

НАБЛЮДЕНИЯ МАССИВНЫХ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА ВСЕГО НЕБА ТЕЛЕСКОПА еРОЗИТА НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

© 2023 г. Р. А. Буренин^{1*}, И. А. Зазнобин¹, П. С. Медведев¹, М. Р. Гильфанов^{1,2}, С. С. Котов³, Р. И. Уклеин³, С. Н. Додонов³, А. В. Моисеев^{1,3}, М. В. Еселевич⁴, И. Ф. Бикмаев^{5,6}, Н. С. Лыскова¹, А. В. Мещеряков^{1,7}, К. А. Постнов⁸, С. Ю. Сазонов¹, А. А. Старобинский⁹, Р. А. Сюняев^{1,2}, Е. М. Чуразов^{1,2}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁵Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁶Академия наук Татарстана, Казань, Россия

⁷Факультет вычислительной математики и кибернетики, МГУ, Москва, Россия

⁸Государственный астрономический институт им. Штернберга, МГУ, Москва, Россия

⁹Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 11.12.2022 г.

После доработки 27.12.2022 г.; принята к публикации 00.01.2023 г.

Представлены результаты поиска массивных скоплений среди протяженных рентгеновских источников из обзора СРГ/еРОЗИТА с использованием данных обзора обсерватории им. Планка, а также данных обзоров неба в оптическом и ИК-диапазонах. Оптические наблюдения этих скоплений проводятся на 6-м телескопе САО РАН (БТА), 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, 1.6-м телескопе Саянской обсерватории (АЗТ-ЗЗИК), а также на 1.5-м Российско-Турецком телескопе (РТТ-150). Приводятся данные по оптическому отождествлению и спектроскопическим измерениям красных смещений 11 массивных скоплений галактик с массами выше $M_{500} \approx 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, расположенных на красных смещениях $z \approx 0.3-1$. Такие скопления являются очень редкими объектами, большинство скоплений такой большой массы в наблюдаемой Вселенной уже было обнаружено ранее по эффекту Сюняева–Зельдовича в обзоре всего неба обсерватории им. Планка. Из-за своей аномальности они могут быть чувствительными индикаторами возможных отклонений космологии от стандартной Λ CDM модели с квазиплоским спектром начальных гауссовых возмущений.

Ключевые слова: скопления галактик, обзоры неба.

DOI: 10.31857/S0320010823010011, **EDN:** PJXNLU

ВВЕДЕНИЕ

Обзор всего неба телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ, Сюняев и др., 2021; Предель и др., 2021) был начат в декабре 2019 г. Предполагается, что глубины обзора будут достаточно, чтобы обнаружить все скопления галактик с массами выше $M_{500} \approx 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ в наблюдаемой части Вселенной (см.,

например, Чуразов и др., 2015). Выборка скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА будет уникальной и станет основной для большого числа различных космологических исследований.

В настоящее время обсерватория СРГ выполнила четыре полных обзора всего неба. Чувствительности обзора всего неба уже сейчас достаточно для того, чтобы обнаружить значительную часть массивных скоплений в наблюдаемой части Вселенной. В этой статье представлены резуль-

*Электронный адрес: rodion@hea.iki.rssi.ru

таты поиска массивных скоплений галактик среди протяженных рентгеновских источников из обзора СРГ/еРОЗИТА с использованием данных обзора обсерватории им. Планка, а также данных обзоров неба в оптическом и ИК-диапазонах. Приводятся данные по оптическому отождествлению и новым спектроскопическим измерениям красных смещений для 11 наиболее массивных скоплений галактик, обнаруженных в обзоре СРГ/еРОЗИТА.

Для расчета светимостей ниже используется космологическая модель плоской Вселенной с $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ и $H_0 = 70$ км/с/Мпк.

ПРОТЯЖЕННЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

Данные обзора всего неба телескопа еРОЗИТА были обработаны с помощью ПО eSASS¹ с использованием предполетных калибровочных данных. Благодаря хорошему угловому разрешению телескопа еРОЗИТА в обзоре всего неба (Сюняев и др., 2021; Предел и др., 2021), подавляющее большинство скоплений галактик, расположенных на любых красных смещениях, при достаточно высоком отношении сигнал—шум наблюдаются в качестве протяженных рентгеновских источников.

Поиск протяженных рентгеновских источников в обзоре всего неба СРГ/еРОЗИТА проводился с помощью вейвлет-разложения рентгеновских изображений (Вихлинин и др., 1998) и далее расчет значимости обнаружения и протяженности, а также измерение потока и размера источников проводился методом максимального правдоподобия с помощью ПО ermldet из пакета eSASS, в который были внесены некоторые изменения, направленные на улучшение эффективности поиска протяженных рентгеновских источников.

По результатам трех полных обзоров всего неба на российской половине неба обзора СРГ/еРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.2 кэВ было обнаружено около 20 000 протяженных рентгеновских источников, подавляющее большинство которых являются скоплениями галактик. В настоящее время продолжаются дальнейшая разработка процедур поиска протяженных рентгеновских источников и их статистическая калибровка с помощью моделирования методом Монте-Карло. Более подробно результаты поиска протяженных рентгеновских источников в обзоре СРГ/еРОЗИТА будут обсуждаться в последующих статьях.

Порог обнаружения скоплений галактик по потоку в областях неба с наименьшей экспозицией составляет величину, примерно, 10^{-13} эрг с⁻¹ см⁻².

ОТБОР МАССИВНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

Источники сигнала Сюняева—Зельдовича низкой значимости

Для отбора наиболее массивных скоплений галактик среди протяженных рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА список этих источников, в первую очередь, был сопоставлен со списком источников сигнала СЗ низкой значимости из обзора Планка. Этот список был составлен по картам параметра комптонизации обзора всего неба обсерватории им. Планка, он содержит около 7000 источников СЗ на российской половине неба обзора СРГ/еРОЗИТА (см. подробности в работах Буренин, 2017; Мещеряков и др., 2022). Сравнение этого списка с каталогом скоплений обзора 400d (Буренин и др., 2007) показывает, что более половины из них являются ложными, однако, подавляющее большинство скоплений с массами выше $\approx 5 \times 10^{14} M_\odot$ должны содержаться в этом списке.

Пересечение этого списка со списком протяженных рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА на российской половине неба с радиусом корреляции 5', который соответствует угловому разрешению на картах обзора Планка, содержит 2317 источников. Предполагая равномерное распределение источников по небу, можно оценить, что только около 120 объектов могут быть случайными совпадениями, поэтому подавляющее большинство из них является массивными скоплениями галактик.

Оптическое отождествление протяженных рентгеновских источников

В первую очередь, координаты протяженных рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА сравнивались с координатами скоплений галактик из каталогов больших обзоров, полученных по данным наблюдений в оптическом, рентгеновском и микроволновом диапазонах (Эйбл и др., 1989; Вихлинин и др., 1998; Буренин и др., 2007; Пиффаретти и др., 2011; Сообщество Планка, 2016а; Буренин, 2017; Блим и др., 2020; Хилтон и др., 2021). Многие скопления обзора обсерватории им. Планка были отождествлены в оптическом диапазоне и для них были получены спектроскопические измерения красных смещений в работах нашей группы (Сообщество Планка, 2016а; Буренин и др., 2018;

¹<https://erosita.mpe.mpg.de/edr/DataAnalysis/>

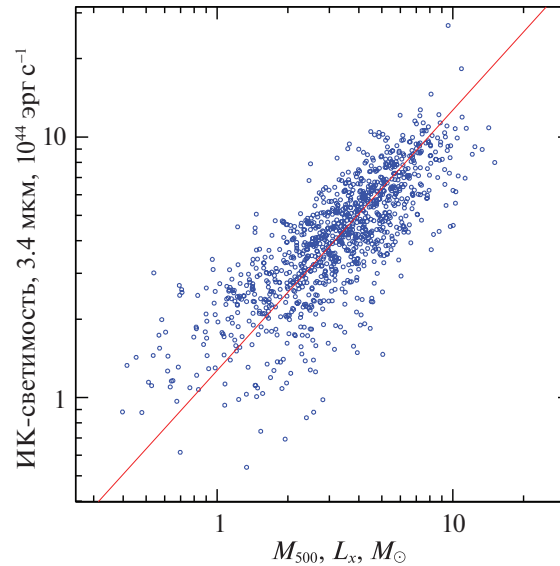


Рис. 1. Соотношение между массой скоплений, оцененной по их рентгеновской светимости, и светимостью в ИК-диапазоне, в полосе 3.4 мкм обзора WISE.

Зазнобин и др., 2019, 2020, 2021a), эти измерения также были использованы нами. Кроме того, поля всех протяженных рентгеновских источников проверялись по Внегалактической базе данных НАСА² на предмет наличия известных ранее скоплений галактик. Оптические отождествления скоплений галактик в различные каталогах скоплений сравнивались между собой, а также с различными спектроскопическими измерениями, доступными из литературы, и измерениями, которые могут быть получены на основе спектроскопических данных Слоановского обзора (Ахумада и др., 2020).

Отождествление протяженных рентгеновских источников по данным в оптическом и ИК-диапазонах проводилось с помощью автоматической процедуры поиска красной последовательности. Для этого использовались данные обзора Pan-STARRS1 (Чамберс и др., 2018) и по данным принудительной фотометрии объектов обзора Pan-STARRS1 в обзоре всего неба обсерватории WISE (Райт и др., 2010a). Для поиска красной последовательности были задействованы цвета $(g - r)$, $(r - i)$, $(i - z)$, $(z - y)$, $(i - w1)$, $(z - w1)$ и $(w1 - w2)$. Использовались результаты принудительной фотометрии по данным обзора WISE для всех объектов обзора Pan-STARRS1 (Буренин, 2022).

Надежность оптического отождествления оценивалась по соответствию ИК-светимости галактик красной последовательности оценке массы,

полученной из рентгеновской светимости скопления (Вихлинин и др., 2009), по соответствию распределения галактик красной последовательности в картинной плоскости β -модели с центром в рентгеновском центре скопления, а также по соответствию величины ярчайшей галактики красной последовательности (в фильтре i), характерному значению для ярчайших галактик скоплений на заданном красном смещении. Если величина ярчайшей галактики красной последовательности или ИК-светимость отличались более чем на три стандартных отклонения от ожидаемого значения, то такое отождествление считалось неверным и отбрасывалось.

ИК-светимость скопления, рассчитанная по этим данным как сумма светимостей галактик красной последовательности в полосе $W1$, расположенных в проекции на небо внутри радиуса R_{500} , хорошо коррелирует с массой скопления, оцененной по рентгеновской светимости скопления. Это показано на рис. 1, где представлено соотношение этих величин для 1063 скоплений из нашей выборки, которые расположены на $z > 0.1$ и были надежно отождествлены ранее в различных обзорах или по наблюдению красной последовательности, и для которых имеются спектроскопические измерения красных смещений (при этом рентгеновская светимость определялась по фотометрической оценке z). Оценки полной массы скопления были получены с помощью соотношения рентгеновская светимость—масса из работы Вихлинина и др. (2009). Разброс разности оценки массы по рентгеновской и ИК-светимостям

²<https://ned.ipac.caltech.edu/>

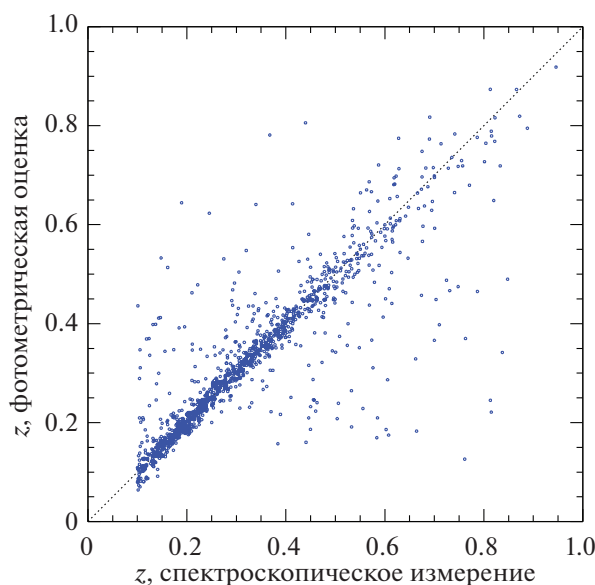


Рис. 2. Соотношение между спектроскопическим измерением красного смещения скопления и его фотометрической оценкой, полученной по цветам красной последовательности.

