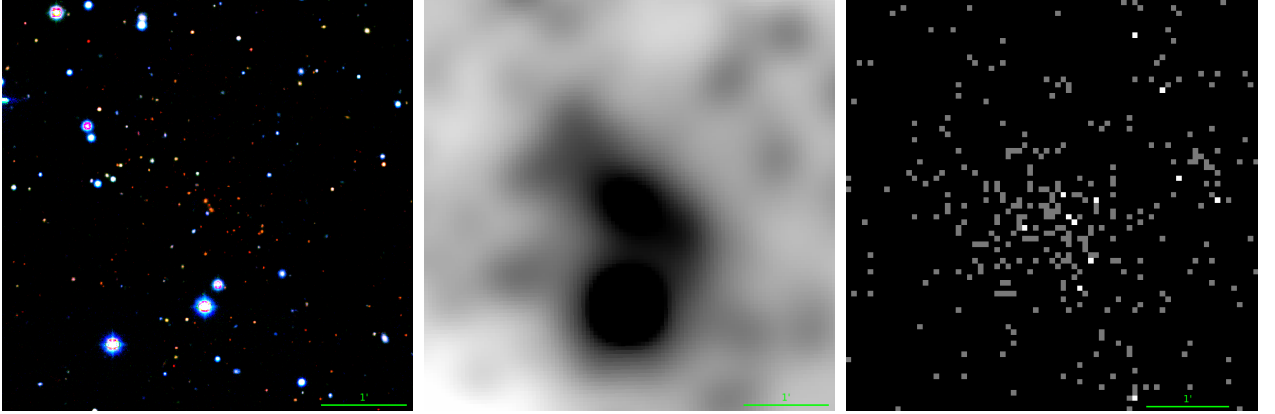
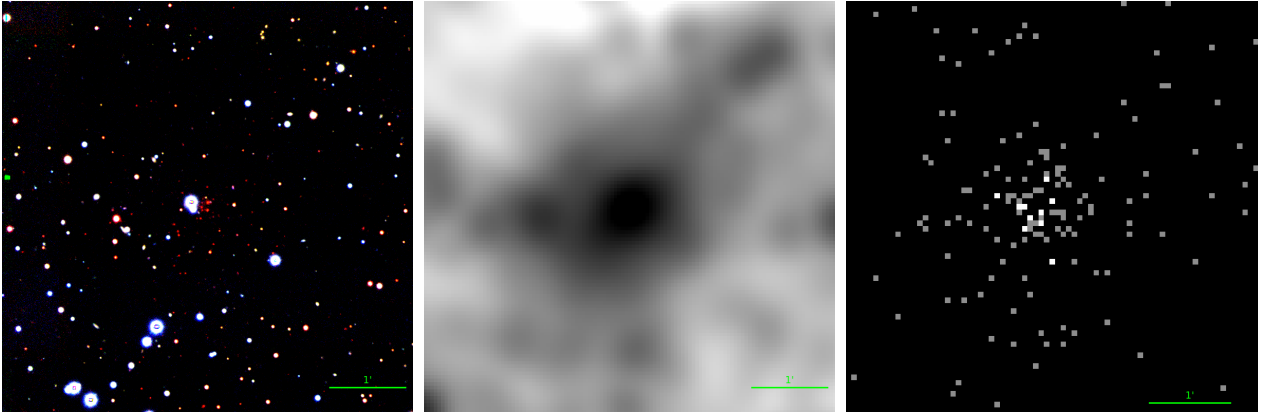
SRGe J105036.9+455126, $z = 0.8747$ SRGe J144035.3+661630, $z = 0.699$ SRGe J215157.4+111248, $z = 0.919$ 

Рисунок 2.7 — Слева: псевдоцветные изображения обзора *DESI LIS* полей скоплений галактик в фильтрах *zrg* (*RGB*), в центре: изображения обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом $24''$, справа: рентгеновское изображение обзора *СПГ/eROSITA*. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер полей изображений $5' \times 5'$.

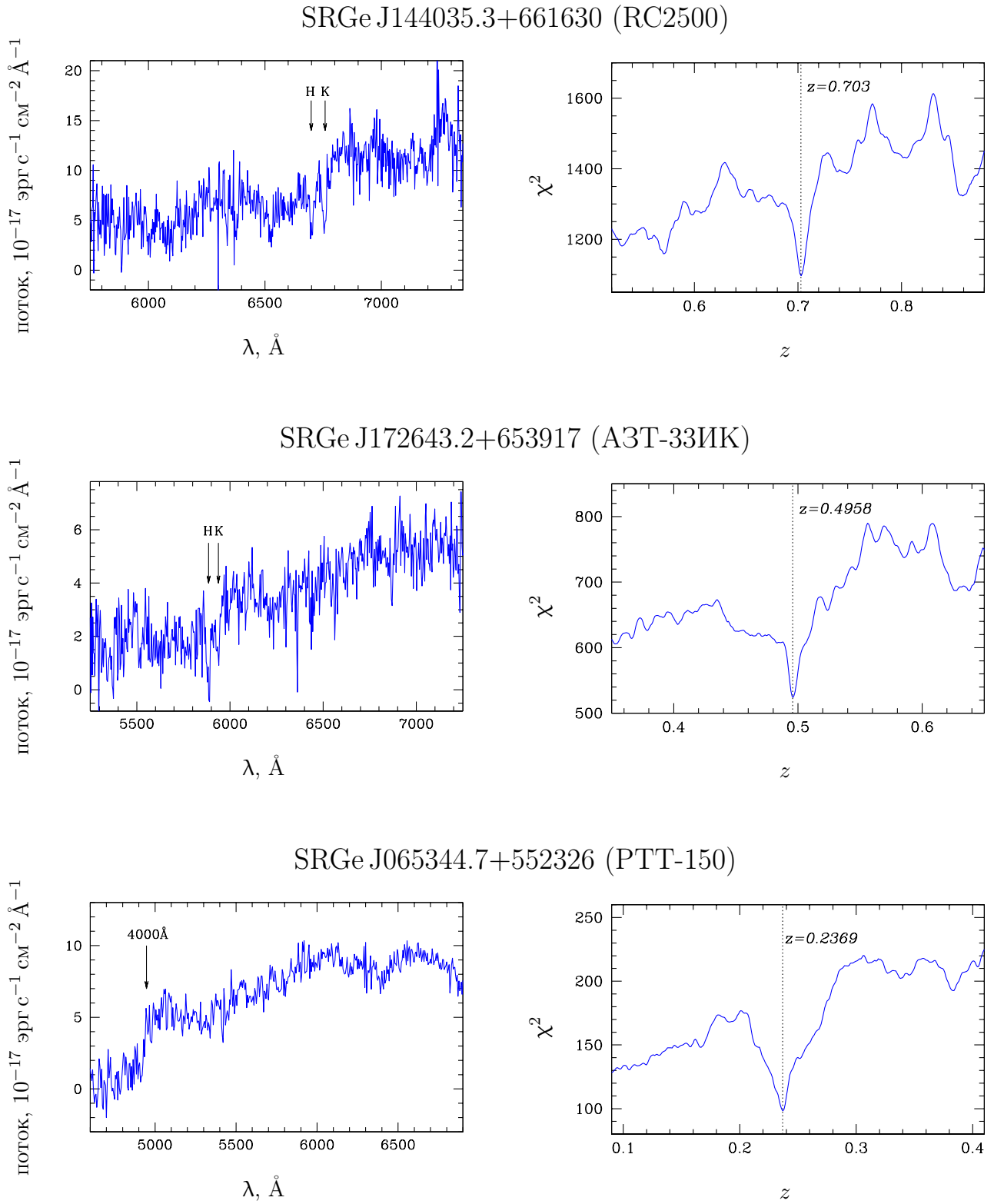
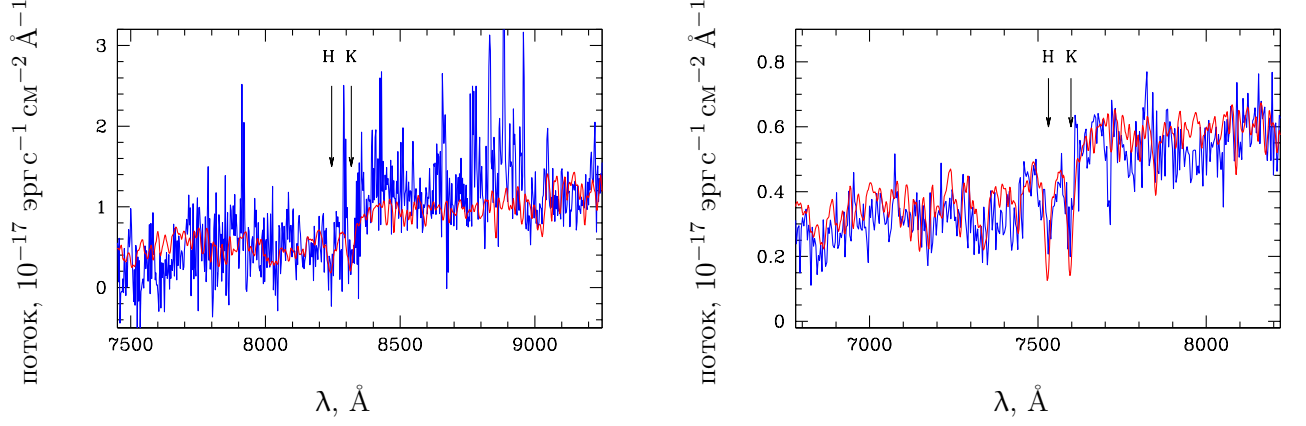


Рисунок 2.8 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений, полученных на телескопах: верхний ряд — *RC2500* средний ряд — АЗТ-ЗЗИК, нижний ряд — РТТ-150. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

SRGe J191751.9+692812 ($z_{spec} = 1.096$) SRGe J215157.4+111248 ($z_{spec} = 0.925$)



SRGe J191842.1+744327 ($z_{spec} = 1.024$) SRGe J132950.1+564752 ($z_{spec} = 1.298$)

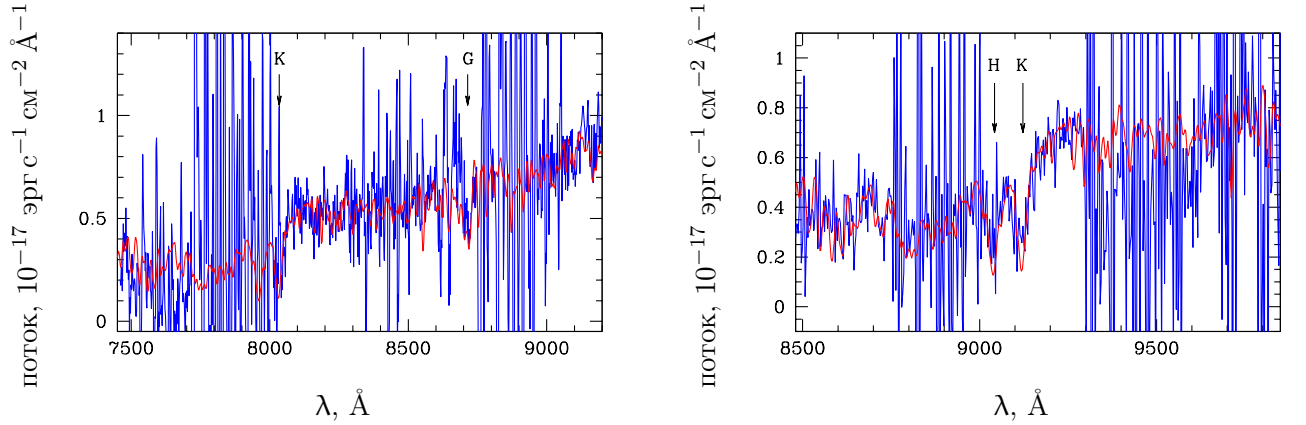


Рисунок 2.9 — Примеры спектроскопических измерений красных смещений ярчайших галактик наиболее удаленных далеких скоплений, обнаруженных в обзоре всего неба СРГ/*eROSITA*, которые не публиковались ранее. Синей линией обозначены спектры галактик, полученные на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*, красной линией обозначены шаблоны спектров сравнения. Для скопления SRGe J191751.9+692812 приведена сумма спектров двух галактик скопления.

ких скоплений ниже подготовлены заметки с оценкой темпа звездообразования в их cD -галактиках по излучению в линии $[\text{OII}]\lambda 3727$. Часть скоплений галактик из табл. 11 ранее уже были опубликованы в предыдущих работах нашей группы [103] и [74]. Четыре скопления галактик наблюдались ранее в среднеполосных фильтрах на космическом телескопе им. Хаббла (HST). В этих работах приведена лишь фотометрическая оценка красных смещений на основе данных наблюдений телескопа им. Хаббла. Поэтому для этих скоплений галактик нами были получены спектроскопические измерения красных смещений. Скопления галактик, обсуждаемые в тексте отдельно, отмечены звездочкой (*).

Мы получили измерения красных смещений 445 галактик в полях всех 216 скоплений. Эти данные опубликованы в Страсбургском центре астрономических данных². Пример данных красных смещений галактик в поле пяти скоплений галактик, расположенных по возрастанию прямых восхождений, приведен в табл. 12. В первом столбце приведено название поля скоплений галактик, определяемое по координатам центра рентгеновского источника. Во втором и третьем столбце приведены координаты галактик. В четвертом и пятом столбцах приведены красные смещения галактик и, при наличии, их ошибки. Точность измерения красных смещений для разных галактик может различаться, поэтому в таблице для различных галактик красные смещения указаны с разным количеством значащих цифр. В таблицу так же включены спектроскопические измерения красных смещений фоновых галактик и галактик переднего плана, свет от которых попал на цель спектрографа случайным образом в процессе наблюдений. Измеренные значения спектроскопических красных смещений и предварительные оценки масс M_{500} скоплений по данным об их рентгеновских потоках из обзора всего неба *eROSITA* приведены на рисунке 2.10.

Распределение числа скоплений галактик, для которых были измерены красные смещения, приведено на рис. 2.11. В распределение не вошло одно скопление галактик, красное смещение которого чуть меньше $z = 0.1$. Это распределение показывает текущий прогресс выполнения программы спектроскопических измерений скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/*eROSITA* и статистической значимости не несет.

Сопоставление скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/*eROSITA* проводилось с другими каталогами скоплений галактик и каталогами рентге-

²<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/PAZh/49/695#/browse>

Таблица 11 — Скопления галактик из обзора всего неба СРГ/*eROSITA*.

Название источника	z_{spec}	N_{gal}	Телескоп	Время, мин	Каталоги	Заметки
SRGe J001104.8+272243	0.3212	3	БТА	60	WHL	
SRGe J001321.8–150316	0.458	2	RC2500	80	ACT	
SRGe J001502.8–151603	0.3353	2	БТА	45	ACT	
SRGe J001525.5–173051	0.4622	1	АЗТ-33ИК	40	PSZ1,ACT	
SRGe J001735.6–114916	0.500	2	RC2500	120	-	
SRGe J002641.7–152613	0.5946	3	БТА	80	ACT,WHL	
SRGe J003542.0+125554	0.247	2	RC2500	60	RM,NSC,NSCS,WHL	
SRGe J004431.2–175026	0.331	2	PTT-150	120	-	
SRGe J010345.3+011836	0.199	2	RC2500	40	-	
SRGe J011738.7–131454	0.1052	1	RC2500	20	-	
SRGe J011817.8–215034	0.4727	2	БТА	50	-	
SRGe J012531.7+192251	0.5811	2	БТА	60	ACT	SDSS
SRGe J012711.9–162606	0.2509	2	АЗТ-33ИК	40	ACT	
SRGe J012915.6–134233	0.376	2	RC2500	80	ACT	
SRGe J013303.5+403457	0.3864	3	БТА	45	-	
SRGe J013923.7–112235	0.277	5	RC2500	80	PSZ2,ACT	
SRGe J014500.2+304113	0.7480	3	БТА	180	-	
SRGe J015010.0+214332	0.5658	2	БТА	45	-	SDSS
SRGe J015448.2+211639	0.593	1	RC2500	100	-	
SRGe J015747.8+381210	0.6827	4	БТА	60	-	[74]
SRGe J020037.1+373836	0.3139	4	БТА	45	-	
SRGe J020244.9+384733	0.3068	3	БТА	30	-	
SRGe J020629.8+363229	0.5164	3	БТА	40	-	[74]
SRGe J021228.1+112737	0.3990	2	БТА	45	-	
SRGe J021250.3–112414	0.3275	1	АЗТ-33ИК	40	ACT	
SRGe J021821.9+323337	0.4473	1	RC2500	120	WHL	ОП3727
SRGe J022017.6–102414	0.4572	3	БТА	60	ACT,WHL	
SRGe J022418.2+301934	0.480	2	RC2500	100	-	линза? *
SRGe J023005.7+194915	0.3368	3	БТА	60	-	
SRGe J023203.5+222043	0.305	1	PTT-150	90	WHL	
SRGe J023251.9+102615	0.4510	1	PTT-150	150	ACT	
SRGe J023820.8+200556	0.4205	2	БТА	30	WHL	[74]
SRGe J024102.2+255716	0.5732	4	БТА	105	-	[74], ОП3727
SRGe J024108.6+141044	0.5539	5	БТА	60	ACT	
SRGe J024140.2+220924	0.438	2	RC2500, АЗТ-33ИК	60	-	
SRGe J024212.7+054452	0.2871	1	RC2500, АЗТ-33ИК	120	WHL,NSC	
SRGe J024450.4+264715	0.5176	2	БТА	60	-	
SRGe J024505.8+255725	0.3339	2	RC2500, АЗТ-33ИК	80	-	
SRGe J024508.5+184217	0.4405	1	АЗТ-33ИК	30	ACT	ОП3727
SRGe J024614.1+103920	0.4209	1	АЗТ-33ИК	40	-	
SRGe J024716.9+335442	0.2339	1	БТА	50	WHL	
SRGe J025827.1+174157	0.3859	3	БТА	75	-	
SRGe J030255.1+841349	0.4436	2	БТА	60	-	
SRGe J030526.0+094805	0.505	2	RC2500	180	ACT,WHL	
SRGe J030926.9+041339	0.458	1	RC2500	320	ACT	
SRGe J032452.5+843310	0.4138	1	БТА, АЗТ-33ИК	45	-	
SRGe J032444.4+113942	0.4794	2	БТА	60	-	
SRGe J033748.0+074743	0.4733	2	БТА	60	WHL	
SRGe J033950.5+280522	0.1755	3	БТА	40	-	
SRGe J034028.9+071047	0.2336	2	АЗТ-33ИК	40	WHL	
SRGe J034821.9+205702	0.2607	2	БТА	70	-	
SRGe J034900.1+213302	0.3478	3	БТА	60	-	[74]
SRGe J034934.9+110529	0.268	2	RC2500	80	WHL	
SRGe J035114.1+174311	0.1565	3	БТА	30	WHL	

Таблица 11 — Продолжение.

Название источника	z_{spec}	N_{gal}	Телескоп	Время, мин	Каталоги	Заметки
SRGe J035322.3+110340	0.2689	3	БТА	30	АСТ, WHL, NSC	
SRGe J040249.5+135319	0.6194	3	БТА	60	АСТ	
SRGe J040342.7+154444	0.5300	1	АЗТ-33ИК	80	-	
SRGe J040844.2+133350	0.8013	1	БТА	180	-	
SRGe J041402.7+830258	0.5909	1	БТА	60	WHL	[74]
SRGe J043602.9+780337	0.5219	1	АЗТ-33ИК	105	-	
SRGe J052742.4+800205	0.3843	2	АЗТ-33ИК	150	-	
SRGe J062552.1+711624	0.7135	2	БТА	90	-	
SRGe J063357.4+574050	0.2361	3	БТА	50	-	
SRGe J064609.8+764805	0.4139	2	БТА	60	-	
SRGe J065344.7+552326	0.2369	1	РТТ-150	150	-	
SRGe J065908.8+811419	0.3614	2	АЗТ-33ИК	120	-	
SRGe J070623.4+484612	0.3777	1	АЗТ-33ИК	70	-	
SRGe J071221.3+593220	0.3315	1	АЗТ-33ИК	40	MACS	HST
SRGe J072328.4+520707	0.6303	3	БТА	120	-	
SRGe J072935.4+643314	0.3640	2	АЗТ-33ИК	90	-	
SRGe J073222.5+551230	0.4145	2	АЗТ-33ИК	90	-	
SRGe J073609.4+515822	0.4795	1	АЗТ-33ИК	70	-	
SRGe J073723.9+544908	0.2590	1	АЗТ-33ИК	80	-	
SRGe J074554.3+800654	0.5270	3	БТА	80	-	
SRGe J074659.4+693740	0.5728	1	БТА	45	-	
SRGe J075537.4+562626	0.4527	1	АЗТ-33ИК, РТТ-150	210	-	
SRGe J080501.8+692700	0.5382	1	РТТ-150	120	-	
SRGe J080514.7+745357	0.7491	2	БТА	70	-	
SRGe J083241.8+665352	0.180	2	RC2500	60	WHL, NSC	
SRGe J085156.5+744249	0.4195	1	АЗТ-33ИК	75	-	
SRGe J085213.7+783256	0.5347	2	RC2500, АЗТ-33ИК	70	-	
SRGe J090416.6+725951	0.2419	3	АЗТ-33ИК	50	NSC	
SRGe J090723.8+671121	0.4911	2	БТА	45	-	
SRGe J091600.3+754812	0.1770	2	БТА	50	NSC	
SRGe J100900.9+721439	0.4441	1	БТА	20	-	
SRGe J102534.9+755226	0.6684	1	RC2500	140	-	
SRGe J103538.2+700645	0.4383	1	БТА	30	-	
SRGe J104446.3+723400	0.441	1	АЗТ-33ИК	80	-	
SRGe J104533.9+781319	0.3953	1	АЗТ-33ИК	70	WHL	
SRGe J105036.9+455126	0.8747	1	БТА	120	-	SDSS
SRGe J112840.5+763600	0.4782	1	АЗТ-33ИК	80	WHL	
SRGe J113857.3+784117	0.6734	1	RC2500	160	-	
SRGe J115342.3+771302	0.3782	2	БТА, АЗТ-33ИК	30	-	
SRGe J115858.1+705437	0.6337	1	БТА	90	WHL	
SRGe J120822.6+742216	0.3846	1	АЗТ-33ИК	40	-	
SRGe J122502.7+862739	0.1972	2	АЗТ-33ИК	70	-	
SRGe J123141.4+723821	0.328	1	РТТ-150	90	-	
SRGe J123221.8+592400	0.675	2	RC2500	240	-	OII3727, SDSS
SRGe J124909.0+812316	0.5373	2	БТА	60	-	
SRGe J125053.7+862515	0.3691	1	АЗТ-33ИК	60	-	
SRGe J125121.5+313125	0.5053	2	RC2500	70	WHL, NSCS	SDSS
SRGe J125445.4+470151	0.3214	2	АЗТ-33ИК	90	NSC, NSCS, 1RXS	
SRGe J131229.6+725048	0.5735	2	БТА	80	-	линза, *
SRGe J131253.5+725502	0.2955	3	БТА	50	-	
SRGe J132420.4+691724	0.3566	1	АЗТ-33ИК	30	-	
SRGe J132810.3+524321	0.3217	2	АЗТ-33ИК, РТТ-150	150	MACS, WHL	SDSS
SRGe J132950.1+564752	1.298	1	БТА	240	MOO	*
SRGe J134330.9+792821	0.4476	4	БТА	40	-	
SRGe J135353.3+733157	0.4780	1	БТА	60	-	OII3727, *

Таблица 11 — Продолжение.

Название источника	z_{spec}	N_{gal}	Телескоп	Время, мин	Каталоги	Заметки
SRGe J135628.1+793836	0.4530	2	А3Т-33ИК	60	-	
SRGe J135900.1+672547	0.4544	3	А3Т-33ИК	150	-	
SRGe J135917.9+744637	0.196	1	RC2500	100	NSC	
SRGe J142452.1+662238	0.2409	2	А3Т-33ИК, PTT-150	70	NSC	
SRGe J143202.2+851737	0.5684	2	БТА	90	-	QSO *
SRGe J144035.3+661630	0.699	2	RC2500	80	-	
SRGe J144245.4+585306	0.6238	1	БТА	90	-	SDSS
SRGe J144605.0+753727	0.1737	2	А3Т-33ИК	50	-	
SRGe J145131.8+810640	0.546	2	RC2500	120	-	
SRGe J150225.3+653951	0.6502	6	БТА	90	-	ОП3727
SRGe J150743.4+700724	0.5154	2	А3Т-33ИК	100	-	
SRGe J150823.5+645304	0.2520	2	А3Т-33ИК	80	NSC	
SRGe J151051.9+670628	0.4196	2	А3Т-33ИК	30	XMM,WHL,NSC	
SRGe J152236.4+640543	0.702	1	RC2500	100	WHL	
SRGe J152736.6+095513	0.7574	2	БТА	60	ACT	
SRGe J152854.9+852009	0.2520	3	А3Т-33ИК	70	-	
SRGe J153256.6+670715	0.7246	2	БТА	120	-	
SRGe J154729.2+701838	0.554	1	RC2500	40	-	
SRGe J155449.4+535841	0.7434	2	БТА	90	-	
SRGe J160002.5-035434	0.2729	1	PTT-150	100	-	
SRGe J160121.3+712533	0.3349	2	А3Т-33ИК, PTT-150	40	-	
SRGe J160205.7+650555	0.2512	2	PTT-150	85	NSC	
SRGe J160948.4-040052	0.3495	1	А3Т-33ИК	30	-	
SRGe J161215.6+662009	0.616	1	RC2500	120	-	
SRGe J161519.8-035343	0.262	3	RC2500	80	ACT,WHL	
SRGe J162051.3+651237	0.1685	2	А3Т-33ИК	40	NSC	
SRGe J162125.2+723233	0.5884	2	БТА	50	-	
SRGe J162126.4+602653	0.2822	1	PTT-150	30	NSC	
SRGe J162545.1+672930	0.8132	1	БТА	90	-	линза, *
SRGe J163405.9+632020	0.5174	1	БТА	45	WHL	
SRGe J164110.0+100449	0.3371	1	PTT-150	90	WHL	
SRGe J164201.1+575631	0.292	2	RC2500	60	-	
SRGe J164500.8+014009	0.337	3	RC2500	40	ACT,MACS,WHL	HST
SRGe J164727.5+044052	0.278	2	RC2500	20	ACT,WHL	
SRGe J165012.0+650920	0.3835	2	А3Т-33ИК	10	-	
SRGe J165151.8+081034	0.3288	1	А3Т-33ИК	40	-	
SRGe J165201.9+800430	0.8131	2	БТА	105	-	
SRGe J165218.4+553455	0.324	2	RC2500	20	MACS	HST
SRGe J170139.9+474516	0.3846	4	БТА	60	RM,WHL	SDSS
SRGe J170519.0+850451	0.3036	2	БТА	30	-	
SRGe J171430.8+481644	0.253	2	RC2500	60	-	
SRGe J171621.3+325646	0.2583	2	RC2500	40	RM,WHL	SDSS
SRGe J171628.9+193457	0.1764	1	PTT-150	50	ACT,Zw,NSC	
SRGe J172037.9+212851	0.3017	2	RC2500	40	-	
SRGe J172321.5+235041	0.229	1	PTT-150	60	-	*
SRGe J172643.2+653917	0.4958	1	А3Т-33ИК	30	WHL	
SRGe J173225.2+193340	0.540	2	RC2500	80	ACT	
SRGe J173349.5+330419	0.401	1	PTT-150	100	RM,WHL	
SRGe J173355.8+300018	0.201	1	PTT-150	60	WHL	
SRGe J173721.0+334748	0.3822	1	RC2500	20	WHL	
SRGe J173807.2+600621	0.3317	2	БТА	40	MACS,WHL	HST
SRGe J174014.2+594415	0.601	2	RC2500	60	WHL	
SRGe J174110.4+471720	0.4793	2	БТА	60	WHL	ОП3727
SRGe J174334.2+420106	0.4713	1	БТА	90	WHL	

Таблица 11 — Продолжение.

