

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА ОБСЕРВАТОРИИ им. ПЛАНКА И НАБЛЮДЕНИЕ ЭТИХ СКОПЛЕНИЙ В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

© 2021 г. И. А. Зазнобин^{1*}, Р. А. Буренин¹, И. Ф. Бикмаев^{2,3},
И. М. Хамитов^{2,4}, Г. А. Хорунжев¹, А. Р. Ляпин¹, М. В. Еселевич⁵,
Н. С. Лыскова¹, П. С. Медведев¹, М. Р. Гильфанов^{1,6}, Р. А. Сюняев^{1,6}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

⁴Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

⁵Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁶Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 26.11.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик, обнаруженных ранее по данным обзора всего неба обсерватории им. Планка, а также по данным Слоановского обзора и обзора всего неба обсерватории WISE. Измерения красных смещений получены для 23 скоплений, в том числе для четырех скоплений галактик из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Основные спектроскопические наблюдения проводились в течение 2019 г. — начале 2020 г. на 1.6-м телескопе АЗТ-3ЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН и 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150). Некоторые данные были получены ранее на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Из 23 скоплений данной выборки 14 объектов расположены на половине неба, где права на данные обзора неба телескопа еРОЗИТА на борту орбитальной рентгеновской обсерватории СРГ принадлежат российской стороне. Все эти скопления были обнаружены при помощи телескопа еРОЗИТА в ходе обзора неба в течение 2020 г. 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 220 скоплений галактик. Многие из них уже обнаружены в обзоре СРГ/еРОЗИТА, значительная часть этих объектов входит в число наиболее массивных скоплений галактик обзора неба телескопа еРОЗИТА и, скорее всего, войдет в космологические выборки скоплений этого обзора.

Ключевые слова: скопления галактик, обзоры неба, оптические наблюдения, красные смещения.

DOI: 10.31857/S0320010821020066

ВВЕДЕНИЕ

Изучение скоплений галактик позволяет получать новые фундаментальные знания о строении Вселенной на больших масштабах, устанавливать новые ограничения на параметры космологической модели, такие как средняя плотность вещества во Вселенной, амплитуда возмущений плотности, параметры уравнения состояния темной материи и темной энергии (см., например, Вихлинин и др., 2009а; Сообщество Планка, 2014а, 2016а). Для

решения таких задач требуются большие выборки массивных скоплений галактик. Составление таких выборок скоплений является одной из основных задач рентгеновского обзора всего неба космической обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ), которая была запущена в июле 2019 г. (Сюняев и др., 2021).

В июне 2020 г. был завершен первый полный обзор всего неба обсерватории СРГ. Предполагается, что до декабря 2023 г. обсерватория СРГ совершит еще семь полных обзоров всего неба. Ожидается, что в результате восьми полных обзоров всего неба при помощи телескопа еРОЗИТА

*Электронный адрес: zaznobin@iki.rssi.ru

на борту обсерватории СРГ будет обнаружено порядка 100 000 скоплений галактик, в том числе все скопления галактик с массой выше $\sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ в наблюдаемой части Вселенной (Мерлони и др., 2012; Чуразов и др., 2015; Предель и др., 2020; Сюняев и др., 2021). Для того чтобы на основе этих данных составить космологические выборки массивных скоплений галактик, потребуется провести большой объем дополнительных оптических наблюдений. В частности, для большого числа массивных скоплений галактик потребуется получить спектроскопические измерения красных смещений.

Наиболее массивные скопления во Вселенной — с массами выше $\sim 6 \times 10^{14} M_{\odot}$ — были обнаружены ранее по наблюдению эффекта Сюняева–Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972) в обзоре обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014б, 2016б). Все эти скопления, скорее всего, будут также обнаружены в обзоре СРГ/еРОЗИТА и войдут в космологические выборки этого обзора. В основном, именно по этой причине наша группа принимала активное участие в работах по оптическому отождествлению скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014б, 2015а,б, 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). Отметим, что для значительного числа скоплений из обзора обсерватории им. Планка оптические отождествления были получены также другими группами (см., например, Сообщество Планка, 2016в; Стреблянская и др., 2018, 2019; Агуадо-Барахон и др., 2019; Баррена и др., 2020).

Используя дополнительные данные обзоров в оптическом и ИК-диапазонах, выборка скоплений обзора обсерватории им. Планка была расширена скоплениями меньшей массы (Б17, Буренин, 2017). Предполагалось, что большинство этих скоплений также будет обнаружено впоследствии в обзоре СРГ и также войдет в космологические выборки этого обзора. Поэтому нами была начата программа спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из этой выборки. Использование этой выборки, фактически, позволило начать программу оптической поддержки обзора СРГ в части измерения красных смещений массивных скоплений галактик еще до запуска обсерватории СРГ.

В нашей предыдущей статье (Зазнобин и др., 2020) мы представили результаты спектроскопических измерений красных смещений более чем 70 скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка, Б17. В этой статье представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений еще для 23 скоплений галактик, в том числе для четырех скоплений из второго каталога обзора обсерватории

им. Планка. Спектроскопические данные получены в 2019–2020 гг. на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории, а также на 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150). Некоторые данные были получены ранее на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Эти наблюдения позволят повысить качество космологических выборок скоплений галактик, которые будут получены по данным обзора СРГ.