составляет величину около 36%, для скоплений более высокой массы этот разброс уменьшается.

Отметим, что разброс оценки массы скопления по его рентгеновской светимости около настоящей массы, измеренной значительно более точным способом, составляет около 27% (Вихлинин и др., 2009). Поэтому, если оценки массы по рентгеновской и ИК-светимостям являются независимыми, то оценка масс скопления по их ИК-светимости должна иметь примерно такую же точность, как и оценки масс по светимости в рентгеновском диапазоне. Измерение ИК-светимости скопления дает довольно точную оценку его массы, по причине того, что измерение светимости галактик в ближнем ИК-диапазоне позволяет оценить звездную массу в них, а звездная масса галактик скопления, в свою очередь, хорошо коррелирует с их полной массой (Кравцов и др., 2018).

Соотношение между спектроскопическим измерением красного смещения скопления и его фотометрической оценкой, полученной по цветам красной последовательности, показано на рис. 2. Точность фотометрической оценки красного смещения скопления, полученной по цветам красной последовательности, составляет $\delta z / (1 + z) = 1.34\%$ в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 0.5$, при этом для около 10.9% скоплений красное смещение автоматически определяется неправильно: $\delta z / (1 + z) > 5\sigma$. На красных смещениях $z < 0.1$ алгоритм в его текущей версии работает плохо, но все массивные скопления галактик на таких красных смещениях являются известными.

Эти оценки качества работы автоматической процедуры оптического отождествления скоплений были выполнены, используя подвыборку из 912 массивных скоплений из нашего списка, расположенных на $0.1 < z < 0.5$, спектроскопические измерения красных смещений которых были взяты из разных каталогов скоплений галактик, а также из Внегалактической базы данных НАСА, как это обсуждалось выше. При этом выяснилось, что в опубликованных каталогах имеется некоторое заметное число ошибочных измерений красных смещений. Так, например, в каталоге PSZ2 было обнаружено 45 случаев, когда вместо спектроскопического измерения красного смещения в каталоге приводится его фотометрическая оценка. Также в каталоге PSZ2 было обнаружено 11 неправильных отождествлений скоплений. Кроме того, было обнаружено 5 неправильных измерений красных смещений скоплений в сборном каталоге MCXC (Пиффаретти и др., 2011), источником всех этих измерений является каталог обзора REFLEX (Борингер и др., 2004). Подробнее эта подвыборка скоплений галактик будет обсуждаться в статье Зазнобина и др. (готовится к печати).

Точность фотометрической оценки оказывается несколько ниже по сравнению с точностью аналогичного алгоритма из работы Кляйна и др. (2018), что, скорее всего, в основном объясняется тем, что в этой работе используются фотометрические данные лучшего качества (обзор DESI LIS). С другой стороны, данные обзора Pan-STARRS1, использованные нами, равномерно по-

Таблица 1. Измерения красных смещений массивных скоплений из обзора СРГ/еРОЗИТА

Название	Координаты (J2000)		z	N_{gal}	L_X , $10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$	M_{500, L_X} , $10^{14} M_{\odot}$	Каталог
	α	δ					
SRGe CL0157.8+3812	01 57 47.8	+38 12 10	0.6827	4	4.98 ± 0.43	6.21 ± 1.81	WHL
SRGe CL0206.5+3632	02 06 29.8	+36 32 29	0.5164	3	4.10 ± 0.29	6.16 ± 1.77	
SRGe CL0238.3+2005	02 38 20.8	+20 05 56	0.4205	2	6.63 ± 0.28	8.87 ± 2.50	
SRGe CL0241.0+2557	02 41 02.2	+25 57 16	0.5732	4	6.09 ± 0.39	7.58 ± 2.17	
SRGe CL0349.0+2133	03 49 00.1	+21 33 02	0.3478	3	3.69 ± 0.21	6.46 ± 1.84	
SRGe CL0413.4+8302	04 13 22.5	+83 02 21	0.5909	1	5.45 ± 0.38	6.99 ± 2.01	WHL
SRGe CL1745.6+5000	17 45 38.1	+50 00 41	0.6285	3	4.70 ± 0.23	6.21 ± 1.76	WHL, B17
SRGe CL1830.6+5653	18 30 34.3	+56 53 39	0.7867	2	6.43 ± 0.34	6.77 ± 1.92	
SRGe CL1841.4+5350	18 41 21.6	+53 50 27	0.9460	2	8.00 ± 0.57	6.96 ± 2.00	
SRGe CL2105.1–0326	21 05 06.6	–03 26 06	0.8374	1	5.65 ± 1.03	6.03 ± 2.01	
SRGe CL2137.2–2232	21 37 14.3	–22 32 16	0.6137	2	5.99 ± 0.57	7.29 ± 2.15	

Примечание. WHL — каталог скоплений, обнаруженных по данным Слоановского обзора (Вен и др., 2012), B17 — расширенный каталог скоплений из обзора обсерватории им. Планка (Буренин, 2017).

крывают большую часть неба ($\delta > -30 \text{ deg}$), в том числе, почти всю половину неба обзора еРОЗИТА с галактическими координатами $l < 180^\circ$, где за обработку данных отвечает российская сторона (Сюняев и др., 2021).

По данным обзора DESI LIS о фотометрических оценках красных смещений галактик были также получены фотометрические оценки красных смещений скоплений, как это будет обсуждаться в работе Зазнобина и др. (готовится к печати). Оказалось, что эти оценки хорошо согласуются с фотометрическими оценками z по цвету красной последовательности, которые обсуждались выше, но имеют заметно более высокую точность.

Поля всех скоплений проверялись визуально, при этом помимо данных обзоров WISE и Pan-STARRS1 также использовались данные Слоановского обзора (Ахумада и др., 2020) и обзора DESI LIS (Дей и др., 2019). По этим данным отождествление скоплений проводилось по превыше-

нию поверхностной плотности галактик с близкими значениями цвета в поле протяженного рентгеновского источника, т.е. таким же образом, как это делалось нами ранее для обзора 400d (Буренин и др., 2007) и обзора Планка (Сообщество Планка, 2014, 2015, 2016a).

Оказывается, что из 2317 протяженных рентгеновских источников на галактических широтах $|b| > 20 \text{ deg}$, которые совпадают с источниками сигнала Сюняева–Зельдовича низкой значимости из обзора Планка, оптических отождествлений не имеют 106 объектов. Это хорошо согласуется с ожидаемым числом ложных совпадений (см. выше). Согласно данным из других каталогов скоплений галактик, Внегалактической базе данных НАСА, а также данным Слоановского обзора, спектроскопические измерения красных смещений скоплений доступны для 1441 скопления из этого списка.

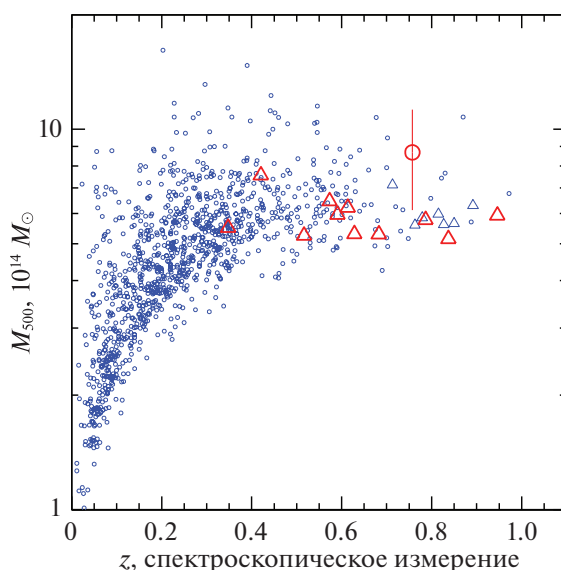


Рис. 3. Соотношение между красным смещением и массой для скоплений галактик, отождествленных в каталоге PSZ2 (синие точки) и в нашей работе (красные треугольники). Красным кружком показано массивное скопление SRGe CL 2305.2+2248, наблюдения которого в обзоре СРГ/еРОЗИТА обсуждались нами ранее (Буренин и др., 2021; Хамитов и др., 2022). Поскольку ошибки оценки массы по рентгеновской светимости определяются разбросом соотношения масса—светимость, оценки масс скоплений, полученные в нашей работе, имеют примерно такие же неопределенности, как и ошибка оценки массы скопления SRGe CL 2305.2+2248, показанная на рисунке.

ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

С целью получить дополнительные данные для оптического отождествления наиболее массивных скоплений из обзора СРГ/еРОЗИТА, а также для спектроскопических измерений их красных смещений, в мае 2020 г. была начата программа наблюдений на российских телескопах. Наблюдения проводились на 6-м телескопе БТА с помощью многорежимных редуторов светосилы SCORPIO и SCORPIO-2 (Афанасьев и др., 2005, 2011), на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории, с помощью спектрографа АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016), а также на Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150) с помощью спектрографа TFOSC. Недавно наблюдения скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА начались также на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Шацкий и др., 2020; Додин и др., 2020) с помощью спектрографа TDS (Потанин и др., 2020).

На этих телескопах проводились спектроскопические наблюдения ярчайших галактик скоплений с целью измерения их красных смещений, а также для более далеких объектов были получены глубокие прямые изображения. Все наблюдения проводились по той же методике, как и наблюдения скоплений галактик из обзора Планка и СРГ/еРОЗИТА (см., например, Сообщество Планка, 2015; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др.,

2021a,b). Для оптических наблюдений, в первую очередь, отбирались скопления галактик, имеющие наибольшую рентгеновскую светимость на данном красном смещении по его фотометрической оценке.

Список скоплений с оценками массы по рентгеновским наблюдениям $M_{500} > 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, для которых в последнее время нами были получены спектроскопические измерения красных смещений, приводится в табл. 1. В таблице приводятся название объекта, координаты рентгеновского центра, спектроскопическое измерение красного смещения, рентгеновская светимость в диапазоне 0.5–2 кэВ в собственной системе и оценка массы M_{500} по рентгеновской светимости (Вихлини и др., 2009).

Спектральные наблюдения всех 11 скоплений в табл. 1 были выполнены на 6-м телескопе БТА в июне—ноябре 2020 г. с помощью прибора SCORPIO-2 в режиме спектроскопии с длинной щелью. Ширина щели составляла $2''$, что вместе с гризмой VPHG940600 обеспечивало спектральное разрешение около $14 \text{ \AA}$ в диапазоне $3500\text{--}8500 \text{ \AA}$. Качество звездных изображений во время наблюдений было в пределах $1.5\text{--}2.3''$, суммарная длительность экспозиций — от 30 до 120 мин в зависимости от яркости центральной галактики скопления. Обработка данных выполнялась аналогично тому, как это описано в наших предыдущих работах (см., например, Буренин и др., 2021).

