

ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК СРЕДИ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ ОБЗОРА СРГ/еРОЗИТА ПО ДАННЫМ О ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ОЦЕНКАХ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ ГАЛАКТИК

© 2023 г. И. А. Зазнобин^{1,2*}, Р. А. Буренин^{1,2}, А. В. Мещеряков¹, М. Р. Гильфанов^{1,3}, Н. С. Лыскова¹, П. С. Медведев¹, С. Ю. Сазонов¹, Р. А. Сюняев^{1,3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 11.08.2023 г.; принята к публикации 11.08.2023 г.

Обсуждается алгоритм, с помощью которого отождествляются массивные скопления галактик, обнаруженные в обзоре всего неба СРГ/еРОЗИТА, и оцениваются их фотометрические оценки красных смещений. С этой целью используются данные фотометрических оценок красных смещений галактик и принудительной фотометрии *WISE*. Для оценки качества работы алгоритма использовалась выборка 634 массивных скоплений галактик из обзора космической обсерватории им. Планка с известными спектроскопическими красными смещениями в диапазоне $0.1 < z_{\text{spec}} < 0.6$. Точность определения фотометрических оценок красных смещений для этой выборки составила $\delta z_{\text{phot}}/(1 + z_{\text{phot}}) \approx 0.5\%$, доля больших отклонений — 1.3%. Показано, что эти большие отклонения возникают, в основном, из-за проекций скоплений галактик или других крупномасштабных структур на разных красных смещениях в поле рентгеновского источника. Измерение инфракрасных (ИК) светимостей скоплений галактик позволяет оценить надежность оптического отождествления скоплений, обнаруженных в обзоре СРГ/еРОЗИТА, а также получить дополнительное независимое измерение их полных гравитационных масс M_{500} . Показано, что оценка масс M_{500} скоплений галактик, полученная по данным измерений их ИК-светимости, имеет точность $\sigma_{\text{lg } M_{500}} = 0.124$, сравнимую с точностью оценки масс скоплений галактик по данным об их рентгеновской светимости.

Ключевые слова: скопления галактик, фотометрические оценки красных смещений.

DOI: 10.31857/S0320010823080065, **EDN:** 01ZHW

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и оптическое отождествление скоплений галактик — одна из важных задач внегалактической астрономии. Изучение свойств скоплений галактик позволяет изучать строение и эволюцию как самих скоплений галактик, так и Вселенной в целом. Изучение выборок скоплений галактик позволяет построить ограничение на параметры используемых космологических моделей Вселенной по измерению функции масс скоплений галактик (Вихлинин и др., 2009б; Сообщение Планка, 2014а, 2016б). Кроме того, исследование больших выборок скоплений позволит получить измерения барионных акустических осцилляций.

13 июля 2019 г. была запущена космическая обсерватория Спектр—Рентген—Гамма (СРГ, Сюняев и др., 2021). На борту обсерватории установлены два рентгеновских телескопа с оптикой косоугольного падения — еРОЗИТА (Предел и др., 2021) и АРТ-ХС (Павлинский и др., 2021), работающие в диапазонах энергий 0.2–8 и 4–30 кэВ соответственно. Изучение скоплений галактик — одна из основных задач обзора телескопа еРОЗИТА. По состоянию на март 2022 г. завершено четыре полных обзора всего неба. В обзоре телескопа еРОЗИТА, в области неба $0 < |l| < 180^\circ$, где за обработку данных обзора всего неба СРГ/еРОЗИТА отвечают российские ученые, было обнаружено около 18 000 протяженных

*Электронный адрес: zaznobin@iki.rssi.ru

рентгеновских источников, большинство которых отождествляются со скоплениями галактик.

Нами была организована работа по оптическому отождествлению и спектроскопическим измерениям красных смещений массивных скоплений галактик из обзора eROZITA на оптических телескопах (Зазнобин и др., 2021a,б; Буренин и др., 2021, 2023). К настоящему времени измерены спектроскопические красные смещения для более чем 200 скоплений галактик с неизмеренными спектроскопическими красными смещениями, которые, скорее всего, в будущем войдут в космологические выборки обзора SRG/eROZITA. Наши наблюдения позволят получить спектроскопические измерения красных смещений для космологической выборки скоплений объемом до нескольких тысяч наиболее массивных скоплений галактик.

Однако для всех скоплений галактик, обнаруженных в обзоре SRG/eROZITA, измерить спектроскопические красные смещения не представляется возможным, так как это требует очень больших затрат наблюдательного времени. Поэтому нами была поставлена задача — определить фотометрические оценки красных смещений (далее по тексту — фотометрические красные смещения) скоплений галактик, используя данные больших фотометрических обзоров неба. Наиболее распространенный способ оценки красных смещений скоплений галактик — по цвету галактик красной последовательности (см., например, Рыкофф и др., 2014; Сообщество Планка, 2015). Существует множество работ, в которых приведены фотометрические красные смещения галактик и скоплений галактик, в том числе полученные с применением методов машинного обучения (см., например, Мещеряков и др., 2015; Цзоу и др., 2022; Шмидт и др., 2020; Сообщество Евклида, 2020; Эрнандес-Ланг и др., 2022; Рыкофф и др., 2014; Вэнь и др., 2012; Хилтон и др., 2018).

Можно предположить, что использование дополнительной информации о точном положении и размере скоплений, которые можно получить по данным в рентгеновском диапазоне, позволит улучшить точность и надежность фотометрических красных смещений скоплений галактик. В настоящей статье обсуждается процедура отождествления и оценки красных смещений массивных скоплений галактик, для которых имеются данные рентгеновских наблюдений в обзоре всего неба телескопа eROZITA на борту космической обсерватории SRG. Для работы процедуры используются фотометрические красные смещения галактик из каталога Цзоу и др. (2022) (далее по тексту Ц22), полученные с помощью методов машинного обучения. Также используются дополнительные данные обзоров в оптическом и ИК-диапазонах. Вычисления расстояний проводятся стандартным

образом для модели плоской Вселенной с параметрами $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$. Процедура оптимизирована для наиболее массивных и богатых скоплений, для менее богатых скоплений она должна работать хуже. Мы предполагаем изучить этот вопрос в нашей дальнейшей работе.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Выборка скоплений галактик

Для проверки качества работы процедуры использовалась выборка массивных скоплений галактик, обнаруженных в обзоре всего неба SRG/eROZITA на участке неба, за обработку которого отвечают российские ученые ($0^\circ < l < 180^\circ$), и также обнаруженных в обзоре космической обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014б, 2016; Буренин, 2017). Спектроскопические красные смещения скоплений галактик выборки взяты из других каталогов (см., например, Маллис и др., 2003; Борингер и др., 2004; Буренин и др., 2007; Пифаретти и др., 2011; Вэнь и др., 2012; Сообщество Планка, 2014б, 2016) и из базы данных внегалактических объектов *NED*¹. Также использовались спектроскопические красные смещения скоплений галактик из обзора Планка, взятые из работ нашей научной группы (Сообщество Планка, 2014б, 2015,б, 2016; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020, 2021а; Хамитов и др., 2020; Буренин, 2022; Буренин и др., 2021, 2023).