Кроме того, в этой статье подводится итог нашей многолетней программы наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и приводятся предварительные результаты поиска этих скоплений в первом полугодичном обзоре телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ. Показано, что наблюдения по нашей программе позволили заранее получить значительную часть необходимых измерений красных смещений для наиболее массивных скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА.

ОТБОР ОБЪЕКТОВ

Список объектов был взят из расширения каталога обзора им. Планка, Б17 (см.: <http://hea.iki.rssi.ru/psz/>). В каталоге указаны координаты (α , δ) оптического центра скоплений галактик по данным обзора WISE, отождествленного с источником Сюняева–Зельдовича, смещение по координатам оптического центра относительно источника Сюняева–Зельдовича, а также фотометрическая оценка красных смещений скоплений галактик.

На изображениях обзора WISE скопления галактик видны как множество инфракрасных источников, локализованных в небольшой области размером несколько десятков угловых секунд. Поэтому для поиска области локализации галактик скоплений мы использовали изображения обзора WISE в фильтре W1 3.4 мкм (Райт и др., 2010; Мейснер и др., 2017), очищенные от звезд и сглаженные при помощи бета-модели радиуса $22''$. Примеры таких изображений показаны на рис. 1 вместе с псевдоцветными изображениями в оптическом диапазоне, полученными по данным Pan-STARRS1 (Чэмберс и др., 2016) и DESI LIS (Дей и др., 2019). На изображениях обзора WISE скопления галактик видны как протяженные области превышения ИК-яркости над фоном (см., например, Буренин, 2015). Поиск галактик, входящих в скопление, осуществлялся среди источников, расположенных внутри этой области.

Отбор галактик для получения их спектроскопических изображений проводился путем поиска

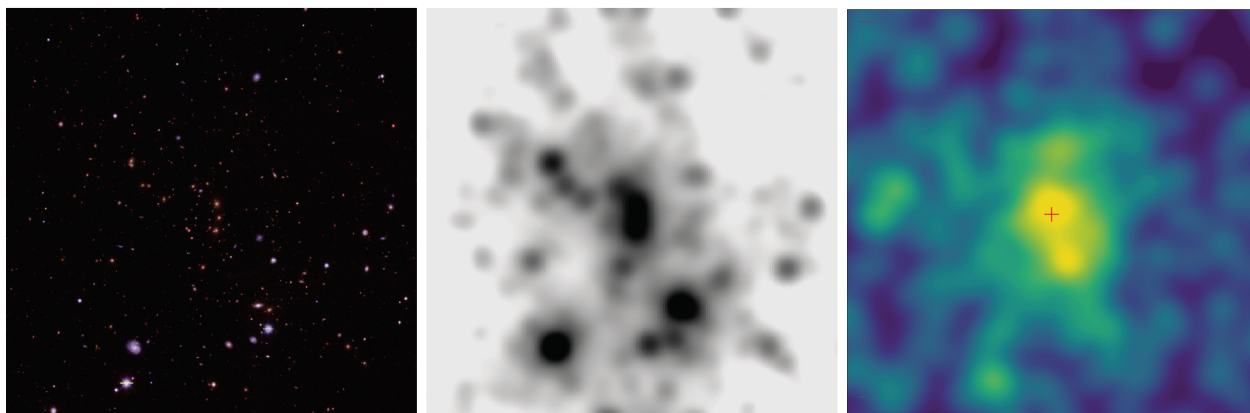
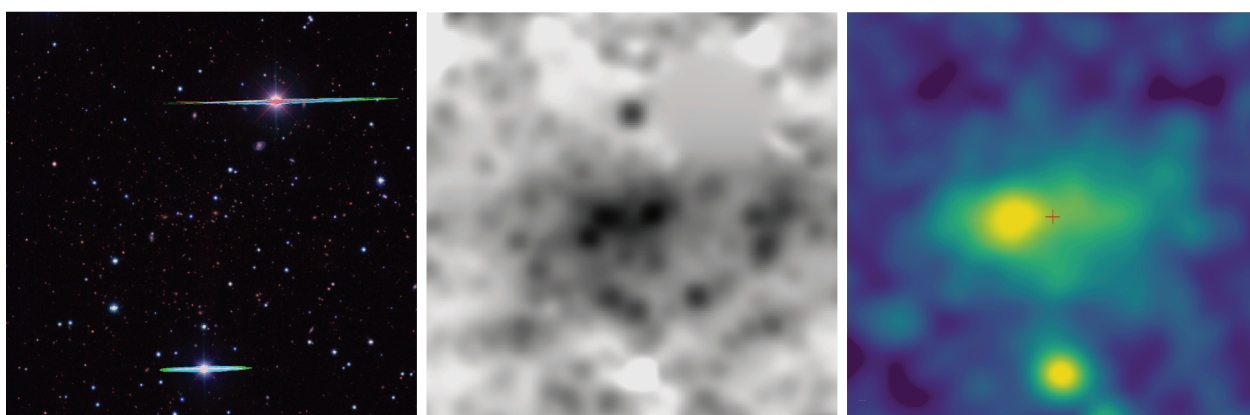
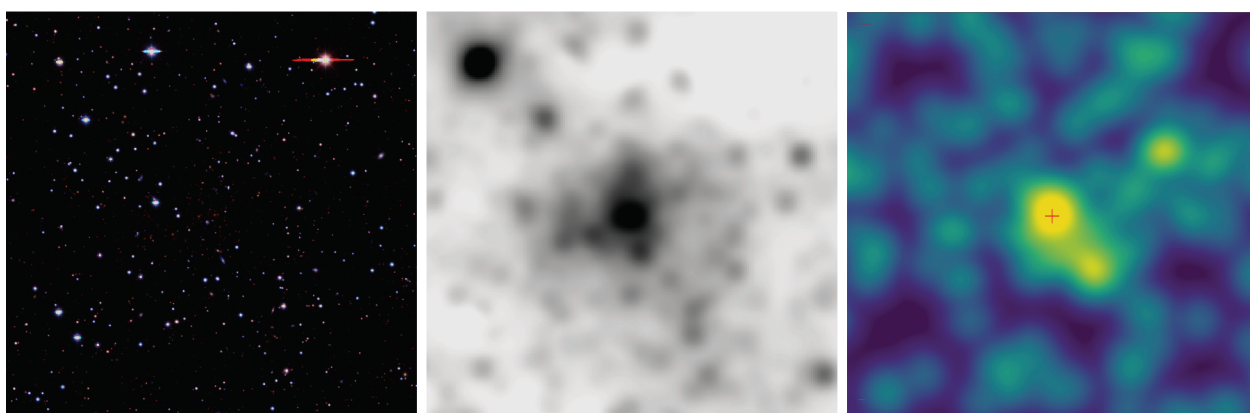
0209 – 1253, $z = 0.2594$ 1710 + 6844, $z = 0.3335$ 1801 + 3952, $z = 0.6184$ 