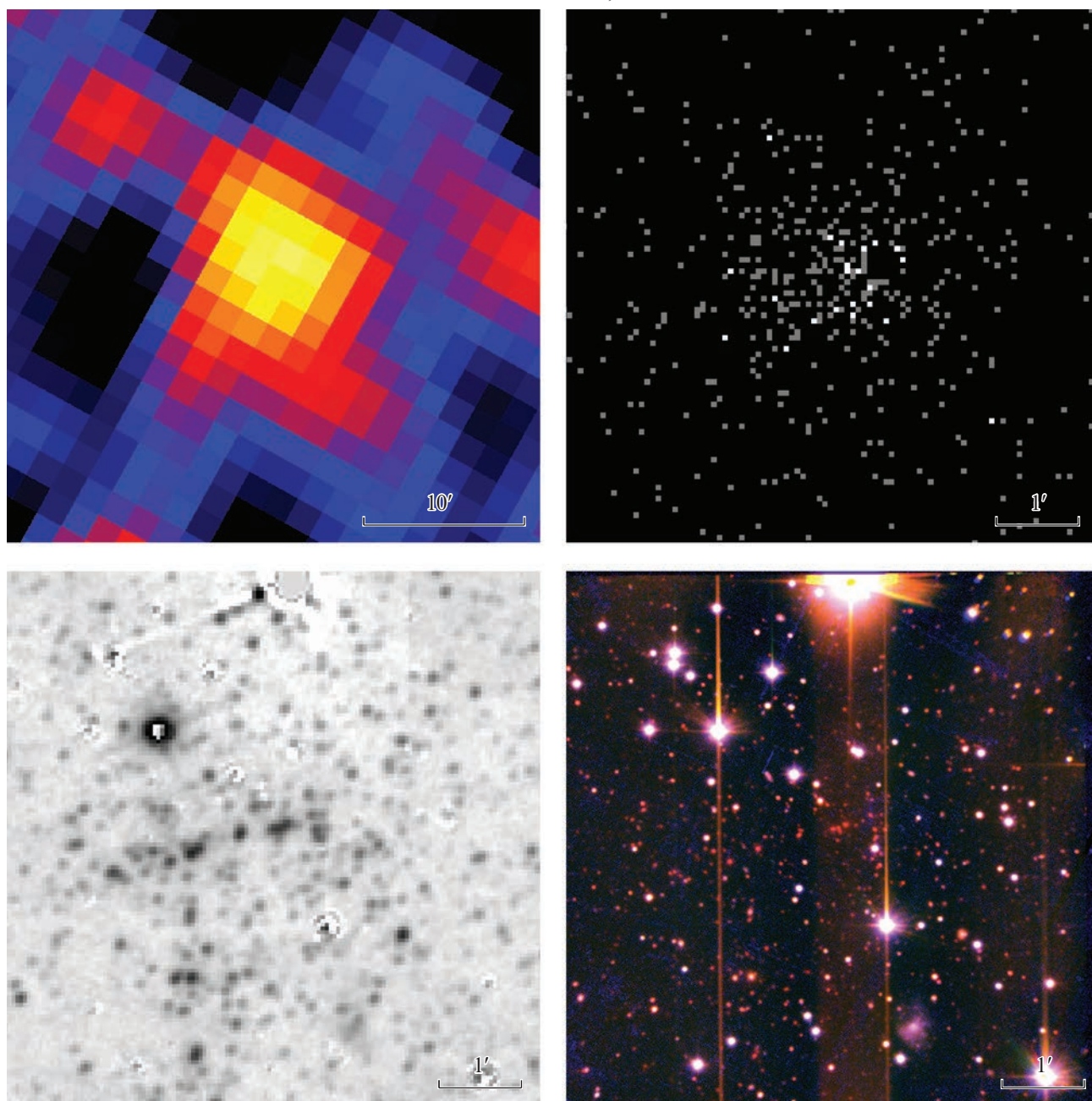
SRGe CL0157.8 + 3812, $z = 0.6827$ 

Рис. 4. Изображения поля скопления SRGe CL0157.8+3812. Слева,верху: карта отношения сигнал—шум параметра комптонизации обзора всего неба обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016b); справа,верху: рентгеновское изображение в диапазоне 0.4–2 кэВ из обзора SRG/ePOGITA; слева,внизу: изображение обзора WISE в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд (см. текст); справа,внизу: псевдоцветное изображение поля в фильтрах *riz* (RGB), изображение в фильтрах *iz* получено по данным наблюдений на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории, в фильтре *g* — по данным обзора Pan-STARRS. Центр изображений совпадает с оптическим центром скопления. Масштаб указан на изображениях, он совпадает на всех изображениях, кроме изображения карты параметра комптонизации обзора Планка.

Отметим, что ошибки оценок масс скоплений, приведенные в табл. 1, в основном, определяются не статистикой фотонов, а дисперсией соотношения светимость—масса. Результаты наших на-

блюдений еще одного скопления галактик очень большой массы были опубликованы нами ранее (Буренин и др., 2021; Хамитов и др., 2022).

Примеры изображений этих скоплений приво-

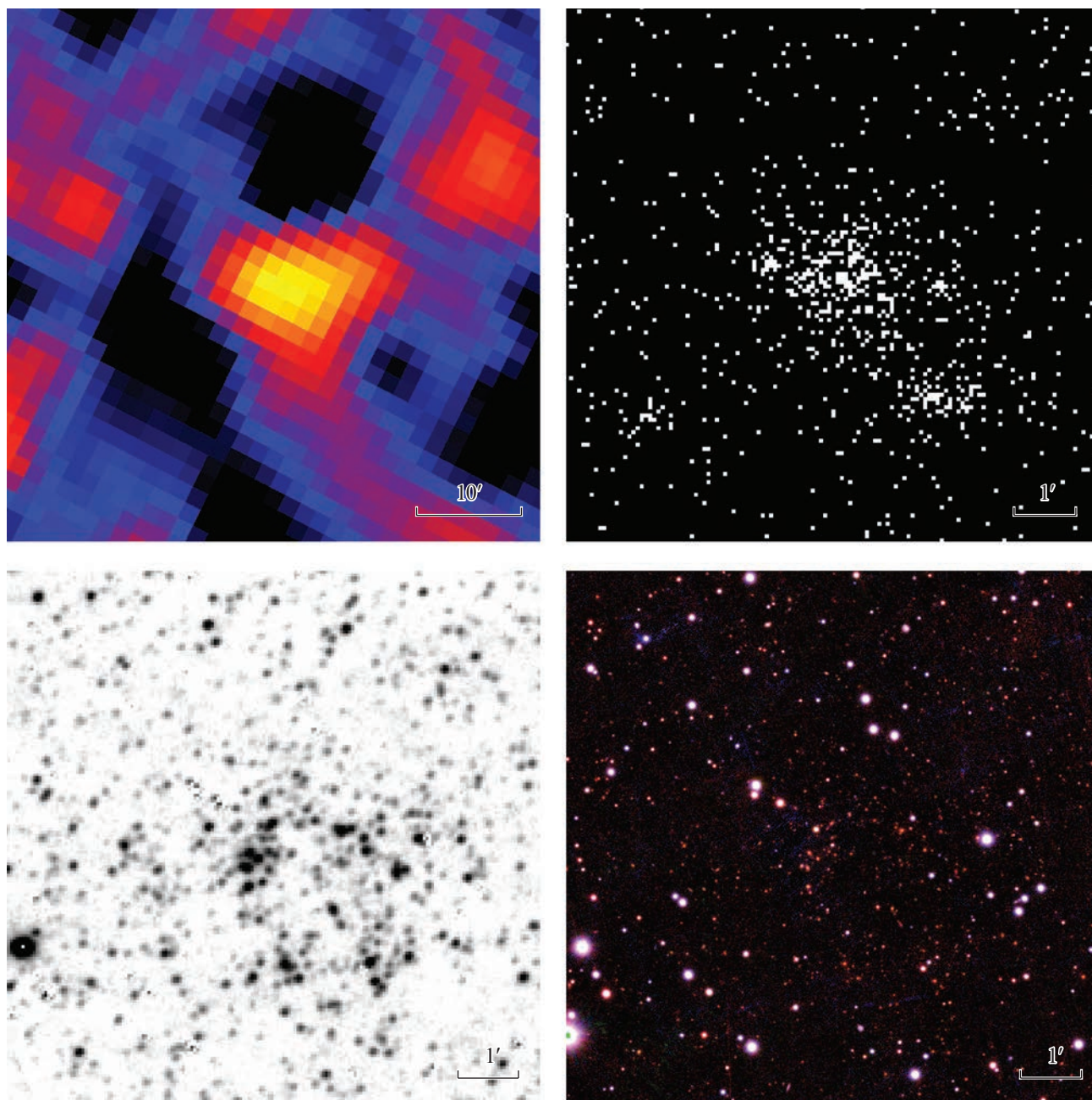
SRGe CL0206.5 + 3632, $z = 0.5164$ 

Рис. 5. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL0206.5+3632. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *grz* (RGB) построено по данным обзора DESIS LIS.

дятся ниже на рис. 4–14. Здесь для каждого скопления даны изображение карты параметра комптонизации обзора всего неба обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016b), рентгеновское изображение в диапазоне 0.4–2 кэВ из обзора SRG/eROSITA, инфракрасное (ИК) изображение из обзора всего неба спутника WISE Райт и др., 2010b), в канале 3.4 мкм (W1), очищенное от

звезд, а также псевдоцветное изображение поля в фильтрах *zrg* (RGB) по данным обзора DESIS LIS.

ИК-изображения спутника WISE на рис. 4–14 приведены по данным последних версий сборок с семилетней полной экспозицией неба (NeoWISE-R 7, Мейснер и др., 2021), из них были вычтены модели звезд, полученные при принудительной фотометрии по данным этих сборок для всех объектов

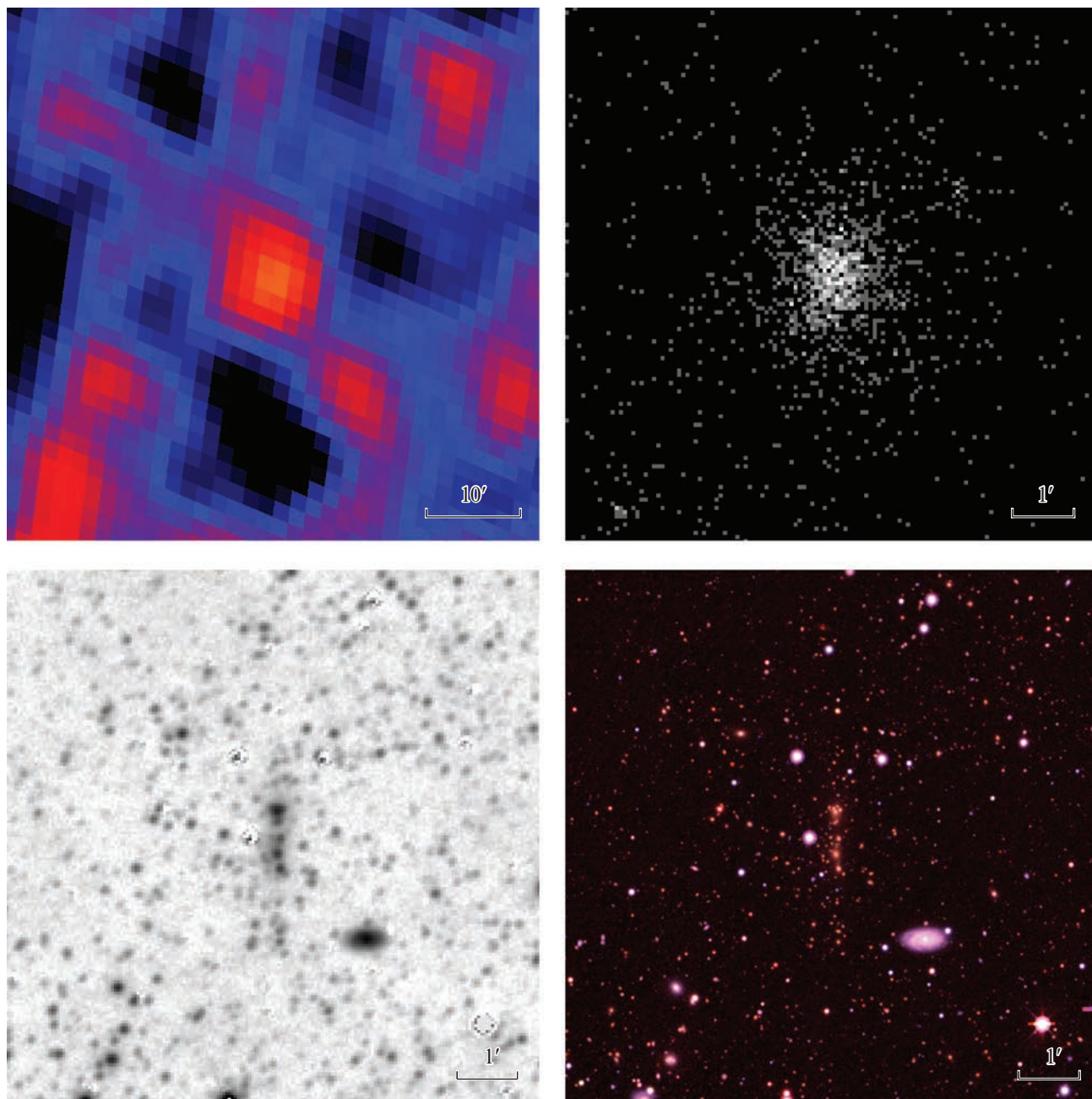
SRGe CL0238.3 + 2005, $z = 0.4205$ 

Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL0238.3+2005. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах grz (RGB) построено по данным обзора DESI LIS.