Название источника	z_{spec}	N_{gal}	Телескоп	Время, мин	Каталоги	Заметки
SRGe J174434.9+822459	0.440	1	RC2500	100	-	
SRGe J174538.1+500041	0.6285	1	БТА	60	WHL	[74]
SRGe J174629.3+472502	0.4816	6	БТА	45	WHL	линза, *
SRGe J175035.3+435243	0.481	1	RC2500	40	WHL	
SRGe J175052.5+415846	0.5828	2	БТА	90	WHL	
SRGe J175155.8+295145	0.3582	3	БТА	60	-	
SRGe J175307.3+583500	0.429	2	RC2500	80	WHL	
SRGe J175729.4+304539	0.6146	2	БТА	45	-	
SRGe J180245.8+292831	0.6816	1	БТА	150	-	
SRGe J180303.3+374252	0.3428	2	БТА	60	WHY	
SRGe J181119.7+431250	0.5183	2	БТА	70	WHL	
SRGe J181528.3+831620	0.5464	2	БТА	45	-	
SRGe J182326.3+541527	0.5335	2	БТА, PTT-150	140	-	
SRGe J182323.1+840138	0.185	2	PTT-150	180	-	
SRGe J182722.2+463850	0.4730	2	БТА	90	-	
SRGe J183034.3+565339	0.7867	2	БТА	45	PSZ2	[74]
SRGe J183852.4+662829	0.3951	2	БТА	50	-	
SRGe J184121.6+535027	0.946	2	БТА	90	-	[74]
SRGe J185131.4+653106	0.4633	2	БТА	105	-	
SRGe J191309.4+740148	0.2696	3	БТА	75	-	
SRGe J191751.9+692812	1.098	2	БТА	160	-	*
SRGe J191842.1+744327	1.024	1	БТА	150	-	*
SRGe J192345.4+730903	0.2762	2	БТА	75	-	
SRGe J192913.6+643318	0.4295	2	БТА	60	-	
SRGe J200210.7+780245	0.3468	4	БТА	60	WHL	
SRGe J204908.2+763440	0.5085	3	БТА	90	-	
SRGe J205158.7-013116	0.3869	4	БТА	60	ACT	
SRGe J210510.1-032638	0.8374	1	БТА	50	-	[74]
SRGe J210510.6-224911	0.7573	2	БТА	80	ACT,SPT	[103]
SRGe J213403.2+141635	0.3776	1	БТА	45	ACT	
SRGe J213701.4-130727	0.2029	2	PTT-150	40	-	
SRGe J213703.6-150529	0.2103	1	A3T-33ИК	40	-	2dF
SRGe J213714.3-223216	0.6137	2	БТА	120	-	[74]
SRGe J214054.0-191035	0.5073	3	БТА	90	-	
SRGe J215157.4+111248	0.919	2	БТА	120	ACT	*
SRGe J220744.1-041657	0.092	3	PTT-150	250	-	
SRGe J221101.3-065318	0.3697	5	БТА, PTT-150	200	ACT,RM,WHL	
SRGe J221953.2-035005	0.4306	2	БТА	45	ACT,RM,WHL	
SRGe J222556.3-123904	0.2752	1	PTT-150	50	-	6dF
SRGe J222701.8-053047	0.2855	1	A3T-33ИК	50	ACT,RM,WHL	
SRGe J224722.8+113354	0.6905	3	БТА	120	-	
SRGe J224811.8+353319	0.2238	1	A3T-33ИК	10	-	
SRGe J225817.2-225553	0.5279	2	БТА	60	ACT,SPT	
SRGe J230019.3-133429	0.338	2	RC2500	40	-	
SRGe J230237.3+353606	0.5209	2	БТА	40	-	
SRGe J231103.8-125846	0.405	2	RC2500	80	ACT	
SRGe J231522.4+090705	0.7350	3	БТА	120	ACT	SDSS
SRGe J231534.7-064746	0.3265	1	PTT-150	45	ACT,RM,WHL	
SRGe J231613.5-060924	0.281	3	PTT-150	180	ACT,RM,WHL	
SRGe J231745.7-110412	0.7217	2	БТА	70	ACT	
SRGe J232006.8-120210	0.404	2	RC2500	60	ACT	
SRGe J232204.4+394150	0.6278	2	БТА	90	-	
SRGe J234200.4+833346	0.7551	4	БТА	60	-	

Таблица 12 — Красные смещения галактик. Полная версия таблицы опубликована в Страсбургском центре астрономических данных.

Поле источника	Координаты (J2000)			
	α	δ	z_{spec}	$z_{\text{spec}}^{\text{err}}$
SRGe J001104.8+272243	00 11 04.6	+27 22 32	0.3193	0.0006
SRGe J001104.8+272243	00 11 04.7	+27 22 35	0.3217	0.0006
SRGe J001104.8+272243	00 11 04.8	+27 22 39	0.3228	0.0004
SRGe J001321.8–150316	00 13 20.7	–15 02 52	0.455	
SRGe J001321.8–150316	00 13 22.9	–15 03 17	0.458	
SRGe J001502.8–151603	00 15 01.6	–15 16 01	0.3335	0.0003
SRGe J001502.8–151603	00 15 03.5	–15 16 20	0.3370	0.0004
SRGe J001525.5–173051	00 15 24.4	–17 30 35	0.4622	0.0019
SRGe J001735.6–114916	00 17 36.2	–11 49 15	0.499	
SRGe J001735.6–114916	00 17 36.2	–11 49 15	0.500	
SRGe J002641.7–152613	00 26 42.1	–15 26 36	0.5929	0.0010
SRGe J002641.7–152613	00 26 42.2	–15 26 08	0.6016	0.0030
SRGe J002641.7–152613	00 26 42.2	–15 26 19	0.5963	0.0014
...				

новских источников при помощи внегалактической базы данных NED³. Радиус сопоставления принимался равным 5'. Из 216 скоплений галактик 139 скоплений не удалось сопоставить с объектами из других каталогов. Эти скопления галактик обнаружены впервые. Для всех скоплений галактик в табл. 11, которые присутствуют в других каталогах, нами были измерены спектроскопические красные смещения. В других каталогах для этих скоплений галактик указаны только фотометрические оценки красных смещений. Несколько скоплений галактик уже известны как источники рентгеновского излучения из данных космических рентгеновских обсерваторий *ROSAT* [117; 118] и *XMM-Newton* [119]. Около 40 скоплений галактик известны как источники Сюняева–Зельдовича из обзоров Атакамской обсерватории [120], Южного полярного телескопа [121] и космической обсерватории им. Планка [15; 16]. В некоторых случаях красные смещения галактик, входящих в скопления, измерены спектроскопическим способом в Слоановском обзоре [27], в обзоре *2df* [28] и *6df* [29]. Эти галактики не входят в число наиболее ярких галактик скоплений и расположены на удалении

³<https://ned.ipac.caltech.edu/>

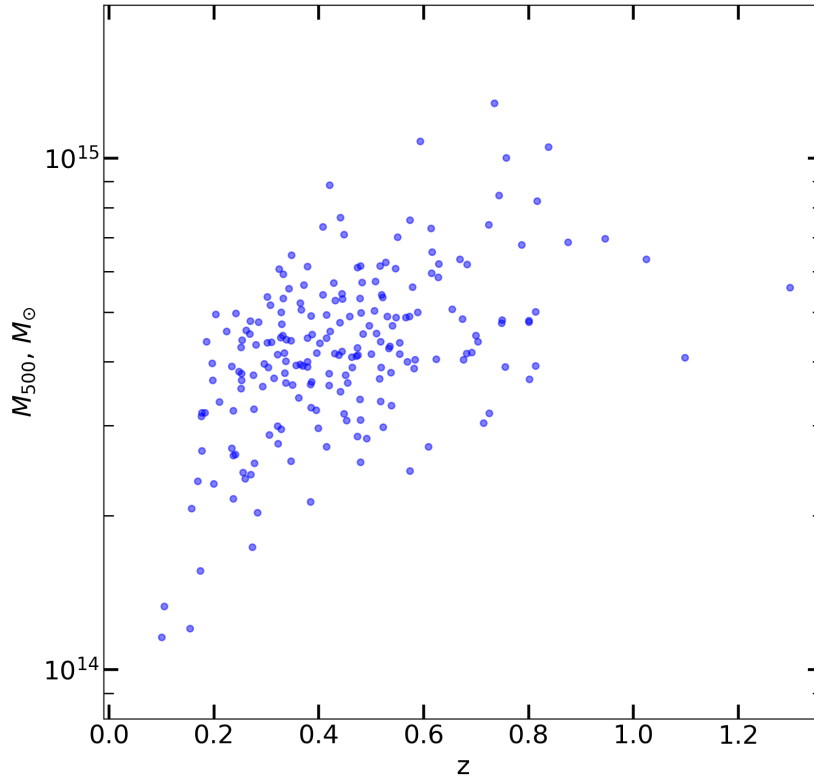


Рисунок 2.10 — Спектроскопические красные смещения z и массы M_{500} , измеренные для 216 скоплений галактик из обзора всего неба *eROSITA*. Спектроскопические измерения красных смещений этих скоплений галактик получены впервые. Массы скоплений галактик оценены по данным об их рентгеновских потоках [2].

от центральных областей скоплений. Поэтому в этих случаях принято решение провести дополнительные наблюдения для уточнения красных смещений этих скоплений. В табл. 13 приведены списки каталогов и количество сопоставленных скоплений галактик.

В 2023 году был разработан алгоритм оценки красных смещений скоплений галактик обзора СРГ/*eROSITA* по фотометрическим оценкам красных смещений галактик [115]. Подробно алгоритм обсуждается в главе 3. С помощью алгоритма были оценены красные смещения 149 скоплений галактик на $z_{spec} \lesssim 0.8$ и определен параметр надежности оптического отождествления скоплений. Часть скоплений галактик оказались вне области обзора *DESI LIS*, где работает алгоритм. Другая часть скоплений галактик оказались слишком далекими, поэтому в используемом алгоритмом каталоге [38] отсутствуют фо-

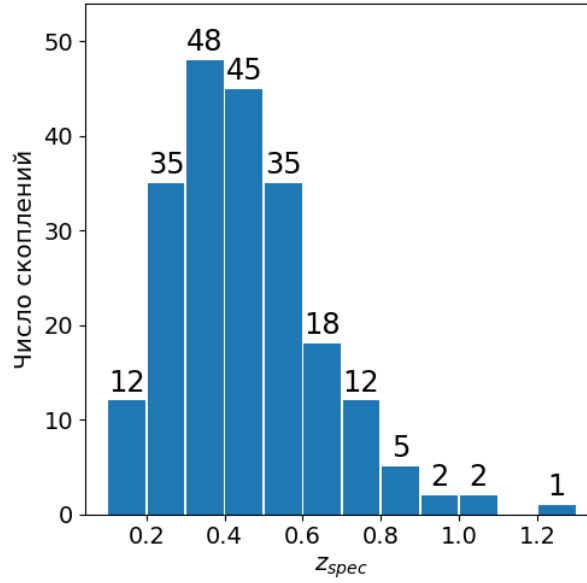


Рисунок 2.11 — Распределение по красным смещениям скоплений галактик из обзора СРГ/*eROSITA*, для которых наша группа измерила спектроскопические красные смещения.

Таблица 13 — Количество скоплений галактик, отождествляемых со скоплениями в других каталогах

Каталог	Количество	Ссылка
-	139	
WHL	51	[33]
ACT	37	[120]
NSC	15	[34]
RM	9	[31]
MACS	5	[118]
NSCS	3	[35]
SPT	2	[121]
PSZ2	2	[16]
PSZ1	1	[15]
Zw	1	[122]
XMM	1	[119]
WHY	1	[123]
MOO	1	[36]

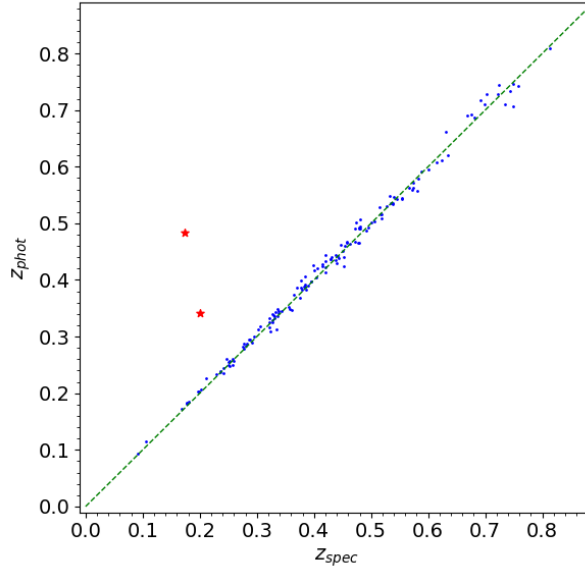


Рисунок 2.12 — Соотношение фотометрических оценок красных смещений скоплений галактик из обзора *СПГ/eROSITA* (по вертикали) с их спектроскопическими измерениями (по горизонтали). Красными звездочками показаны скопления галактик *SRGe J144605.0+753727* и *SRGe J173355.8+300018* с большим несоответствием фотометрического и спектроскопического красного смещения.

фометрические оценки красных смещений галактик, входящих в эти скопления. Поэтому фотометрическим алгоритмом оценены красные смещения только части скоплений галактик. Соотношение спектроскопических измерений красных смещений и их фотометрических оценок приведены на рис. 2.12, где по вертикали приведены фотометрические оценки, а по горизонтали спектроскопические измерения. Точность фотометрической оценки составляет $\delta z / (1 + z) \approx 0.007$ для скоплений галактик на $z < 0.8$.

В случае двух скоплений галактик *SRGe J144605.0+753727* и *SRGe J173355.8+300018* алгоритм дает оценки красных смещений, не соответствующие спектроскопическим измерениям (показаны красными звездочками на рис. 2.12). Алгоритм указывает на возможную неточность в отождествлении этих скоплений галактик. В случае скоплений галактик *SRGe J173355.8+300018* алгоритм указывает на возможное наличие проекции.

2.4.3 Замечания по отдельным объектам

SRGe J022418.2+301934. При просмотре изображений обзора *DESI LIS*, в центральной части скопления была обнаружена очень слабая протяженная структура, форма и ориентация по отношению к центру скопления которой характерна для линзированных галактик. Изображение кандидата в линзированные галактики приведено на рис. 2.13, координаты объекта 02 24 19.6 +30 19 39. На рисунке приведена конфигурация щели, и обозначен кандидат в линзируемую галактику. Видно, что положение щели мы определили таким образом, чтобы две наиболее яркие галактики скопления ($r \sim 20^m$) и кандидат в линзированную галактику попали на щель спектрографа. Наблюдения были проведены 1 октября 2022 г. на телескопе *RC2500*, получено четыре спектроскопических изображения по 1200 с, отношение сигнала к шуму галактик составляет примерно 2.5–2.7. Красное смещение обеих галактик одинаково и равно $z_{spec} = 0.480$, спектр кандидата в линзированные галактики очень слабый и поэтому не может быть извлечен. Наблюдение этого объекта отдельно не проводилось, так как это требует большого количества наблюдательного времени на больших телескопах и выходит за рамки наблюдательной программы.

SRGe J131253.5+725502. В этом скоплении наблюдается эффект сильного гравитационного линзирования фоновых галактик, который описан в работе [124]. В этой работе приведены фотометрические оценки красного смещения скопления, поэтому нами принято решение провести спектроскопические наблюдения галактик этого скопления на телескопе БТА.

SRGe J132950.1+564752. Это наиболее далекое скопление галактик, обнаруженное в обзоре всего неба *CPG/eROSITA*, красное смещение которого удалось измерить спектроскопическим образом. Спектр галактик этого скопления получен 14–15 мая 2021 г. на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*. В общей сложности было получено 16 спектроскопических изображений по 1200 с каждое в решетке *VPHG1200@860*. Координаты центра щели 13 29 50.1 +56 47 52, позиционный угол щели $PA = 276.7^\circ$. В результате обработки измерено красное смещение наиболее яркой галактики скопления: $z_{spec} = 1.298$

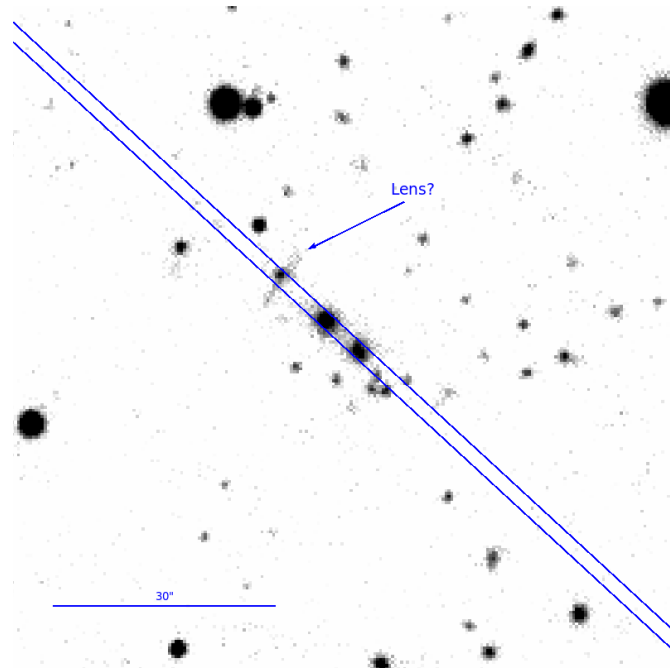


Рисунок 2.13 — Изображение в фильтре r центральной области скопления галактик SRGe J022418.2+301934, взятое из обзора *DESI LIS*. Синими линиями показаны контуры щели *TDS* шириной $2''$. Стрелочкой показан кандидат в линзированную галактику.

с координатами $13\ 29\ 51.4\ +56\ 47\ 50$. Спектр этой галактики приведен на рисунке 2.9 в нижнем ряду справа. Так же на щель спектрографа попал свет от еще одной галактики, входящей в скопление. Спектр этой галактики оказался слабым и сильно зашумленным. Однако на нем можно различить спектральные особенности в области $9000\text{--}9200\ \text{\AA}$, которые могут быть фраунгоферовыми линиями K и H , а также $4000\ \text{\AA}$ – скачок на красном смещении $z \approx 1.3$.

Это скопление галактик отождествляется со скоплением галактик MOO J1329+5647 с фотометрической оценкой красного смещения $z_{phot} = 1.43 \pm 0.04$ [36]. Для этого скопления были получены глубокие прямые изображения. Получено по 24 изображения по 60 с в фильтрах iz 09 ноября 2021 г. на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*, качество $1.1''$. На телескопе *RC2500* на приборе *AstroNIRCam* 11 и 27 декабря 2021 г. было получено 72 изображения в фильтре J суммарной экспозицией 6945 с и 30 декабря 2021г. было получено 120 изображений в фильтре K суммарной экспозицией 3500 с. Псевдоцветное изображение скопления приведено на рис. 2.14.

SRGe J135353.3+733157. Спектр cD -галактики этого скопления содержит яркую запрещенную линию $[\text{OII}]\lambda 3727$. Координаты галактики $13\ 53\ 53.2$

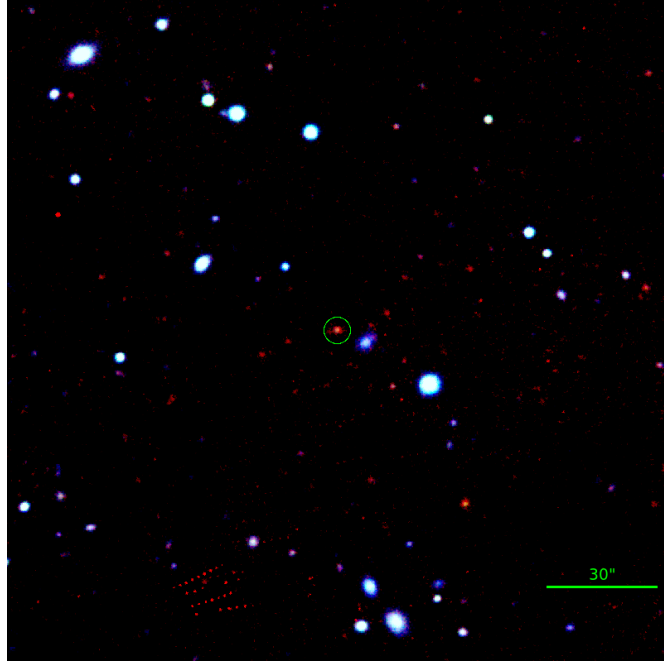


Рисунок 2.14 — Псевдоцветное изображение в фильтрах Jzi (RGB) скопления галактик SRGe J132950.1+564752. Зеленой окружностью обозначена наиболее яркая галактика скопления, для которой был получен спектр на БТА. Суммарная экспозиция в фильтрах iz – 1440 с (БТА, *SCORPIO-2*), в фильтре J – 6945 с (2.5-м телескоп КГО, *AstroNIRCam*).

+73 31 56, измеренное спектроскопическое красное смещение $z_{\text{spec}} = 0.4780$. В предыдущей работе [74] мы приводили оценки темпа звездообразования наиболее ярких галактик скоплений, оцененных по светимости галактики в линии [OII] λ 3727. В случае скопления SRGe J135353.3+733157 звездообразование наблюдается в наиболее яркой галактике скопления в ее центральной части. Поэтому для него мы так же оценили темп звездообразования.

Для этого мы оценили межзвездное поглощение, используя модель из работы [125], которое для скопления SRGe J135353.3+733157 с координатами $l \approx 117^\circ$ и $b \approx 43^\circ$ оказалось пренебрежимо мало $E(B - V) = 0.007 \pm 0.025$. Поток в линии [OII] λ 3727 равен $F_{[\text{OII}]\lambda 3727} = (3.6 \pm 0.4) \times 10^{-15}$ эрг/с/см². Для определения светимости в линии мы использовали Λ CDM-модель плоской Вселенной с параметрами $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_M = 0.3$. Светимость в линии [OII] λ 3727 оказалась равна $L_{[\text{OII}]\lambda 3727} = (3.1 \pm 0.3) \times 10^{42}$ эрг/с. Если не учитывать возможный вклад от излучения активного ядра галактики, то, используя соотношение из работы [126], можно оценить верхний предел на темп звездообразования как $SFR < 43 \text{ M}_\odot/\text{год}$.

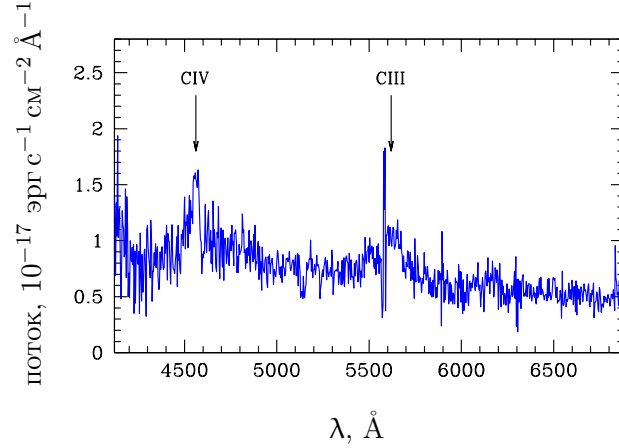


Рисунок 2.15 — Спектр квазара на красном смещении $z_{\text{spec}} = 1.945$, полученный на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2* при наблюдении скопления галактик SRGe J143202.2+851737.

SRGe J143202.2+851737. При наблюдениях этого скопления галактик на телескопе БТА в щель спектрографа *SCORPIO-2* попал квазар на красном смещении $z_{\text{spec}} = 1.945$, расположенный на удалении около $2'$ от центра скопления, координаты квазара 14 32 03.1 +85 15 28. Красное смещение квазара было измерено по линиям излучения CIII λ 1908 и CIV λ 1549 (см. рис. 2.15). В обзоре CPG/*eROSITA* не обнаружено рентгеновского источника, который совпадал бы по координатам с этим квазаром.

SRGe J162545.1+672930. В центральной области этого скопления есть очень слабая протяженная структура на изображениях обзора *DESI LIS*, которая может быть линзируемой галактикой, координаты объекта 16 25 45.7 +67 29 46 (рис. 2.16). Яркость объекта очень низкая, поэтому он не рассматривался как цель для спектроскопических наблюдений.