Рис. 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 $22''$, справа: рентгеновское изображение обзора СРГ/еРОЗИТА, сглаженное гауссианой радиусом $20''$, по состоянию на ноябрь 2020 г. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер полей изображений $10' \times 10'$.

красной последовательности галактик на диаграмме цвет—величина для объектов в поле превышения ИК-яркости. В центральной области скопления галактик обычно находится очень массивная эллиптическая галактика, так называемая сD-

галактика. Красное смещение сD-галактики с высокой точностью совпадает с красным смещением всего скопления галактик в целом, поэтому для спектроскопических наблюдений мы в первую очередь отбирали центральные сD-галактики скопле-

ний. В случае, когда однозначно определить сD-галактику невозможно, мы отбирали несколько наиболее ярких галактик на красной последовательности, которые находятся в центрах областей повышенной ИК-яркости. Ранее было показано (см., например, Зазнобин и др., 2020), что спектроскопические измерения красных смещений, полученные таким способом, являются точными, и такой отбор позволяет сэкономить большое количество наблюдательного времени.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились в 2019 г. и в начале 2020 г. на телескопе 1.6-м АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016), а также на 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150) с помощью спектрографа TFOSC¹.

Спектрограф АДАМ имеет высокую общую квантовую эффективность, что позволяет получать спектры низкого разрешения сD-галактик далеких массивных скоплений вплоть до красных смещений $z \approx 0.8$ (Буренин и др., 2018). В качестве диспергирующего элемента в его оптической схеме содержится колесо с тремя пропускающими объемными фазовыми голографическими решетками (VPHG). Решетка VPHG600G имеет спектральный диапазон 3800–7250 Å, VPHG600R — 6450–11 000 Å, обе решетки имеют 600 штрихов на миллиметр и разрешение в пределах $R = 600–1300$. Также мы использовали решетку VPHG400 (спектральный диапазон 4300–9900 Å 400 штрихов на миллиметр) чуть меньшего разрешения. Для получения спектральных изображений галактик мы использовали все три решетки. На спектрографе TFOSC использовалась решетка спектрального диапазона 3230–9120 Å с разрешением $R \approx 500$.

Наблюдения проводились по заранее подготовленной программе. Программа содержит графические изображения и координаты отобранных объектов для наведения объектов на щель, оптимальное время и количество экспозиций для каждого телескопа, величину объекта в фильтрах Слоановского обзора, фотометрическое красное смещение. Для наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК указывался размер щели спектрографа. Для получения изображений спектров мы использовали щель размером 2'', но при качестве прямых изображений хуже 2'' мы увеличивали суммарное время экспозиции и использовали щель размером 3''.

Для наблюдений на спектрографе АДАМ решетка для получения спектроскопических изображений выбиралась оптимальным образом с учетом того, чтобы на спектре присутствовали линии поглощения К, Н кальция, 4000 Å — провал, а также G-линию фраунгоферовской серии. Для этого мы использовали фотометрическую оценку красного смещения. Для получения спектроскопических изображений скоплений галактик с фотометрическим красным смещением $z < 0.55$ мы использовали решетку VPHG600G, для $z > 0.65$ мы использовали решетку VPHG600R и решетку VPHG400 при промежуточных значениях фотометрического красного смещения. При наблюдениях на телескопе АЗТ-ЗЗИК в решетке VPHG600R также использовался фильтр OS11, который убирает со спектральных изображений второй порядок интерференции.