В ходе первых трех обзоров всего неба SRG/eROZITA получена выборка 2317 скоплений галактик в области неба, за обработку данных eROZITA которых отвечают российские ученые, и которые также содержатся в обзоре Планка. Из них для 1053 скоплений оказались измерены спектроскопические красные смещения. Скопления галактик на $z < 0.1$ хорошо изучены, а галактики скоплений на больших красных смещениях $z > 0.6$ имеют значительный разброс фотометрических красных смещений (см. табл. 3 из работы Ц22). Поэтому в нашей работе параметры алгоритма оптимизированы для того, чтобы получить как можно более надежные отождествления скоплений и как можно более точные фотометрические красные смещения скоплений, расположенных на $0.1 < z < 0.6$. Из этой выборки было отобрано 804 скопления галактик на красных смещениях $0.1 < z_{\text{spec}} < 0.6$. Поскольку использовались данные фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI LIS* (Дэй и др., 2019) и данные принудительной фотометрии *WISE* (Райт и др.,

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/>

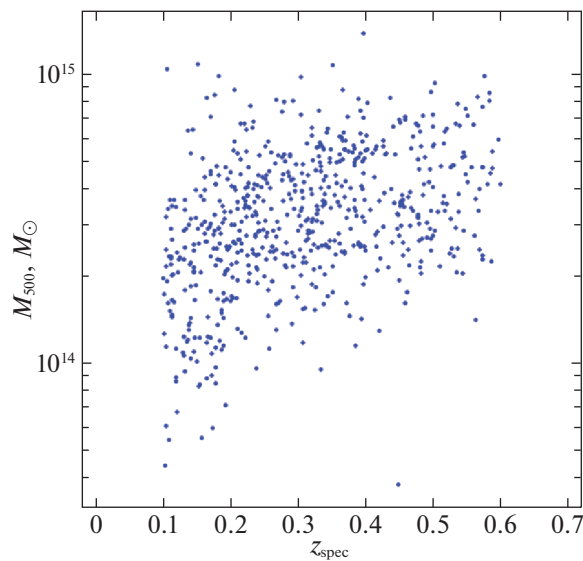


Рис. 1. Соотношение масс M_{500} скоплений выборки из 634 скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА с их спектроскопическими красными смещениями $z_{\text{спец}}$. Массы скоплений оценены из значений рентгеновских светимостей еРОЗИТА и рассчитаны, используя соотношение из работы Вихлинина и др. (2009а).

2010) галактик из обзора *Pan-STARRS1* (Чэмберс и др., 2016), отбор объектов проводился в области пересечения обзоров *DESI LIS* и *Pan-STARRS1*. Поэтому итоговая выборка скоплений галактик, по которой проводилась оценка качества работы алгоритма оптического отождествления и расчета фотометрических красных смещений, составляет 634 скопления галактик на красных смещениях $0.1 < z_{\text{спец}} < 0.6$.

Соотношение масс и красных смещений скоплений галактик этой выборки из 634 скоплений галактик представлено на рис. 1, массы оценены стандартным способом (Вихлинин и др., 2009а) из рентгеновских светимостей, полученных из данных обзора еРОЗИТА. Видно, что практически все скопления выборки являются массивными. В табл. 1 указано количество скоплений галактик нашей выборки, встречающихся в других известных каталогах скоплений галактик, в том числе со спектроскопическими измерениями красных смещений. В табл. 1 отдельно указано количество скоплений галактик, спектроскопические красные смещения которых измерены нашей научной группой, так как в разных каталогах не для всех скоплений галактик имеются спектроскопические измерения, во многих случаях приводятся фотометрические красные смещения.

Красные смещения галактик

Для определения красных смещений скоплений галактик использовались данные фотометрических

красных смещений галактик, представленных в работе Ц22. В этой работе приведены оценки красных смещений галактик, полученные с использованием данных обзоров неба *Dark Energy Spectroscopic*

Таблица 1. Количество скоплений галактик выборки, встречающихся в других известных каталогах

Название источника	Число скоплений	С измененными $z_{\text{спец}}$
Abell (Эйбл и др., 1989)	131	71
PSZ2 (Сообщество Планка, 2016)	148	126
ACT (Хилтон и др., 2021)	129	98
RM (Рыкофф и др., 2014)	486	—
B17 (Буренин, 2017)	442	391
WHL (Вэнь и др., 2012)	422	164
REFLEX (Борингер и др., 2004)	68	68
MCXC (Пифаретти и др., 2011)	93	93
MACS (Эбелинг и др., 2001)	24	6
Наша группа ¹	121	121

¹ Скопления галактик выборки, для которых нашей научной группой измерены спектроскопические красные смещения.

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*² министерства науки и технологий Китайской Народной Республики.

В нашей работе использовались данные фотометрических оценок красных смещений галактик, основанные на выпуске 9 обзора *DESI Legacy Imaging Surveys (DESI LIS, Дэй и др., 2019)*. 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 скоплений галактик выборки.

Данные обзора *DESI LIS*, выпуск 9, опубликованы в январе 2021 г. и состоят из фотометрических обзоров неба, выполненных в обсерватории Китт-Пик в США на 2.3-м телескопе в фильтрах *gr* (*Beijing-Arizona Sky Survey, BASS*) и четвертом телескопе в фильтре *z* (*Mayall z-band Legacy Survey, MzLS*), а также на четвертом телескопе обсерватории Серро-Тололо, Чили, в фильтрах *grz* (*Dark Energy Camera Legacy Survey, DECaLS*). Глубина обзора на уровне 5σ составляет $g = 24.7$, $r = 23.9$ и $z = 23.0$, покрытие около 20 000 кв. градусов внегалактического неба $|b| > 18^\circ$ на склонениях $-18^\circ < \delta < +84^\circ$.

В работе Ц22 для данных обзора *DESI LIS* определены красные смещения оптически протяженных объектов ярче $r < 23$. Всего таких источников оказалось около 320 млн на площади неба 19876 кв. градусов. Для 2.8 млн галактик на полях этого обзора известны их спектроскопические красные смещения из открытых источников, таких как Слоановский обзор неба (Сообщество СДСС, 2020) и др. Полный список спектроскопических обзоров приведен в табл. 2 в работе Цзоу и др. (2019).

Фотометрические красные смещения галактик в работе Ц22 определены методом постоянного локальной линейной регрессии между пространством цветов галактик и их красными смещениями, где галактики отбирались методом 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 табл. 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* 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 ($\delta z / (1 + z) > 0.15$) 0.85% от общего числа.

Для нашей работы мы использовали каталог фотометрических красных смещений галактик из обзора *DESI*. Использовались только данные координат галактик, приведенные в столбцах *RA* и *DEC*, а также данные фотометрических красных смещений и их ошибок, приведенных в столбцах *PHOTO_Z* и *PHOTO_ZERR* (далее по тексту *photo_z* и *photo_zerr*).

Рентгеновские данные

Для отождествления скоплений галактик и оценки их красных смещений использовались данные о потоках, координатах и размерах протяженных рентгеновских источников, обнаруженных в результате первых трех обзоров всего неба телескопа *eROSITA*. Размеры рентгеновских источников определялись как радиус ядра бета-модели r_c , которой аппроксимировался профиль поверхностной яркости протяженных рентгеновских источников (Сарагин, 1986).

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 настоящей статьи и будет обсуждаться в последующих работах.

Данные в ИК-диапазоне

В работе использовались данные принудительной фотометрии *WISE* (Буренин, 2022) в полосе 3.4 мкм галактик, координаты которых определены по данным обзора *Pan-STARRS1* и сопоставлены с каталогом *DESI*, выпуск 9. В работе Буренина (2022) фотометрия была получена из сборок данных с большей экспозицией, чем в обзоре *DESI LIS*, поэтому использовалась фотометрия из работы Буренина (2022). Эти данные имеются для большинства галактик из каталога Ц22. Для галактик, отсутствующих в каталоге *Pan-STARRS1*, использовалась фотометрия *WISE* из обзора *DESI LIS*.