обзора Pan-STARRS, при этом звезды были отделены от галактик по их цветам в плоскости $(r - i)$ – $(r - W1)$ (Буренин, 2022). На таких изображениях остается, в основном, только ИК-излучение далеких галактик, и далекие скопления галактик становятся хорошо видны вплоть до высоких красных смещений (см., например, Буренин, 2015).

На рис. 15 показаны примеры спектров, по которым проводятся измерения красных смещений ярчайших скоплений галактик. Для надежного измерения красного смещения не требуется спектральных данных с высоким отношением сигнал–шум. Надежные измерения красных смещений ярчайших галактик могут быть получены путем срав-

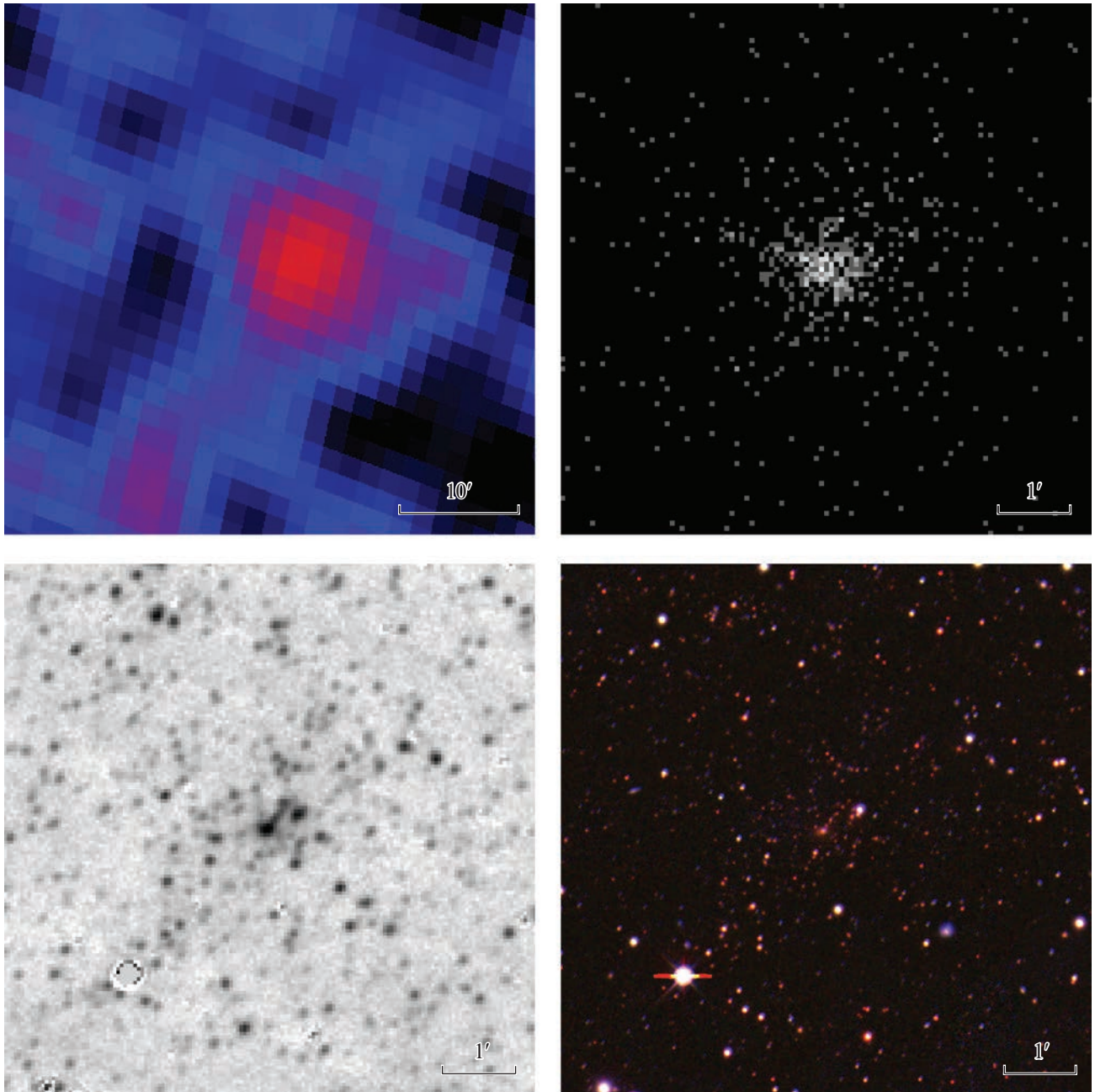
SRGe CL0241.0 + 2557, $z = 0.5732$ 

Рис. 7. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL0241.0+2557. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *grz* (RGB) построено по данным обзора DESI LIS.

нения с шаблоном спектра эллиптической галактики (см. рис. 15, справа).

В спектрах наиболее ярких галактик скоплений SRGe CL0241.0+2557 и SRGe CL1745.6+5000 присутствуют яркие запрещенные линии излучения кислорода $[\text{OII}]\lambda 3727 \text{ \AA}$ (рис. 15). Известно, что наличие в спектре галактик линии излучения $[\text{OII}]\lambda 3727$ является индикатором, по которому

можно оценить темп звездообразования в галактике (см., например, Кенникатт, 1998). Для этого требуется оценить светимость в линии $[\text{OII}]\lambda 3727 \text{ \AA}$.

Спектры этих галактик были исправлены за межзвездное поглощение, используя данные из работы Шлафли и др. (2014). Для скопления SRGe CL0241.0+2557 был получен избыток цвета $E(B - V) = 0.234 \pm 0.030$, а для

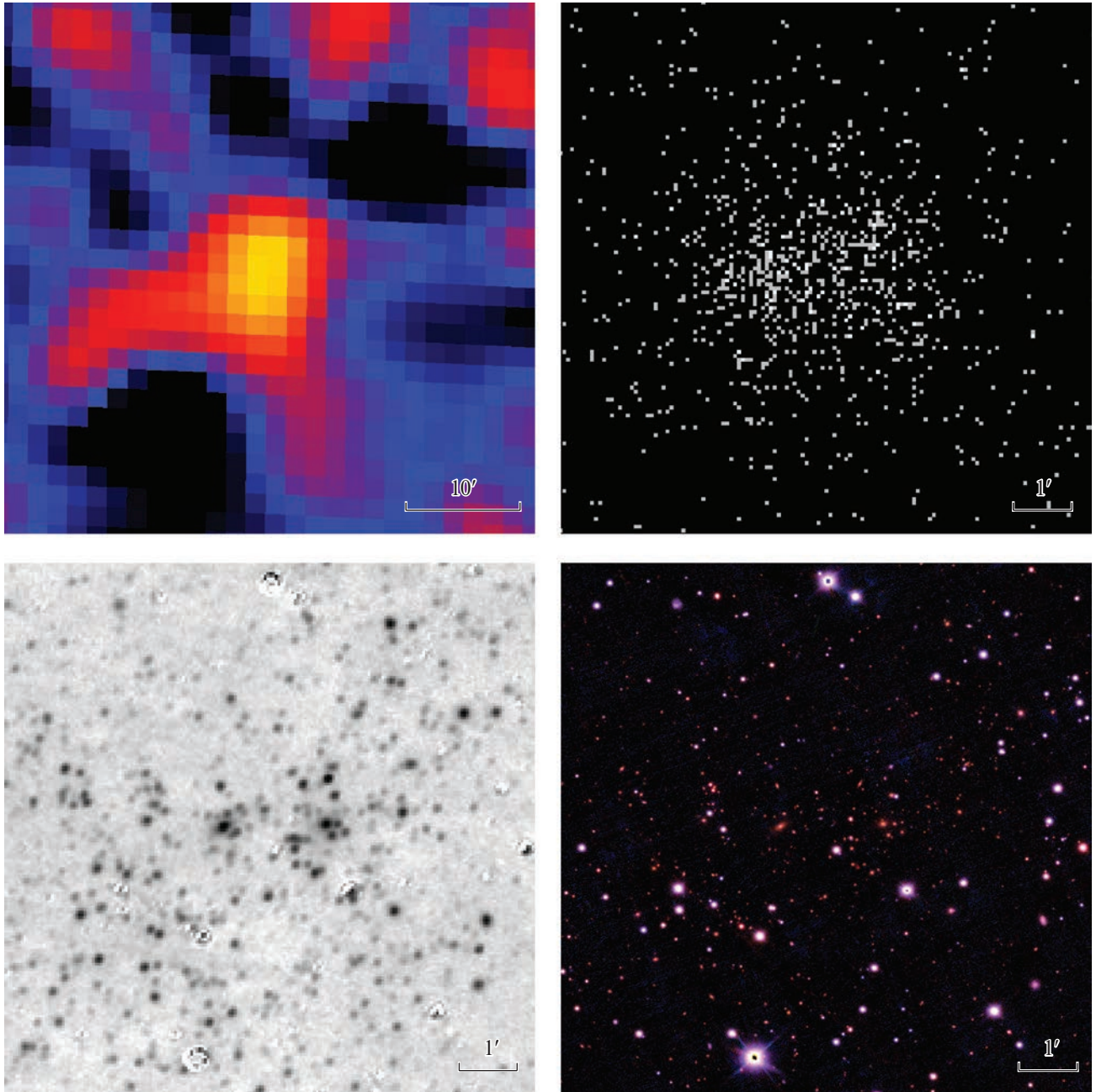
SRGe CL0349.0 + 2133, $z = 0.3478$ 

Рис. 8. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL0349.0+2133. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *gri* (RGB) построено по данным обзора Pan-STARRS.