SRGe J172321.5+235041. Наблюдения *cD*-галактики скопления, с координатами 17 23 21.6 +23 50 39, проводились 3 августа 2022 г. на телескопе РТТ-150. Спектр галактики сильно зашумлен и содержит линии излучения H α и [NII] λ 6584, 4000 Å скачок. Линии H β и [OIII] λ 5007 отсутствуют на уровне 2σ . Качество спектра позволяет измерить красное смещение *cD*-галактики скопления,

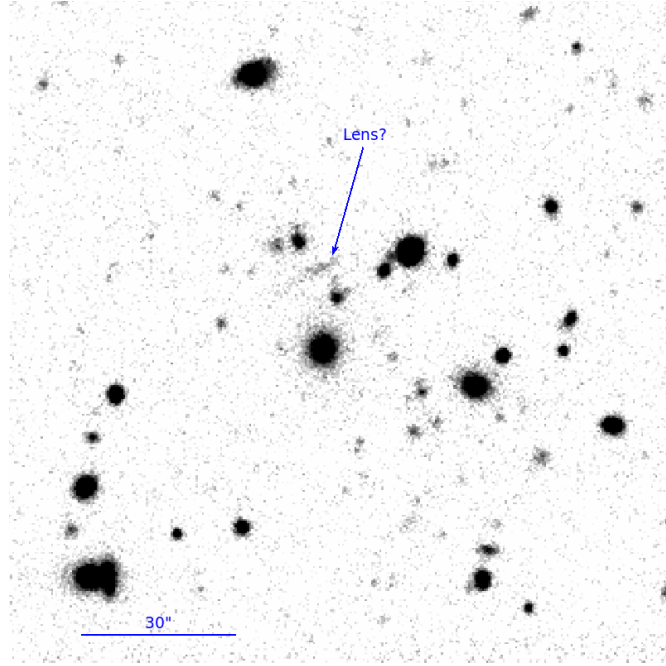


Рисунок 2.16 — Изображение в фильтре r центральной области скопления галактик SRGe J162545.1+672930, взятое из обзора *DESI LIS*. Стрелочкой показан кандидат в линзированную галактику.

но не позволяет достоверно измерить потоки в линиях $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6584$. Поэтому, чтобы утверждать про наличие активности в ядре cD -галактики скопления или наличия звездообразования в ней, необходимо провести дополнительные спектроскопические наблюдения.

SRGe J174629.3+472502. В центральной области этого скопления галактик есть протяженная структура с координатами 17 46 29.6 +47 24 44, которая может быть линзируемой галактикой (рис. 2.17). Поэтому при наблюдениях этого скопления галактик использовалась конфигурация щели, которая позволяла получить спектры большого числа галактик скопления, включая cD -галактику и спектр кандидата в линзируемую галактику. Наблюдения этого объекта проводились 28 июня 2020 г. на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*. Всего было получено три спектроскопических изображения по 900 с каждое при качестве $1.7''$. Были извлечены спектры 11 объектов, попавших на щель спектрографа, из которых шесть объектов оказались галактиками скопления SRGe J174629.3+472502 на красном смещении $z_{spec} \approx 0.482$. Спектр кандидата в линзированную галактику оказался слишком слабым, чтобы можно было измерить его красное смещение.

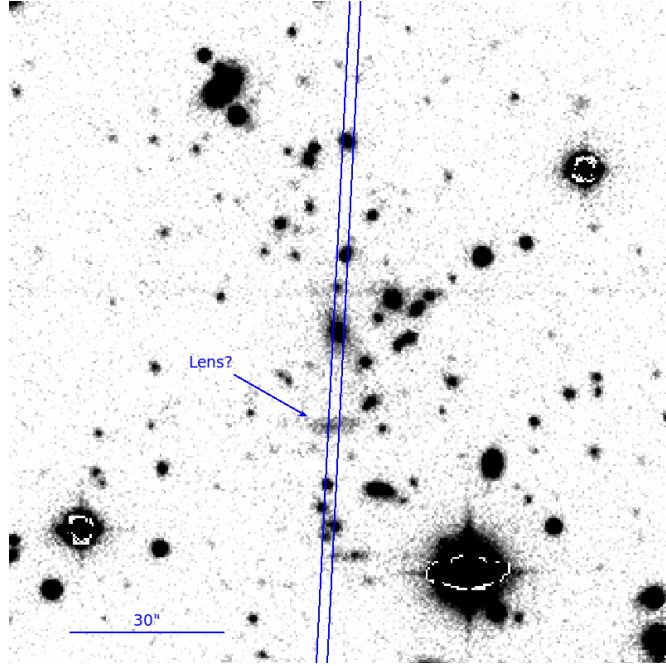


Рисунок 2.17 — Изображение в фильтре r центральной области скопления галактик SRGe J174629.3+472502, взятое из обзора *DESI LIS*. Синими линиями показаны контуры щели шириной $2''$. Стрелкой показан кандидат в линзируемую галактику.

SRGe J191751.9+692812. Спектр галактик этого скопления получен 27 августа 2022 г. на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*. Было получено восемь спектроскопических изображений по 1200 с каждое в решетке VPHG1200@860. Координаты центра щели 19 17 43.9 +69 27 51, позиционный угол щели $PA = 27.3^\circ$. В результате обработки измерены красные смещения двух галактик скопления: $z_1 = 1.096 \pm 0.003$, $z_2 = 1.101 \pm 0.005$. Сумма спектров этих двух галактик приведена на рис. 2.9 в верхнем ряду слева.

Также были получены глубокие прямые изображения скопления. Получено 6 изображений по 90 с в фильтрах iz на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2* и получено 42 изображения в фильтре J суммарной экспозицией 4051 с на телескопе *RC2500* на приборе *AstroNIRCam*. Псевдоцветное изображение в фильтрах Jzi (RGB) поля скопления приведено на рис. 2.18.

SRGe J191842.1+744327. Спектр галактик этого скопления получен 23 октября 2020 г. на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*. Было получено 10 спектроскопических изображений по 900 с каждое в решетке VPHG1200@860 при качестве прямых изображений $2''$. Координаты центра щели 19 18 42.1 +74 43 31, позиционный угол щели $PA = 112.6^\circ$. В результате обработки из-

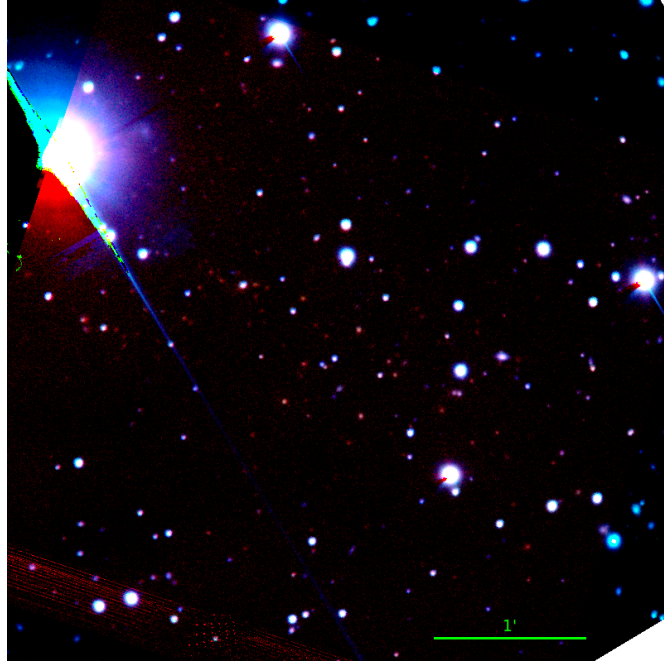


Рисунок 2.18 — Псевдоцветное изображение в фильтрах Jzi (RGB) скопления галактик SRGe J191751.9+692812. Суммарная экспозиция в фильтрах iz – 540 с (БТА, *SCORPIO-2*), в фильтре J – 4051 с (2.5-м телескоп КГО, *AstroNIRCam*).

мерено красное смещение наиболее яркой галактики скопления: $z_{spec} = 1.024$ координатами 19 18 45.0 +74 43 26, красные смещения других галактик на щели спектрографа достоверно определить не получилось. Спектр галактики приведен на рис. 2.9 в нижнем ряду слева.

Также 09 ноября 2020 г. были получены глубокие прямые изображения скопления. Получено по 16 изображений по 90 с в фильтрах riz на телескопе БТА на спектрографе *SCORPIO-2*. Качество изображений $1.4''$. Псевдоцветное изображение в фильтрах zir (RGB) поля скопления приведено на рисунке 2.19.

SRGe J215157.4+111248. Для этого объекта были получены спектры двух галактик (рис. 2.20 и 2.21), красные смещения которых были оценены как $z \sim 0.9$. Поэтому мы сделали учет атмосферного поглощения O_2 на 7580–7700 Å, как описано выше. На рис. 2.21 приведены спектры галактики до учета атмосферного поглощения и после. После учета поглощения на спектрах галактик обнаружены фраунгоферовы линии поглощения H и K . Сравнение их спектров со спектром шаблона возрастом 2.5 млрд лет $Z = 0.008$ позволяет определить красные смещение галактик как $z_{spec} = 0.914$ и $z_{spec} = 0.924$. Поэтому мы определили красное смещение скопления SRGe J215157.4+111248 как $z = 0.919$.

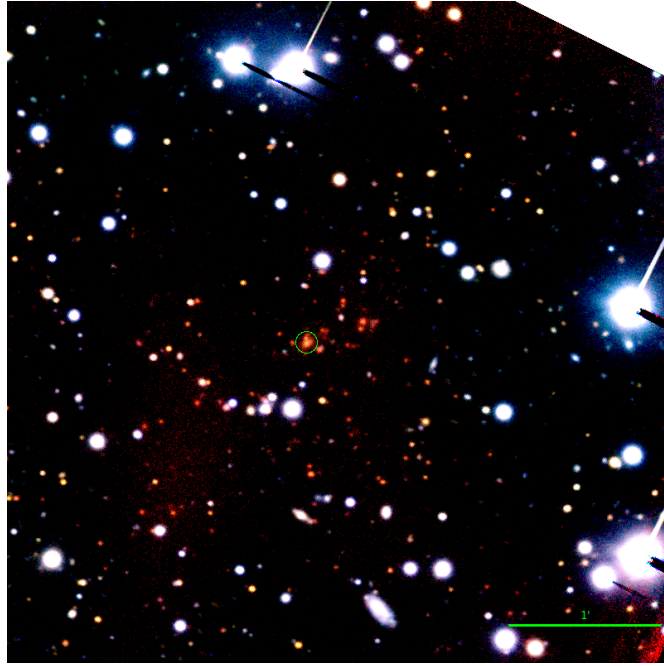


Рисунок 2.19 — Псевдоцветное изображение в фильтрах *zir* (RGB) скопления галактик SRGe J191842.1+744327. Зеленой окружностью обозначена наиболее яркая галактика скопления, для которой был получен спектр на БТА. Суммарная экспозиция в фильтрах *riz* – 1440 с (БТА, *SCORPIO-2*)

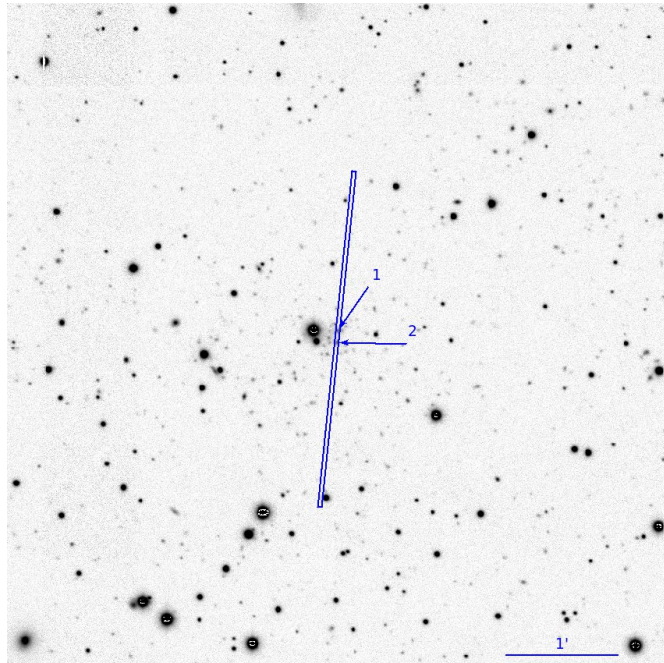


Рисунок 2.20 — Карта наведения в фильтре *r* скопления галактик SRGe J215157.4+111248 для наблюдения на телескопе БТА, взятая из обзора *DESI LIS*. Синим прямоугольником обозначена ориентация длинной щели спектрографа *SCORPIO-2* шириной $2''$. Позиционный угол щели $PA = 354.2^\circ$, координаты центра щели 21 51 57.9 +11 12 56. Галактики 1 и 2 обозначены стрелочками.

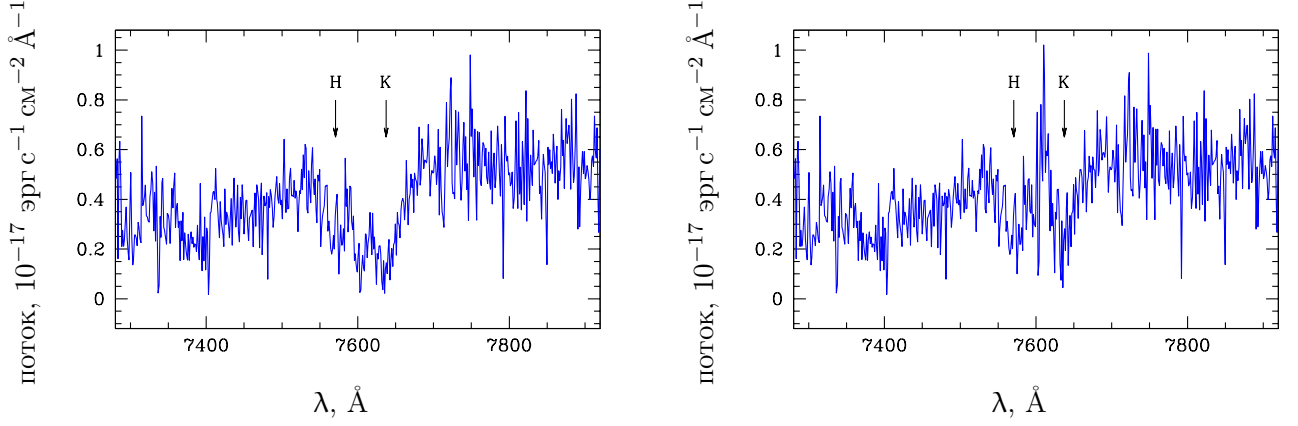
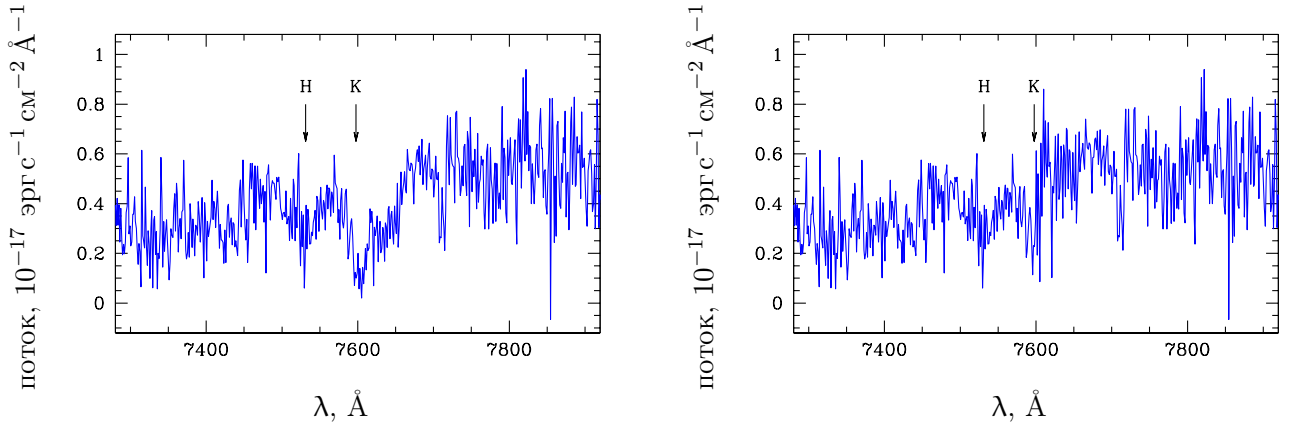
Галактика 1, $z = 0.924$ Галактика 2, $z = 0.914$ 

Рисунок 2.21 — Спектры двух галактик скопления SRGe J215157.4+111248. Показаны спектры галактик до учета атмосферного поглощения O_2 в левом ряду и после учета — в правом ряду.

2.5 Заключение

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 скоп-

ления. Показаны примеры обнаружения скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка в обзоре всего неба *SPG/eROSITA*.

В результате выполнения оптического отождествления и спектроскопических наблюдений скоплений галактик, обнаруженных в ходе обзора всего неба *SPG/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.

Глава 3. Оптическое отождествление скоплений галактик среди протяженных рентгеновских источников

3.1 Введение

Известно, что функция масс скоплений чувствительна к космологическим параметрам. Причем наибольшая чувствительность достигается на больших массах [127], 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 [128], однако для вычисления светимости необходима информация о красном смещении скопления. Поэтому нами и была выполнена описанная в Главах 1 и 2 работа по измерению спектроскопических красных смещений наиболее массивных скоплений, обнаруженных в обзорах Планка и SRG. Точность оценки космологических параметров улучшается с ростом числа объектов, но падает с уменьшением точности измеренных красных смещений [18]. 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 [31; 32]. Существует множество работ, в которых приведены фотометрические красные смещения галактик и скоплений галактик, в том числе полученные с применением методов машинного обучения, например, [31; 33; 37–42]. 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 смещений галактик, а также данных в рентгеновском и ИК диапазонах.

В этой главе обсуждается предложенный нами алгоритм отождествления скоплений галактик. Алгоритм измеряет фотометрические красные смещения скоплений галактик, которые наблюдаются как протяженные рентгеновские источники, а также рассчитывает параметр, характеризующий надежность отождествления.

3.2 Описание алгоритма

Скопления галактик в оптическом диапазоне наблюдаются как группа отдельных галактик. Из-за наличия на небе высокой плотности других источников – фоновых звезд в нашей Галактике и галактик не входящих в скопление, их оказывается сложно найти на небе по увеличению плотности оптических объектов в телесном угле. Однако, при наличии оценок красных смещений галактик в определенной области неба, скопления могут быть найдены по пику плотности галактик вдоль красного смещения. Статистически значимый пик плотности, который можно обнаружить в заданном направлении, не всегда является скоплением, иногда он появляется в результате наложения других крупномасштабных структур (таких, как космологические нити или стены) или, в небольшой доле случаев, увеличенной плотности гравитационно не связанных галактик.

В нашем алгоритме мы предоставляем оценки красных смещений скоплений галактик и вероятности отождествления галактик как скопление (надежность отождествления). Если кандидат в скопление был обнаружен как рентгеновский источник, то появляется возможность проверить надежность отождествления скопления по корреляции его рентгеновского потока и совокупной ИК-светимости входящих в него галактик [72]. Ниже мы описываем нашу методику отождествления и оценки красных смещений скоплений по избытку плотности галактик в заданном направлении, а также описываем методику оценки надежности отождествления по ИК и рентгеновским данным.

3.2.1 Поиск и отождествление скоплений галактик

Основным источником кандидатов в скопления в нашей работе будут протяженные рентгеновские источники, обнаруженные в различных рентгеновских обзорах, в основном, *eROSITA*. Для поиска скоплений галактик проводился отбор всех галактик в некотором поисковом объеме. Этот объем ограничен конусом, направленным на центр рентгеновского источника и имеющим раствор зависящим от размера рентгеновского источника. На больших значениях красных смещений физические размеры охватываемых областей пространства могут многократно превышать реальные размеры скоплений галактик. Поэтому мы также ограничиваем поисковый объем областью в пределах 800 кпк до направления на рентгеновский источник, что соответствует размеру R_{500} скопления галактик с массой $M_{500} = 3 \cdot 10^{14} M_{\odot}$ на красном смещении $z = 0.6$. Для вычисления расстояний от галактик до направления на центр рентгеновского источника будут использоваться их фотометрические оценки красных смещений.

Ошибка измерения расстояния до галактик, определенная по ошибке фотометрических красных смещений, оказывается значительно больше характерного размера скоплений. Поэтому для обнаружения скопления вдоль красного смещения мы используем подход "оптимальной фильтрации" (*matched filter*). Для этого мы строим карту наилучшего совпадения (которую мы будем называть распределением ИК-яркости) — это карта, имеющая вид суммы нормальных распределений с амплитудой, равной ИК-светимости галактик, средним значениям и дисперсии, равными их фотометрическим красным смещениям и соответствующей ошибки с добавкой. ИК-светимость используется в качестве нормировки, так как в центральных областях скоплений галактик содержатся эллиптические галактики, которые являются наиболее массивными и, соответственно, яркими в ИК-диапазоне, по сравнению с галактиками, не входящими в массивные скопления [129]. Добавка к ошибке, которую мы называем "сглаживающим коэффициентом" необходима для сглаживания распределения ИК-яркости в области максимума. Если не использовать сглаживающий коэффициент, то в ряде случаев может возникнуть ситуаций, когда вклад отдельных ярких галактик скоплений, имеющих высокую точность фотометрических красных смещений, будет настолько значителен, что максимум ИК-яркости будет в точности совпадать с фотометрическими красными смещениями этих галактик.

Для построения распределения ИК-яркости мы вычислили ИК-светимости галактик по следующим формулам:

$$IR_{abs} = IR - 5 \lg D + 5$$

$$F_{IR} = ZP_V \cdot W_{eff} \cdot 10^{-0.4IR_{abs}} (1 + photo_z) / k_{cor}$$

$$L_{IR} = F_{IR} \cdot 4\pi (10pc)^2$$

где IR_{abs} – абсолютная величина, IR – видимая ИК-величина, D – расстояние до галактик, F_{IR} – ИК-поток от галактик с расстояния 10 парсек, ZP_V – опорное значение спектральной плотности потока, W_{eff} – эффективная ширина пропускания фильтра, $photo_z$ – фотометрическое красное смещение галактик, k_{cor} – K -поправка, L_{IR} – ИК-светимость галактик. Вычисления расстояний проводятся стандартным образом для модели плоской Вселенной с параметрами $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$. K -поправки рассчитывались методом свертки шаблона спектра эллиптической галактики (с возрастом 2.5 Глет с металличностью $Z = 0.008$ [75]), смещенного на красное смещение $photo_z$, с кривой пропускания фильтра.

Распределение ИК-яркости вычислялось по следующей формуле:

$$f(z) = \langle \sigma_{photo_zerr}^i \rangle \cdot \sum_i \frac{L_{IRi}}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-(z-photo_z_i)^2/2\sigma_i^2}$$

где $photo_z$ и $photo_zerr$ – фотометрическое красное смещение и ее ошибка соответственно. $\sigma_i = \sqrt{photo_zerr_i^2 + \delta z^2}$, где δz – сглаживающий коэффициент. Полученное распределение умножалось на величину среднего значения $\langle \sigma_{photo_zerr}^i \rangle$, для того, чтобы максимальные значения распределений ИК-яркости галактик (далее по тексту – пики ИК-яркости) в поле скоплений примерно соотносились по величине с их реальной ИК-светимостью. Красное смещение, на которое приходится максимальная суммарная ИК-яркость галактик в заданной области неба, будет считаться предварительной оценкой красного смещения скопления $z_{предв.}$.

3.2.2 Оценка красных смещений скоплений

Мы будем полагать, что полученная предварительная оценка красного смещения скопления достаточно хорошо определена, тогда в достаточно малой окрестности относительно предварительной оценки красного смещения могут быть найдены галактики скопления, либо же фоновые галактики или галактики переднего плана с ошибочными оценками красных смещений. Чтобы уменьшить количество таких галактик, мы отбираем галактики у которых их красные смещения заключены в окрестности определенного диапазона красных смещений $z_{\text{предв.}} \pm z_{\text{отбр.}}(1 + z_{\text{предв.}})$ и их ошибки красных смещений не превышают определенное пороговое значение *photo_zerr_threshold* (оба параметра $z_{\text{отбр.}}$ и *photo_zerr_threshold* зависят от медианной ошибки фотометрических измерений красных смещений в конкретном каталоге).

Галактики отбирались на расстоянии не более $1.4R_{500}$ до направления на центр рентгеновского источника. Оценка R_{500} была получена по предварительной оценке массы скопления. В нашей работе оценка массы осуществляется из соотношения масса – светимость для рентгеновской светимости, полученной из измеренного рентгеновского потока с учетом $z_{\text{предв.}}$. Наши оценки показывают, что при существенном увеличении расстояния, больше указанного значения, будет увеличиваться количество отобранных фоновых галактик ближайших к скоплениям крупномасштабных структур, расположенных на смежных со скоплениями галактик красных смещениях. Уменьшение расстояния приведет к уменьшению числа отобранных галактик скоплений. Все это будет приводить к ухудшению точности оценки красных смещений скоплений галактик.

Последним шагом мы оцениваем значение красного смещения скопления z_{phot}^0 как средневзвешенное значение красных смещений всех отобранных галактик с весом, обратным квадратам ошибок красных смещений *photo_zerr*. Этот подход должен позволить усреднить все индивидуальные ошибки измерений красных смещений галактик, связанные со статистической ошибкой.

После этого из выборки исключались галактики, у которых фотометрические красные смещения находятся за пределами двух стандартных отклонений от z_{phot}^0 . Последние два шага (поиск средневзвешенного красного смещения и отсеив галактик по их отклонению от обновленной оценки) повторялся до тех пор пока при следующей итерации не будет исключено ни одной галактики. Полу-

ченное значение z_{phot} являются итоговым результатом, который предоставляет алгоритм.

3.2.3 Описание природы несоответствий

Как было показано в [18], даже при фотометрической точности измерений красных смещений при большом количестве объектов подобные выборки могут использоваться для получения сильных ограничений на космологические параметры. Однако в ряде случаев алгоритм может предоставлять измерение красного смещения с критической ошибкой, совершенно не соответствующей его реальному красному смещению или же предоставит оценку красного смещения для объекта, не являющегося скоплением. Кроме того, в случаях проекций массивных скоплений галактик разделить их рентгеновские потоки не представляется возможным. В этом случае нельзя оценивать массу проецируемых скоплений, используя только данные об их суммарном рентгеновском потоке. Объекты, которым были приписаны критически неверные измерения красных смещений или оценка масс, могут существенно испортить измеряемую функцию масс скоплений. Поэтому необходимо проверить качество работы алгоритма: оценить точность измерений фотометрических красных смещений и определить природу и частоту критических несоответствий.

Также несоответствие может произойти, если протяженный рентгеновский источник образован несколькими близко расположенными точечными источниками. В поле таких источников не наблюдаются скопления галактик, поэтому величина пиков ИК-яркости таких рентгеновских источников будет значительно ниже пиков ИК-яркости настоящих скоплений галактик, что позволит нам отсеять такие случаи.