²<https://nadc.china-vo.org/>

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ

Красные смещения скоплений галактик оцениваются процедурой, разделенной на два этапа. Сначала проводятся поиск и отождествление скоплений галактик. Для этого рассчитывались ИК-светимости галактик вблизи центральных областей рентгеновских источников, отождествляемых со скоплениями галактик. Использование данных галактик из небольшой области вблизи центров скоплений позволяет отделить галактики скоплений от фоновых галактик и галактик переднего плана.

После этого определяются красные смещения скоплений галактик по фотометрическим красным смещениям галактик в узком диапазоне красных смещений на большем радиусе, сравнимым с величинами R_{500} или R_{200} . Эта методика позволяет оценить красное смещение скоплений, отсеив фоновые галактики или группы галактик, и более точно определить красные смещения скоплений галактик по большому количеству галактик. Далее эти этапы будут описаны подробно.

Поиск и отождествление скоплений галактик

Для поиска скоплений галактик проводился отбор всех галактик из каталога Ц22 на угловом расстоянии от центра рентгеновского источника не более пяти радиусов ядра бета-модели, которой описывается протяженный рентгеновский источник. На больших значениях красных смещений физические размеры охватываемых областей пространства могут многократно превышать реальные размеры скоплений галактик. Поэтому выбирались только те галактики, у которых физическое расстояние до направления на центр рентгеновского источника не превышает характерного размера массивных скоплений, примерно равного 800 кпк — размеру R_{500} скопления галактик с массой $M_{500} = 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ на красном смещении $z = 0.6$. Для вычисления расстояний от галактик до направления на центр рентгеновского источника использовались их фотометрические красные смещения из каталога Ц22.

После чего строилась зависимость ИК-светимостей галактик от их предполагаемых красных смещений, взятых из Ц22. Для этого рассчитывалась светимость галактик в полосе 3.4 мкм обзора *WISE*. Величины $W1$ принудительной фотометрии из работы Буренин (2022) приведены в величинах *UBVRI*-системы (система Веги). Значения потока рассчитывались с использованием эффективной ширины фильтра $W1$: $W_{\text{eff}} = 6626.42 \text{ \AA}$ и

опорного значения спектральной плотности потока излучения в *UBVRI*-системе: $ZP_V = 8.1787 \times 10^{-12} \text{ эрг/с/см}^2/\text{\AA}$. Величины $W122AB$ -, из работы Ц22 приведены в *AB*-системе, поэтому для них $ZP_V = 9.5950 \times 10^{-11} \text{ эрг/с/см}^2/\text{\AA}$.

$$W1_{\text{abs}} = W1 - 5 \lg D + 5,$$

$$F_{W1} = ZP_V W_{\text{eff}} \times 10^{-0.4 W1_{\text{abs}}} (1 + photo_z) / k_{\text{cor}},$$

$$L_{W1} = F_{W1} \times 4\pi (10pc)^2.$$

K -поправки рассчитывались методом смещения шаблона спектра эллиптической галактики возрастом 2.5 Глет с металличностью $Z = 0.008$ (Брузуал, Шарло, 2003) на красное смещение $photo_z$. Для этого проводился расчет свертки шаблона спектра с профилем пропускания фильтра $W1$. После чего каждой галактике выборки ставилось в соответствие гауссово распределение, где математическое ожидание соответствует красному смещению галактики $photo_z$. Среднее квадратичное отклонение определялось как квадратный корень суммы квадратов ошибки измерения красного смещения $photo_zerr$ и значения сглаживающего коэффициента 0.02. Распределение нормировалось на величину светимости в полосе 3.4 мкм:

$$f(z) = \sum_i \frac{L_{W1i}}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-(z-photo_z_i)^2/2\sigma_i^2},$$

$$\sigma_i = \sqrt{photo_zerr_i^2 + 0.02^2}.$$

Полученные для каждой галактики выборки распределения складывались и умножались на величину среднего значения $\langle \sigma_{photo_z}^i \rangle = 0.0884$, для того, чтобы максимальные значения распределений ИК-светимости галактик в поле скоплений примерно соотносились по величине с их реальной ИК-светимостью. Красное смещение, на которое приходится максимальная суммарная ИК-светимость галактик в заданной области неба, будет считаться предварительной оценкой красного смещения скопления.

Оценка красных смещений скоплений

Чтобы получить более точное измерение красного смещения скопления галактик, требуется усреднить измерения как можно большего числа галактик скоплений. Для этого отбирались галактики в поле скопления на большом расстоянии до направления на центр рентгеновского источника, но в узком диапазоне красных смещений $photo_z$. Выбирались галактики с относительными ошибками красных смещений $photo_zerr/(1 + photo_z) < 0.02$ со значениями $photo_z$ в диапазоне от $z - 0.06(1 + z)$ до $z + 0.06(1 + z)$, где z — предварительная оценка красного смещения скопления.

Галактики отбирались на расстоянии не более $1.4R_{500}$ до направления на центр рентгеновского источника. Наши оценки показывают, что при увеличении расстояния, больше указанного значения, будет увеличиваться количество отобранных фоновых галактик ближайших к скоплениям крупномасштабных структур, расположенных на смежных со скоплениями галактик красных смещениях. Это будет приводить к ухудшению точности оценки красных смещений скоплений галактик.

Значения R_{500} определялись исходя из оценки масс M_{500} , полученных из рентгеновских светимостей скоплений галактик. Методика вычисления рентгеновских светимостей скоплений, с учетом К-поправки, взята из работы Вихлинина и др. (2009а). При расчете светимостей учитывалось поглощение рентгеновского излучения на нейтральном галактическом водороде. Значения плотности колонки нейтрального водорода определялись по данным, взятым из работы Дикей, Локмана (1990). Красные смещения скоплений галактик принимались равным предварительным оценкам красных смещений скоплений галактик.

Для отобранных галактик скоплений рассчитывались средневзвешенные значения красных смещений, где вес галактик равнялся обратной величине квадрата ее ошибки $photo_zerr$. При этом из выборки галактик исключались галактики, у которых фотометрические красные смещения галактик находятся за пределами двух стандартных отклонений распределений красных смещений галактик. Галактики исключались из выборки до тех пор, пока при следующей итерации не было исключено ни одной галактики. Для скоплений галактик из обзора Планка фотометрические красные смещения оцениваются, в среднем, по фотометрическим красным смещениям 50 галактик.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ

В ходе работы процедуры могут возникать существенные расхождения между полученными фотометрическими красными смещениями скоплений галактик и спектроскопическими измерениями их красных смещений. Главным образом это связано с расхождениями в оптическом отождествлении, которые возникают, преимущественно, при проекции крупномасштабных структур на протяженные рентгеновские источники. Так же некоторая часть протяженных рентгеновских источников может быть образована несколькими близко расположенными точечными источниками, поэтому такие источники не должны быть отождествлены со скоплениями галактик. Поэтому мы предлагаем способы оценки надежности процедуры по данным ИК-светимостей скоплений галактик и по распределению ИК-светимости при поиске и отождествлении скоплений галактик.

Распределение ИК-светимости по красному смещению

Величины максимумов распределений ИК-светимости по красному смещению могут служить характеристикой надежности отождествления скоплений галактик. Для массивных скоплений галактик пики ИК-светимостей должны принимать большие значения, превышающие значения пиков, которые могут возникать при проекции крупномасштабных структур в полях рентгеновских источников. В случаях проецирования нескольких скоплений или крупномасштабных структур их рентгеновские потоки могут складываться, поэтому в некоторых случаях может быть сложно определить, какие скопления галактик в полях рентгеновских источников являются наиболее массивными.