Координаты положения центра и величина позиционного угла щели выбиралась таким образом, чтобы свет как можно большего числа галактик красной последовательности (в том числе сD-галактик) попал в щель спектрографа. Общее время экспозиции спектральных изображений для каждого объекта выбиралось из соотношения сигнал/шум $\sigma > 10$. Время экспозиции выбиралось равным 600, 900 или 1200 с. После каждой экспозиции телескоп смещался таким образом, чтобы свет от объектов изменял свое положение вдоль щели на величину 10''–15''. В случае, если наблюдаемый объект слабее 20^m, ориентация щели выбиралась таким образом, чтобы в щель спектрографа попал свет яркой звезды. Это необходимо, чтобы совместить спектральные изображения при их сложении. После окончания серии спектральных изображений одного объекта мы получали несколько изображений калибровочных ламп.

Обработка спектральных изображений проводилась с использованием программного пакета IRAF², а также собственного программного обеспечения. Из спектральных изображений вычитались изображения тока смещения усилителя. Вычитание темнового тока не производилось, так как матрицы всех используемых спектрографов обладают низкими показателями темнового тока для требуемых экспозиций. Проводилось вычитание изображения нормированного плоского поля, которое создавалось излучением ламп спектрографов. После чего для каждого объекта находилось двумерное дисперсионное решение линейного спектра галогеновых ламп спектрографа, это решение применялось к спектральным изображениям объектов. Положения спектров объектов на изображениях совмещались и комбинировались. Извлеченный спектр объекта нормировался на спектр

¹ <http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/ru/index.php?page=tfosc>

² <http://iraf.noao.edu/>

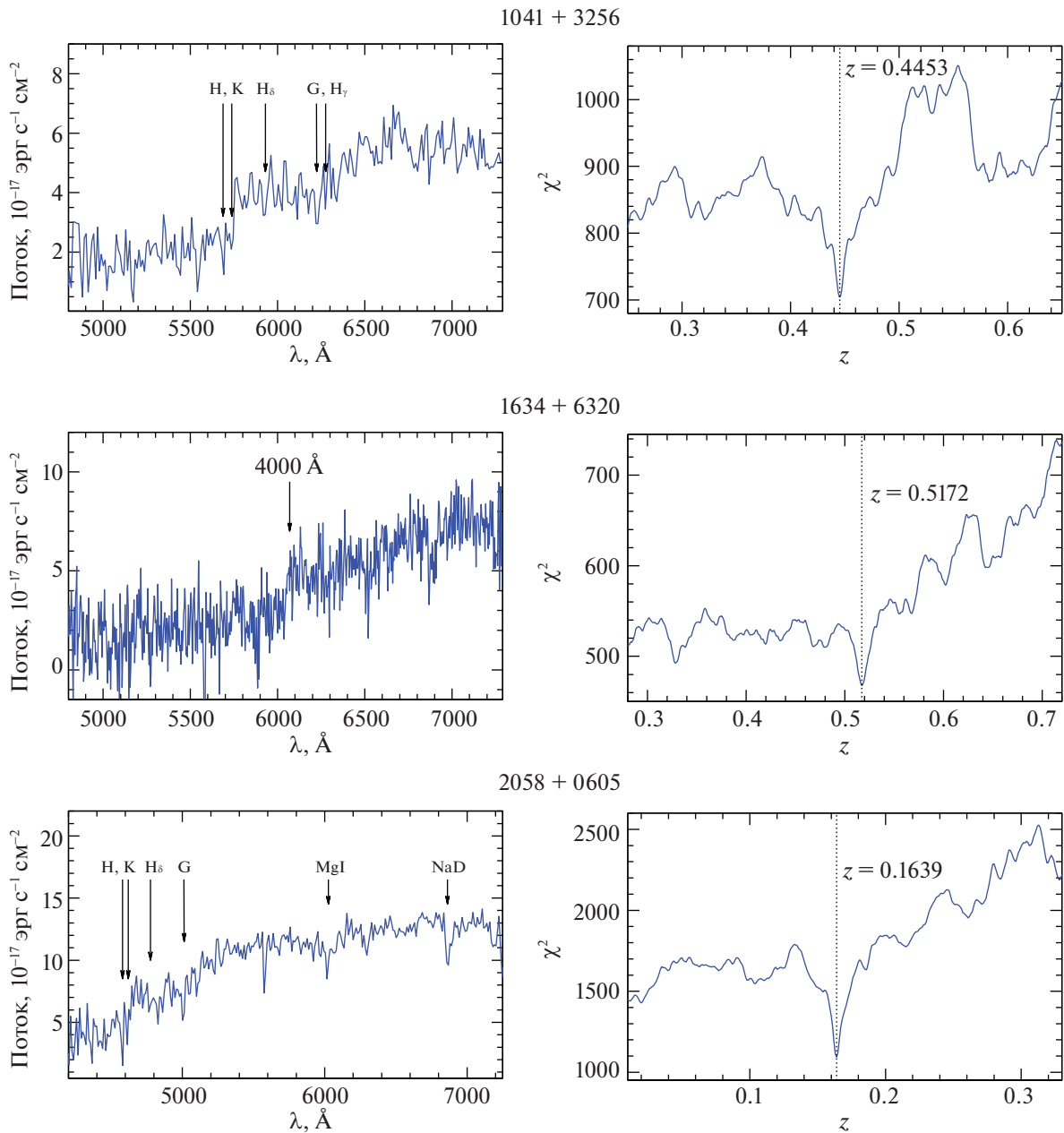


Рис. 2. Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ. Справа: значение χ^2 , полученное в результате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