SRGe CL1745.6+5000 межзвездное поглощение пренебрежимо мало, поэтому оно не учитывалось. Поток в линии $[\text{OII}]\lambda 3727 \text{ \AA}$ оказался равным $F_{\text{OII}\lambda 3727} = (1.43 \pm 0.18) \times 10^{-15} \text{ эрг/с/см}^2$ для SRGe CL0241.0+2557 и $F_{\text{OII}\lambda 3727} = (3.54 \pm \pm 0.82) \times 10^{-16} \text{ эрг/с/см}^2$ для SRGe CL1745.6+5000, а светимость в линии $\text{OII}\lambda 3727 \text{ \AA}$ —

$L_{\text{OII}\lambda 3727} = (1.92 \pm 0.24) \times 10^{42} \text{ эрг/с}$ для SRGe CL0241.0+2557 и $L_{\text{OII}\lambda 3727} = (5.91 \pm 1.37) \times \times 10^{41} \text{ эрг/с}$ для SRGe CL1745.6+5000. Используя соотношение из работы (Кенникатт, 1998), темпы звездообразования можно оценить как $SFR = 26.8 \pm 8.4 M_{\odot}/\text{год}$ и $8.3 \pm 3.0 M_{\odot}/\text{год}$ для SRGe CL0241.0+2557 и SRGe CL1745.6+

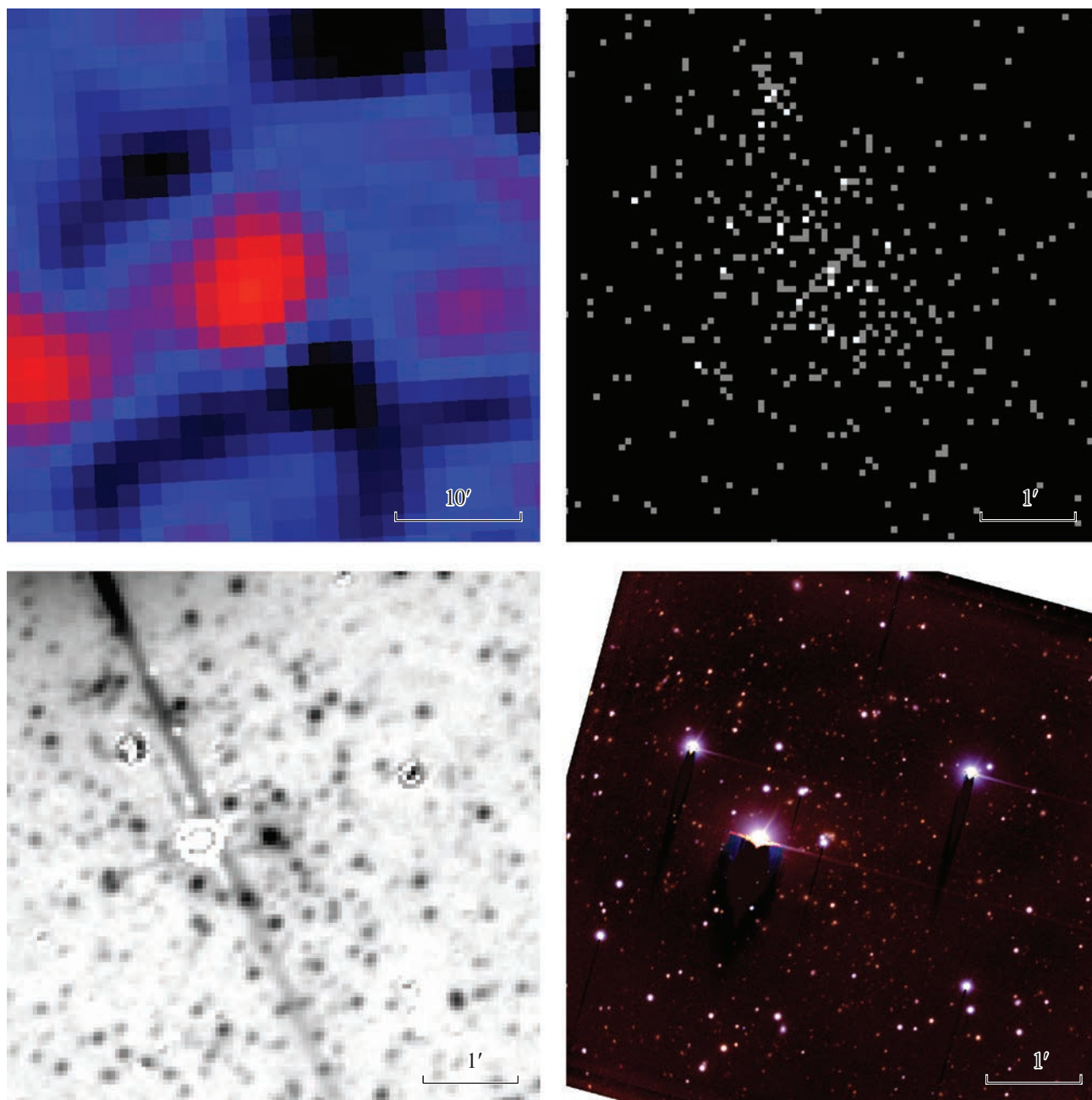
SRGe CL0413.4 + 8302, $z = 0.5909$ 

Рис. 9. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL0413.4+8302. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *riz* (RGB) построено по данным прибора СКОРПИО-2 на 6-м телескопе БТА. Отметим, что для этого поля имеются также глубокие прямые изображения, полученные с помощью прибора ТФОСК на телескопе РТТ-150. Эти данные были использованы для уточнения фотометрических измерений.

+5000 соответственно. Эти оценки являются приблизительными, поскольку в них не учитывается возможное внутреннее поглощение в галактиках. Для того чтобы получить более точные оценки темпа звездообразования, требуется измерить спектры в области линии $H\alpha$.

Всего в настоящее время (конец 2022 г.) получены спектроскопические измерения красных смещений для более чем 160 скоплений галактик. Наблюдения продолжаются, результаты этих измерений будут опубликованы нами в последующих статьях.

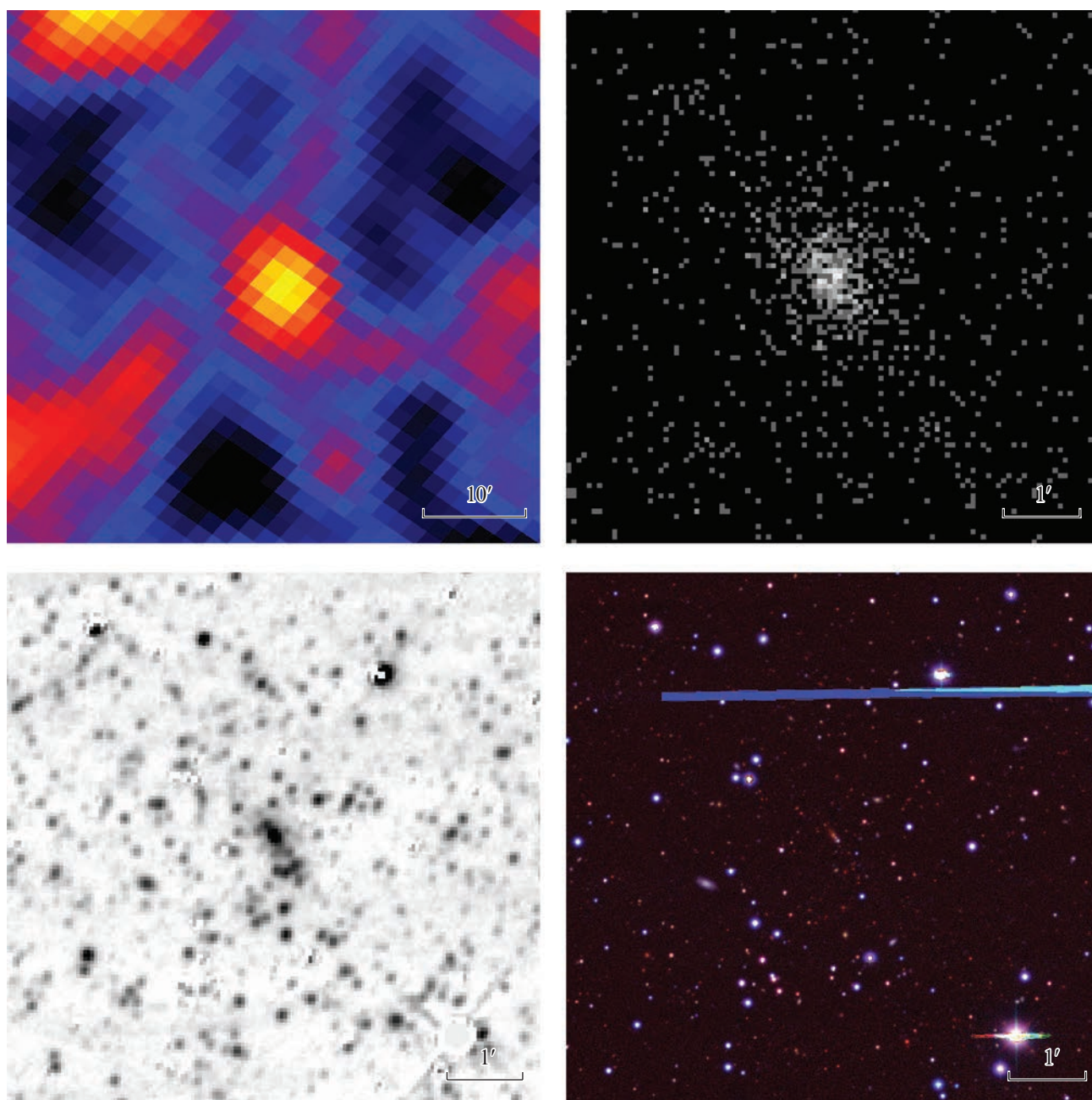
SRGe CL1745.6 + 5000, $z = 0.6285$ 

Рис. 10. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL1745.6+5000. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *grz* (RGB) построено по данным обзора DESI LIS.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выше обсуждались методика и результаты поиска наиболее массивных скоплений галактик в рентгеновском обзоре всего неба телескопа ePOZITA на борту космической обсерватории SRG. Приведены описание оптических наблюдений этих скоплений и результаты спектроскопических

измерений красных смещений для 11 скоплений галактик большой массы, $M_{500} > 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, обнаруженных в обзоре SRG/ePOZITA.

Шесть скоплений из этого списка расположены на красных смещениях $z > 0.6$. Отметим, что такие массивные скопления являются очень редкими объектами на высоких красных смещениях, и наши

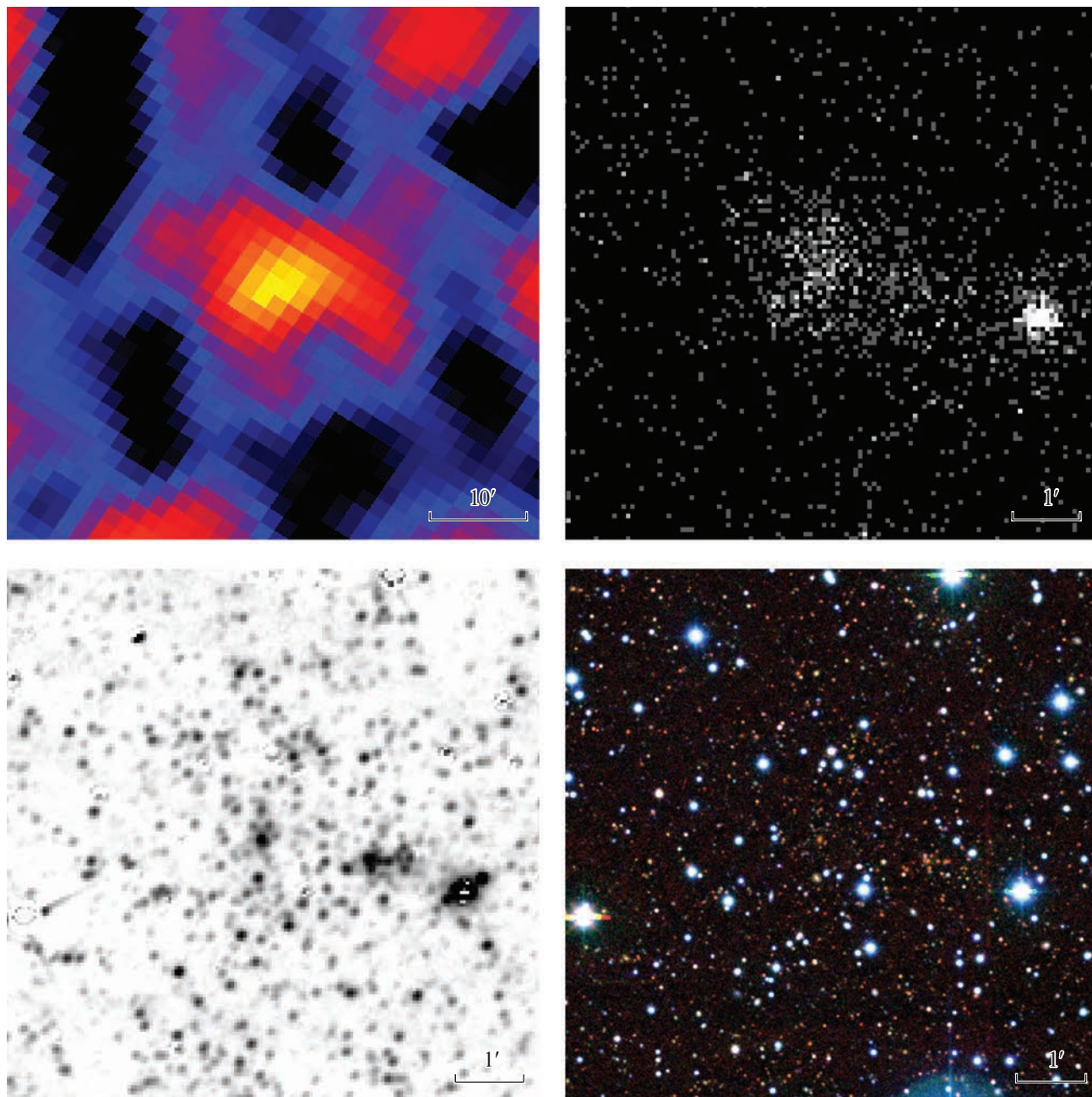
SRGe CL1830.6 + 5653, $z = 0.7867$ 

Рис. 11. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL1830.6+5653. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах grz (RGB) построено по данным обзора DESI LIS.