Для того чтобы оценить показатель надежности оптического отождествления скоплений галактик, нами смоделирована выборка 10 000 рентгеновских источников (далее по тексту — ложные 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 ложных источников выбиралось случайным образом среди скоплений галактик из обзора Планка, обнаруженных в обзоре СРГ/еРОЗИТЫ. В выборке ложных 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 мы ложным способом отождествим настоящий рентгеновский источник с ложным. Число таких случайных совпадений мало и составляет не более нескольких десятков.

В поле каждого ложного источника получены распределения ИК-светимостей, определены значения пиков и красные смещения, на которые они приходятся. Результаты этого моделирования приведены на рис. 2. На рисунке показаны значения пиков ИК-светимостей, где оранжевые точки соответствуют ложным источникам, синие точки — скоплениям из обзора Планка. Красные звезды соответствуют скоплениям из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$, где z_{phot} — предварительные оценки красных смещений скоплений, а σ — стандартное отклонение.

Распределения ИК-светимости скоплений галактик могут содержать больше одного надежного локального пика из-за корреляции фоновых галактик по красным смещениям в полях скоплений галактик, возникающих при проекциях крупномасштабных структур. Часто в случаях проекций может быть трудно установить, какие скопления

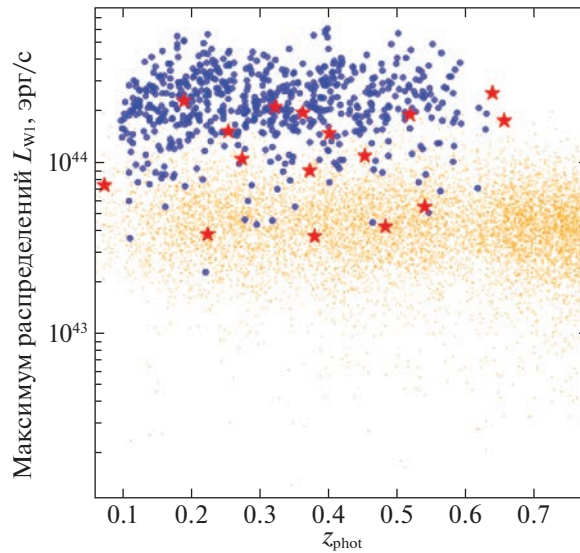


Рис. 2. Значения пиков ИК-светимости скоплений от красного смещения. Синими точками обозначены скопления из обзора Планка, оранжевыми — ложные источники, красными звездами — скопления из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$, где z_{phot} — предварительные оценки красных смещений скоплений галактик.

галактик являются более массивными. Отождествление скоплений галактик может быть ненадежным, если в поле их рентгеновских источников есть вторичные пики, значения которых сравнимы со значением главного пика. В таких случаях можно говорить о возможном наличии проекций в полях рентгеновских источников, если в распределениях ИК-светимости наблюдаются вторичные пики с амплитудой более половины от главного пика и надежностью больше 2σ . Подобные случаи могут потребовать дополнительных данных для оптического отождествления.

Зависимость ИК-светимости скоплений от их массы

Соотношение между рентгеновской оценкой масс скоплений и их ИК-светимостями также может быть использовано для оценки надежности отождествления скоплений галактик. Известно, что между светимостями скоплений галактик в ИК-диапазоне и их массой наблюдается корреляция (см., например, Лин и др., 2004; Копылова, Копылов, 2006; Буренин, 2017; Буренин и др., 2023). Массы скоплений могут быть оценены на основе рентгеновских данных eROZITY (Вихлинин и др., 2009a) и их фотометрических красных смещений. ИК-светимость скоплений галактик можно оценить по данным принудительной фотометрии галактик в полосе 3.4 мкм.

Чтобы оценить ИК-светимости скоплений галактик, мы отобрали галактики, у которых угловые расстояния до центров рентгеновских источников

не превышают угловые размеры $1.4R_{500}$. Среди полученных выборок галактик отбирались 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 устанавливались. 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 рис. 3. Слева на рисунке показано соотношение светимостей L_{W1} скоплений галактик в полосе 3.4 мкм в зависимости от их масс M_{500} . 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 $M_{\odot}$. Синие точки — скопления галактик из выборки обзора Планка, оранжевые точки — ложные рентгеновские источники, красные звезды — скопления из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$. На рисунке видно, что оцениваемые ИК-светимости выборки ложных источников получаются в несколько раз меньше, чем для массивных скоплений из выборки обзора Планка. Следовательно, низкие ИК-светимости могут указывать на ненадежные отождествления, которые могут возникать в поле протяженных рентгеновских источников, не отождествляемых со скоплениями галактик.

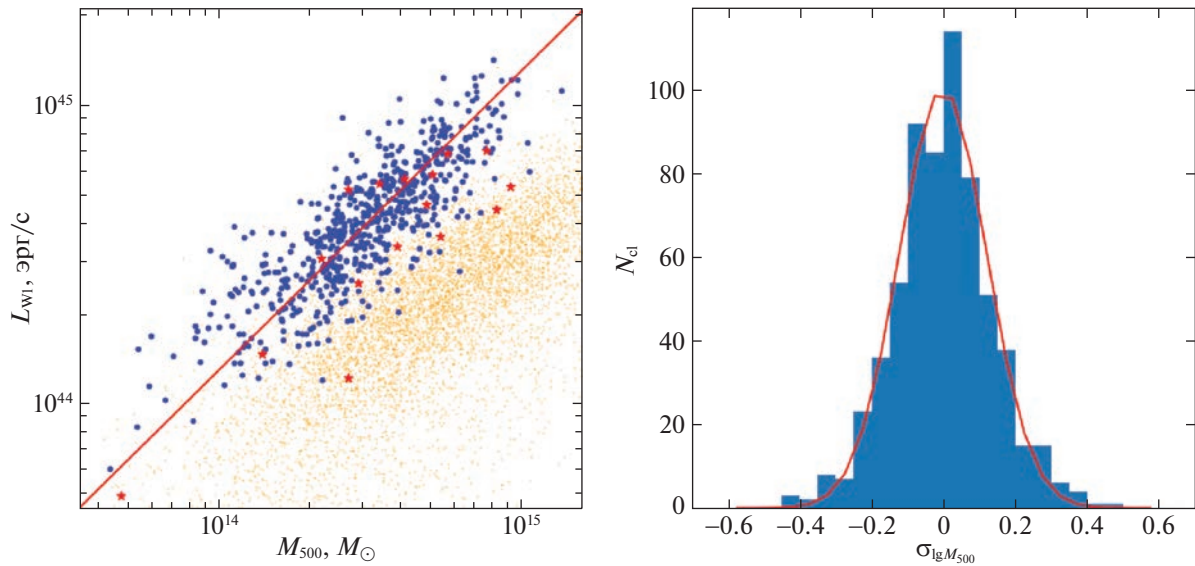


Рис. 3. Слева: соотношение светимостей L_{W1} скоплений галактик в полосе 3.4 мкм в зависимости от их масс M_{500} . Синие точки — скопления галактик из выборки обзора Планка, красные звездочки — скопления из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$, оранжевые точки — ложные рентгеновские источники. Красная линия — линия лучшей аппроксимации $\lg(L_{W1}) = \lg(M_{500}) + k$. Справа: гистограмма распределения $\sigma_{\lg M_{500}}$ относительно значений аппроксимации.