спектрофотометрических стандартов из списка Европейской южной обсерватории³.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Полученные одномерные спектры мы сравнили с шаблоном спектра синтетического звездного населения возрастом 11 млрд лет и металличностью $Z = 0.02$ из работы Брузуал и Шарло (2003). На

диаграмме χ^2 распределения значение выраженного локального минимума с большой вероятностью является значением спектроскопического красного смещения галактики. Как правило, на полученном спектре с учетом красного смещения мы можем наблюдать линии фраунгоферовской серии К, Н — линии кальция, 4000 Å провал, G — линию, линии MgI, а так же D — дублет натрия. На рис. 2 приведены примеры спектров галактик скоплений, а также распределений χ^2 , которые получаются при сравнении наблюдаемого спектра с шаблоном.

³ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards.html>

Таблица 1. Скопления галактик из расширенного каталога скоплений галактик, обнаруженных по данным обзора обсерватории им. Планка

Координаты (J2000)				Примечания
α	δ	z	N_g	
02 09 35.6	−12 54 56	0.2594	2	
02 17 06.1	+29 51 23	0.3636	1	
03 33 04.7	−06 51 23	0.5691	1	SDSS
07 41 26.7	+25 58 29	0.1571	2	
07 50 15.7	−08 24 33	0.2398	1	*, PSZ2G227.30+09.00
08 00 45.0	+65 12 45	0.3894	1	*
08 14 59.8	+66 26 16	0.1459	3	Abell 0629
08 29 55.9	+06 46 30	0.3938	1	SDSS
08 40 20.6	+22 35 11	0.2169	2	ZwCl 0837.4+2245
09 14 42.9	+27 58 56	0.4384	1	
10 15 47.8	+80 10 54	0.2093	2	
10 41 49.9	+32 56 30	0.4453	1	RMJ104149.9+325631.9
12 47 37.6	+22 17 51	0.4166	1	
12 51 19.3	+19 55 09	0.3312	1	
16 00 42.3	+57 36 07	0.2958	2	
16 27 29.7	+06 22 57	0.3930	1	*
16 34 06.6	+63 20 16	0.5172	1	
17 04 44.2	+09 57 00	0.2756	1	
17 10 40.3	+68 44 43	0.3335	1	*, PSZ2G099.55+34.23
18 01 07.4	+39 52 06	0.6184	4	*, PSZ2G066.34+26.14, A19
20 58 43.5	+06 05 28	0.1641	2	
21 11 08.2	+07 35 06	0.1517	1	
22 37 21.7	+41 15 57	0.0564	3	PSZ2G097.52−14.89

Примечание. * Обсуждается в тексте; PSZ2 — объект отождествлен со скоплением галактик из второго каталога обсерватории им. Планка Сообщество Планка (2016б); Abell — объект отождествлен со скоплением галактик из работы Эйбл и др. (1989); ZwCl — объект отождествлен со скоплением галактик из серии работ Цвикки и др. (1961); RM — объект отождествлен со скоплением галактик, из работы Рыкофф и др. (2014); A19 — спектроскопическое красное смещение скопления галактик согласуется со значением спектроскопического красного смещения из работы Агуадо-Барахон и др. (2019). SDSS — значения спектроскопического красного смещения согласуются с данными Слоанского обзора (Сообщество СДСС, 2017).

Результаты измерений приведены в табл. 1. В первых двух столбцах указаны координаты (α , δ) оптических центров скоплений галактик, определенных по данным изображений WISE и Pan-STARRS1. В третьем и четвертом столбцах указаны измеренные нами спектроскопические красные смещения скоплений галактик и количество галактик, по которым было определено красное смещение. Красное смещение каждого скопления галактик мы определяли как спектроскопическое

красное смещение сD-галактики или среднее значение спектроскопических красных смещений всех галактик скопления, для которых эти значения известны.