Когда протяженный рентгеновский источник связан со скоплениями галактик, несоответствие по измеренному красному смещению может возникнуть при случайно возникшем согласовании фотометрических красных смещений нескольких гравитационно не связанных галактик поля. Фоновые галактики в направлении на источник будут производить ложные вторичные пики ИК-яркости ввиду стохастических флуктуаций их плотности по красному смещению в направлении на скопление и флуктуаций фотометрических ошибок измерения

их красных смещений. Эти пики могут быть отсеяны, если их яркость значительно уступает ИК-яркости настоящих скоплений.

Также несоответствие может возникнуть при проецировании фоновых крупномасштабных структур: других скоплений галактик, групп галактик, галактических филаментов или стен. В некоторых случаях ИК-яркость вторичных пиков может соответствовать яркости пиков от скоплений галактик. Масса таких структур, как правило, меньше массы скоплений галактик, поэтому для отсева проецируемых структур можно оценивать их массу независимым от рентгеновского излучения образом и сравнивать с массами реальных скоплений галактик.

3.2.4 Оценка масс проецируемых скоплений

Известно, что между светимостями скоплений галактик в ИК-диапазоне и их массой наблюдается корреляция [25; 72–74]. ИК-светимость скоплений галактик измеряется по ИК-светимостям входящих в них галактик. Для большинства галактик в поле рентгеновского источника, кроме самых тусклых, мы имеем фотометрические красные смещения, что позволит нам уверенно разделить галактики, принадлежащие к разным проецируемым структурам. Поэтому измерение ИК-светимости структур, производящих вторичные пики ИК-яркости, поможет нам обнаружить проекции скоплений галактик, либо отсеять вторичные пики, связанные с маломассивными структурами, а также оценить массы таких структур независимо от рентгеновских данных.

3.2.5 Определение надежности оптического отождествления

Исходя из предполагаемой природы критической ошибки, мы определяем параметр надежности оптического отождествления скоплений как произведение вероятности отождествления рентгеновского источника с ложным пиком ИК-яркости на вероятность наблюдаемого отношения полученного значения ИК-светимости к рентгеновскому потоку. Для реальных скоплений ИК-свети-

мость скоплений и рентгеновский поток должны сильно коррелировать [130], а для ложных отождествлений будут зависеть от свойств каталога, используемого для отождествления. Обе вероятности могут быть получены при помощи исследования случайных выборок объектов в используемых для отождествления каталогах ИК объектов с фотометрическими оценками красных смещений.

Наблюдаемая плотность галактик в зависимости от красного смещения будет зависеть от чувствительности используемого каталога (например, очевидно, что число тусклых галактик будет уменьшаться с ростом красного смещения). Таким образом спектр амплитуды ложных пиков ИК-яркости зависит от красного смещения и характеристик каталога, который используется при отождествлении. В случае, если предоставленный в алгоритм кандидат не является реальным скоплением, он будет ложно отождествлен с пиком ИК-яркости фоновых галактик.

3.3 Использование алгоритма для отождествления скоплений из обзора *eROSITA*

Предполагается, что описываемый алгоритм будет использован для отождествления и измерения красных смещений скоплений галактик, которые в последствие, вероятно, войдут в космологические выборки СРГ/*eROSITA*. На точность фотометрических оценок красных смещений и количество несоответствий могут в значительной степени повлиять используемые данные. Поэтому мы предлагаем описать данные обзоров и каталогов, которые могут быть использованы для отождествления скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/*eROSITA*, и на основе этих данных определить параметр надежности отождествления. В этом разделе мы подробно опишем какие данные использовались.

3.3.1 Фотометрические оценки красных смещений галактик

Ключевыми данными для работы алгоритма являются оценки красных смещений галактик в направлении на кандидата в скопление. Для качественной работы алгоритма необходимо, чтобы такие оценки были предоставлены с как можно низкой ошибкой и малой долей катастрофических выбросов. Необходимо, чтобы используемый каталог галактик покрывал как можно большую площадь северного внегалактического неба, в широком диапазоне наблюдаемых величин и красных смещений.

В нашей работе мы использовали фотометрические оценки красных смещений галактик, представленные в работе [38] (далее по тексту Ц22). В этой работе приведены оценки красных смещений галактик, полученные с использованием данных обзоров неба *Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)*, *Dark Energy Survey (DES)* и *Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program (HSC-SSP)*. Данные доступны для скачивания с сайта Национального центра астрономических данных *NADC*¹ министерства науки и технологий Китайской Народной Республики. В нашей работе мы использовали данные фотометрических оценок красных смещений галактик, основанные на 9 выпуске обзора *DESI LIS*. Этот обзор покрывает большую площадь неба, по сравнению с обзорами *DES* и *HSC-SSP*. Кроме того, этот обзор проводился, преимущественно, на северном внегалактическом небе, на котором расположена большая часть доступных нам скоплений галактик *eROSITA*.

В работе Ц22 для данных обзора *DESI LIS* определены красные смещения оптически протяженных объектов ярче $r < 23$. Всего таких источников оказалось около 320 миллионов на площади неба 19876 кв. градусов. Для 2.8 миллионов галактик на полях этого обзора известны их спектроскопические красные смещения из открытых источников, таких как Слоановский обзор неба [27] и другие. Полный список спектроскопических обзоров приведен в таблице 2 в работе [131].

Фотометрические красные смещения галактик в работе Ц22 определены методом построения локальной линейной регрессии между пространством цветов галактик и их красными смещениями, где галактики отбирались методом

¹<https://nadc.china-vo.org/>

K -ближайших соседей. Метод основан на поиске нескольких галактик с известными красными смещениями с показателями цветов, схожими с показателями цветов исследуемых галактик с неизвестными красными смещениями.

Качество определения фотометрических красных смещений галактик приведено в таблице 3 в работе Ц22. Видно, что для галактик $18 < r < 22$ на красных смещениях до $z < 0.6$, точность фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI LIS* лучше точности фотометрических красных смещений галактик из обзоров *DES* и *HSC-SSP*. Точность измерения красных смещений галактик из обзора *DESI LIS* составляет $\delta z / (1 + z) = 0.0172$, количество катастрофических выбросов ($\delta z / (1 + z) > 0.15$) составляет 0.85% от общего числа.

Для работы использовался каталог фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI LIS*. Использовались только данные координат галактик, приведенные в колонках *RA* и *DEC*, а также данные фотометрических красных смещений и их ошибок, приведенных в колонках *PHOTO_Z* и *PHOTO_ZERR*. Среднее значение ошибки фотометрического красного смещения галактик этого каталога составляет $\langle \sigma_{photo_zerr}^i \rangle = 0.0884$. Исходя из характеристик используемого каталога, мы определили наиболее оптимальные значения для нескольких параметров алгоритма, которые зависят от характеристик каталога красных смещений галактик. На этапе поиска и отождествления скоплений мы использовали сглаживающий коэффициент $\delta z = 0.02$. На этапе измерения красных смещений мы использовали порог точности красного смещения галактик $photo_zerr_threshold = 0.02$, а параметр отбора галактик по красному смещению $z_{отбр.} = 0.06$.

3.3.2 Используемые рентгеновские данные

В качестве кандидатов в скопления галактик использовались протяженные рентгеновские источники, обнаруженные в результате первых трех обзоров всего неба телескопа *eROSITA*. Для отождествления скоплений галактик и оценки их красных смещений использовались данные о потоках, координатах и размерах протяженных рентгеновских источников. Обработка данных телескопа *eROSITA* проводилась с использованием элементов пакета *eSASS* (*eROSITA*

Science Analysis Software System) и математического обеспечения, разработанного в научной группе по рентгеновскому каталогу Российского консорциума телескопа *eROSITA*. Более подробное описание процедур обработки и получения данных выходит за рамки этой работы.

Размеры рентгеновских источников определялись как радиус ядра β -модели r_c , которой аппроксимировался профиль поверхностной яркости протяженных рентгеновских источников [7]. Для построения распределения ИК-яркости отбирались галактики в радиусе $5r_c$ от центра рентгеновского источника. Значения R_{500} и M_{500} , используемые для работы алгоритма, получены из рентгеновских светимостей скоплений галактик. Методика вычисления рентгеновских светимостей скоплений, с учетом K -поправки, взята из работы [128]. При расчете светимостей учитывалось поглощение рентгеновского излучения на нейтральном галактическом водороде. Значения плотности колонки нейтрального водорода определялись по данным, взятым из работы [106].

3.3.3 Используемые данные в ИК-диапазоне

В работе использовались данные принудительной фотометрии *WISE* [69] в полосе 3.4 мкм ($W1$) галактик, координаты которых определены по данным обзора *Pan-STARRS1* и сопоставлены с каталогом *DESI LIS*, выпуск 9. В работе [69] фотометрия была получена из сборок данных с большей экспозицией, чем в обзоре *DESI LIS*, поэтому использовалась фотометрия из работы [69]. Эти данные имеются для большинства галактик из каталога Ц22. Для галактик, отсутствующих в каталоге *Pan-STARRS1*, использовалась фотометрия *WISE* из обзора *DESI LIS*.

Величины $W1$ принудительной фотометрии из работы [69] приведены в величинах $UBVRI$ системы (система Веги). Значения потока рассчитывалось с использованием эффективной ширины $W_{eff} = 6626.42 \text{ \AA}$ фильтра $W1$ и опорного значения спектральной плотности потока излучения в $UBVRI$ системе: $ZP_V = 8.1787 \cdot 10^{-12} \text{ эрг/с/см}^2/\text{\AA}$, данные взяты из сервиса профилей фильтров². Величины $W1$ из работы Ц22 приведены в AB -системе, поэтому для них $ZP_V = 9.5950 \cdot 10^{-11} \text{ эрг/с/см}^2/\text{\AA}$.

²<http://svo2.cab.inta-csic.es/theory/fps/>

3.4 Измерение ИК-светимости скоплений и оценка их масс

При проекциях скоплений галактик может происходить сложение их рентгеновского излучения в один протяженный источник. В этих случаях мы не можем оценить массы каждого проецируемого скопления отдельно, используя соотношение масса – рентгеновская светимость. Поэтому для измерения функции масс скоплений галактик нам необходимо оценивать массы скоплений независимо от их рентгеновского излучения, используя методы, которые слабо чувствительны к проецированию скоплений.

Для этого мы будем использовать корреляцию между массой скоплений и их ИК-светимостью. В ряде работ была продемонстрирована корреляция масс скоплений с ИК-светимостью в фильтре Ks [72] с разбросом $\sigma_{lg M} = 0.125$, что может быть сравнимо с оценкой масс по рентгеновской светимости скоплений [128]. Используя данные фотометрических красных смещений галактик, мы можем получить слабо чувствительные к проецированию оценки масс скоплений по их ИК-светимости.

Для того, чтобы мы могли установить точную зависимость массы скоплений от их ИК-светимости, необходимо определить метод измерения ИК-светимости скоплений галактик и откалибровать зависимость на выборке скоплений. Для этого мы подготовили проверочную выборку скоплений, определили методику измерений ИК-светимости скоплений на примере этой выборки и оценили точность измерений.

3.4.1 Проверочная выборка скоплений галактик

Для калибровки зависимости масс скоплений от их ИК-светимости, мы использовали выборку массивных скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба $CPG/eROSITA$ на участке неба, за обработку которого отвечают российские ученые ($0^\circ < l < 180^\circ$), и также обнаруженных в обзоре космической обсерватории им. Планка [15; 16; 25].

В ходе первых трех обзоров всего неба $CPG/eROSITA$ получена выборка 2317 массивных скоплений галактик из обзора Планка на внегалактическом

небе ($|b| > 20^\circ$). Из них для 1053 скоплений оказались измерены спектроскопические красные смещения. Скопления галактик на $z < 0.1$ известны, а галактики скоплений на $z > 0.6$, как правило, имеют значительно большую ошибку фотометрических красных смещений (см. таблицу 3 из работы Ц22). Большинство скоплений, для которых будет использоваться алгоритм, скорее всего располагаются в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 0.6$, это значительно упрощает выбор каталогов фотометрических красных смещений галактик. Из выборки скоплений галактик с измеренными красными смещениями 804 скопления галактик расположены на красных смещениях $0.1 < z_{spec} < 0.6$. Поскольку использовались данные фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI LIS* и данные принудительной фотометрии *WISE* галактик из обзора *Pan-STARRS1*, отбор объектов проводился в области пересечения обзоров *DESI LIS*, *Pan-STARRS1*. Поэтому итоговая проверочная выборка скоплений галактик составляет 634 скопления галактик.

Массы скоплений выборки мы оценили по данным об их рентгеновских потоках, полученных в ходе обзора всего неба телескопа *eROSITA*. Для этого мы взяли спектроскопические красные смещения этих скоплений из других каталогов, например, [15; 16; 33; 93; 132–134] и из базы данных внегалактических объектов *NED*³. Также использовались спектроскопические красные смещения скоплений галактик из обзора Планка, взятые из работ нашей научной группы [15; 16; 32; 57; 59; 62–65; 69; 74; 103; 135]. Красные смещения 121 скоплений выборки были измерены нашей группой и были опубликованы в наших работах [63–65; 104]. Используя данные о рентгеновских потоках и красных смещениях скоплений мы оценили их массы стандартным способом [128] из рентгеновских светимости скоплений.

Распределение масс и красных смещений скоплений галактик проверочной выборки представлено на рисунке 3.1. Видно, что практически все скопления из выборки являются массивными. Для большинства скоплений спектрометрические красные смещения измерены различными коллективами и опубликованы в ряде отдельных работ (см. таблицу 14).

³<https://ned.ipac.caltech.edu/>

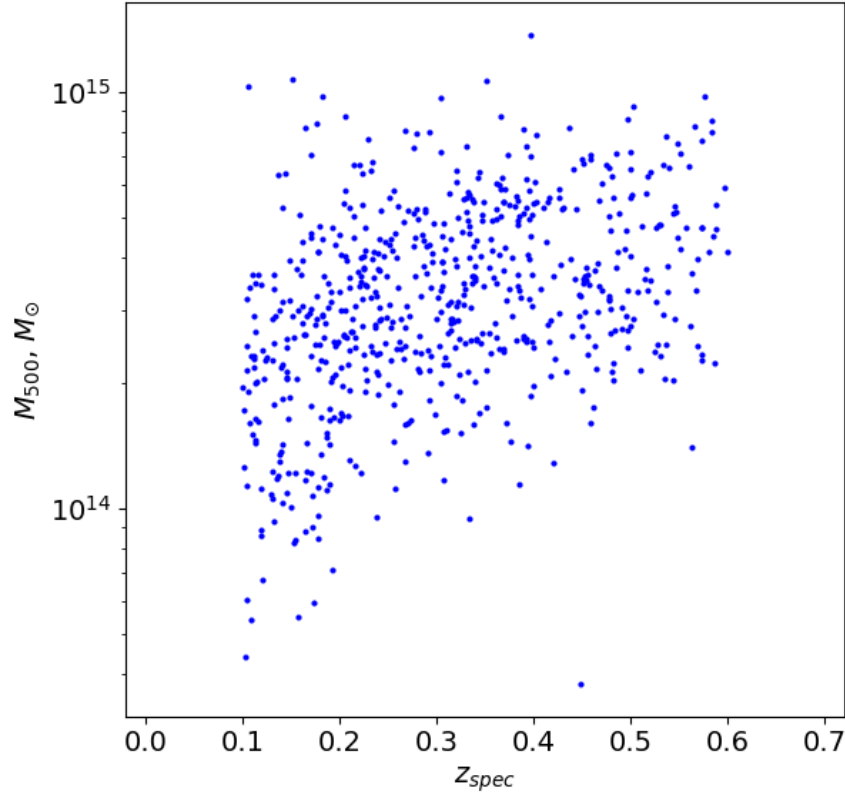


Рисунок 3.1 — Распределение масс M_{500} от спектроскопических красных смещений проверочной выборки из 634 скоплений галактик из обзора *CPG/eROSITA*.

Таблица 14 — Количество скоплений галактик проверочной выборки, встречающихся в других известных каталогах.

Название источника	Число скоплений	С измеренными z_{spec}
Abell [99]	131	71
PSZ2 [16]	148	126
ACT [120]	129	98
RM [31]	486	—
B17 [25]	442	391
WHL [33]	422	164
REFLEX [133]	68	68
MCXC [134]	93	93
MACS [118]	24	6
Наша группа [63–65; 104]	121	121

3.4.2 Оценка масс скоплений по их ИК-светимости

Для измерения ИК-светимости скоплений мы используем данные из обзора *WISE* в фильтре *W1*. Этот фильтр имеет диапазон близко расположенный к диапазону фильтра *Ks*, использовавшийся в работе [72]. В свою очередь фотометрические данные обзора *WISE* в фильтре *W1* доступны по всему небу и имеют большую глубину и точность, чем данные обзора *2MASS* в фильтре *Ks*.

Чтобы оценить ИК-светимости скоплений галактик, мы отбирали галактики в поле скоплений, у которых угловые расстояния до центров рентгеновских источников не превышают угловые размеры $1.4R_{500}$. Далее среди этих галактик мы отбирали галактики, значения $photo_z$ которых отличается от фотометрического красного смещения скопления не более, чем на две величины ошибок. Ограничения на относительную точность фотометрических красных смещений галактик при этом не устанавливалось. ИК-светимости скоплений галактик рассчитывались как сумма ИК-светимостей всех отобранных галактик с учетом *K*-поправки. Светимости и *K*-поправки галактик рассчитывались с учетом фотометрических красных смещений для каждой галактики отдельно, а не всего скопления в целом.

Полученные результаты приведены на рисунке 3.2. Слева на рисунке показано соотношение светимостей L_{W1} скоплений галактик проверочной выборки в фильтре *W1* в зависимости от их масс M_{500} , которые были оценены на основе рентгеновских данных *eROSITA* [128] и их фотометрических красных смещений. Красной линией показана наилучшая аппроксимация прямой $lg(L_{W1}) = lg(M_{500}) + k$, где $k = 30.11$, L_{W1} приведена в эрг/с, а M_{500} в $M_{\odot}$. Справа на рисунке 3.2 показано распределение отклонений масс скоплений. Красной кривой показана аппроксимация нормальным распределением.

Стандартное отклонение распределения равняется $\sigma_{lg M_{500}}^{tot} = 0.124$, то есть $\pm 33\%$. В работе [128] отклонение рентгеновских светимостей скоплений относительно их масс $\sigma_{ln L} = 0.396$, что дает отклонение масс относительно рентгеновских светимостей $\sigma_{lg M_{500}} = 0.107$. Следовательно, используя приведенную методику, мы можем независимо от рентгеновских данных оценивать массы скоплений. Однако полученные измерения могут оказаться немного завышенными в случае проекций галактик, так как оцениваемые значения R_{500} будут завышены.

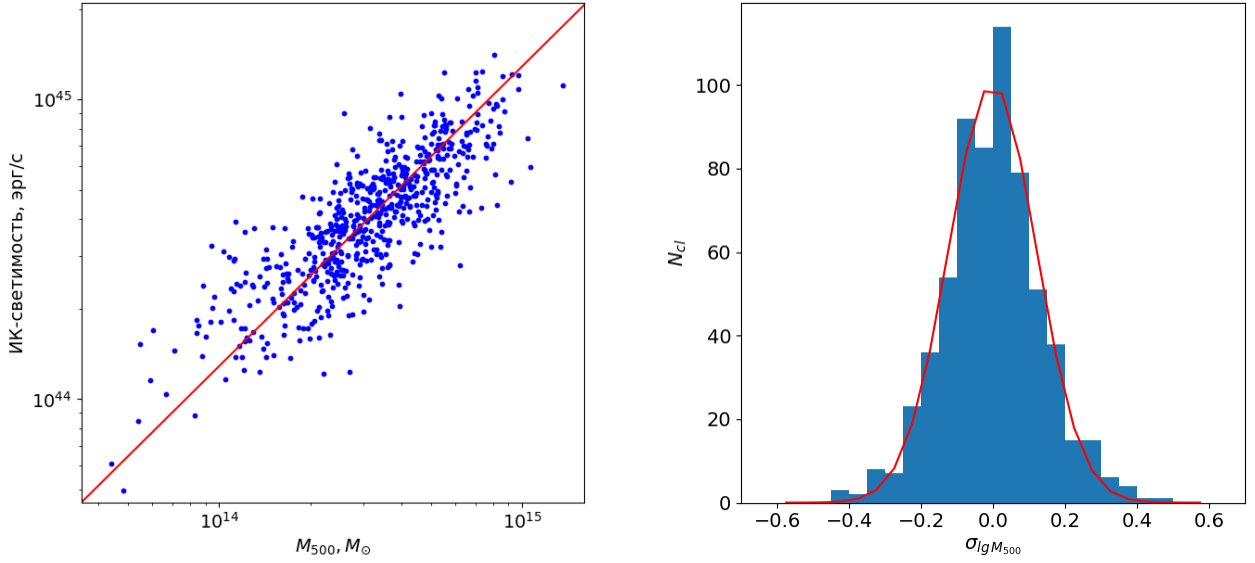


Рисунок 3.2 — Слева: значение светимостей L_{W1} скоплений галактик проверочной выборки в фильтре $W1$ и их масс M_{500} . Красная линия – линия наилучшего соотношения $lg(L_{W1}) = lg(M_{500}) + k$. Справа: гистограмма распределения $\sigma_{lg M_{500}}$ относительно линии аппроксимации.

3.5 Проверка статистических характеристик измерений алгоритма

Целью алгоритма является предоставление трех характеристик: красного смещения скопления, оценки его массы по ИК-светимости и надежности отождествления (вероятности того, что протяженный рентгеновский источник действительно является реальным скоплением галактик на измеренном красном смещении). Все характеристики измеряются на основе фотометрических красных смещений и каталогов ИК-величин объектов. Качество работы алгоритма проверяется на специальной калибровочной выборке, скопления которых имеют красные смещения, измеренные спектроскопическим образом с точностью не хуже $\delta z/(1+z) \approx 0.001$. В данном случае мы использовали проверочную выборку из прошлой главы. Далее мы опишем, как мы вычисляли независимые вероятности ложного отождествления, связанные с некорректным отождествлением галактик и рентгеновского источника, а также представим анализ точности измерений и надежности отождествления.

3.5.1 Оценка надежности оптического отождествления

Для того чтобы оценить показатель надежности оптического отождествления скоплений галактик, нами смоделирована выборка 10000 рентгеновских источников (далее по тексту – случайные источники), случайным образом распределенных на полях обзора *DESI LIS*. Координаты центров этих источников выбирались таким образом, чтобы угловое расстояние между их центрами было не менее $10'$. Значение потоков и радиусов случайных источников выбиралось случайным образом среди скоплений галактик проверочной выборки, обнаруженных в обзоре СРГ/*eROSITA*. В выборке случайных источников практически не должно быть объектов, расположенных в полях скоплений галактик. Если такие объекты появляются в выборке, то такие совпадения являются случайными и отражают вероятность того, что ложным способом был отождествлен настоящий рентгеновский источник с ложным. Число таких случайных совпадений мало и составляет не более нескольких десятков.

ИК-яркость скоплений

На рисунке 3.3 показаны значения пиков ИК-яркости в зависимости от красного смещения проверочной выборки и выборки случайных источников. Как мы и ожидали, пики ИК-яркости реальных массивных скоплений галактик во много раз выше, чем у случайных источников. Исходя из этого можно подтвердить вывод, что если рентгеновский источник не может быть отождествлен со скоплением галактик, то его пик ИК-яркости будет значительно меньше, чем у реальных скоплений (например, в случае, когда протяженный источник образован близко расположенными точечными).

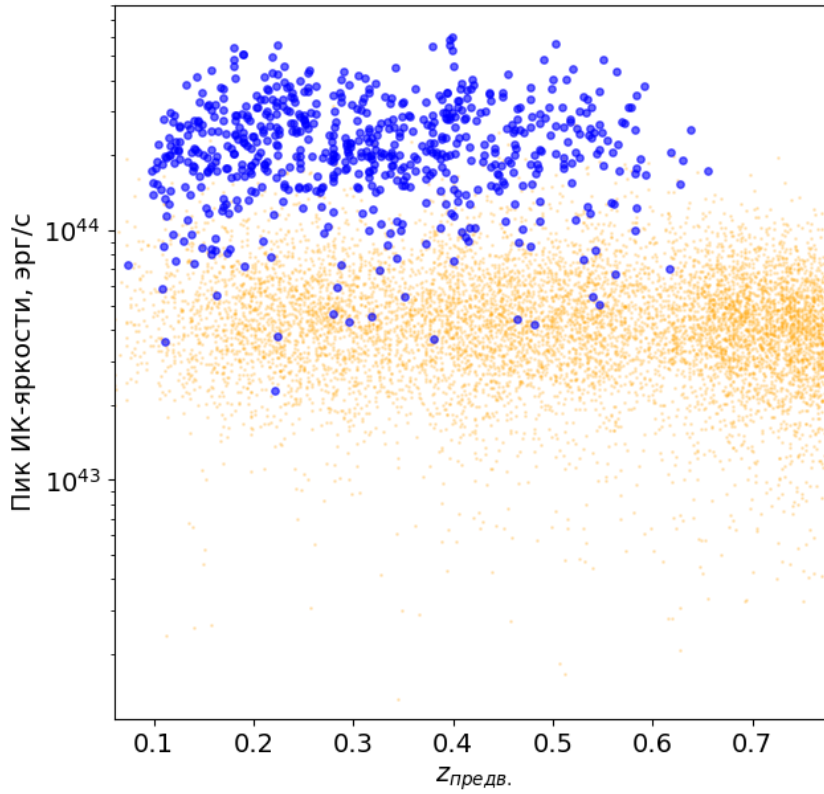


Рисунок 3.3 — Значения пиков ИК-яркости скоплений и их предварительные оценки красных смещений. Синими точками обозначены скопления проверочной выборки, оранжевыми — случайные источники.

Отношение ИК-светимости скоплений к их массам, определенным по рентгеновской светимости

Отношение ИК-светимостей скоплений к их массам также может быть использовано для оценки надежности отождествления скоплений галактик. На рисунке 3.4 показаны светимостей L_{W1} от масс M_{500} скоплений галактик проверочной выборки и выборки случайных источников. На рисунке видно, что оцениваемые ИК-светимости выборки случайных источников получаются в несколько раз меньше, чем для массивных скоплений проверочной выборки, поэтому низкое значение отношения их ИК-светимости к массе могут указывать на ненадежные отождествления. Это подтверждает предположение о том, что ИК-светимость может использоваться как параметр для оценки надежности отождествления.