Справа на рис. 3 показано распределение отклонений масс скоплений. Красной кривой показана аппроксимация нормальным распределением. Стандартное отклонение распределения равняется $\sigma_{\lg M_{500}}^{\text{tot}} = 0.124$, т.е. $\pm 33\%$. Ошибка определения масс скоплений по их ИК-светимостям содержит в себе ошибки на определение масс скоплений по рентгеновским светимостям скоплений галактик. В работе Вихлинина и др. (2009а) 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, точность оценки масс скоплений галактик по их ИК-светимостям сравнима с точностью оценки масс по рентгеновской светимости.

Определение надежности оптического отождествления

Надежность оптического отождествления мы определяли как произведение вероятности того, что значения главного максимума распределения ИК-светимости по красному смещению в исследуемом объекте больше, чем значения пиков ложных источников на данном красном смещении в диапазоне $z = z_{\text{phot}} \pm 0.05$, на вероятность того, что отношение ИК-светимости исследуемого объекта к оценке их массы M_{500} , полученной из рентгеновских данных, больше, чем отношение ИК-светимости к M_{500} ложных источников в диапазоне $\lg(M_{500}) \pm \lg 2$.

Как уже упоминалось ранее, распределения ИК-светимостей скоплений галактик могут содержать больше одного надежного локального пика из-за корреляции фоновых галактик по красным смещениям в полях скоплений галактик, возникающих при проекциях крупномасштабных структур. Часто в случаях проекций может быть трудно установить, какие скопления галактик являются более массивными. Количество скоплений галактик из выборки обзора Планка, у которых распределение ИК-светимости имеет вторичные пики, вероятность которых превышает 1σ , составляет 189 при общем числе 634 (29.8%), а для 2σ — 22 (3.5%).

Отождествление скоплений галактик может быть ненадежным, если в поле их рентгеновских источников есть вторичные пики, значения которых сравнимы с значением главного пика. В таких случаях можно говорить о возможном наличии проекций в полях рентгеновских источников, если в распределениях ИК-светимостей наблюдаются вторичные пики с амплитудой более половины от главного пика и надежностью больше 2σ . В случаях проекций рентгеновское излучение складывается от двух проецируемых скоплений, из-за чего оценка массы M_{500} скопления, расположенного на красном смещении пика распределения ИК-светимости, может быть завышена. Следовательно, ИК-светимость такого скопления будет заниженной, по сравнению со скоплениями сравнимой массы, поэтому значение надежности таких объектов будет низким.

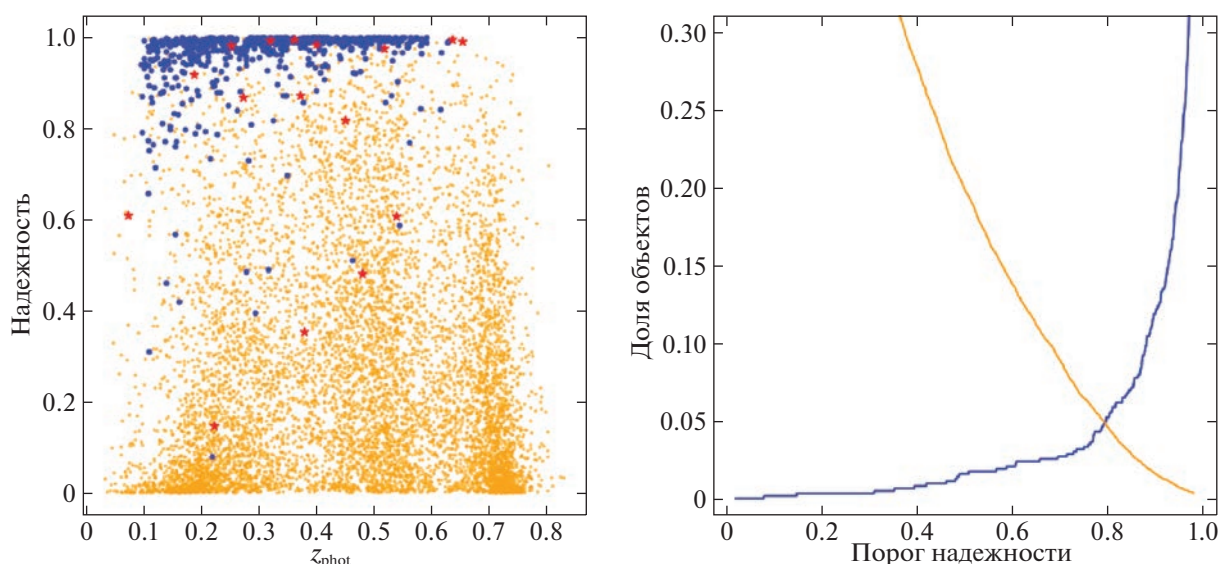


Рис. 4. Справа: оценка показателя надежности. Оранжевые точки — ложные скопления, синие точки — скопления галактик из выборки обзора Планка, красные точки — скопления из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$, где z_{phot} — предварительные оценки красных смещений скоплений галактик. Справа синей линией показана доля скоплений галактик из обзора Планка ниже определенного порога надежности, оранжевой линией показана доля ложных скоплений выше определенного порога надежности.

Некоторые точечные рентгеновские источники могут быть расположены на небольшом угловом расстоянии друг относительно друга, из-за чего эти источники детектируются как один протяженный рентгеновский источник. Такие протяженные источники не могут отождествляться с массивными скоплениями галактик, обладающих высокой светимостью в ИК-диапазоне. Значительное несоответствие ИК-светимости характерным для скоплений галактик схожей массы значениям может указывать на ненадежность отождествления. Поэтому значение оценки надежности этих объектов будет меньше, чем у массивных скоплений галактик.

На рис. 4 слева показана оценка показателя надежности. Оранжевые точки — ложные скопления, синие точки — скопления галактик из выборки обзора Планка, красные точки — скопления из обзора Планка, для которых $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) > 5\sigma$, где z_{phot} — предварительные оценки красных смещений скоплений галактик. Видно, что оценка надежности массивных скоплений значительно превышает оценку надежности ложных скоплений. Справа синей линией показана доля скоплений галактик из обзора Планка ниже определенного порога надежности, оранжевой линией показана доля ложных скоплений выше определенного порога надежности. Видно, что некоторые скопления галактик из выборки обзора Планка имеют низкий показатель надежности.

В основном низкий показатель надежности связан с вкладом в рентгеновский поток активных

ядер галактик или проецируемых скоплений галактик, расположенных на небольших угловых расстояниях от центров протяженных рентгеновских источников. Это, как правило, приводит к завышенной оценке масс скоплений, поэтому ИК-светимость скоплений будет иметь значения, ниже характерных значений для скоплений галактик схожей массы. В таких случаях пики ИК-светимостей в направлении на рентгеновские источники могут принимать значения, характерные для массивных скоплений галактик. Поэтому в таких случаях можно говорить о возможном вкладе других рентгеновских источников.

Другая причина заключается в отсутствии фотометрических красных смещений некоторых *cD*-галактик скоплений в каталоге Ц22. Вероятно, это связано с критериями отбора галактик из обзора *DESI LIS* в Ц22. Число скоплений галактик из обзора Планка, у которых отсутствует фотометрическое красное смещение *cD*-галактик в Ц22, насчитывает несколько штук. Большинство таких скоплений из них имеют низкую надежность. *cD*-галактики дают большой вклад в ИК-светимость скоплений и ИК-распределений в направлении на центр скоплений, поэтому отсутствие фотометрических красных смещений *cD*-галактик может уменьшить показатель надежности скоплений галактик.