наблюдения позволяют заметно увеличить число таких скоплений с надежными измерениями красных смещений. Это показано на рис. 3, где приводится соотношение между красным смещением и массой для скоплений галактик, отождествленных в каталоге PSZ2 (Сообщество Планка, 2016а; Буренин и др., 2018) и в нашей работе. На этом рисунке для удобства сравнения с измерениями масс

скоплений в каталоге PSZ2 оценки масс по рентгеновской светимости скоплений смещены примерно на 17% в сторону меньших значений массы, что следует из сравнения этих измерений масс для скоплений из нашего списка. Видно, что скопления такой массы на красных смещениях выше $z \approx 0.6$ входят в число всего лишь нескольких десятков

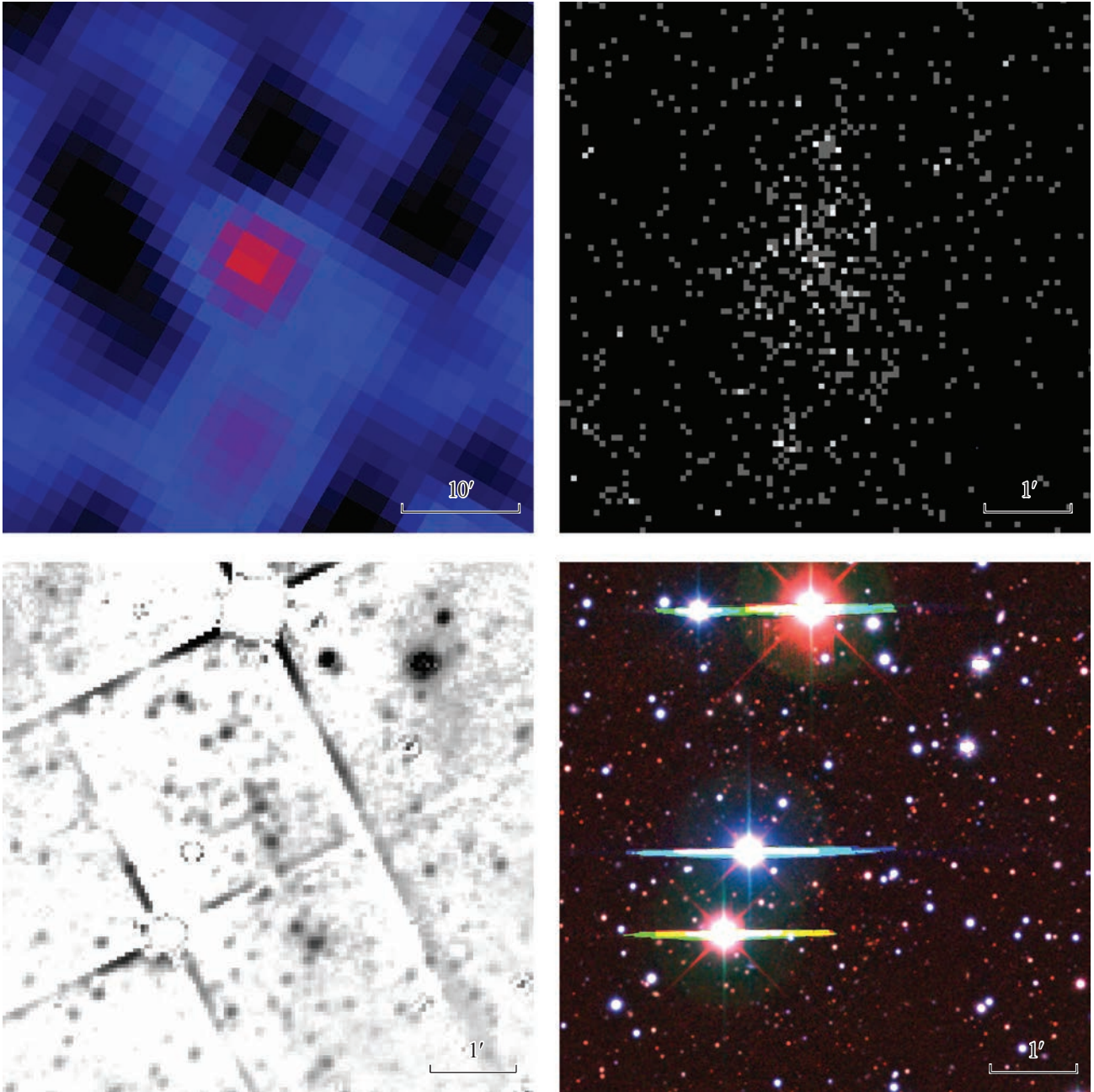
SRGe CL1841.4 + 5350, $z = 0.946$ 

Рис. 12. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL1841.4+5350. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах grz (RGB) построено по данным обзора DESI LIS.

наиболее массивных скоплений во Вселенной, расположенных на таких красных смещениях.

Наиболее массивным скоплением нашей выборки является SRGe CL2305.2+2248, расположенное на $z = 0.7573$, с рентгеновской оценкой массы $M_{500} = (9.0 \pm 2.6) \times 10^{14} M_{\odot}$, наблюдения которого в обзоре СРГ/еРОЗИТА обсуждались

нами ранее (Буренин и др., 2021; Хамитов и др., 2022). Довольно редким по своей массе объектом является также и более близкое скопление SRGe CL0238.3+2005, с массой около $M_{500} \approx 8.9 \times 10^{14} M_{\odot}$, расположенное на красном смещении $z = 0.4205$.

В спектрах ярчайших галактик двух скоплений из нашего списка обнаружены яркие линии излу-

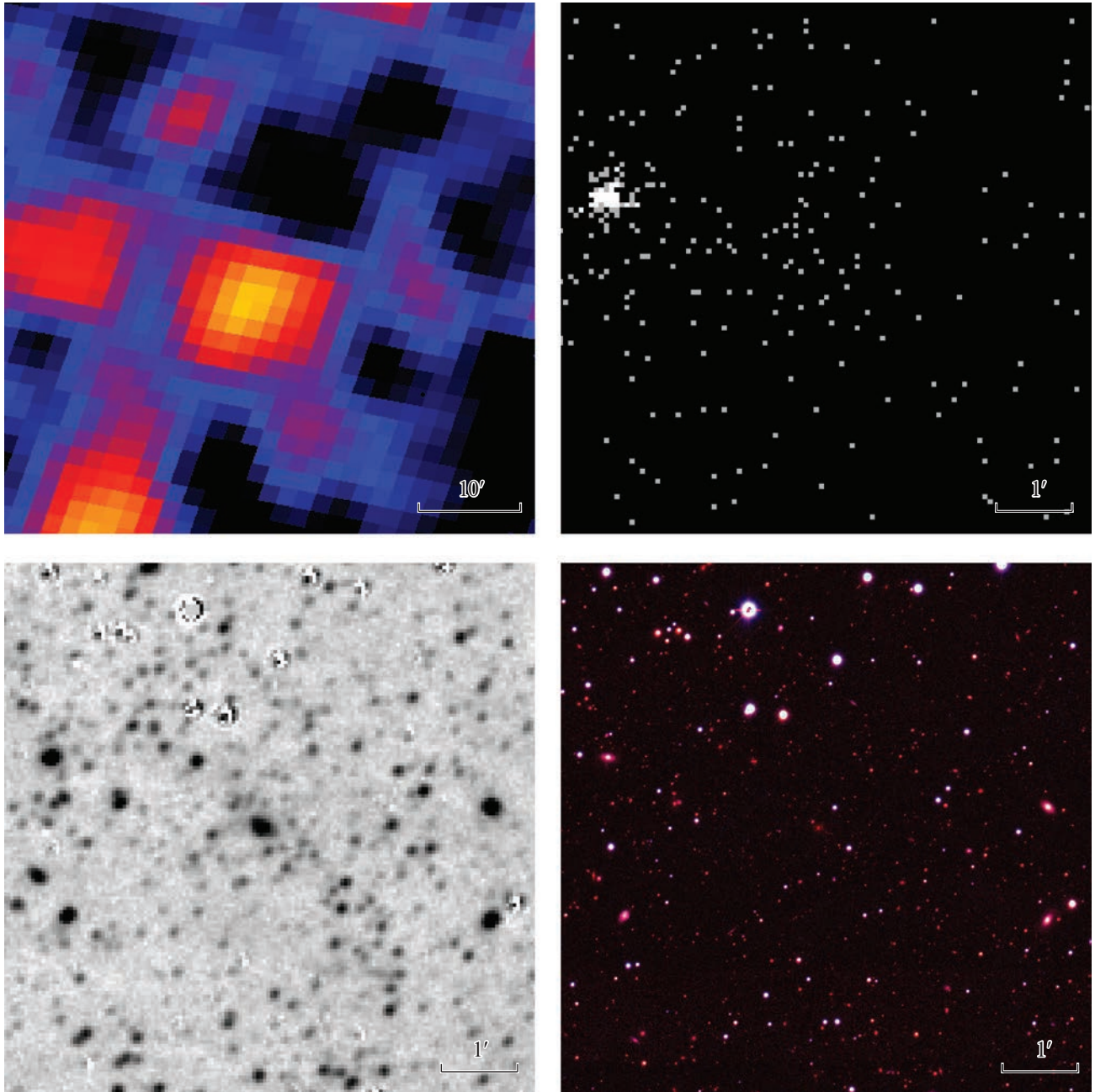


Рис. 13. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL2105.1–0326. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *grz* (RGB) построено по данным обзоров Pan-STARRS и DESI LIS.