На рис. 3 показано сравнение измеренных нами спектроскопических красных смещений скоплений галактик с фотометрическими оценками из каталога B17. Видно, что точность фотометрических оценок красных смещений из каталога B17 составляет $\delta z/(z + 1) \approx 0.03$, что хорошо согласуется с

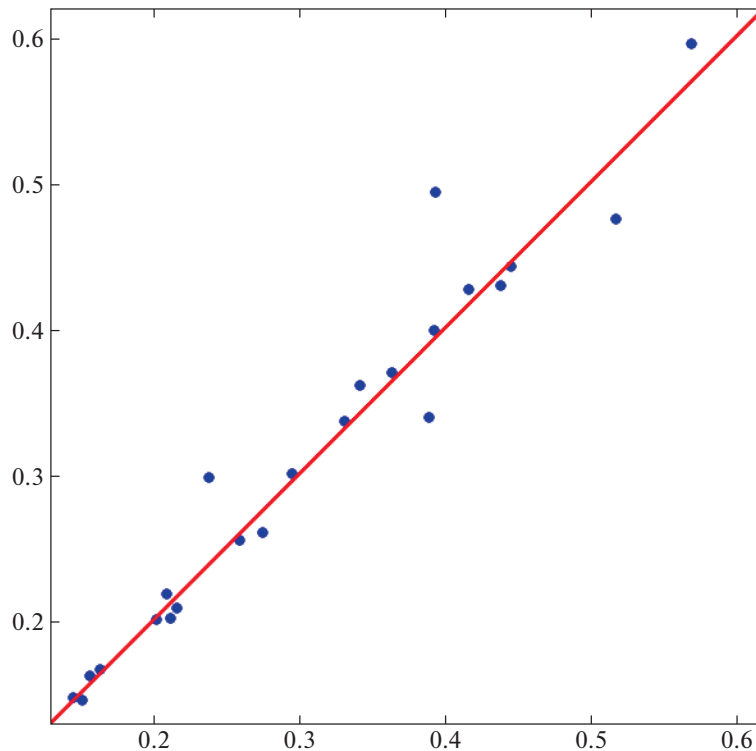


Рис. 3. Сравнение фотометрических оценок красных смещений скоплений галактик из работы Б17 (по вертикали) со спектроскопическими красными смещениями, полученными в этой работе (по горизонтали).

результатами, полученными ранее (Буренин, 2017; Зазнобин и др., 2020). Отметим, что для 20 из 23 скоплений галактик результаты спектроскопических красных смещений скоплений галактик также хорошо согласуются с фотометрическими оценками красных смещений из работы Вэнь и др. (2012).

Замечания по отдельным объектам

0750–0824. Это скопление галактик PSZ2 G227.30+09.00 из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Мы получили спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{\text{spec}} = 0.2398$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{\text{phot}} = 0.24 \pm 0.03$ из работы Агуадо-Баракон и др. (2019).

0800–6512. В предыдущей работе Зазнобина и др. (2020) мы публиковали результаты 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 мы обнаружили еще одну область превышения ИК-яркости с координатами центра 08 00 45.0 +65 12 45, отождествляемую со скоплением галактик. Эти скопления галактик находятся на угловом расстоянии около $5'$ друг относительно друга (рис. 4) и, скорее

всего, дают сравнимый вклад в сигнал Сюняева–Зельдовича, который наблюдается в обзоре обсерватории им. Планка. Отметим также наличие яркой звезды ТУС 4132-205-1, излучение которой также может исказить сигнал Сюняева–Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка.

Нами были проведены спектроскопические наблюдения сD-галактики этого скопления на телескопе АЗТ-3ЗИК 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.

1627–0622. В радиусе $6'$ от источника Сюняева–Зельдовича находятся две области повышенной яркости в ИК-диапазоне, которые мы отождествили с двумя скоплениями галактик. Для скопления галактик, которое имеет наибольшую яркость в полосе W1, мы получили спектроскопическое красное смещение наиболее яркой галактики. Полученное нами значение $z_{\text{spec}} = 0.3930$ согласуется с данными фотометрической оценки красного смещения из каталога Б17. Стоит отметить, что находящаяся на расстоянии чуть менее $4'$ яркая звезда