Установка порогового значения надежности позволит найти подобные объекты. Если установить пороговое значение на уровне 0.8, то 5.4% скоплений галактик из выборки обзора Планка

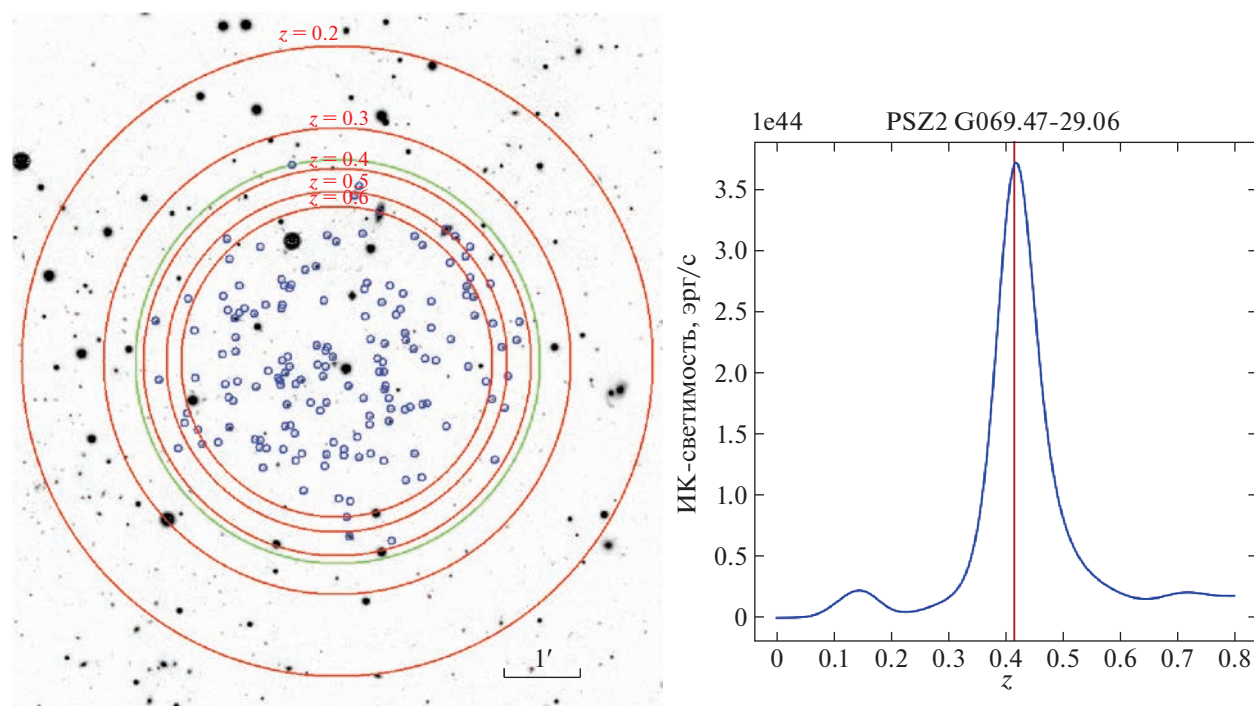


Рис. 5. Скопление галактик PSZ2 G107.67–39.78. Слева: результат отбора галактик на первом этапе для поля скопления, изображение *DESI LIS* в фильтре *r*, центр изображения соответствует центру рентгеновского источника *еРОЗИТА*. Синими окружностями показаны отобранные на первом этапе галактики. Красными окружностями обозначены круги радиусом 800 кпк на разных красных смещениях. Справа: распределение ИК-светимости в цилиндре в зависимости от красного смещения. Вертикальной линией обозначено спектроскопическое красное смещение скопления.

будут иметь показатель надежности ниже этого значения. При уменьшении порогового значения до 0.5 доля скоплений галактик из выборки обзора Планка ниже порогового значения уменьшится до 1.7%. Доля ложных скоплений выше пороговых значений 0.8 и 0.5 будет составлять 4.6 и 19.8% соответственно.

В обзоре всего неба *СРГ/еРОЗИТА* скопления галактик достаточно надежно определяются как протяженные рентгеновские источники. Например, в случае, если 10% протяженных рентгеновских источников обзора *СРГ/еРОЗИТА* являются ложными, для пороговых значений показателя надежности 0.8 и 0.5 количество ложных протяженных рентгеновских источников, неправильно отождествленных в оптическом диапазоне в качестве настоящих скоплений галактик, будет составлять 0.5 и 2% всей выборки соответственно. Видно, что, повышая порог надежности, уменьшается количество объектов, ложным образом отождествленных как скопления галактик. При этом уменьшится количество отождествленных скоплений галактик, значительную часть которых до определенного значения показателя надежности будут составлять скопления галактик с проекциями.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример работы процедуры

Пример отождествления скопления галактик по пикам ИК-светимостей показан на рис. 5. На рисунке слева изображено поле скопления галактик PSZ2 G107.67–39.78 из второго каталога Планка в фильтре *r* из обзора *DESI LIS*. Радиус ядра рентгеновского источника в данном случае составляет 31.7". Синими окружностями показаны 156 галактик, отобранных процедурой на этапе поиска и отождествления скопления галактик. Красными окружностями обозначено расстояние 800 кпк до направления на центр рентгеновского источника на разных красных смещениях. Распределение ИК-светимости от красного смещения приведено на рисунке справа, на нем виден только один пик. Предварительная оценка красного смещения $z = 0.418$.

Координаты центра рентгеновского источника: 00 01 11.3 +21 32 14. Для 13 галактик этого скопления в радиусе 4' от центра источника доступны измерения красных смещений из Слоановского обзора, выпуск 13 (Сообщество СДСС, 2016).

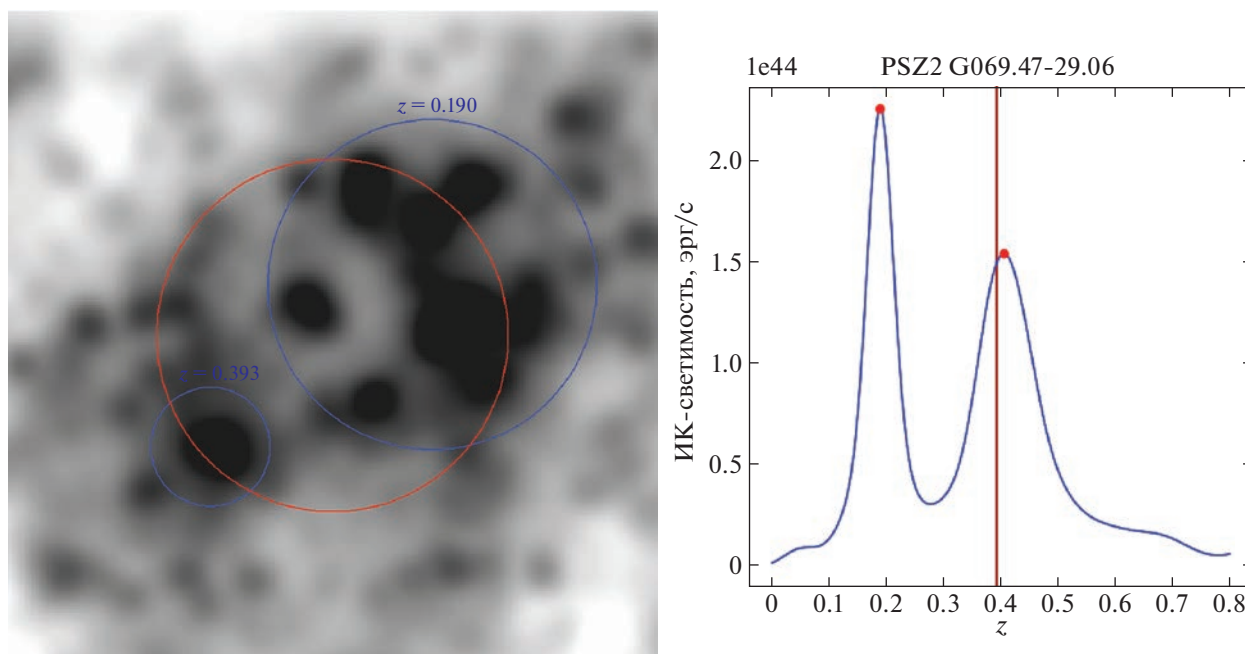


Рис. 6. Скопление PSZ2 G069.47 – 29.06. Слева: сглаженное с β -моделью радиусом $24''$ изображение *WISE* в полосе 3.4 мкм из работы Зазнобина и др. (2019). Красным кругом обозначен отождествляемый со скоплением источник *еРОЗИТА* радиусом $158''$. Справа: распределение ИК-светимости галактик в центральной области скопления.