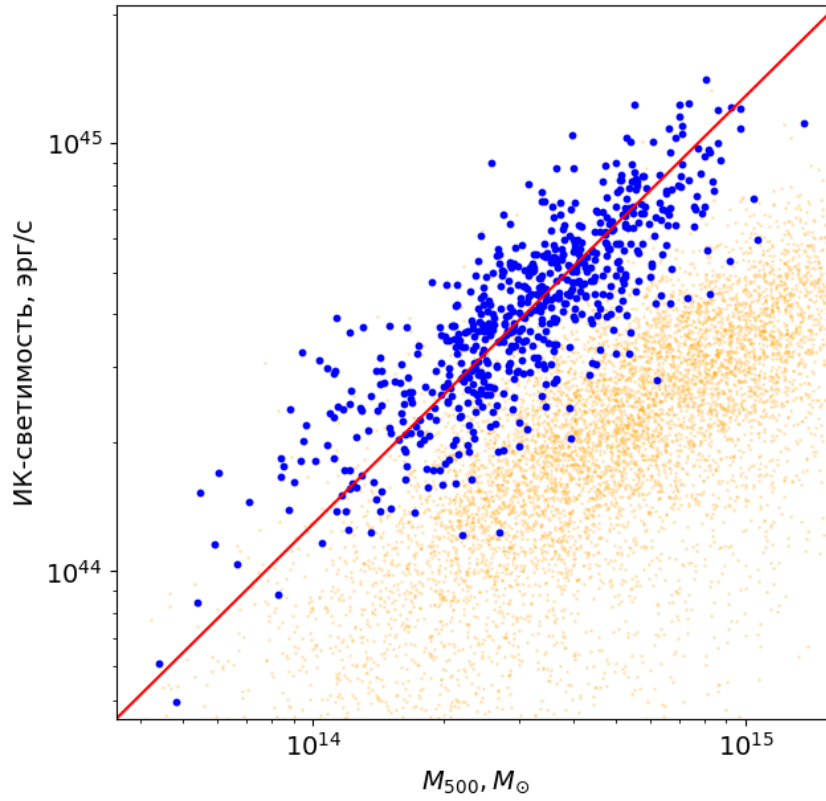


Рисунок 3.4 — Значение светимостей L_{W1} скоплений галактик в фильтре $W1$ и их масс M_{500} , определенных из соотношения масса – рентгеновская светимость. Синие точки – скопления галактик из проверочной выборки, оранжевые точки – случайные источники. Красная линия – линия наилучшего соотношения

$$\lg(L_{W1}) = \lg(M_{500}) + k.$$

3.5.2 Анализ точности красных смещений скоплений из проверочной выборки

Фотометрические красные смещения для проверочной выборки показаны на рисунке 3.5. Слева приведено сравнение фотометрических красных смещений z_{phot} , полученных алгоритмом, с их спектроскопическими измерениями z_{spec} . Зеленым цветом обозначена область, где $(z_{phot} - z_{spec}) / (1 + z_{spec}) < 4\sigma$. Красными звездочками показаны 9 скоплений, у которых наблюдаются большие отклонения фотометрических красных смещений относительно спектроскопических измерений из-за наличия проекций. В полях этих скоплений галактик

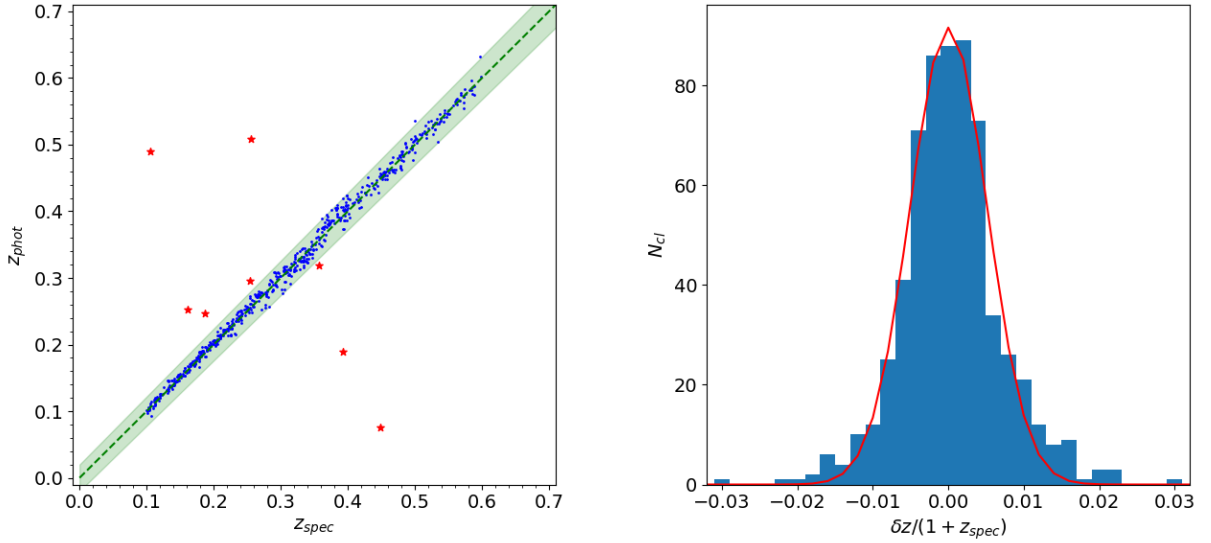


Рисунок 3.5 — Фотометрические красные смещения скоплений галактик. Слева: сравнение фотометрических оценок красных смещений z_{phot} скоплений галактик проверочной выборки с их спектроскопическими измерениями z_{spec} . Красными звездочками обозначены скопления галактик с большими отклонениями из-за возможных проекций, зеленым обозначена область 4σ . Справа: гистограмма распределения числа скоплений галактик от $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$, красной линией показана аппроксимация распределения гауссианой.

выделить главное скопление может быть затруднительно, поэтому возникают различия в отождествлении.

Справа на рисунке 3.5 приведена гистограмма распределения числа скоплений галактик от $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$, ширина столбца 0.001, красной линией показана аппроксимация распределения гауссианой. В таблице 15 приведены параметры этого распределения как для всего исследуемого диапазона красных смещений $0.1 < z_{spec} < 0.6$, так и для узких диапазонов. Приведены значения количества скоплений, смещения центроида распределения относительно $z_{phot} = z_{spec}$, стандартное отклонение. В последнем столбце показано количество скоплений галактик с большими отклонениями фотометрических красных смещений относительно измерений спектроскопических красных смещений из каталога, превышающими 5σ , которые объясняются проекциями скоплений галактик.

Достигнутая точность фотометрических красных смещений скоплений галактик превышает точность фотометрических красных смещений галактик каталога Ц22 на исследуемом диапазоне красных смещений примерно в три ра-

Таблица 15 — Результаты оценки красных смещений проверочной выборки галактик.

z_{spec}^1	N_{cl}^2	δz_0^3	σ^4	$> 5\sigma^5$
0.1 – 0.2	159	0.0028	0.0038	3 (1.9%)
0.2 – 0.3	158	0.0009	0.0047	2 (1.3%)
0.3 – 0.4	162	-0.0012	0.0091	2 (1.2%)
0.4 – 0.5	94	-0.0032	0.0058	1 (1.1%)
0.5 – 0.6	61	0.0000	0.0044	0 (0%)
0.1 – 0.6	634	0.0000	0.0051	8 (1.3%)

¹ – диапазон спектроскопических красных смещений скоплений галактик.

² – число скоплений галактик.

³ – значение σ аппроксимации гауссианой распределения $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$.

⁴ – значение центроида гауссианы.

⁵ – количество несоответствий фотометрических красных смещений скоплений галактик их спектроскопическим измерениям на уровне 5σ , возникающих из-за возможных проекций.

за. При этом количество несоответствий фотометрических красных смещений скоплений галактик их спектроскопическим измерениям на уровне 5σ , возникающих из-за возможных проекций, составляет около 1.3% на всем исследуемом диапазоне красных смещений.

3.5.3 Анализ надежности отождествления скоплений из проверочной выборки

На рисунке 3.6 слева показана оценка показателя надежности скоплений галактик из проверочной выборки, где синие точки — скопления галактик из проверочной выборки, оранжевые точки — выборка случайных источников. Видно, что оценка надежности массивных скоплений значительно превышает оценку надежности случайных источников. Справа синей линией показана доля скоплений галактик проверочной выборки ниже установленного порога надежности в зависимости от порога надежности, оранжевой линией показана доля случайных источников выше установленного порога надежности. Количество скоплений галактик проверочной выборки, у которых распределение

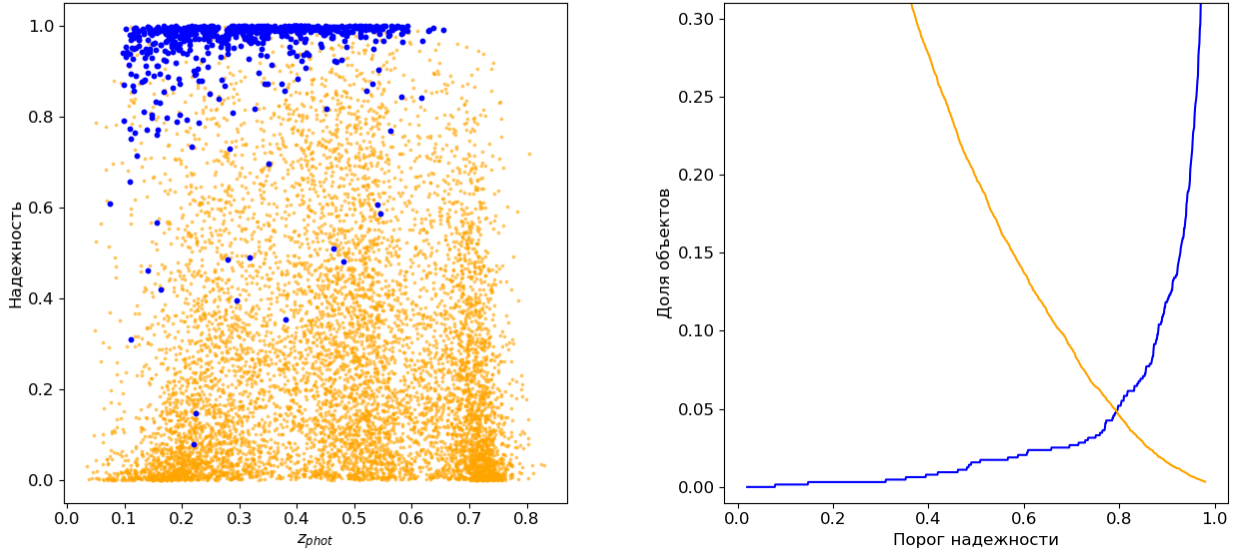


Рисунок 3.6 — Справа: оценка показателя надежности. Синие точки — скопления галактик из проверочной выборки, оранжевые точки — случайные источники. Справа синей линией показана доля скоплений галактик проверочной выборки ниже определенного порога надежности, оранжевой линией показана доля случайных источников выше определенного порога надежности.

ИК-яркости имеет вторичные пики, вероятность которых превышает 0.683 (1σ), составляет 189 (29.8%), а для 0.954 (2σ) составляет 22 (3.5%).

Если установить значение порога надежности на уровне 0.8, то 5.4% скоплений галактик проверочной выборки будут иметь показатель надежности ниже порога. При уменьшении порогового значения до 0.5 доля скоплений галактик проверочной выборки ниже порогового значения уменьшится до 1.7%. Доля случайных источников выше пороговых значений 0.8 и 0.5 будет составлять 4.6% и 19.8% соответственно. В обзоре всего неба *СПГ/eROSITA* скопления галактик достаточно надежно определяются как протяженные рентгеновские источники. Например, в случае, если 10% протяженных рентгеновских источников обзора *СПГ/eROSITA* не должны отождествляться со скоплениями, для пороговых значений 0.8 и 0.5 количество случайных источников, неправильно отождествленных алгоритмом как настоящие скопления галактик, будет составлять 0.5% и 2% всей выборки соответственно. Видно, что повышая порог надежности, уменьшается количество объектов, ложным образом отождествленных как скопления галактик.

В проверочной выборке содержатся массивные скопления галактик, которые, как мы предполагали, должны иметь показатель надежности, близкий к 1. Однако на рисунке 3.6 некоторые из них имеют низкий показатель надежности. Как мы выяснили, в большинстве этих случаев в каталоге Ц22 отсутствует фотометрическая оценка красных смещений некоторых cD -галактик скоплений. Вероятно, это связано с критериями отбора галактик из обзора *DESI LIS* в Ц22. Так как cD -галактики дают большой вклад в ИК-светимость скоплений и ИК-яркость в направлении на центр скоплений, отсутствие фотометрических красных смещений cD -галактик может уменьшить показатель надежности скоплений галактик. Поэтому некоторая небольшая часть настоящих скоплений галактик, которые будут отождествлены при помощи нашего алгоритма, могут иметь низкий показатель надежности.

3.6 Примеры работы алгоритма

3.6.1 Пример без проекции крупномасштабных структур

Покажем работу алгоритма на примере отождествления массивного скопления галактик PSZ2 G107.67 – 39.78 из проверочной выборки без проекции крупномасштабных структур в поле скопления. Координаты центра рентгеновского источника: 00 01 11.3 +21 32 14. На рисунке 3.7 слева изображено поле скопления галактик в фильтре r из обзора *DESI LIS*, справа показано распределение ИК-яркости скопления, где виден только один пик. Предварительная оценка красного смещения $z_{\text{предв.}} = 0.418$.

Для измерения красного смещения скопления галактик PSZ2 G107.67 – 39.78 было отобрано 70 галактик, по которым оценивалось красное смещение скопления. Полученная оценка $z_{\text{phot}} = 0.4183$ согласуется с предварительной оценкой красного смещения $z_{\text{предв.}} = 0.418$. Показатель надежности 0.998. Спектроскопическое красное смещение этого скопления галактик определено как среднее значение спектроскопических измерений красных смещений 13 галактик скопления [60] и равно $z_{\text{spec}} = 0.4113 \pm 0.0025$. Ошибка при этом составляет 0.5%: $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) = 0.0049$.

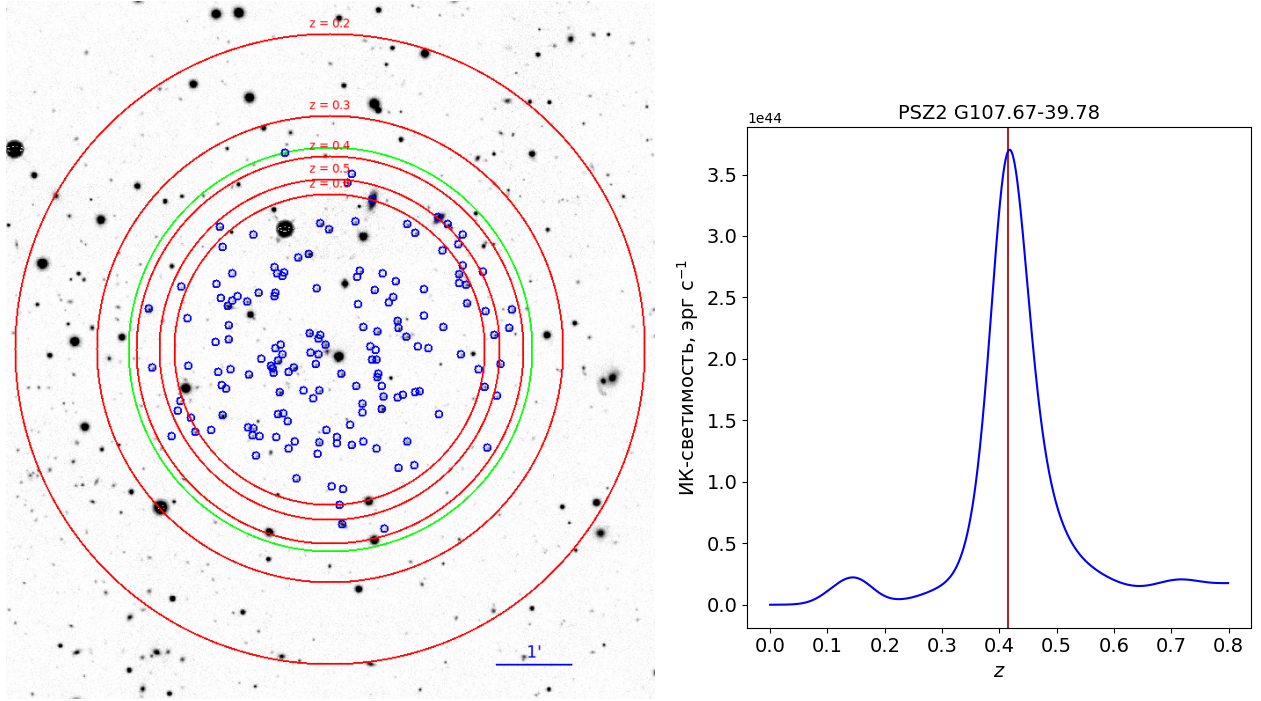


Рисунок 3.7 — Скопление галактик PSZ2 G107.67 – 39.78. Слева: отбор галактик для определения предварительной оценки красного смещения. Показано изображение *DESI LIS* в фильтре r , центр изображения соответствует центру рентгеновского источника *eROSITA* радиусом $31.7''$ (зеленая окружность). Синими окружностями показаны отобранные на первом этапе 156 галактик. Красными окружностями обозначены круги радиусом 800 кпк на разных красных смещениях. Справа: диаграмма распределения ИК-яркости. Вертикальной линией обозначено спектроскопическое красное смещение скопления.

3.6.2 Пример с проекцией крупномасштабных структур

Приведем пример работы алгоритма в случае проекции двух скоплений галактик на различных красных смещениях, отождествляемых с источником рентгеновского излучения большого углового размера. В поле скопления галактик PSZ2 G069.47 – 29.06 из проверочной выборки наблюдается проекция двух скоплений на красных смещениях $z = 0.1908$ [64; 90] и $z = 0.3920$ [63]. В работе [63] указано, что скопление на $z = 0.3920$ расположено ближе к источнику сигнала Сюняева–Зельдовича и более яркое в ИК-диапазоне, поэтому источник PSZ2 G069.47 – 29.06 отождествили со скоплением на красном смещении $z = 0.3920$.

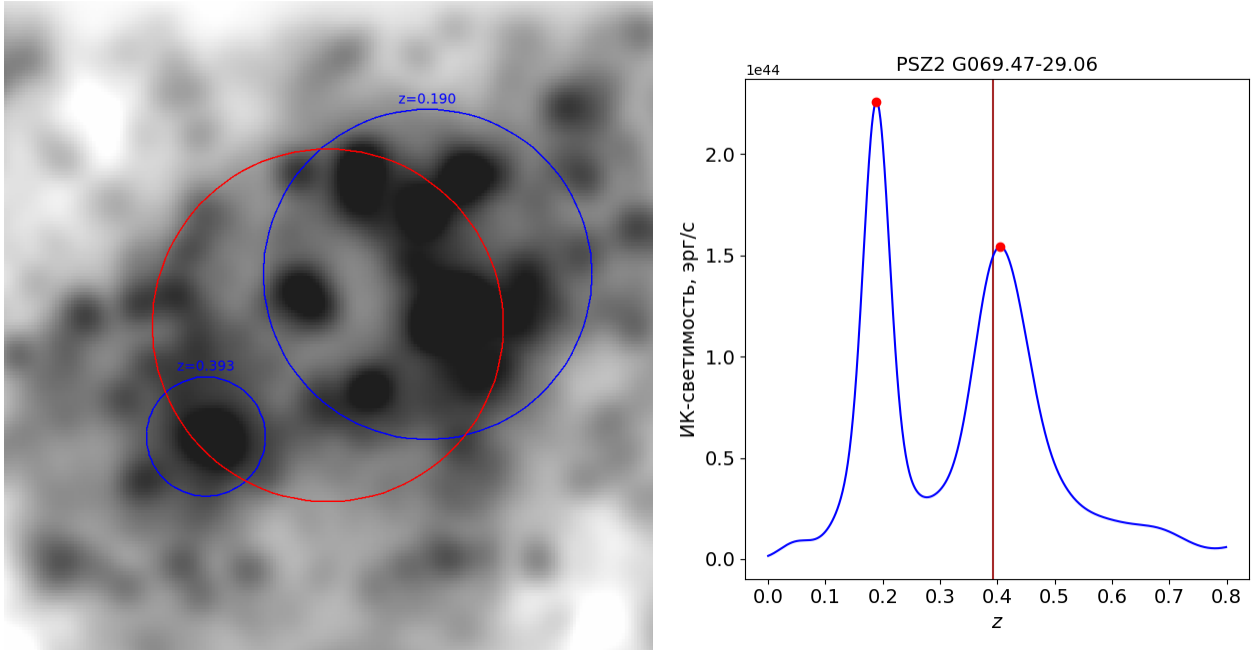


Рисунок 3.8 — Скопление PSZ2 G069.47–29.06. Слева — сглаженное с β -моделью радиусом $24''$ изображение *WISE* в фильтре *W1* из работы [63]. Красным кругом обозначен отождествляемый со скоплением источник *eROSITA* радиусом $158''$. Справа — распределение ИК-светимости галактик в центральной области скопления.

Источник PSZ2 G069.47–29.06 в рентгеновском диапазоне имеет большой радиус порядка $158''$. На рисунке 3.8 слева показано сглаженное изображение поля скопления в фильтре *W1* (как на рисунке 4 в работе [63]), где красной окружностью показан рентгеновский источник, угловой размер которого составляет $158''$. Видно, что в этом случае потоки от скоплений галактик складываются, что может увеличивать угловой размер рентгеновского источника и его поток. На рисунке 3.8 справа приведено распределение ИК-светимости, где видно два пика с большими значениями ИК-яркости. Красными точками показаны пики с предварительными оценками красных смещений $z_{\text{предв.}} = 0.189$ и $z_{\text{предв.}} = 0.405$. Алгоритм позволяет оценить красное смещение этого скопления галактик $z_{\text{phot}} = 0.1893$, что очень точно согласуется со спектроскопическими измерениями $z_{\text{spec}} = 0.1908$ одного из скоплений галактик проекции. Показатель надежности при этом равен 0.918.

3.7 Заключение

В этой главе описан алгоритм отождествления протяженных рентгеновских источников со скоплениями галактик, разработанный нашей группой. При помощи алгоритма мы можем оценить красные смещения и определить надежность отождествления скоплений галактик из обзора СРГ/*eROSITA*, которые войдут в космологические выборки обзора, но для них не будут измерены спектроскопические красные смещения. 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. Отметим, что характеристики фотометрических красных смещений, полученные в нашей работе, относятся к наиболее массивным скоплениям галактик. Для менее массивных скоплений надежность оптического отождествления должна быть хуже.

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 $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec}) = 0.02$. В недавней работе [41] достигнута сравнимая точность 0.47%, полученная для выборки массивных скоплений галактик из обзора Планка с использованием данных обзора всего неба СРГ/*eROSITA* и обзора *DES*.

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. 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.

Глава 4. Оптическое отождествление рентгеновских источников из обзора *СРГ/ART-XC*

4.1 Введение

Обзор *СРГ* уникален во многих отношениях. Предполагается, что после 8 обзоров всего неба, в диапазоне мягкого рентгеновского излучения (0.2–2.3 кэВ) *eROSITA* будет обнаружено несколько миллионов источников рентгеновского излучения, что в $\gtrsim 30$ раз больше, чем было обнаружено во время обзора всего неба космической обсерватории *ROSAT* [23], проведенного 30 лет назад. При более высоких энергиях *eROSITA* и *ART-XC* впервые будут обследовать все небо с угловым разрешением в доли угловой минуты. Ожидается, что обзор *ART-XC* в диапазоне энергий 4–12 кэВ значительно превзойдет предыдущие обзоры, проведенные в аналогичных (средних рентгеновских) диапазонах энергий по сочетанию углового разрешения, чувствительности и однородности, и окажет огромное влияние на наши знания о различных популяциях галактических и внегалактических объектов. Первые результаты миссии показывают, что она оправдывает эти ожидания [22].

В 2022 году был опубликован каталог источников, обнаруженных в диапазоне 4–12 кэВ телескопом *ART-XC* в течение первого года обзора всего неба (а именно на объединенной карте первого и второго сканов неба *ART-XC* или *ARTSS12*), включающий 867 источников [43]. 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).

Чтобы представить количество катаклизмических переменных звезд, уже обнаруженных *ART-XC* в контексте, отметим, что опубликованные выборки катаклизмических переменных, отобранные в мягком рентгеновском излучении (0.1–2.4 кэВ) из обзора всего неба обсерватории *ROSAT*, составляют ~ 50 объектов [136–138], а выборка катаклизмических переменных звезд из обзора *RXTE slew* в диапазоне 3–20 кэВ включает ~ 25 объектов [139]. В последнее время благодаря случайным обзорам в жестком рентгеновском диапазоне (выше

15 кэВ), проведенным обсерваториями [140–142], была получена выборка ~ 100 катаклизмических переменных звезд, данные были накоплены за ~ 15 лет. 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 [143]). На излучение в этом диапазоне энергий практически не влияют как низкоэнергетические (из-за фотопоглощения), так и высокоэнергетические обрывы, наблюдаемые в широкополосных рентгеновских спектрах катаклизмических переменных звезд.

Была организована программа дополнительных оптических наблюдений новых и ранее не отождествленных источников рентгеновского излучения в каталоге *ARTSS12*, которая уже привела к отождествлению нескольких активных ядер галактик, в том числе сильно поглощенных [144]. В этой главе представлены полученные нами результаты оптического отождествления еще трех источников *ART-XC*, которые оказались катаклизмическими переменными звездами.

4.2 Отбор объектов

Объекты для исследования (см. Таблицу 16) отобраны из каталога точечных источников, обнаруженных телескопом *ART-XC* на объединенной карте первого и второго обзоров неба (12 декабря 2019 г. – 15 декабря 2020 г.) на уровне значимости выше $S/N > 4.8$ в диапазоне энергий 4–12 кэВ. Положения источников были измерены с точностью до $30''$ (при достоверности 95%). Все три отобранных источника также были обнаружены *eROSITA*, что позволило уточнить их положение с точностью до нескольких угловых секунд (см. Таблицу 16) и построить их рентгеновские спектры в широком диапазоне энергий от 0.2 до 20 кэВ (с использованием данных как *eROSITA* так и *ART-XC*).

Все три объекта были обнаружены как источники рентгеновского излучения в ходе обзора всего неба космической обсерватории *ROSAT* (*RASS*), а позже также обнаружены в ходе обзора *XMM-Newton slew* [145], но до сих пор

Таблица 16 — Список источников.