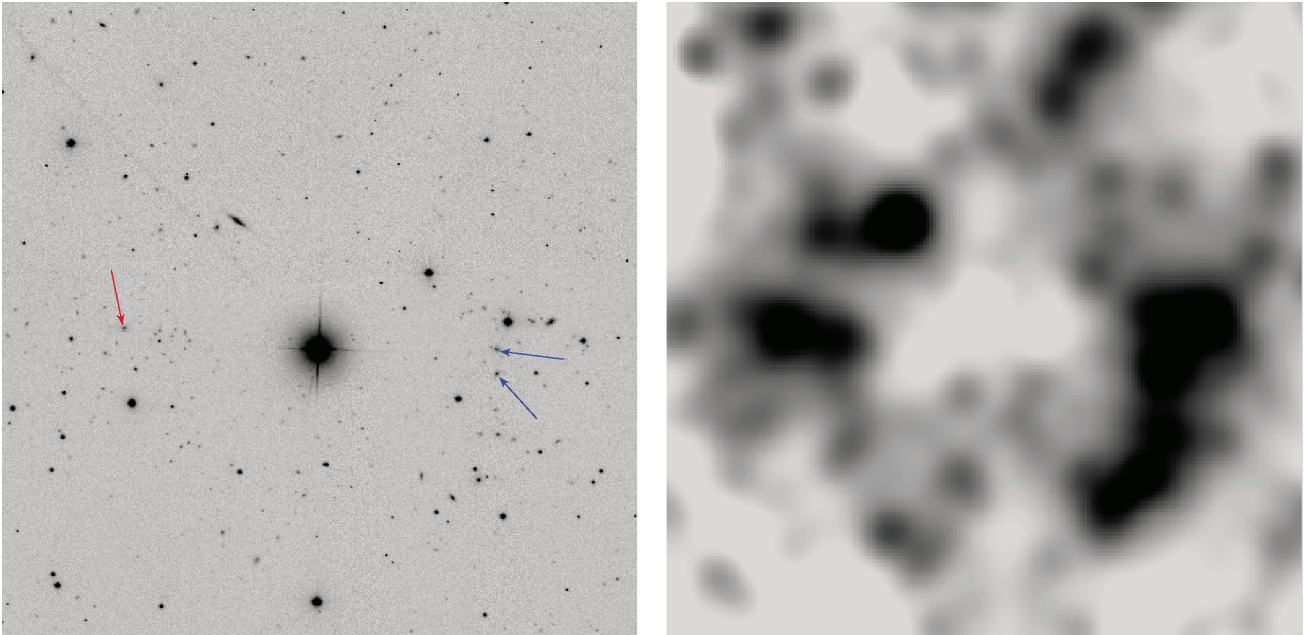


Рис. 4. Изображения поля источника Сюняева–Зельдовича с координатами 08 00 31.1 +65 13 22. Слева: изображения Слоановского обзора в фильтре i . Справа: изображения обзора WISE в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β -моделью радиусом 24". Синими стрелочками указаны галактики, для которых были измерены спектроскопические красные смещения в работе Зазнобина и др. (2020). Красной стрелочкой обозначена cD-галактика, для которой мы измерили спектроскопическое красное смещение в этой работе.

BD+06 3231 может искажать сигнал Сюняева–Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка.

1710–6844. Это скопление галактик PSZ2 G099.55 + 34.23 из второго каталога Планка. Мы получили спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{\text{spec}} = 0.3335$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{\text{phot}} = 0.31 \pm 0.03$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019).

1801–3952. Это скопление галактик PSZ2 G066.34 + 26.14 из второго каталога Планка. Для этого скопления были получены спектры четырех галактик скопления на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Спектроскопическое красное смещение этого скопления галактик было принято равным среднему значению красных смещений этих четырех галактик: $z_{\text{spec}} = 0.6184$. Эта величина согласуется со значением $z_{\text{spec}} = 0.622$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019). Более того, полученное нами красное смещение наиболее яркой галактики скопления $z_{\text{spec}} = 0.6174$ также хорошо согласуется со значением красного смещения для наиболее яркой галактики $z_{\text{spec,BCG}} = 0.6167$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019).

НАБЛЮДЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

Из 23 скоплений, отобранных для оптического отождествления, результаты которого излагаются

в настоящей статье, 14 находятся на той половине неба, за обработку которой отвечает Российский консорциум телескопа еРОЗИТА обсерватории СРГ. Все эти скопления были обнаружены при помощи телескопа еРОЗИТА в ходе обзора неба в течение 2020 г., с потоками в интервале от нескольких 10^{-14} эрг/с/см² до нескольких 10^{-13} эрг/с/см². На рис. 1 приведены примеры рентгеновских изображений, полученных телескопом еРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.2 кэВ. Подробное исследование рентгеновских свойств этих скоплений галактик выходит за рамки данной работы.

Программа оптических наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка выполнялась нашей группой, начиная с лета 2011 г. (Сообщество Планка, 2014б, 2015а,б, 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). В рамках этой программы спектроскопические измерения красных смещений были получены для 220 скоплений галактик. Исследование рентгеновских свойств этих скоплений выходит за рамки этой статьи и будет представлено в последующих работах. Однако уже сейчас можно сказать, что значительная часть этих скоплений будет обнаружена в рентгеновском обзоре СРГ/еРОЗИТА. Так, согласно предварительным результатам обработки данных первого полугодичного обзора СРГ/еРОЗИТА, на российской половине неба

в качестве протяженных рентгеновских источников было обнаружено 134 скопления из нашей программы. В дальнейшем, по мере увеличения глубины обзора СРГ/еРОЗИТА, это число должно увеличиться. Таким образом, хотя отбор скоплений галактик для нашей программы проводился по сигналу Сюняева–Зельдовича и по данным в оптическом и ИК-диапазонах, результаты наших наблюдений будут полезны в будущем и при работе с данными обзора СРГ/еРОЗИТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье представлены спектроскопические измерения красных смещений для списка из 23 массивных скоплений галактик, отобранных из расширенного каталога обзора всего неба обсерватории им. Планка, которые были получены в течение конца 2019 г.–начала 2020 г. на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, а также на 1.5-м телескопе РТТ-150. Кроме того, представлены спектроскопические измерения красных смещений четырех скоплений из второго каталога обсерватории им. Планка, измеренные нами ранее.