ния $[\text{OII}]\lambda 3727$. Наблюдение этих линий является указанием на наличие значительного звездообразования в этих галактиках. Темп звездообразования, оцененный по светимости в линии $[\text{OII}]\lambda 3727$, оказывается на уровне от 10 до 30 $M_{\odot}/\text{год}$. Такой темп звездообразования наблюдается в некоторых скоплениях галактик, распределение горячего газа в которых является установившимся, и в центрах

которых наблюдаются значительные течения охлаждения (см., например, МакНамара и др., 2006; МакДональд и др., 2012). Такой темп звездообразования оказывается значительно меньше наблюдаемого в известном массивном скоплении галактик Феникс (МакДональд и др., 2012). Поскольку звездообразование в центральных галактиках скоплений указывает на наличие течения охлажде-

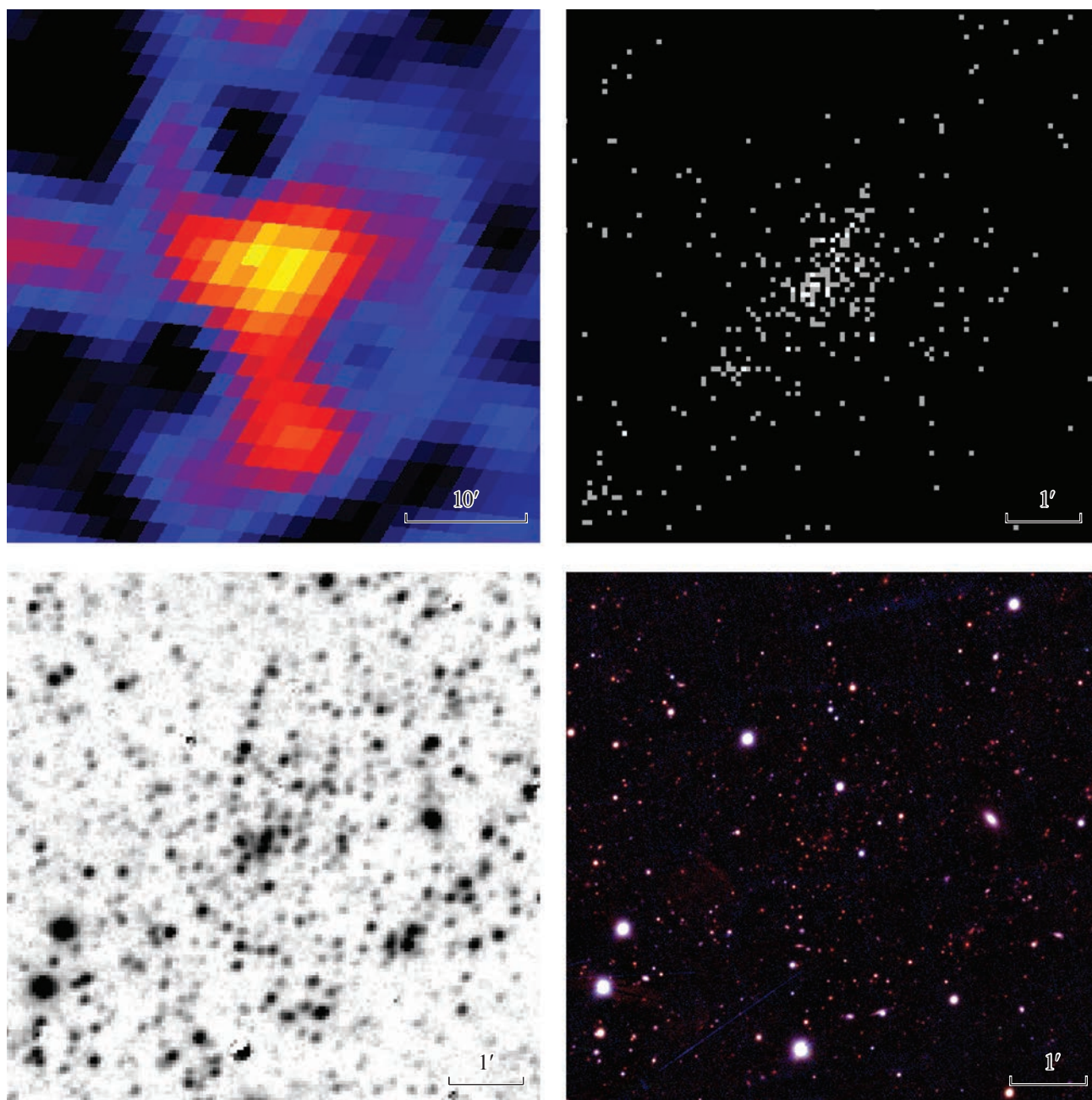
SRGe CL2137.2 – 2232, $z = 0.946$ 

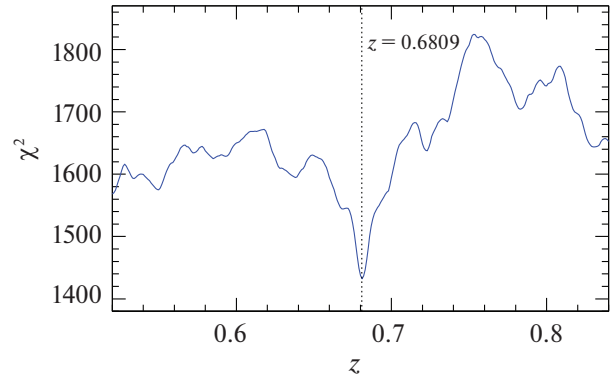
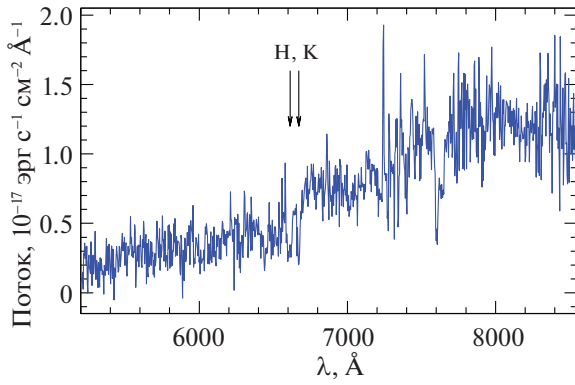
Рис. 14. То же, что на рис. 4, но для скопления SRGe CL2137.2–2232. Псевдоцветное изображение поля в фильтрах *gri* (RGB) построено по данным обзора Pan-STARRS.

ния горячего газа, а охлаждение в центре приводит к значительному росту рентгеновской светимости скопления, оценка массы этих скоплений по их рентгеновской светимости может быть завышена.

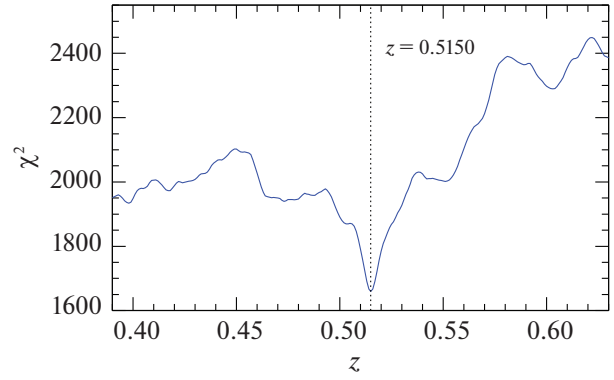
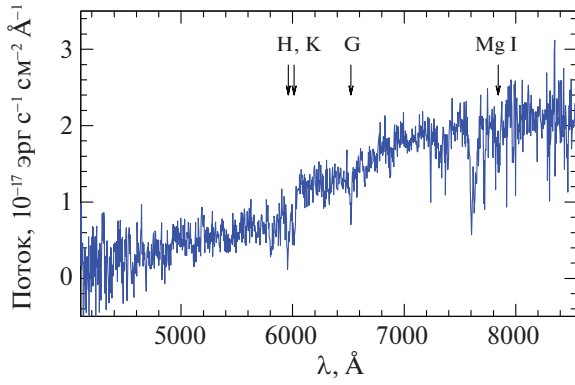
Подчеркнем, что выборка скоплений, представленная в настоящей статье, получена в результате нашей текущей работы и ни в каком смысле не является статистически полной и не может быть

использована для оценки полноты каких-либо других выборок скоплений. Тем не менее большая часть объектов такой большой массы должна входить в каталог PSZ2. При этом все скопления из табл. 1 попадают в область неба, по которой был составлен каталог PSZ2. Тот факт, что в обзоре SRG/eROZITA удастся обнаружить новые скопления такой большой массы, скорее всего,

SRGeCL 0157.8 + 3812



SRGeCL 0206.5 + 3632



SRGeCL 0238.3 + 2005

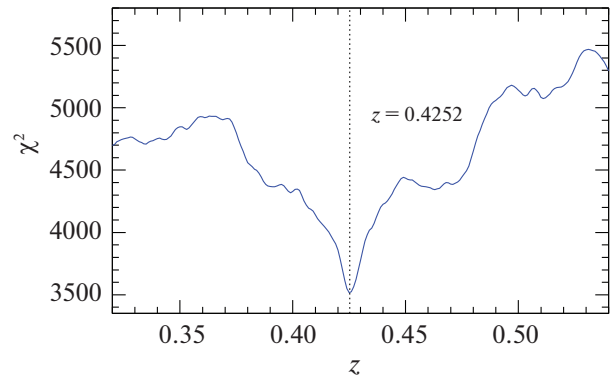
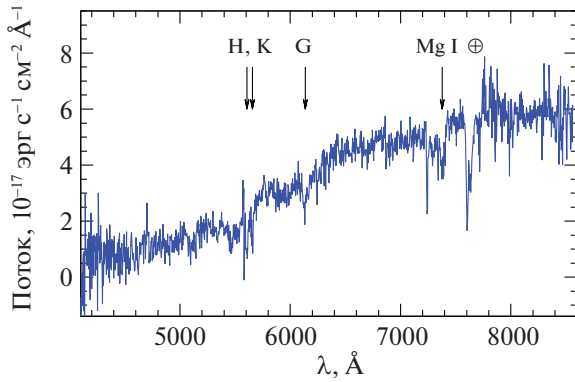


Рис. 15. Спектроскопические измерения красных смещений скопления. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа SCORPIO-2. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