Источник <i>ART-XC</i>	Координаты <i>eROSITA</i>			Координаты <i>Gaia</i>		Название <i>RASS</i>
	RA	Dec	R_{98}	RA	Dec	
SRGA J194638.9+704552	19 46 38.2	+70 45 58	4.1''	19 46 38.09	+70 45 55.6	2RXS J194639.7+704551
SRGA J204547.8+672642	20 45 48.0	+67 26 43	6.8''	20 45 48.04	+67 26 43.1	2RXS J204548.4+672629
SRGA J225412.8+690658	22 54 13.0	+69 07 06	3.5''	22 54 12.99	+69 07 06.1	2RXS J225416.1+690705

R_{98} — *eROSITA* радиус локализации источника при достоверности 98%.

Таблица 17 — Список рентгеновских наблюдений.

Источник	Даты	Эксп. кс	$F_{4-12\text{ keV}}$	$F_{0.3-2.2\text{ keV}}$	$N_{H,Gal}$
			10^{-12} эрг с^{-1}	см^{-2}	10^{22} см^{-2}
SRGA J194638.9+704552	22–24 Янв. 2020,	1.7	5.7 ± 0.7	$2.03^{+0.02}_{-0.03}$	0.08
	22–24 Июля 2020,				
	16–19, 21 Янв. 2021				
SRGA J204547.8+672642	3–7 Янв. 2020,	1.8	2.3 ± 0.5	$0.77^{+0.02}_{-0.03}$	0.14
	1–5 Июля 2021,				
	2–6 Янв. 2021				
SRGA J225412.8+690658	27–30 Янв. 2020,	1.1	1.9 ± 0.7	$0.25^{+0.01}_{-0.01}$	0.41
	28–31 Июль 2021,				
	21–23 Янв. 2021				

Эксп. — Общая время экспозиции источника *ART-XC*.

$F_{4-12\text{ keV}}$ — поток в диапазоне энергий 4–12 кэВ *ART-XC*, усредненный по трем обзорам неба, оцененный в предположении, что спектр подобен спектру пульсара в Крабовидной туманности.

$F_{0.3-2.2\text{ keV}}$ — поток в диапазоне энергий 0.3–2.2 кэВ *eROSITA*, усредненный по трем обзорам неба, оцененный с использованием наиболее подходящих степенных спектральных моделей поглощения из таблицы 18. $N_{H,Gal}$ — Галактическая колонковая плотность *HI*, взятая из [147].

Ошибки потока соответствуют доверительному интервалу 68%.

их природа оставалась неизвестной. Благодаря улучшенным данным локализации источников обсерватории СРГ, и появлению недавних оптических обзоров всего неба (в частности, *Gaia*), стало проще отождествлять оптический компаньон для каждого из этих источников рентгеновского излучения.

В таблице 16 для каждого объекта приведены: экваториальные координаты источников *ART-XC* и *eROSITA* на эпоху J2000.0, координаты оптического компаньона согласно каталогу *Gaia Early Data Release (EDR3)* [146] и название источника во втором каталоге источников обзора всего неба обсерватории *ROSAT (2RXS)* [23].

4.3 Рентгеновские наблюдения

На момент выполнения работы все три объекта наблюдались в ходе первых трех обзоров всего неба СРГ. Из-за их высоких эклиптических широт ($b_{ecl} = 79.5^\circ$ для SRGA J194638.9+704552, 74.1° для SRGA J204547.8+672642 и 63.8° для SRGA J225412.8+690658) и стратегии обзора СРГ (а именно сканирования больших кругов, пересекающихся на полюсах эклиптики, см. [22]), все три источника имеют относительно высокие значения экспозиции наблюдений. В частности, СРГ наблюдал эти источники в течение 3–5 дней во время каждого обзора всего неба, по сравнению с ~ 1 днем для типичных источников на низких эклиптических широтах. Однако, в действительности каждое из этих наблюдений состояли из нескольких десятков коротких (~ 20 с и ~ 40 с для *ART-XC* и *eROSITA* соответственно) за каждый проход, разделенные 4 часами, так что общее накопленное время экспозиции составляет всего ~ 1 кс для *ART-XC* и в ~ 4 больше для *eROSITA*¹ (см. таблицу 17). В таблице 17 приведены средние значения потоков в диапазонах энергий 0.3–2.2 и 4–12 кэВ, где достигается максимальная чувствительность *eROSITA* и *ART-XC* соответственно [22].

Также в таблице 17 приведены плотности колонки галактического нейтрального водорода, $N_{H,Gal}$, в направлении объектов [147]. Учитывая, что все расстояния до источников превышают ~ 700 пк, и что они расположены относительно высоко над плоскостью Галактики ($b = 21.1^\circ$ для SRGA J194638.9+704552, 14.9° для SRGA J204547.8+672642 и 8.6° для SRGA J225412.8+690658), можно ожидать, что основная часть колонки галактического нейтрального водорода (*HI*) будет располагаться между нами и объектами. Этот вопрос будет обсуждаться более подробно в разделе 4.4.

4.3.1 Спектральный анализ

По данным *eROSITA* и *ART-XC* проведен анализ рентгеновского спектра в диапазоне энергий 0.2–12 кэВ для SRGA J204547.8+672642 и SRGA J225412.8+690658 и в диапазоне 0.2–20 кэВ для SRGA J194638.9+704552.

¹Поля зрения *ART-XC* и *eROSITA* составляют 36 угловых минут и 1 град соответственно.

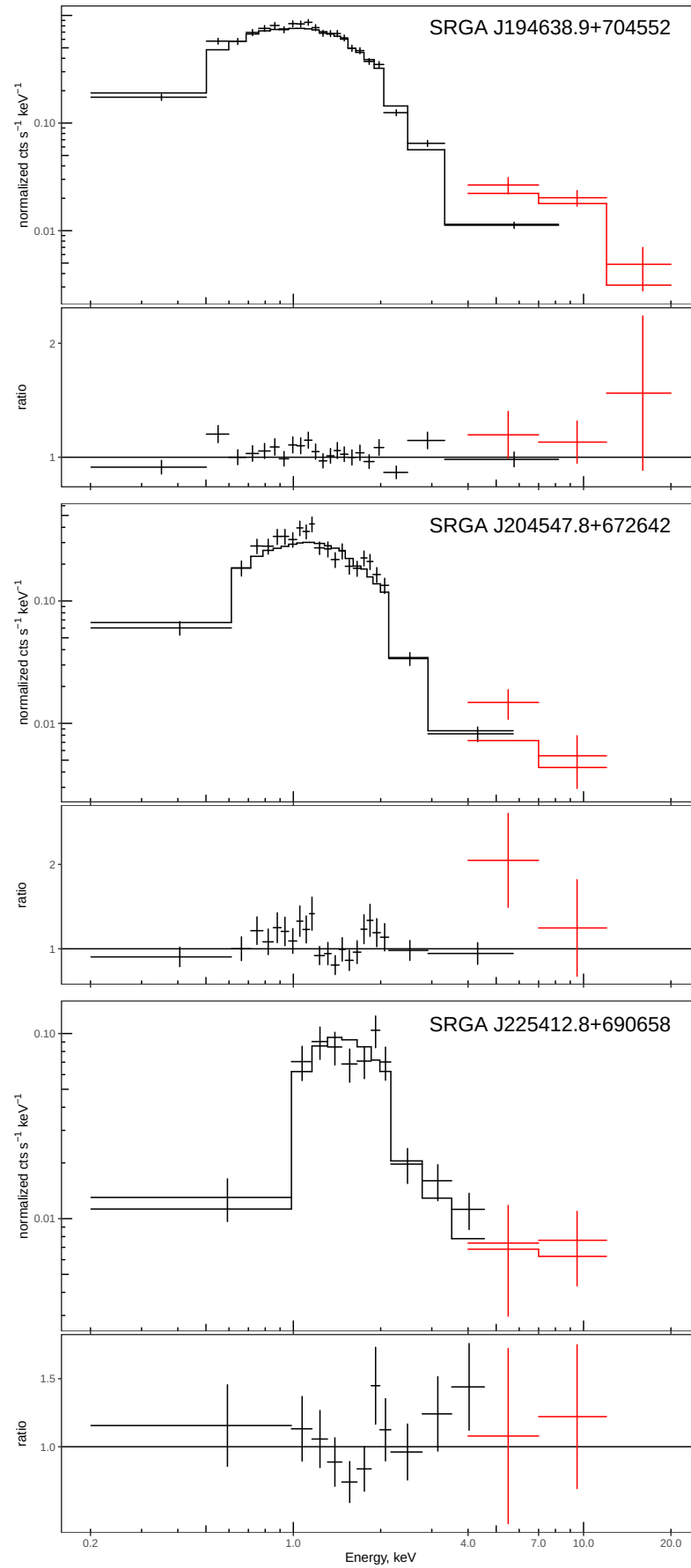


Рисунок 4.1 — Рентгеновские спектры (верхняя часть изображений), полученные с помощью *eROSITA* (черный) и *ART-XC* (красный), и их наиболее подходящие модели PHABS*BREMSS. На нижних частях изображений показаны соответствующие графики отношения данных к модели, горизонтальная линия указывает на отношение, равное 1.

Таблица 18 — Свойства рентгеновских спектров.

Параметр	Источник SRGA		
	194638.9+704552	204547.8+672642	225412.8+690658
<i>POWERLAW</i>			
N_H	$0.12^{+0.02}_{-0.02}$	$0.25^{+0.04}_{-0.06}$	$0.50^{+0.24}_{-0.13}$
Γ	$1.3^{+0.1}_{-0.1}$	$1.6^{+0.2}_{-0.2}$	$0.8^{+0.3}_{-0.3}$
norm	$9.8^{+0.6}_{-0.6} \times 10^{-4}$	$5.0^{+0.9}_{-0.7} \times 10^{-4}$	$1.8^{+0.8}_{-0.5} \times 10^{-4}$
χ^2	182.9	77	7.7
dof	167	47	10
<i>BREMSSTRAHLUNG</i>			
N_H	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.19^{+0.03}_{-0.03}$	$0.69^{+0.17}_{-0.14}$
kT	40^{+53}_{-17}	10^{+15}_{-4}	> 21
norm	$1.8^{+0.4}_{-0.2} \times 10^{-3}$	$6.3^{+0.8}_{-0.4} \times 10^{-4}$	$7.9^{+0.8}_{-3.2} \times 10^{-4}$
χ^2	182.9	77.0	10.7
dof	167	47	10
<i>APEC</i>			
N_H	$0.11^{+0.01}_{-0.01}$	$0.20^{+0.03}_{-0.02}$	$0.71^{+0.24}_{-0.11}$
kT	> 18	$7.1^{+3.8}_{-1.7}$	> 18
norm	$5.1^{+0.9}_{-0.7} \times 10^{-3}$	$1.65^{+0.13}_{-0.12} \times 10^{-3}$	$1.7^{+0.2}_{-0.4} \times 10^{-3}$
χ^2	184.6	72.2	11.9
dof	167	47	10

N_H – колонка водорода в единицах 10^{22} см^{-2} .

kT – температура в кэВ.

dof – степени свободы.

Ошибки и пределы соответствуют доверительному уровню 90%.

Данные *eROSITA* обрабатывались калибровочным программным обеспечением, разработанным в Институте космических исследований (ИКИ, Москва), построенным с использованием компонентов программного обеспечения *eROSITA Science Analysis Software System (eSASS)*.

Были извлечены спектры источников и кривые блеска, используя круглую область радиусом 60 угловых секунд с центром в положении источника. Для выделения фона использовалась кольцевая область с внутренним и внешним радиусами 150 и 300 угловых секунд вокруг каждого источника. Мы замаскировали круговые области радиусом 40 угловых секунд вокруг всех источников, перекрывающихся с исследуемыми источниками и фоновыми областями и обнаруженных с $S/N > 4$. Спектры *eROSITA* бинировались таким образом, чтобы в каждом спектральном интервале было не менее 25 отсчетов.

Данные *ART-XC* обработаны с помощью программного обеспечения для анализа *artproducts v0.9* [21] с использованием калибровочных файлов версии 20200401. Были извлечены данные в диапазонах 4–7, 7–12 и 12–20 кэВ для всех трех источников. Однако у SRGA J204547.8+672642 и SRGA J225412.8+690658 очень мало отсчетов в бине 12–20 кэВ. Поэтому при спектральном анализе этих двух источников мы использовали только каналы 4–7 и 7–12 кэВ.

Спектральный анализ был выполнен, используя XSPEC² v12.11.0. [148] и получены значения качества спектральных подгонок, используя статистику χ^2 . Для некоторых спектральных моделей, обсуждаемых ниже, неопределенности параметров оценивались с помощью цепей Монте-Карло Маркова (*MCMC*) на основе алгоритма Гудмана–Уира [149] с шагами 15×10^3 (а именно для SRGA J225412.8+690658 в случае *apex*). Константа кросс-нормализации между данными *eROSITA* и *ART-XC* далее не используется, так как введение такого коэффициента не приводит к существенному улучшению качества спектральной аппроксимации.

4.3.2 Модели

Сначала осуществлены попытки описать спектры степенной моделью с учетом фотопоглощения (*phabs*powerlaw* в XSPEC), и были получены удовлетво-

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

рительные результаты во всех трех случаях (см. таблицу 18). Предполагаемые колонки поглощения вдоль луча зрения, N_H , немного больше, чем общие колонки нейтрального водорода Галактики в направлении SRGA J194638.9+704552 и SRGA J204547.8+672642 тогда как для SRGA J225412.8+690658 N_H согласуется с $N_{H,Gal}$. Все три спектра жесткие. Полученные фотонные индексы $\Gamma < 1.8$ свидетельствуют о тепловом излучении оптически тонкой плазмы и типичны для катаклизмических переменных звезд, как магнитных, так и немагнитных (например, [150; 151]).

Для дальнейшего исследования этой гипотезы рентгеновские спектры были аппроксимированы моделью поглощенного теплового тормозного излучения (*phabs*bremss*). Это привело к почти такому же качеству аппроксимации (см. таблицу 18). Можно установить надежные нижние пределы температуры плазмы $kT \gtrsim 20$ кэВ для SRGA J194638.9+704552 и SRGA J225412.8+690658 и $kT \gtrsim 5$ кэВ для SRGA J204547.8+672642. Рисунок 4.1 показывает наилучшее соответствие этой модели.

Спектры были описаны с помощью модели *арес* для диффузного газа, ионизованного столкновением. Как и ожидалось, это не привело к значительному улучшению качества аппроксимации по сравнению с *bremss* для SRGA J194638.9+704552 и SRGA J225412.8+690658, так как при таких высоких температурах, как предполагается здесь, плазма должна быть почти полностью ионизирована, без образования сильных эмиссионных линий (помимо слабых линий *H*- и *He*-подобных железа и никеля вблизи 7 кэВ, где в спектрах есть несколько фотонов). Для этих источников нижние пределы температуры плазмы, полученные из модели *арес*, $kT \gtrsim 18$ кэВ, несколько менее жесткие, чем соответствующие значения для *bremss*. Для SRGA J204547.8+672642 использование модели *арес* дает незначительное улучшение качества подгонки по сравнению с *bremss*, и это ограничивает температуру плазмы относительно в узком интервале около $kT \approx 7$ кэВ. Это свидетельствует о наличии заметного эмиссионного излучения в спектре *eROSITA* этого источника.

Таким образом, как расчетные рентгеновские светимости ($\sim 10^{32}$ – 10^{33} эрг с⁻¹), так и рентгеновские спектры, согласующиеся с излучением от горячей оптически тонкой плазмы, убедительно указывают на то, что все три источника являются катаклизмическими переменными звездами.

SRGA J194638.9+704552 SRGA J204547.8+672642 SRGA J225412.8+690658

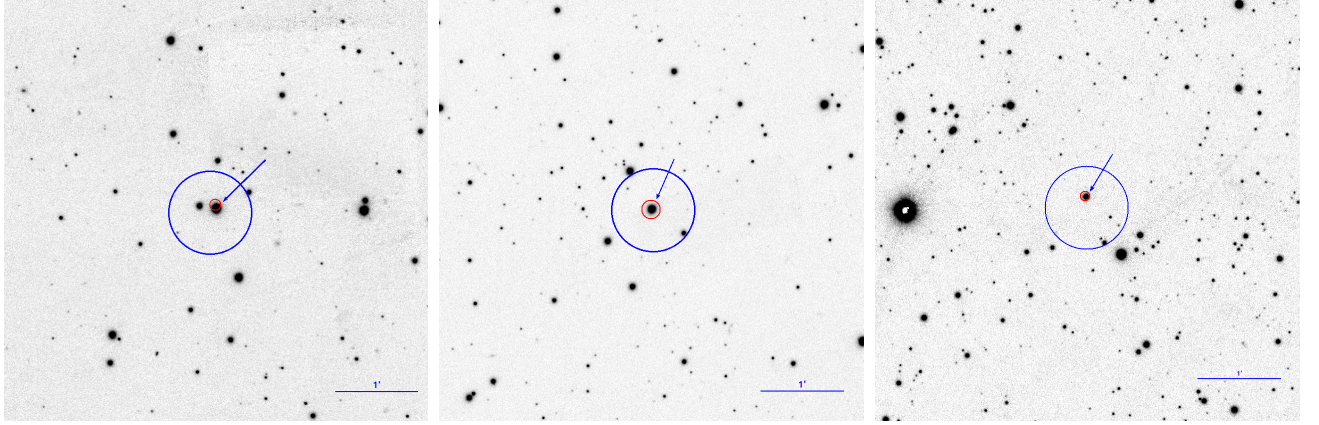


Рисунок 4.2 — Изображения Pan-STARRS1 (*Pan-STARRS1*) в фильтре r вокруг SRGA J194638.9+704552 (слева), SRGA J204547.8+672642 (посередине) и SRGA J225412.8+690658 (справа). Размер каждого изображения $5' \times 5'$. Синий кружок — область локализации источника *ART-XC* с радиусом $30''$. Красный кружок — область локализации источника *eROSITA* 98%. Отождествляемый с рентгеновским источником объект указан стрелочкой.

4.4 Оптические наблюдения

Для каждого из трех источников рентгеновского излучения в области локализации *eROSITA* есть одна относительно яркая звезда на архивных оптических изображениях (рис. 4.2). Из предыдущих наблюдений известно, что эти звезды являются переменными, что означает, что мы можем иметь дело с катаклизмическими переменными звездами.

Некоторые ключевые оптические характеристики этих объектов перечислены в таблице 19 и обсуждаются в разделе 4.4.3 ниже. В частности, предоставлено для каждой звезды ее расстояние, определенное по параллаксу из [146], видимую величину и амплитуду ее переменности, а также межзвездное поглощение. Полученные оценки поглощения основаны на карте пыли [152] (*SFD*), откалиброванной в соответствии с [153], которая учитывает полное галактическое поглощение в заданном направлении³. Также оценки поглощения основаны на модели *Bayestar19* трехмерного распределения пыли в Галактике [154], которая позволяет учитывать расстояние до объекта⁴. Для расчетов использовались значения $R_V = 3.1$ и $R_{g-r} = E(g-r)/E(B-V) = 0.98 \pm 0.02$ [153]

³<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/>

⁴<http://argonaut.skymaps.info/>

Таблица 19 — Оптические свойства катаклизмических переменных звезд.

Объект	D^a , пк	V	ΔV^b	A_V^c	M_V
SRGA J194638.9+704552	1816 ± 43	14.16	± 0.23	0.5	2.3
SRGA J204547.8+672642	848 ± 9	13.83	± 0.34	0.9	3.3
SRGA J225412.8+690658	686 ± 12	16.46	± 2.11	2.4	4.9

^aРасстояние указано на основе данных [146].

^bАмплитуда переменности основана на данных *ZTF* и *ASAS-SN*.

^cПоглощение указано на основе на данных [152–154].

для преобразования $E(B - V)$ и $E(g - r)$ в величину поглощения A_V . Оценки A_V по *SFD* и *Bayestar19* оказываются схожими для рассматриваемых звезд, что неудивительно, учитывая большие расстояния до них и довольно большие высоты над плоскостью Галактики.

4.4.1 Спектроскопия

Для детального изучения этих объектов проведены их оптические наблюдения на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории (см. главу 1, пункт 1.3.3). Для спектроскопии использовали спектрограф низкого и среднего разрешения АДАМ [81; 82]. Наблюдения проводились с использованием объемной фазовой голографической решетки VPHG600G, спектрального диапазона $3650\text{\AA} - 7250\text{\AA}$ и спектрального разрешения $\approx 9\text{\AA}$ с использованием щели шириной $2''$. Качество изображений составляло около $1.8'' - 2''$ во время наблюдений. В ходе наблюдений каждого объекта после серии спектроскопических изображений были получены калибровочные спектры. После каждой экспозиции мы сдвигали положение объекта вдоль щели на $10'' - 15''$ в произвольном направлении для уменьшения интерференционных полос в спектрах. Обработка данных осуществлялась с помощью программы *IRAF*⁵ и собственного программного обеспечения. Спектральные потоки были откалиброваны с использованием наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка *ESO*⁶.

⁵<http://iraf.noao.edu>

⁶<https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra.html>

Таблица 20 — Список оптических наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК.

Объект	Дата	Спектроскопия			Дата	Фотометрия	
		Время эксп.	Гризма	Щель		Время эксп.	Фильтр
SRGA J194638.9+704552	2020-10-23	3×60 с	VRHG600G	2"	2021-06-17	420×15 с	r
SRGA J204547.8+672642	2020-10-21	3×200 с	VRHG600G	2"	2021-06-18	540×15 с	r
SRGA J225412.8+690658	2021-05-14	5×100 с	VRHG600G	2"	2021-06-19	240×30 с	r

Столбцы с временем экспозиции показывают количество полученных изображений при непрерывных наблюдениях и время экспозиции каждого изображения. Столбцы с датами показывают даты наблюдений в формате ГГГГ-ММ-ДД, UTC+0.

Для оценки собственной ширины эмиссионных линий, учитывалось приборное уширение линий (см. [144]). Коррекция спектров на поглощение проводилась в программе *IRAF*, используя процедуру *deredden*. Ниже в разделе 4.4.3 описано как оценивалось поглощение для каждого объекта.

4.4.2 Фотометрия

В период с 17 по 20 июня 2021 г. проведены фотометрические наблюдения исследуемых объектов на телескопе АЗТ-ЗЗИК с помощью камеры *Andor iKon-M 934* (подробнее см. раздел 1.3.3). Для каждого объекта наблюдения проводились непрерывно в течение 2 и более часов с качеством прямых снимков не хуже 1.7" в фильтре *r* Слоановской системы. Изображения были обработаны стандартным способом, используя *IRAF* и собственное программное обеспечение. Апертурная фотометрия выполнялась с помощью процедуры *apphot* из пакета *digiphot*. Измерение потоков источников проводилось относительно ближайших ярких звезд, при этом размер апертуры для каждой серии наблюдений определялся таким образом, чтобы было получено максимально возможное отношение сигнал/шум. Измеренные звездные величины были откалиброваны, используя звездные величины вторичных фотометрических стандартов в поле источника с яркостью, сравнимой или превышающей поток кандидатов в катаклизмические переменные. Для калибровки мы использовали *PSF* величины из *Pan-STARRS1* выпуск 2 [61]. Обработка данных кривых блеска проводилась с

помощью пакета *Python Lightkurve* [155]. Дальнейшие подробности оптических наблюдений приведены в таблице 20.

4.4.3 Результаты

На рис. 4.3 показаны полученные оптические спектры и кривые блеска. В таблице 21 представлены характеристики эмиссионных линий, обнаруженных в спектрах. Ниже представлены обсуждения результатов архивных и последующих оптических наблюдений по источникам.

SRGA J194638.9+704552

Этот рентгеновский источник обозначен соответствует источнику с идентификатором 2263241129823231104 в каталоге *Gaia EDR3*. Согласно каталогу *UCAC4* [156], его средние звездные величины $B = 15.00$ и $V = 14.16$. Объект также наблюдался в обзоре *Zwicky Transient Facility* (*ZTF*⁷) при помощи 48-дюймового телескопа Самуэля Ошина Паломарской обсерватории. Переменный источник *ZTF18absajkj*⁸ был обнаружен 31 августа 2018 г. и повторно открыт как переменный источник *ZTF19acyzjtl* 25 ноября 2019 г. Согласно данным автоматического обучения для быстрой классификации событий (*ALeRCE*⁹) [157; 158], с большей вероятностью, это катаклизмическая переменная, чем цефеида или затменная двойная звезда. Его средние величины в фильтрах *ZTF* [159] составляют $g_{mean} = 14.54$ и $r_{mean} = 13.74$. По кривой блеска *ZTF*, охватывающей ~ 3 года, можно оценить амплитуду переменности источника как $\Delta V = \pm 0.23$.