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

Пример проекции крупномасштабных структур

Пример выше показывает работу процедуры при отсутствии в поле рентгеновского источника проекций крупномасштабных структур, таких как волокна, скопления и группы галактик. В подавляющем большинстве скоплений галактик проекции крупномасштабных структур не наблюдаются. Однако в случаях проекций групп и скоплений галактик на различных красных смещениях, расположенных на небольшом угловом расстоянии друг от друга, рентгеновское излучение может складываться в один рентгеновский источник большого углового размера, о чем говорилось ранее. 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 второго каталога Планка наблюдается проекция двух скоплений на красных смещениях $z = 0.1908$ (Зазнобин и др., 2020; Стреблянская и др., 2018) и $z = 0.3920$ (Зазнобин и др., 2019). В работе Зазнобина и др. (2019) 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 $z = 0.3920$.

Источник PSZ2 G069.47–29.06 в рентгеновском диапазоне имеет большой радиус порядка $158''$. На рис. 6 слева показано сглаженное изображение поля скопления в полосе 3.4 мкм, как на рис. 4 в работе Зазнобина и др. (2019), 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 рис. 6 справа приведено распределение ИК-светимости, где видны два пика. Красными точками показаны пики с предварительными оценками красных смещений $z = 0.189$ и $z = 0.405$. Процедура позволяет оценить красное смещение этого скопления галактик $z_{\text{phot}} = 0.1893$, что очень точно согласуется со спектроскопическими измерениями $z_{\text{spec}} = 0.1908$

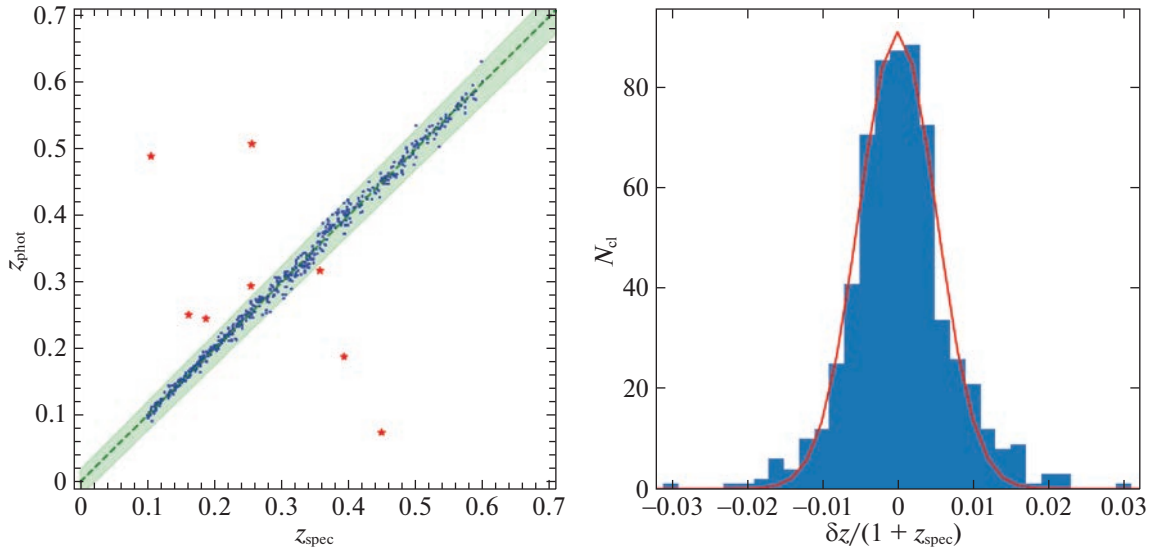


Рис. 7. Фотометрические красные смещения скоплений галактик. Слева: сравнение z_{phot} со спектроскопическими измерениями z_{spec} . Красными звездочками обозначены скопления галактик с возможными проекциями, зеленым обозначена область 4σ . Справа: гистограмма распределения числа скоплений галактик от $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$, красной линией показана аппроксимация распределения гауссианой.

одного из скоплений галактик проекции. Показатель надежности при этом равен 0.918.

Фотометрические оценки скоплений галактик

Фотометрические красные смещения для выборки из 634 скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА на $0.1 < z_{\text{spec}} < 0.6$ показаны

Таблица 2. Полученные результаты

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 $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$.

⁴ Значение центроида гауссианы.

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

на рис. 7. Слева приведено сравнение фотометрических красных смещений z_{phot} , полученных нашим алгоритмом, с их спектроскопическими измерениями z_{spec} . Зеленым цветом обозначена область, где $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) < 4\sigma$. Красными звездочками показаны восемь скоплений, у которых наблюдаются большие отклонения фотометрических красных смещений относительно спектроскопических измерений из-за наличия проекций. В полях этих скоплений галактик выделить главное скопление может быть затруднительно, поэтому возникают различия в отождествлениях.

Справа на рис. 7 приведена гистограмма распределения числа скоплений галактик от $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$, ширина столбца 0.002, красной линией показана аппроксимация распределения гауссианой. В табл. 2 приведены параметры этого распределения как для всего исследуемого диапазона красных смещений $0.1 < z_{\text{spec}} < 0.6$, так и для узких диапазонов. Приведены значения количества скоплений, смещения центроида распределения относительно $z_{\text{phot}} = z_{\text{spec}}$, 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 крас-

ных смещений примерно в 3 раза. 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.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе описана простая процедура оптического отождествления и определения фотометрических красных смещений скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА в диапазоне красных смещений $0.1 < z_{\text{spec}} < 0.6$ по данным о фотометрических красных смещениях галактик из обзора *DESI LIS* с использованием дополнительных данных принудительной фотометрии *WISE*. Достигнута точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик 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.

Измерена ИК-светимость скоплений галактик. Показано, что точность оценки массы M_{500} скоплений галактик от их ИК-светимости $\sigma_{\text{lg } M_{500}} = 0.107$ сравнима с точностью определения массы M_{500} скоплений галактик по данным их рентгеновской светимости. Получена оценка надежности оптического отождествления скоплений галактик.

Достигнутая точность определения фотометрических красных смещений скоплений галактик 0.5% является высокой по сравнению с точностью оценки красных смещений по цвету красной последовательности, например, алгоритма *redMaPPer*, точность которого на $z \approx 0.5$ составляет $(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}}) = 0.02$. В недавней работе Эрнандес-Ланг и др. (2022) достигнута точность 0.47%, полученная для выборки массивных скоплений галактик из обзора Планка с использованием данных обзора всего неба СРГ/еРОЗИТА и обзора *DES*. Достигнутая в работе Эрнандес-Ланг и др. (2022) точность фотометрических красных смещений скоплений сравнима с точностью, полученной в нашей работе.