Программа оптических наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка выполнялась нашей группой в течение последних нескольких лет (Сообщество Планка, 2014б, 2015а,б, 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). За это время были получены оптические отождествления и спектроскопические измерения красных смещений для 220 скоплений галактик. Из них 140 скоплений входят также во второй каталог источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка, при этом 96 скоплений были отобраны из расширения каталога скоплений галактик обзора обсерватории им. Планка, Б17. Для сравнения отметим, что во втором каталоге обсерватории им. Планка имеется 1653 источника Сюняева–Зельдовича, из которых 1203 были подтверждены как скопления галактик на момент публикации каталога. Таким образом, в рамках нашей программы была проведена примерно четверть всех необходимых дополнительных оптических наблюдений объектов из этого каталога. При этом для около 10% скоплений галактик из этого каталога спектроскопические измерения красных смещений были получены нашей группой.

Большинство скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка, наблюдения которых проводились в рамках нашей программы, будут обнаружены в обзоре всего неба телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ и, скорее всего, войдут в космологические выборки скоплений этого обзора. Предварительные результаты

обработки данных обзора СРГ/еРОЗИТА показывают, что большое число скоплений из нашей программы уже обнаружено в качестве протяженных рентгеновских источников в этом обзоре. В дальнейшем, по мере увеличения глубины обзора СРГ/еРОЗИТА, это число должно еще увеличиться. Таким образом, хотя отбор скоплений галактик для нашей программы проводился по данным обзора обсерватории им. Планка, наши наблюдения позволили заранее получить спектроскопические измерения красных смещений для значительного числа наиболее массивных скоплений галактик обзора СРГ/еРОЗИТА.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-12-00520. Авторы благодарят ТЮБИТАК, ИКИ РАН, КФУ и АН РТ за поддержку наблюдений на российско-турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150). Измерения на телескопе АЗТ-33ИК выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара”⁴. В этом исследовании использованы данные наблюдений телескопа еРозита на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/еРозита изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (МРЕ) при поддержке 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, Усурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. 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. Агуадо-Барохон и др. (A. Aguado-Barahona, R. Barrena, A. Streblyanska, A. Ferragamo, J.A. Rubino-Martin, D. Tramonte, and H. Lietzen), *Astron. Astrophys.* **631**, A148 (2019); arXiv:1909.06235.

⁴ <http://ckp-ri.ru/ckp/3056/>

2. Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., Астрофиз. бюлл. **71**, 514 (2016). [V.L. Afanasiev, et al., *Astrophys. Bull.* **71**, 479 (2016)].
3. Баррена и др. (R. Barrena, A. Ferragamo, J.A. Rubiño-Martín, A. Streblyanska, A. Aguado-Barahona, et al.), *Astron. Astrophys.* **638**, A146 (2020).
4. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 167 (2015). [R.A. Burenin, *Astron. Letters* **41**, 167 (2015)].
5. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С. и др., Письма в Астрон. журн. **42**, 333 (2016). [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **42**, 295 (2016)].
6. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017). [R.A. Burenin, *Astron. Letters* **43**, 507 (2017)].
7. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 297 (2018). [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **44**, 297 (2018)].
8. Брузуал, Шарло, (G. Bruzual and S. Charlot), *MNRAS* **344**, 1000 (2003).
9. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, A.V. Kravtsov, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009a).
10. Воробьев В.С., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Додонов С.Н., Жучков Р.Я. и др., Письма в Астрон. журн. **42**, 81 (2016). [V.S. Vorobyev et al., *Astron. Lett.* **42**, 63 (2016)].
11. Вэнь и др. (Z.L. Wen, J.L. Han, and F.S. Liu), *Astroophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 2(34) (2012).
12. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
13. 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)].
14. 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)].
15. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), arXiv:1209.3114 (2012).
16. Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, and D.J. Schlegel), *Astron. J.* **154**, 161 (2017).
17. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.*, in press, arXiv:2010.03477 (2020).
18. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, D. Padgett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
19. Рыкофф и др. (E.S. Rykoff, E. Rozo, M.T. Busha, C.E. Cunha, A. Finoguenov, A. Evrard, et al.), *Astrophys. J.* **758**, 2 (2014).
20. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014a).
21. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014b).
22. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015a).
23. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A14 (2015b).
24. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016a).
25. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016b).
26. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **586**, A139 (2016в).
27. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), *Astroophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 25 (2017).
28. Стреблянская и др. (A. Streblyanska, R. Barrena, J.A. Rubiño-Martín, R.F. van der Burg, N. Aghanim, A. Aguado-Barahona, et al.), *Astron. Astrophys.* **617**, A71 (2018).
29. Стреблянская и др. (A. Streblyanska, A. Aguado-Barahona, A. Ferragamo, R. Barrena, J.A. Rubiño-Martín, et al.), *Astron. Astrophys.* **628**, A13 (2019).
30. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.V. Zeldovich), *Comm. Astrophys. Space Phys.* **4**, 173 (1972).
31. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, et al.), *Astron. Astrophys.*, готовится к печати (2021).
32. 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)].
33. Цвикки и др. (F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, M. Karowicz, C.T. Kowal), *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies*, V. I (California Inst. Technol., Pasadena, 1961).
34. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *MNRAS* **450**, 1984 (2015).
35. Чэмберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arxiv.org:1612.05560
36. Эйбл и др. (G.O. Abell, H.G.Jr. Corwin, and R.P. Olowin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **70**, 1 (1989).