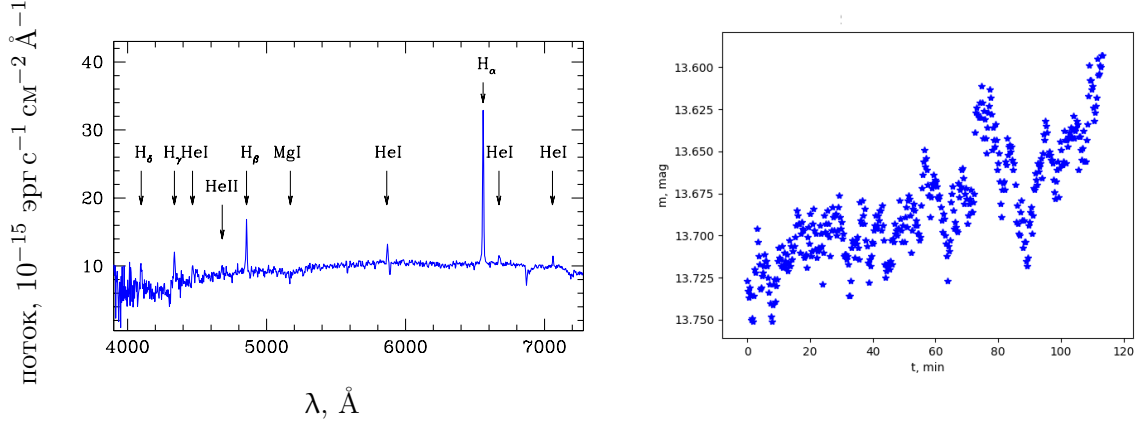
Спектр объекта (см. рис. 4.3) типичен для катаклизмических переменных звезд (например, [160]). В частности, на спектре присутствуют серии эмиссионных линий водорода и гелия. Также видны некоторые линии погло-

⁷<https://www.ztf.caltech.edu/>

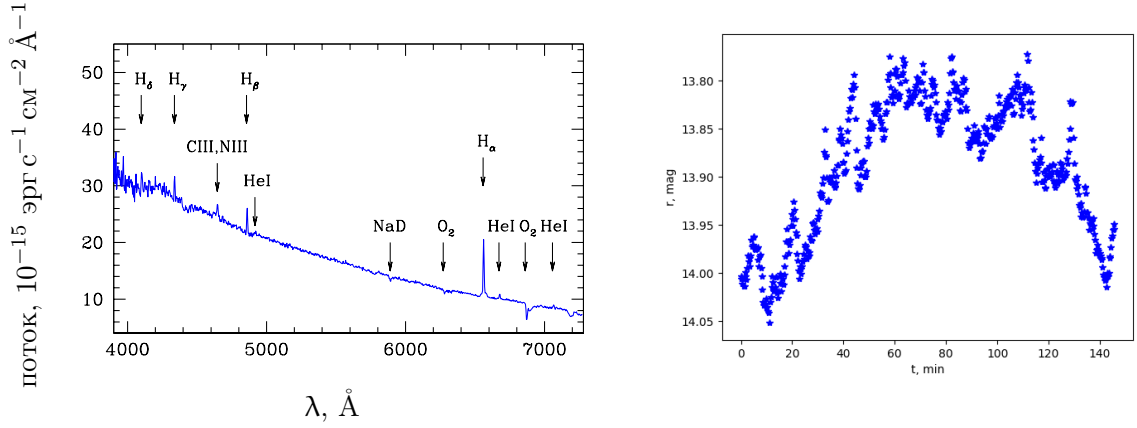
⁸<https://alerce.online/object/ZTF18absajkj>

⁹<http://alerce.science/>

SRGA J194638.9+704552



SRGA J204547.8+672642



SRGA J225412.8+690658

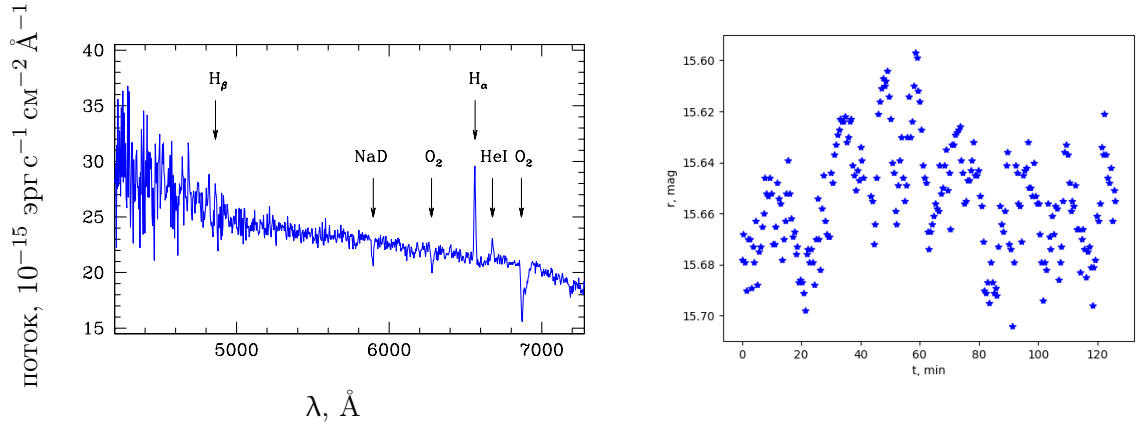


Рисунок 4.3 — Оптические спектры (слева) и кривые блеска (справа) исследуемых объектов. Спектры поправлены на межзвездное поглощение, указаны спектральные особенности. Кривые блеска получены в фильтре r , время по горизонтальной шкале отсчитывается от начала наблюдения.

Таблица 21 — Характеристики эмиссионных линий.

Линии	Длина волны ¹ Å	Поток ² 10 ⁻¹⁴ эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина ³ Å	FWHM ⁴ км/с ⁻¹
SRGA J194638.9+704552				
<i>H</i> _δ	4098.2	< 2.6	—	—
<i>H</i> _γ	4337.2	2.5 ^{+1.4} _{-0.5}	-6.0 ^{+5.5} _{-1.4}	337 ± 57
<i>HeI</i> λ4471	4468	< 2.9	—	—
<i>HeII</i> λ4686	4680	< 2.1	—	—
<i>H</i> _β	4856.7	4.3 ± 0.5	-8.2 ± 0.6	238 ± 48
<i>HeI</i> λ5876	5870.4	2.1 ^{+0.7} _{-0.4}	-3.2 ^{+0.9} _{-0.6}	336 ± 73
<i>H</i> _α	6558.6	14.8 ± 0.8	-20.8 ± 2.1	205 ± 36
<i>HeI</i> λ6678	6675.1	< 1.5	—	—
<i>HeI</i> λ7065	7060.1	< 1.1	—	—
SRGA J204547.8+672642				
<i>H</i> _δ	4101.9	< 1.6	—	—
<i>H</i> _γ	4338.2	1.1 ^{+0.5} _{-0.2}	-1.2 ^{+0.5} _{-0.2}	240 ± 90
<i>CIII, NIII</i>				
λλ4640, 4650	4647.4	1.2 ^{+0.8} _{-0.3}	—	—
<i>HeII</i> λ4686	4684	< 0.5	—	—
<i>H</i> _β	4860.0	1.4 ± 0.4	-1.7 ± 0.5	156 ± 64
<i>HeI</i> λ4922	4922.3	< 0.6	—	—
<i>H</i> _α	6562.1	4.9 ± 0.3	-9.2 ± 0.9	100 ± 23
<i>HeI</i> λ6678	6678.5	< 0.6	—	—
<i>HeI</i> λ7065	7065.5	< 0.6	—	—
SRGA J225412.8+690658				
<i>H</i> _β	4862.6	< 7.9	—	—
<i>H</i> _α	6561.5	16.9 ± 2.0	-5.0 ± 0.7	188 ± 42
<i>HeI</i> λ6678	6677.1	4.3 ± 1.1	-1.2 ± 0.3	222 ± 141

¹ Измеренные длины волн.² Потоки не исправлены на межзвездное поглощение. Верхние пределы приведены для линий с отношением сигнал/шум менее 2σ.³ Отрицательные значения соответствуют эмиссионным линиям. Неопределенности соответствуют доверительному интервалу 1σ (68%).⁴ FWHM — полная ширина на половине высоты линий.

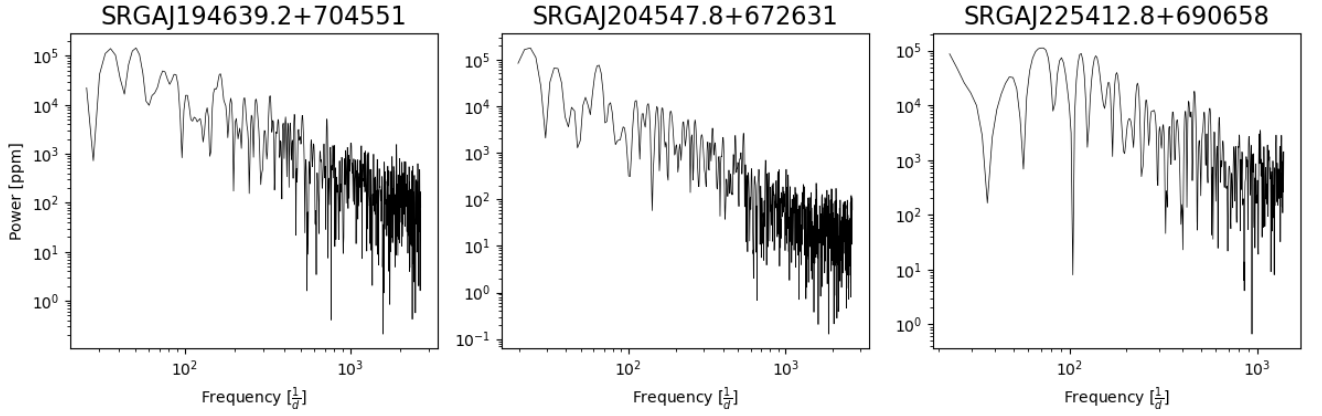


Рисунок 4.4 — Периодограммы Ломба–Скаргла, построенные на основе краткосрочных кривых блеска, полученных на телескопе АЗТ-ЗЗИК.

щения Фраунгофера. Бальмеровский декремент $H_\alpha/H_\beta = 3.4 \pm 0.4$ (здесь и далее указанные погрешности даны на доверительном уровне 1σ , если не указано иное), что указывает на умеренное поглощение, если принять внутреннее отношение $H_\alpha/H_\beta = 2.86$ [161]. Используя соотношение $E(B - V) = 1.97 \log_{10}[(H_\alpha/H_\beta)_{obs}/2.86]$ из [161], получено $E(B - V) = 0.15 \pm 0.10$, что согласуется со значением межзвездного поглощения источника.

За 114 минут фотометрии на АЗТ-ЗЗИК было получено 420 изображений с экспозицией 15 с. За это время звездная величина опорной звезды менялась на 0.008^m (среднеквадратичное отклонение), в то время как у SRGA J194638.9+704552 наблюдались гораздо более сильные изменения величины (см. рис. 4.3). Поскольку интервалы между отдельными изображениями не были строго постоянными, для временного анализа была использована периодограмма Ломба–Скаргла [162; 163]. Полученный спектр мощности (см. рис. 4.4 слева) демонстрирует сильную переменность, подобную красному шуму (очевидную из высокоамплитудных стохастических флуктуаций на кривой блеска), модифицированную оконной функцией. Признаков периодичности или квазипериодичности нет. Из-за функции окна трудно установить верхние пределы амплитуды любого периодического сигнала. Однако общая восходящая тенденция кривой блеска свидетельствует о том, что период обращения этой катаклизмической переменной звезды превышает 2 часа.

Если бы этот объект был магнитной катаклизмической переменной звездой, то мы бы ожидали увидеть признаки вращения белого карлика на его кривой блеска, которые обычно находятся в диапазоне от ~ 1 мин до ~ 1 час для объектов этого класса (например, [143]). Однако спиновая модуляция не все-

SRGA J204547.8+672642

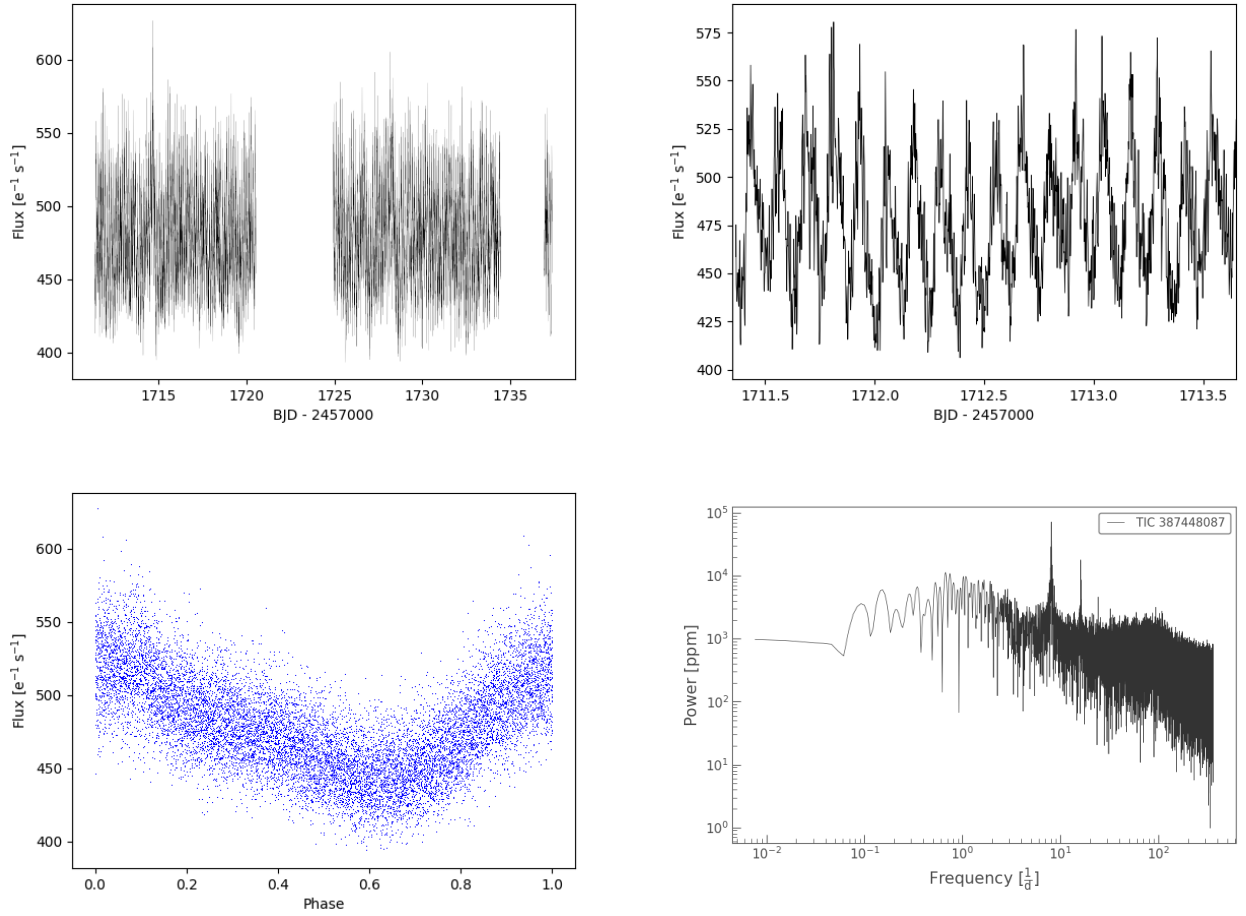


Рисунок 4.5 — Верхний ряд: кривые блеска *TESS* для SRGA J204547.8+672642 полученные в секторе 15 (полный набор данных слева, первые два дня наблюдений справа). Внизу слева: кривая блеска, сложенная для периода 2.98-часа.

Внизу справа: периододграмма Ломба–Скаргла.

гда проявляется в оптическом свете магнитных катаклизмических переменных, поэтому ее отсутствие на кривой оптического блеска SRGA J194638.9+704552 не исключает того, что объект может быть полярном или промежуточным полярном.

SRGA J204547.8+672642

Этот рентгеновский источник отождествлен с непериодической переменной звездой ASASSN-V J204548.04+672643.0¹⁰ из каталога переменных звезд

¹⁰<https://asas-sn.osu.edu/variables/AP15943107>

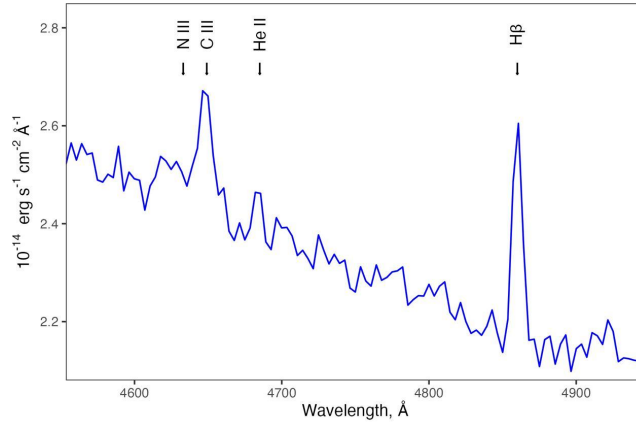


Рисунок 4.6 — Оптический спектр SRGA J204547.8+672642 на длинах волн 4550–4950 Å. В спектре видны Боуэновская бленда и линия H β , в то время как линия HeII λ 4686 не обнаруживается.

ASAS-SN VI [164] со средней звездной величиной $V_{mean} = 13.83$ и амплитудой переменности $\Delta V = 0.34$. В каталоге *Gaia* EDR3 объект указан под идентификатором 2246133514871244672.

Объект также наблюдался с помощью космической обсерватории *TESS* (*Transiting Exoplanet Survey Satellite*) [165] в секторах 15, 16, 17, 18, 24 и 25 с периодичностью 2 и 30 минут. Был проведен временной анализ данных, полученных в секторе 15, сделанных с 2-минутной периодичностью. На рисунке 4.5 показана результирующая кривая блеска и основанная на ней периодограмма Ломба–Скаргла. Периодограмма показывает сигнал с периодичностью 2.979 ± 0.006 часа, а также сильную и сложную изменчивость. Полученный период типичен для орбитальных периодов катаклизмических переменных звезд (например, [160]). В спектре мощности переменности также можно выделить излом континуума на частоте $\sim 10^{-3}$ Гц, что также характерно для катаклизмических переменных [166; 167].

В оптическом спектре объекта (см. рис. 4.3) видны эмиссионные линии бальмеровской серии от H α до H δ , а также эмиссионные линии гелия: HeI λ 4922, HeI λ 6678 и HeI λ 7065. Боуэновская бленда CIII + NIII λ 4640, 4650 также видна (см. рис. 4.6), но HeII λ 4686 и HeI λ 5876 достоверно не обнаруживаются. В целом, эти спектральные особенности характерны для катаклизмических переменных звезд, и, в частности, для полярных [160]. Бальмеровский декремент $H_{\alpha}/H_{\beta} = 3.5 \pm 0.9$. Это соответствует избытку цвета $E(B - V) = 0.17 \pm 0.22$, что согласуется с межзвездным поглощением источника.

За 146 минут фотометрии на АЗТ-ЗЗИК было получено 540 снимков с экспозицией 15 с каждый. За этот период звездная величина опорной звезды менялась на 0.005^m (среднеквадратичное отклонение), тогда как у SRGA J204547.8+672642 наблюдалась гораздо более сильное изменение величины (см. рис. 4.3). Эта краткосрочная кривая блеска показывает изменения блеска, которое согласуется с 2.98-часовой орбитальной модуляцией, обнаруженной на долговременной кривой блеска *TESS*.

SRGA J225412.8+690658

Этот рентгеновский источник отождествляется с непериодической сильно-переменной звездой¹¹ из каталога переменных звезд *ASAS-SN I* [168] с $V_{mean} = 16.46$ и $\Delta V = 2.11$. В этом каталоге объект классифицируется как молодой звездный объект (*YSO*) с вероятностью классификации 0.528. В каталоге *Gaia EDR3* объект указан как источник с идентификатором 2225473558247025152.

В оптическом спектре объекта (рис. 4.3) видны эмиссионные линии H_α и $HeI\lambda 6678$, слабая эмиссионная линия H_β , а также линии поглощения $Na\lambda 5890$ и O_2 . Нижний предел Бальмеровского декремента равен $H_\alpha/H_\beta > 2.1$. Отсутствие эмиссионных линий в коротковолновой части спектра, вероятно, связано с гораздо большим поглощением до SRGA J225412.8+690658 по сравнению с SRGA J194638.9+704552 и SRGA J204547.8+672642.

За 127 минут фотометрии на АЗТ-ЗЗИК было получено 240 изображений с экспозицией 30 с каждое. Последние 30 минут наблюдений проводились в сумерках, на высоте Солнца от -12° до -16° градусов. В результате величины, измеренные, начиная, с 90 минут после начала, имеют более низкое отношение сигнал/шум. Кривая блеска объекта (см. рис. 4.3) имеет небольшие вариации, которые, однако, значительно превышают отклонения кривой блеска опорной звезды (среднеквадратичное отклонение 0.011^m). На основании этой краткосрочной кривой блеска невозможно сделать какие-либо выводы об орбитальной или иной периодичности (см. рис. 4.4 справа).

Учитывая значение абсолютной звездной величины $M_V \approx 4.8$, светимость объекта слишком мала для *Be*-звезд, для которых также характерно наличие

¹¹<https://asas-sn.osu.edu/variables/468427>

линий поглощения бальмеровской серии. Кроме того, объект демонстрирует слишком высокую переменность для *Be*-звезд, $\Delta V = \pm 2.1$. Это, вместе с рентгеновской светимостью и спектром, убедительно свидетельствует о том, что SRGA J225412.8+690658 является катаклизмической переменной звездой.

4.5 Обсуждение

Информация об измеренных рентгеновских потоках, расстояния по *Gaia* и абсолютные оптические величины для оценки рентгеновской и оптической светимостей исследуемых объектов, а также информация об эквивалентной ширине (EW) линии H_β оптических спектров приведены в таблице 22. Для SRGA J225412.8+690658 доступен только верхний предел EW (H_β).

Измеренные рентгеновские светимости типичны для катаклизмических переменных звезд (например, [139; 143]). Достаточно большие отношения L_X/L_V ($\sim 0.1 - 0.5$), обнаруженные у исследованных объектов, свидетельствуют об умеренных темпах аккреции ($\dot{M} \sim 10^{15} - 10^{18}$ г с⁻¹) на белый карлик [169]. Это, по-видимому, согласуется с их довольно высокими рентгеновскими светимостями, принимая во внимание большой собственный разброс в L_X/L_V по сравнению с $\dot{M}$ и L_X по сравнению с $\dot{M}$ для катаклизмических переменных (см. рис. 6 и 7 в [169]), и существенной оптической переменностью изучаемых здесь объектов. Полученные значения L_X/L_V и EW (H_β) также согласуются с известной корреляцией этих величин для катаклизмических переменных [169].

При $L_X \sim 3 \times 10^{33}$ эрг с⁻¹ (2–10 кэВ) SRGA J194638.9+704552 скорее всего будет промежуточным поляр, а SRGA J204547.8+672642 и SRGA J225412.8+690658, оба с $L_X \sim 2 \times 10^{32}$ эрг с⁻¹, вероятно, являются магнитными катаклизмическими переменными звездами, но такие светимости могут относиться и к немагнитным катаклизмическим переменным (карликовые новые). В оптическом спектре SRGA J204547.8+672642 присутствует Боуэновская бленда CIII + NII $\lambda\lambda 4640, 4650$, поток в которой сравним с потоком в H_β . Это говорит о том, что объект может быть поляр [160; 170], хотя эту спектральную особенность можно наблюдать и в промежуточных полярах (например, [171]). Кроме того, большое значение абсолютной величины $M_V = 3.3$ и умеренная оптическая переменность $\Delta V = \pm 0.3$ нетипичны

Таблица 22 — Физические свойства катаклизмических переменных.

Объект	L_V , эрг с ⁻¹	L_X , эрг с ⁻¹	$\log(L_X/L_V)$	$EW(H_\beta)$, Å
SRGA J194638.9+704552	$(4.8 \pm 0.9) \times 10^{33}$	$(2.7 \pm 0.2) \times 10^{33}$	-0.26 ± 0.09	8.2 ± 0.6
SRGA J204547.8+672642	$(1.9 \pm 0.5) \times 10^{33}$	$(2.6 \pm 0.2) \times 10^{32}$	-0.87 ± 0.12	1.7 ± 0.5
SRGA J225412.8+690658	$0.5^{+2.9}_{-0.4} \times 10^{33}$	$(1.6 \pm 0.2) \times 10^{32}$	-0.49 ± 0.84	< 3.2

L_X — рентгеновская светимость в диапазоне энергий 2–10 кэВ, основанная на данных *eROSITA* и *ART-XC* с учетом спектральных моделей из таблицы 18 и галактического поглощения.

для карликовых новых [160]. То же верно и для SRGA J194638.9+704552, для которого $M_V = 2.3$ и $\Delta V = \pm 0.2$.

4.6 Заключение

В этой главе представлены полученные нами результаты оптического отождествления трех источников *ART-XC* в диапазоне энергий 4–12 кэВ, полученном после первого года обзора всего неба СРГ [43]. Эти источники также были обнаружены телескопом *eROSITA* на борту обсерватории СРГ. 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. Оптические свойства подтверждают то, что эти объекты являются катаклизмическими переменными звездами. Сделан вывод, что SRGA J194638.9+704552 является промежуточным поляр, SRGA J204547.8+672642, вероятно, поляр или промежуточным поляр, 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.

Заключение

Основные выводы и результаты диссертационной работы:

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 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-33ИК 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-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.
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 $\sigma_{\text{lg } M_{500}} = 0.124 (\pm 33\%)$, что сравнимо с точностью оценки масс скоплений по измерениям рентгеновской светимости $\sigma_{\text{lg } M_{500}} = 0.107$.

7. Представлены полученные нами результаты оптического отождествления трех источников *ART-XC* в диапазоне энергий 4-12 кэВ, полученном после первого года обзора всего неба СРГ. 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. Оптические свойства подтверждают то, что эти объекты являются катаклизмическими переменными звездами. Сделан вывод, что SRGA J194638.9+704552 является промежуточным поляр, SRGA J204547.8+672642, вероятно, поляр или промежуточным поляр, 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 литературы

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 2013 results. XX. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — nov. — Vol. 571. — P. A20.
4. *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.
5. *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.
6. *Sunyaev R. A., Zeldovich Ya. B.* Formation of Clusters of Galaxies; Procluster Fragmentation and Intergalactic Gas Heating // *Astronomy & Astrophysics*. — 1972. — aug. — Vol. 20. — P. 189.
7. *Sarazin C. L.* X-ray emission from clusters of galaxies // *Reviews of Modern Physics*. — 1986. — jan. — Vol. 58, no. 1. — Pp. 1–115.
8. *Birkinshaw M., Gull S. F., Hardebeck H.* The Sunyaev-Zeldovich effect towards three clusters of galaxies. // *Nature*. — 1984. — may. — Vol. 309. — Pp. 34–35.
9. *Carlstrom J. E. [et al.]*. The 10 Meter South Pole Telescope // *PASP*. — 2011. — may. — Vol. 123, no. 903. — P. 568.
10. *Fowler J. W. [et al.]*. Optical design of the Atacama Cosmology Telescope and the Millimeter Bolometric Array Camera // *Appl. Opt.*. — 2007. — jun. — Vol. 46, no. 17. — Pp. 3444–3454.

11. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck early results. I. The Planck mission // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — dec. — Vol. 536. — P. A1.
12. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // *Astronomy & Astrophysics*. — 2014. — nov. — Vol. 571. — P. A16.
13. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — sep. — Vol. 594. — P. A13.
14. *Planck Collaboration, Aghanim N. [et al.]*. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — sep. — Vol. 641. — P. A6.
15. *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.
16. *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.
17. *Pillepich A., Porciani C., Reiprich T. H.* The X-ray cluster survey with eRosita: forecasts for cosmology, cluster physics and primordial non-Gaussianity // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — may. — Vol. 422, no. 1. — Pp. 44–69.
18. *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.
19. *Bykov S., Gilfanov M., Sunyaev R.* Forecasts for cosmological measurements based on the angular power spectra of AGN and clusters of galaxies in the SRG/eROSITA all-sky survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2023. — jan. — Vol. 669. — P. A61.
20. *Predehl P. [et al.]*. The eROSITA X-ray telescope on SRG // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — mar. — Vol. 647. — P. A1.