Отметим, что характеристики фотометрических красных смещений, полученных в нашей работе, относятся к наиболее массивным скоплениям галактик. Для менее массивных надежность оптического отождествления должна быть хуже. В будущем планируется усовершенствовать процедуру для отождествления и оценки красных смещений менее массивных скоплений галактик. Для этой цели хорошо подойдет выборка скоплений галактик

обзора 400 кв. градусов космической рентгеновской обсерватории *ROSAT* (Буренин и др., 2007).

Результаты нашей работы основаны на данных фотометрических красных смещений галактик обзора *DESI LIS* из работы Цзоу и др. (2022), полученных с применением методов машинного обучения. Планируется, что в будущем наша научная группа получит фотометрические красные смещения галактик на основе фотометрических данных обзоров *Pan-STARRS1*, *DESI LIS*, *WISE*, с использованием методов машинного обучения. Предполагается, что использование большего числа больших обзоров неба в оптических и ИК-диапазонах позволит улучшить точность определения фотометрических красных смещений галактик, что, в свою очередь, позволит улучшить точность фотометрических красных смещений скоплений галактик.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-12-00210. В настоящем исследовании использованы данные наблюдений телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (*DLR*). Космический аппарат СРГ спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Рентгеновский телескоп еРОЗИТА изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка при поддержке *DLR*. Используемые в настоящей работе данные телескопа еРОЗИТА обработаны с помощью программного обеспечения *eSASS*, разработанного германским консорциумом еРОЗИТА, и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа еРОЗИТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берингер и др. (H. Böhringer, P. Schuecker, L. Guzzo, C.A. Collins, W. Voges, R.G. Cruddace, et al.), *Astron. Astrophys.* **425**, 367 (2004).
2. Брузуал, Шарло (G. Bruzual and S. Charlot), *MNRAS* **344**, 1000 (2003).
3. Буренин и др. (R.A. Burenin, A. Vikhlinin, A. Hornstrup, H. Ebeling, H. Quintana, and A. Mescheryakov), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 561 (2007).
4. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 507 (2017).

5. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 297 (2018) [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **44**, 297 (2018)].
6. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р., Гроховская А.А., Додонов С.Н. и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 461 (2021) [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **47**, 443 (2021)].
7. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **48**, 167 (2022) [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **48**, 153 (2022)].
8. Буренин Р.А. и др., Письма в Астрон. журн. **49**, 2 (2023).
9. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009).
10. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin, W.R. Forman, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1060 (2009).
11. Воробьев В.С., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Додонов С.Н., и др., Письма в Астрон. журн. **42**, 81 (2016) [V.S. Vorobyev et al., *Astron. Lett.* **42**, 63 (2016)].
12. Вэнь и др. (Z.L. Wen, J.L. Han, and F.S. Liu), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 12 (2012).
13. Дикей, Локман (J.M. Dickey and F.J. Lockman), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **28**, 215 (1990).
14. Дэй и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, et al.), *Astron. J.* **157**, id. 168 (2019).
15. Сообщество Евклида (G. Desprez, S. Paltani, J. Coupon, I. Almosallam, A. Alvarez-Ayllon, et al.), *Astron. Astrophys.* **644**, A31 (2020).
16. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев В.В. и др., Письма в Астрон. журн. **45**, 77 (2019) [I.A. Zaznobin et al., *Astron. Lett.* **45**, 49 (2019)].
17. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 79 (2020) [I.A. Zaznobin et al., *Astron. Lett.* **46**, 79 (2020)].
18. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р. и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 61 (2021) [I.A. Zaznobin et al., *Astron. Lett.* **47**, 61 (2021)].
19. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Ляпин А.Р., Хорунжев Г.А., Афанасьев В.Л. и др., Письма в Астрон. журн. **47**, 174 (2021) [I.A. Zaznobin et al., *Astron. Lett.* **47**, 174 (2021)].
20. Кляйн и др. (M. Klein, J.J. Mohr, S. Desai, H. Israel, S. Allam, et al.), *MNRAS* **474**, 3324 (2018).
21. Копылова Ф.Г., Копылов А.И., Письма в Астрон. журн. **32**, 95 (2006).
22. Лин и др. (Y.-T. Lin, J.J. Mohr, and S.A. Stanford), *Astrophys. J.* **610**, 745 (2004).
23. Маллис и др. (C.R. Mullis, B.R. McNamara, H. Quintana, A. Vikhlinin, J.P. Henry, et al.), *Astrophys. J.* **594**, 154 (2003).
24. Мещеряков А.В., Глазкова В.В., Герасимов С.В., Буренин Р.А., Хорунжев Г.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 339 (2015) [A.V. Meshcheryakov et al., *Astron. Lett.* **41**, 307 (2015)].
25. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, 18 (2021).
26. Пифаретти и др. (R. Piffaretti, M. Arnaud, G.W. Pratt, E. Pointecouteau, and J.-B. Melin), *Astron. Astrophys.* **534**, A109 (2011).
27. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, M. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, 16 (2021).
28. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
29. Рыкофф и др. (E.S. Rykoff, E. Rozo, M.T. Busha, C.E. Cunha, A. Finoguenov, et al.), *Astrophys. J.* **785**, 33 (2014).
30. Сарацин (C.L. Sarazin), *Rev. Modern Phys.* **58**, 1 (1986).
31. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: R. Ahumada, C. Allende Prieto, A. Almeida, F. Anders, S.F. Anders, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 2 (2016).
32. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: R. Ahumada, C.A. Prieto, A. Almeida, F. Anders, S.F. Anders, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
33. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014a).
34. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014b).
35. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015a).
36. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A14 (2015b).
37. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, 38 (2016).
38. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016b).
39. Стреблянская и др. (A. Streblyanska, R. Barrena, J.A. Rubiño-Martín, R.F. van der Burg, N. Aghanim, et al.), *Astron. Astrophys.* **617**, A71 (2018).
40. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.) <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141779>, *Astron. Astrophys. Special issue "The Early Data Release of eROSITA and Mikhail Pavlinsky ART-XC on the SRG mission"*, (2021).
41. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Буренин Р.А., Глушков М.В., Мельников С.С., Ляпин А.Р., Письма в Астрон. журн. **46**, 3 (2020) [I.M. Khamitov et al., *Astron. Lett.* **46**, 1 (2020)].

42. Хилтон и др. (M. Hilton, M. Hasselfield, C. Sifón, N. Battaglia, S. Aiola, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 20 (2018).
43. Хилтон и др. (M. Hilton, C. Sifón, S. Naess, M. Madhavacheril, M. Oguri, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 3 (2021).
44. Цзоу и др. (Zou Hu, Gao Jinghua, Zhou Xu, and Kong Xu), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **242**, 8 (2019).
45. Цзоу и др. (Zou Hu, Sui Jipeng, Xue Suijian, Zhou Xu, Ma Jun, et al.), *arXiv:2203.17035*, (2022).
46. Чэмберс др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, et al.), *arXiv:1612.05560*, (2016).
47. Шмидт и др. (S.J. Schmidt, A.I. Malz, J.Y.H. Soo, I.A. Almosallam, M. Brescia, et al.), *MNRAS* **499**, 1587 (2020).
48. Эбелинг и др. (H. Ebeling, A.C. Edge, and J.P. Henry), *Astrophys. J.* **533**, 668 (2019).
49. Эйбл и др. (G.O. Abell, H.G.Jr. Corwin, and R.P. Olowin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **70**, 1 (1989).
50. Эрнандес-Ланг и др. (D. Hernández-Lang, J.J. Mohr, M. Klein, S. Grandis, J.-B. Melin, et al.), *arXiv:2210.04666* (2022).