21. *Pavlinsky M. [et al.]*. The ART-XC telescope on board the SRG observatory // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — jun. — Vol. 650. — P. A42.
22. *Sunyaev R. [et al.]*. SRG X-ray orbital observatory. Its telescopes and first scientific results // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — dec. — Vol. 656. — P. A132.
23. *Boller Th. [et al.]*. Second ROSAT all-sky survey (2RXS) source catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — apr. — Vol. 588. — P. A103.
24. *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.
25. *Буренин Р. А.* Расширение каталога скоплений галактик обзора обсерватории им. Планка // *Письма в Астрономический журнал*. — 2017. — Т. 43, № 8. — С. 559–569.
26. *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.
27. *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.
28. *Colless M. [et al.]*. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release // *arXiv e-prints*. — 2003. — jun. — Pp. astro-ph/0306581.
29. *Heath Jones D. [et al.]*. The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2009. — oct. — Vol. 399, no. 2. — Pp. 683–698.
30. *Collaboration DESI*. The Early Data Release of the Dark Energy Spectroscopic Instrument // *arXiv e-prints*. — 2023. — jun. — P. arXiv:2306.06308.
31. *Rykoff E. S. [et al.]*. redMaPPer. I. Algorithm and SDSS DR8 Catalog // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — apr. — Vol. 785, no. 2. — P. 104.

32. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.]*. Planck intermediate results. XXVI. Optical identification and redshifts of Planck clusters with the RTT150 telescope // *Astronomy & Astrophysics*. — 2015. — oct. — Vol. 582. — P. A29.
33. *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.
34. *Gal R. R. [et al.]*. The Northern Sky Optical Cluster Survey. III. A Cluster Catalog Covering PI Steradians // *AJ*. — 2009. — feb. — Vol. 137, no. 2. — Pp. 2981–2999.
35. *Lopes P. A. A. [et al.]*. The Northern Sky Optical Cluster Survey. IV. An Intermediate-Redshift Galaxy Cluster Catalog and the Comparison of Two Detection Algorithms // *AJ*. — 2004. — sep. — Vol. 128, no. 3. — Pp. 1017–1045.
36. *Gonzalez A. H. [et al.]*. The Massive and Distant Clusters of WISE Survey. I. Survey Overview and a Catalog of >2000 Galaxy Clusters at $z \simeq 1$ // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2019. — feb. — Vol. 240, no. 2. — P. 33.
37. *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.
38. *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.
39. *Schmidt S. J. [et al.]*. Evaluation of probabilistic photometric redshift estimation approaches for The Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time (LSST) // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — dec. — Vol. 499, no. 2. — Pp. 1587–1606.
40. *Euclid Collaboration*. Euclid preparation. X. The Euclid photometric-redshift challenge // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — dec. — Vol. 644. — P. A31.
41. *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.

42. *Hilton M. [et al.]*. The Atacama Cosmology Telescope: The Two-season ACT-Pol Sunyaev-Zel'dovich Effect Selected Cluster Catalog // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — mar. — Vol. 235, no. 1. — P. 20.
43. *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.
44. *Zaznobin I. [et al.]*. Identification of three cataclysmic variables detected by the ART-XC and eROSITA telescopes on board the SRG during the all-sky X-ray survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2022. — may. — Vol. 661. — P. A39.
45. *Girardi M. [et al.]*. Optical Mass Estimates of Galaxy Clusters // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — sep. — Vol. 505, no. 1. — Pp. 74–95.
46. *Mamon G. A. [et al.]*. MAMPOSSt: Modelling Anisotropy and Mass Profiles of Observed Spherical Systems - I. Gaussian 3D velocities // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — mar. — Vol. 429, no. 4. — Pp. 3079–3098.
47. *Capasso R. [et al.]*. Mass calibration of the CODEX cluster sample using SPIDERS spectroscopy - II. The X-ray luminosity-mass relation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — may. — Vol. 494, no. 2. — Pp. 2736–2746.
48. *Birkinshaw M.* The Sunyaev-Zel'dovich effect // *Phys. Rep.*. — 1999. — mar. — Vol. 310, no. 2-3. — Pp. 97–195.
49. *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.
50. *Okabe N., Smith G. P.* LoCuSS: weak-lensing mass calibration of galaxy clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2016. — oct. — Vol. 461, no. 4. — Pp. 3794–3821.
51. *Melchior P. [et al.]*. Weak-lensing mass calibration of redMaPPer galaxy clusters in Dark Energy Survey Science Verification data // *Monthly Notices of*

- the Royal Astronomical Society.* — 2017. — aug. — Vol. 469, no. 4. — Pp. 4899–4920.
52. *McClintock T. [et al.].* Dark Energy Survey Year 1 results: weak lensing mass calibration of redMaPPer galaxy clusters // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2019. — jan. — Vol. 482, no. 1. — Pp. 1352–1378.
 53. *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.
 54. *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.
 55. *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.
 56. *Bahk H., Hwang H. S.* UPCluster-SZ: The Updated Catalog of Galaxy Clusters from the List of Planck Sunyaev–Zel’dovich Sources // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2024. — may. — Vol. 272, no. 1. — P. 7.
 57. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.].* Planck 2013 results. XXXII. The updated Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources // *Astronomy & Astrophysics.* — 2015. — sep. — Vol. 581. — P. A14.
 58. *Planck Collaboration, Ade P. A. R. [et al.].* Planck intermediate results. XXXVI. Optical identification and redshifts of Planck SZ sources with telescopes at the Canary Islands observatories // *Astronomy & Astrophysics.* — 2016. — feb. — Vol. 586. — P. A139.
 59. *Воробьев В. С. [и др.].* Дополнительные спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из первого каталога обзора обсерватории им. Планка // *Письма в Астрономический журнал.* — 2016. — Т. 42, № 2. — С. 63–68.
 60. *Albareti 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.
61. *Chambers K. C. [et al.]*. The Pan-STARRS1 Surveys // *arXiv e-prints*. — 2016. — dec. — P. arXiv:1612.05560.
 62. *Буренин Р. 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. 17–330.
 63. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Оптическое отождествление скоплений галактик среди объектов второго каталога источников Сюняева-Зельдовича обсерватории им. Планка // *Письма в Астрономический журнал*. — 2019. — Т. 45, № 2. — С. 77–90.
 64. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик, обнаруженных по данным обзора обсерватории им. Планка // *Письма в Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 46, № 2. — С. 79–91.
 65. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре СРГ/еРОЗИТА // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 3. — С. 79–88.
 66. *Dey A. [et al.]*. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys // *AJ*. — 2019. — may. — Vol. 157, no. 5. — P. 168.
 67. *Wright E. L. [et al.]*. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *AJ*. — 2010. — dec. — Vol. 140, no. 6. — Pp. 1868–1881.
 68. *Буренин Р. А.* Поиск далеких скоплений галактик из рентгеновского обзора 400d в инфракрасном обзоре обсерватории WISE // *Письма в Астрономический журнал*. — 2015. — Т. 41, № 5. — С. 189–195.
 69. *Буренин Р. А.* Принудительная фотометрия объектов обзора Pan-STARRS1 по данным обзора WISE // *Письма в Астрономический журнал*. — 2022. — Т. 48, № 3. — С. 167–176.

70. *Gladders Michael D., Yee H. K. C.* A New Method For Galaxy Cluster Detection. I. The Algorithm // *AJ*. — 2000. — oct. — Vol. 120, no. 4. — Pp. 2148–2162.
71. *Bell E. F. [et al.]*. Nearly 5000 Distant Early-Type Galaxies in COMBO-17: A Red Sequence and Its Evolution since $z \sim 1$ // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — jun. — Vol. 608, no. 2. — Pp. 752–767.
72. *Lin Yen-Ting, Mohr Joseph J., Stanford S. Adam.* K-Band Properties of Galaxy Clusters and Groups: Luminosity Function, Radial Distribution, and Halo Occupation Number // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — aug. — Vol. 610, no. 2. — Pp. 745–761.
73. *Kopylova F. G., Kopylov A. I.* Detailed study of the Ursa Major supercluster of galaxies using the 2MASS and SDSS Catalogs // *Astronomy Letters*. — 2006. — Vol. 32, no. 2. — Pp. 84–90.
74. *Буренин Р. А. [и др.]*. Наблюдения массивных скоплений галактик из обзора всего неба телескопа ePOZITA на борту космической обсерватории СРГ // *Письма в Астрономический журнал*. — 2023. — Т. 49, № 1. — С. 3–25.
75. *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.
76. *Афанасьев В. Л., Моисеев А. В.* Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO // *Письма в Астрономический журнал*. — 2005. — Т. 31, № 3. — С. 214–225.
77. *Afanasiev V. L., Moiseev A. V.* Scorpio on the 6 m Telescope: Current State and Perspectives for Spectroscopy of Galactic and Extragalactic Objects // *Baltic Astronomy*. — 2011. — aug. — Vol. 20. — Pp. 363–370.
78. *Pozanenko A. [et al.]*. Astronomical Hosting in Central Asia // *EAS Publications Series* / Ed. by A. J. Castro-Tirado, J. Gorosabel, I. H. Park. — Vol. 61 of *EAS Publications Series*. — 2013. — jul. — Pp. 495–497.

79. Kornilov V. [et al.]. Combined MASS-DIMM instruments for atmospheric turbulence studies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2007. — dec. — Vol. 382, no. 343. — Pp. 1268–1278.
80. Клушко Е. В., Еселевич М. В., Тергоев В. И. Наблюдения ТГК «Прогресс» на оптическом телескопе АЗТ-3ЗИК // *Солнечно-земная физика*. — 2016. — Т. 2, № 3. — С. 17–23.
81. Афанасьев В. Л. [и др.]. Спектрограф низкого и среднего разрешения АДАМ для 1.6-м телескопа АЗТ-3ЗИК // *Астрофизический бюллетень*. — 2016. — Т. 71, № 4. — С. 514–524.
82. Буренин Р. А. [и др.]. Наблюдательные возможности нового спектрографа среднего и низкого разрешения на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории // *Письма в Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 42, № 5. — С. 333–345.
83. Бикмаев Ильфан Фяритович. Наземная поддержка спутника ИНТЕГРАЛ комплексом научного оборудования 1.5-м телескопа РТТ150. Создание комплекса, наблюдения и интерпретация оптич. свойств источников жестк. рентген. излучения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.03.02. — Каз. гос. университет, Казань, 2008. — 270 с.
84. Потанин С. А. [и др.]. Двухлучевой спектрограф для 2.5-м телескопа КГО ГАИШ МГУ // *Письма в Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 46, № 12. — С. 894–912.
85. Додин А. В. [и др.]. Оптическая спектроскопия квазаров, открытых телескопом СРГ/еРОЗИТА, на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 10. — С. 683–696.
86. Nadjip A. E. [et al.]. ASTRONIRCAM—the infrared camera-spectrograph for the 2.5-m telescope of SAI Caucasian observatory // *Astrophys. Bull.* — 2017. — jul. — Vol. 72, no. 3. — Pp. 349–362.
87. Tatarnikov A. M. [et al.]. Photometric Operation Mode of the ASTRONIRCAM Camera // *Astrophys. Bull.* — 2023. — sep. — Vol. 78, no. 3. — Pp. 384–394.

88. *Amodeo S. [et al.]*. Calibrating the Planck Cluster Mass Scale with Cluster Velocity Dispersions // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — aug. — Vol. 844, no. 2. — P. 101.
89. *Boada S. [et al.]*. High Confidence Optical Confirmations Among the High Signal-to-Noise Planck Cluster Candidates // *arXiv e-prints*. — 2018. — sep. — P. arXiv:1809.06378.
90. *Streblyanska A. [et al.]*. Characterization of a subsample of the Planck SZ source cluster catalogues using optical SDSS DR12 data // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — sep. — Vol. 617. — P. A71.
91. *Vikhlinin A. [et al.]*. X-Ray Overluminous Elliptical Galaxies: A New Class of Mass Concentrations in the Universe? // *The Astrophysical Journal Letters*. — 1999. — jul. — Vol. 520, no. 1. — Pp. L1–L4.
92. *Voevodkin A. [et al.]*. Fossil Systems in the 400d Cluster Catalog // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — jan. — Vol. 708, no. 2. — Pp. 1376–1387.
93. *Burenin R. A. [et al.]*. The 400 Square Degree ROSAT PSPC Galaxy Cluster Survey: Catalog and Statistical Calibration // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2007. — oct. — Vol. 172, no. 2. — Pp. 561–582.
94. *Kron R. G.* Photometry of a complete sample of faint galaxies. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1980. — jun. — Vol. 43. — Pp. 305–325.
95. *Planck Collaboration, Aghanim N. [et al.]*. Planck 2015 results. XXII. A map of the thermal Sunyaev-Zeldovich effect // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — sep. — Vol. 594. — P. A22.
96. *Streblyanska A. [et al.]*. Optical validation and characterization of Planck PSZ2 sources at the Canary Islands observatories. I. First year of LP15 observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — aug. — Vol. 628. — P. A13.
97. *Aguado-Barahona A. [et al.]*. Optical validation and characterization of Planck PSZ2 sources at the Canary Islands observatories. II. Second year of LP15 observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2019. — nov. — Vol. 631. — P. A148.

98. *Barrena R. [et al.]*. Optical validation and characterisation of Planck PSZ1 sources at the Canary Islands observatories. II. Second year of ITP13 observations // *Astronomy & Astrophysics*. — 2020. — jun. — Vol. 638. — P. A146.
99. *Abell G. O., Corwin H. G. Jr., Olowin R. P.* A Catalog of Rich Clusters of Galaxies // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1989. — may. — Vol. 70. — Pp. 1–138.
100. *Zwicky F. [et al.]*. Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. I. — 1961.
101. *Mirkazemi M. [et al.]*. Brightest X-Ray Clusters of Galaxies in the CFHTLS Wide Fields: Catalog and Optical Mass Estimator // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — jan. — Vol. 799, no. 1. — P. 60.
102. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа ePOZITA на борту обсерватории СРГ // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 3. — С. 174–182.
103. *Буренин Р. А. [и др.]*. Наблюдение скопления галактик очень большой массы на $z = 0.76$ в обзоре всего неба СРГ/ePOZITA // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 7. — С. 443–453.
104. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Оптическое отождествление и спектроскопические измерения красных смещений 216 скоплений галактик из обзора всего неба СРГ/ePOZITA // *Письма в Астрономический журнал*. — 2023. — Т. 49, № 11. — С. 695–716.
105. *Lockman F. J., Jahoda K., McCammon D.* The Structure of Galactic H i in Directions of Low Total Column Density // *The Astrophysical Journal*. — 1986. — mar. — Vol. 302. — P. 432.
106. *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.
107. *Hasinger G. [et al.]*. A deep X-ray survey in the Lockman hole and the soft X-ray log N-log S. // *Astronomy & Astrophysics*. — 1993. — aug. — Vol. 275. — Pp. 1–15.

108. *Hasinger G. [et al.]*. XMM-Newton observation of the Lockman Hole. I. The X-ray data // *Astronomy & Astrophysics*. — 2001. — jan. — Vol. 365. — Pp. L45–L50.
109. *Yang Y. [et al.]*. The Chandra Large Area Synoptic X-Ray Survey (CLASXS) of the Lockman Hole-Northwest: The X-Ray Catalog // *AJ*. — 2004. — oct. — Vol. 128, no. 4. — Pp. 1501–1523.
110. *Mateos S. [et al.]*. XMM-Newton observations of the Lockman Hole IV: spectra of the brightest AGN // *Astronomy & Astrophysics*. — 2005. — dec. — Vol. 444, no. 1. — Pp. 79–99.
111. *Rosen S. R. [et al.]*. The XMM-Newton serendipitous survey. VII. The third XMM-Newton serendipitous source catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — may. — Vol. 590. — P. A1.
112. *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* The Structure of Cold Dark Matter Halos // *The Astrophysical Journal*. — 1996. — may. — Vol. 462. — P. 563.
113. *Kettula K. [et al.]*. CFHTLenS: weak lensing calibrated scaling relations for low-mass clusters of galaxies // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — aug. — Vol. 451, no. 2. — Pp. 1460–1481.
114. *Duffy Alan R. [et al.]*. Dark matter halo concentrations in the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe year 5 cosmology // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2008. — oct. — Vol. 390, no. 1. — Pp. L64–L68.
115. *Зазнобин И. А. [и др.]*. Оптическое отождествление скоплений галактик среди рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА по данным о фотометрических оценках красных смещений галактик // *Письма в Астрономический журнал*. — 2023. — Т. 49, № 8. — С. 517–531.
116. *Vikhlinin A. [et al.]*. A Catalog of 200 Galaxy Clusters Serendipitously Detected in the ROSAT PSPC Pointed Observations // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — aug. — Vol. 502, no. 2. — Pp. 558–581.
117. *Voges W. [et al.]*. The ROSAT all-sky survey bright source catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 1999. — sep. — Vol. 349. — Pp. 389–405.

118. *Ebeling H., Edge A. C., Henry J. P.* MACS: A Quest for the Most Massive Galaxy Clusters in the Universe // *The Astrophysical Journal*. — 2001. — jun. — Vol. 553, no. 2. — Pp. 668–676.
119. *Mehrtens N. [et al.]*. The XMM Cluster Survey: optical analysis methodology and the first data release // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — jun. — Vol. 423, no. 2. — Pp. 1024–1052.
120. *Hilton M. [et al.]*. The Atacama Cosmology Telescope: A Catalog of >4000 Sunyaev-Zel'dovich Galaxy Clusters // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2021. — mar. — Vol. 253, no. 1. — P. 3.
121. *Bleem L. E. [et al.]*. The SPTpol Extended Cluster Survey // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2020. — mar. — Vol. 247, no. 1. — P. 25.
122. *Zwicky F., Herzog E., Wild P.* Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies, Vol. 2. — 1963.
123. *Yuan Z. S., Han J. L., Wen Z. L.* Dynamical state of galaxy clusters evaluated from X-ray images // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — jun. — Vol. 513, no. 2. — Pp. 3013–3021.
124. *Dahle H. [et al.]*. Weak Gravitational Lensing by a Sample of X-Ray-luminous Clusters of Galaxies. III. Serendipitous Weak Lensing Detections of Dark and Luminous Mass Concentrations // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — jul. — Vol. 591, no. 2. — Pp. 662–676.
125. *Schlafly E. F. [et al.]*. A Map of Dust Reddening to 4.5 kpc from Pan-STARRS1 // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — jul. — Vol. 789, no. 1. — P. 15.
126. *Kennicutt R. C. Jr.* Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence // *The Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 1998. — jan. — Vol. 36. — Pp. 189–232.
127. *Вихлинин А. А. [и др.]*. Скопления галактик // *Успехи физических наук*. — 2014. — Т. 57, № 4. — С. 317–341.

128. *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.
129. *Dressler A.* Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. // *The Astrophysical Journal*. — 1980. — mar. — Vol. 236. — Pp. 351–365.
130. *Giard M. [et al.]*. The infrared luminosity of galaxy clusters // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — nov. — Vol. 490, no. 2. — Pp. 547–554.
131. *Zou Hu [et al.]*. Photometric Redshifts and Stellar Masses for Galaxies from the DESI Legacy Imaging Surveys // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2019. — may. — Vol. 242, no. 1. — P. 8.
132. *Mullis C. R. [et al.]*. The 160 Square Degree ROSAT Survey: The Revised Catalog of 201 Clusters with Spectroscopic Redshifts // *The Astrophysical Journal*. — 2003. — sep. — Vol. 594, no. 1. — Pp. 154–171.
133. *Böhringer H. [et al.]*. The ROSAT-ESO Flux Limited X-ray (REFLEX) Galaxy cluster survey. V. The cluster catalogue // *Astronomy & Astrophysics*. — 2004. — oct. — Vol. 425. — Pp. 367–383.
134. *Piffaretti R. [et al.]*. The MCXC: a meta-catalogue of x-ray detected clusters of galaxies // *Astronomy & Astrophysics*. — 2011. — oct. — Vol. 534. — P. A109.
135. *Хамитов И. М. [и др.]*. Измерения красных смещений галактик в скоплениях методом многоцелевой спектроскопии на 1.5-м телескопе РТТ-150 // *Письма в Астрономический журнал*. — 2020. — Т. 46, № 1. — С. 3–14.
136. *Schwabe A. D. [et al.]*. The census of cataclysmic variables in the ROSAT Bright Survey // *Astronomy & Astrophysics*. — 2002. — dec. — Vol. 396. — Pp. 895–910.
137. *Pretorius M. L., Knigge C.* The space density and X-ray luminosity function of non-magnetic cataclysmic variables // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2012. — jan. — Vol. 419, no. 2. — Pp. 1442–1454.

138. Pretorius M. L., Knigge C., Schwobe A. D. The space density of magnetic cataclysmic variables // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2013. — jun. — Vol. 432, no. 1. — Pp. 570–583.
139. Sazonov S. [et al.]. X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way // *Astronomy & Astrophysics*. — 2006. — apr. — Vol. 450, no. 1. — Pp. 117–128.
140. Revnivtsev [et al.]. Properties of the Galactic population of cataclysmic variables in hard X-rays // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — oct. — Vol. 489, no. 3. — Pp. 1121–1127.
141. Oh K. [et al.]. The 105-Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2018. — mar. — Vol. 235, no. 1. — P. 4.
142. Lutovinov A. [et al.]. INTEGRAL View on cataclysmic variables and symbiotic binaries // *New Astronomy Review*. — 2020. — dec. — Vol. 91. — P. 101547.
143. Mukai K. X-Ray Emissions from Accreting White Dwarfs: A Review // *PASP*. — 2017. — jun. — Vol. 129, no. 976. — P. 062001.
144. Зазнобин И. А. [и др.]. Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба // *Письма в Астрономический журнал*. — 2021. — Т. 47, № 3. — С. 89–106.
145. Saxton R. D. [et al.]. The first XMM-Newton slew survey catalogue: XMM-SL1 // *Astronomy & Astrophysics*. — 2008. — mar. — Vol. 480, no. 2. — Pp. 611–622.
146. Gaia Collaboration, Brown A. G. A. [et al.]. Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties // *Astronomy & Astrophysics*. — 2021. — may. — Vol. 649. — P. A1.
147. HI4PI Collaboration, Ben Bekhti N. [et al.]. HI4PI: A full-sky H I survey based on EBHIS and GASS // *Astronomy & Astrophysics*. — 2016. — oct. — Vol. 594. — P. A116.

148. *Arnaud K. A.* XSPEC: The First Ten Years // *Astronomical Data Analysis Software and Systems V* / Ed. by George H. Jacoby, Jeannette Barnes. — Vol. 101 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1996. — jan. — P. 17.
149. *Goodman J., Weare J.* Ensemble samplers with affine invariance // *Communications in Applied Mathematics and Computational Science*. — 2010. — jan. — Vol. 5, no. 1. — Pp. 65–80.
150. *Byckling K. [et al.]*. Deriving an X-ray luminosity function of dwarf novae based on parallax measurements // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — nov. — Vol. 408, no. 4. — Pp. 2298–2311.
151. *Буренин Р. А. [и др.]*. Выборка катаклизмических переменных, обнаруженных в рентгеновском обзоре площадью 400 кв. градусов // *Письма в Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 42, № 4. — С. 273–284.
152. *Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M.* Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — jun. — Vol. 500, no. 2. — Pp. 525–553.
153. *Schlafly E. F., Finkbeiner D. P.* Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD // *The Astrophysical Journal*. — 2011. — aug. — Vol. 737, no. 2. — P. 103.
154. *Green G. M. [et al.]*. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS // *The Astrophysical Journal*. — 2019. — dec. — Vol. 887, no. 1. — P. 93.
155. *Lightkurve Collaboration, Cardoso J. V. M. [et al.]*. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python. — Astrophysics Source Code Library, record ascl:1812.013. — 2018. — dec.
156. *Zacharias N. [et al.]*. VizieR Online Data Catalog: UCAC4 Catalogue (Zacharias+, 2012) // *VizieR Online Data Catalog*. — 2012. — jul. — P. I/322A.
157. *Sánchez-Sáez P. [et al.]*. Alert Classification for the ALeRCE Broker System: The Light Curve Classifier // *AJ*. — 2021. — mar. — Vol. 161, no. 3. — P. 141.

158. *Förster F. [et al.]*. The Automatic Learning for the Rapid Classification of Events (ALeRCE) Alert Broker // *AJ*. — 2021. — may. — Vol. 161, no. 5. — P. 242.
159. *Bellm E. C. [et al.]*. The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results // *PASP*. — 2019. — jan. — Vol. 131, no. 995. — P. 018002.
160. *Warner Brian*. Cataclysmic variable stars. — 1995. — Vol. 28.
161. *Osterbrock D. E.* Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei. — 1989.
162. *Lomb N. R.* Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data // *Ap&SS*. — 1976. — feb. — Vol. 39, no. 2. — Pp. 447–462.
163. *Scargle J. D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. // *The Astrophysical Journal*. — 1982. — dec. — Vol. 263. — Pp. 835–853.
164. *Jayasinghe T. [et al.]*. The ASAS-SN catalogue of variable stars VI: an all-sky sample of δ Scuti stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — apr. — Vol. 493, no. 3. — Pp. 4186–4208.
165. *Ricker G. R. [et al.]*. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) // Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave / Ed. by Jr. Oschmann, Jacobus M., Mark Clampin, Giovanni G. Fazio, Howard A. MacEwen. — Vol. 9143 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2014. — aug. — P. 914320.
166. *Revnivtsev M. [et al.]*. Aperiodic optical variability of intermediate polars - cataclysmic variables with truncated accretion disks // *Astronomy & Astrophysics*. — 2010. — apr. — Vol. 513. — P. A63.
167. *Scaringi S. [et al.]*. Accretion-induced variability links young stellar objects, white dwarfs, and black holes // *Science Advances*. — 2015. — oct. — Vol. 1, no. 9. — Pp. e1500686–e1500686.

168. *Jayasinghe T. [et al.]*. The ASAS-SN catalogue of variable stars I: The Serendipitous Survey // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — jul. — Vol. 477, no. 3. — Pp. 3145–3163.
169. *Patterson J., Raymond J. C.* X-ray emission from cataclysmic variables with accretion disks. I. Hard X-rays. // *The Astrophysical Journal*. — 1985. — may. — Vol. 292. — Pp. 535–549.
170. *Schachter J. [et al.]*. Bowen Fluorescence in AM Herculis Stars // *The Astrophysical Journal*. — 1991. — jun. — Vol. 373. — P. 633.
171. *Harlaftis E. T., Horne K.* The emission-line pulse pattern in the intermediate polar RX J0558+53 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1999. — apr. — Vol. 305, no. 2. — Pp. 437–448.