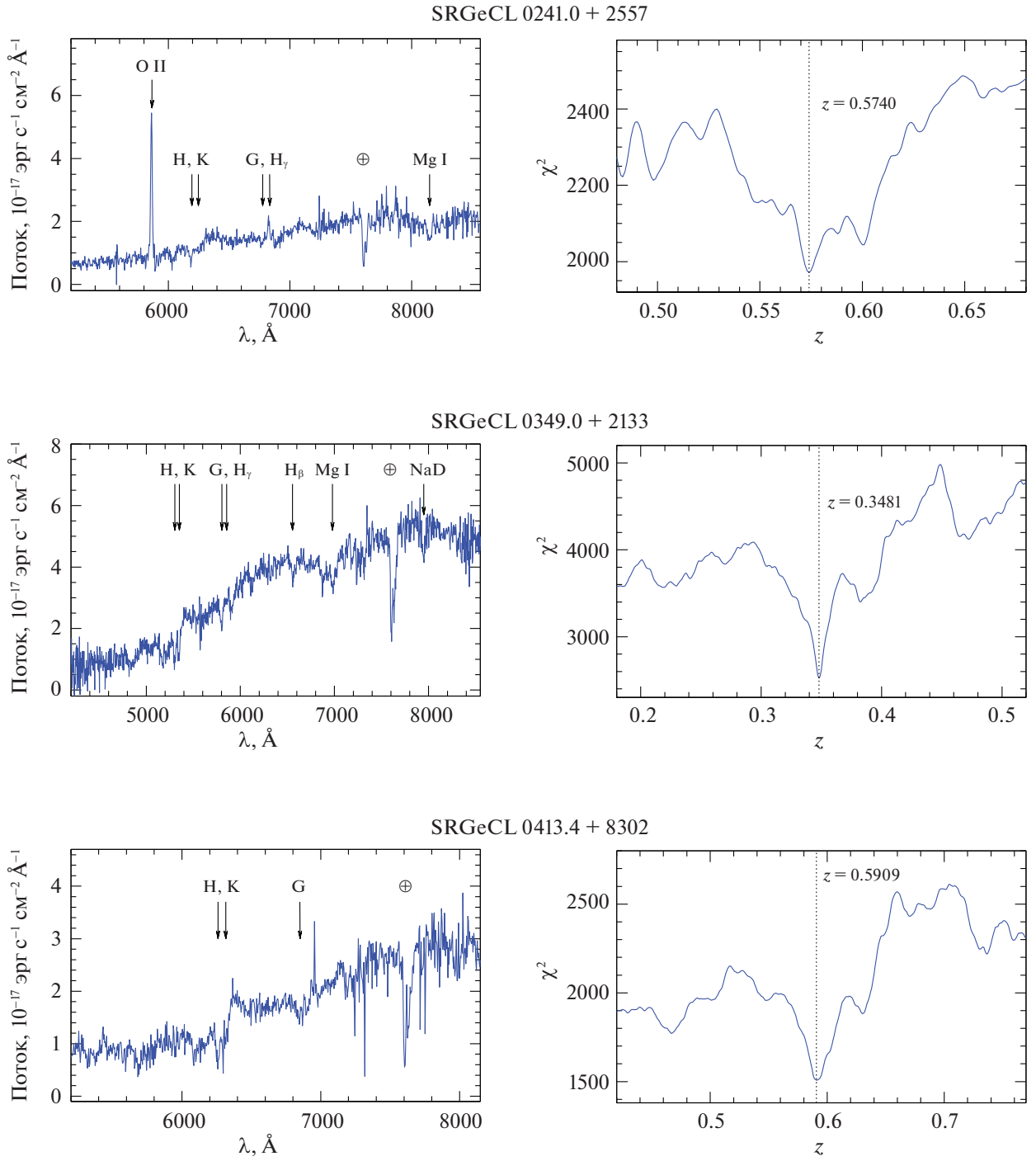
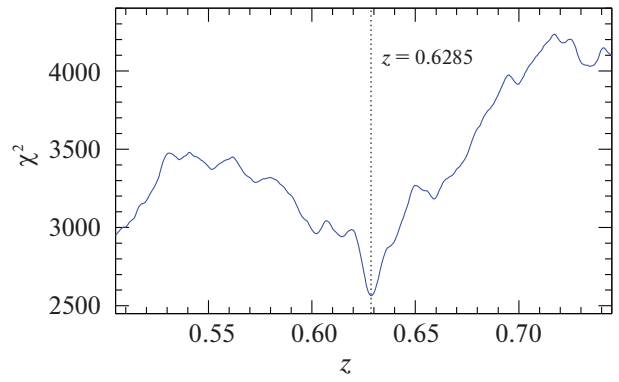
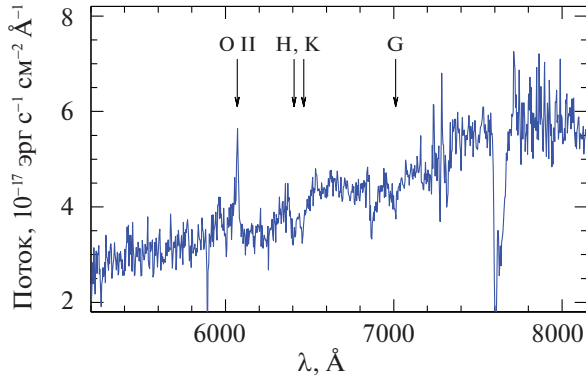
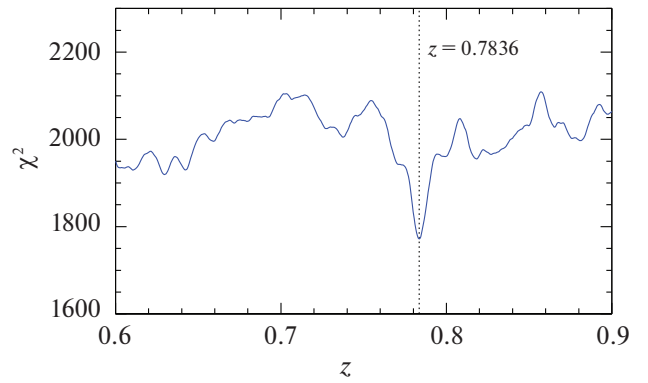
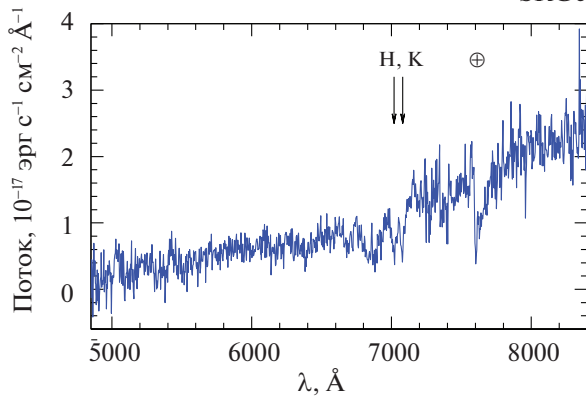


Рис. 15. Продолжение.

SRGeCL 1745.6 + 5000



SRGeCL 1830.6 + 5653



SRGeCL 1841.4 + 5350

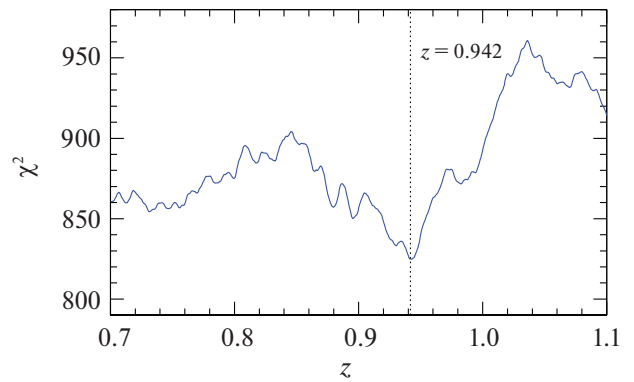
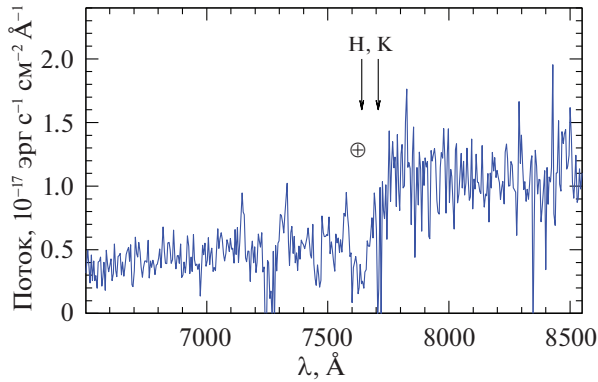


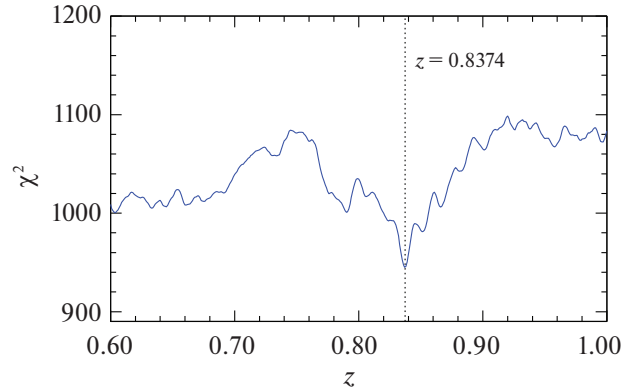
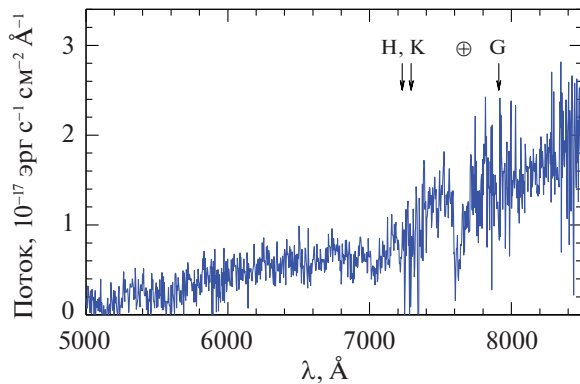
Рис. 15. Продолжение.

объясняется просто тем, что полнота каталога (Сообщество Планка, 2016а) для скоплений такой массы отличается от единицы, как это и следует из моделирования процедуры поиска скоплений в обзоре Планка. Так, например, полнота каталога PSZ2 для скоплений с массой $M_{500} > 6 \times 10^{14} M_{\odot}$,

расположенных на $z > 0.3$, находится на уровне не выше 80% (Сообщество Планка, 2016а).

Программа оптических наблюдений массивных скоплений галактик на российских телескопах продолжается. Всего в настоящее время получены спектроскопические измерения красных смещений

SRGeCL 2105.1 – 0326



SRGeCL 2137.2 – 2232

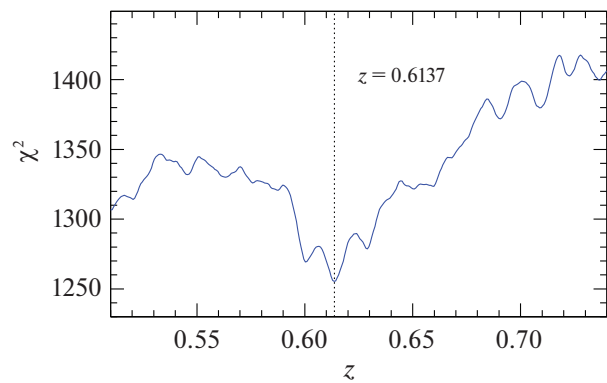
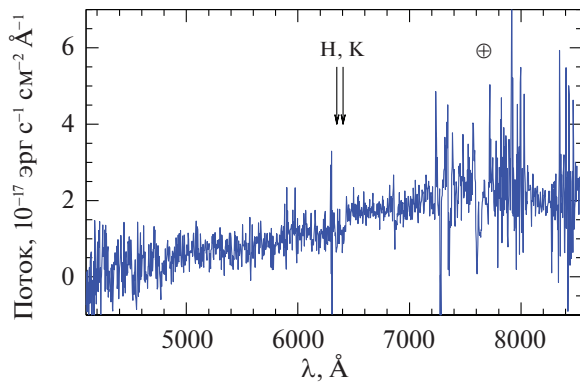


Рис. 15. Окончание.

для более чем 160 скоплений галактик. Эти результаты будут опубликованы нами в последующих статьях.

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”. Основным разработчиком спектральной аппаратуры, на которой в рамках представленного проекта проводятся наблюдения на 1.6-м и 6-м телескопах, являлся В.Л. Афанасьев. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 21-12-00210. ААС был частично поддержан проектом 0033-2019-0005 Минобнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А.В., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005) [V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev, Astron. Lett. **31**, 194 (2005)].
2. Афанасьев и др. (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), Baltic Astron. **20**, 363 (2011).
3. Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., Астрофиз. Бюлл. **71**, 71 (2016).
4. Ахумада и др. (R. Ahumada, C. A. Prieto, Almeida, F. Anders, S.F. Anderson, B.H. Andrews, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **249**, 3 (2020).
5. Блим и др. (L.E. Bleem, S. Bocquet, B. Stalder, M.D. Gladders, P.A.R. Ade, S.W. Allen, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **247**, 25 (2020).
6. Борингер и др. (H. Böhringer, P. Schuecker, L. Guzzo, C.A. Collins, W. Voges, R.G. Cruddace, et al.), Astron. Astrophys. **425**, 367 (2004).
7. Буренин и др. (R.A. Burenin, A. Vikhlinin, Hornstrup, H. Ebeling, H. Quintana, and A. Mescheryakov), Astrophys. J. Suppl. Ser. **172**, 561 (2007).
8. Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А., Ревнивцев М.Г., Сазонов С.Ю., Ткаченко, Г.А. Хорунжев, Яскович А.Л., Павлинский М.Н., Письма в Астрон. журн. **42**, 333 (2016) [R.A. Burenin, et al., Astron. Lett. **42**, 295 (2016)].

9. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Рубино-Мартин Х.-А., Агханов Н., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 317 (2018) [R.A. Burenin, et al., *Astron. Lett.* **44**, 297 (2018)].
10. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р., Гроховская А.А., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Зазнобин И.А., Иртуганов Э.Н., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Мещеряков А.В., Моисеев А.В., Сазонов С.Ю., Старобинский А.А., Сюняев Р.А., Уклеин Р.И., Хабибуллин И.И., Хамитов И.М., Чуратов Е.М., Письма в Астрон. журн. **47**, 461 (2021) [R.A. Burenin, et al., *Astron. Lett.* **47**, 443 (2021)].
11. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 189 (2015) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **41**, 167 (2015)].
12. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **43**, 507 (2017)].
13. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **48**, 167 (2022) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **48**, 153 (2022)].
14. Вен и др. (Z.L. Wen, J.L. Han, and F.S. Liu), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 34 (2012).
15. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, and A. Hornstrup), *Astrophys. J.* **502**, 558 (1998).
16. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009).
17. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
18. Додин А.В., Потанин С.А., Шацкий Н.И., Белинский А.А., Атапин К.Е., Бурлак М.А. и др., Письма в Астрон. журн. **46**, 459 (2020) [A.V. Dodin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 429 (2020)].
19. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Сюняев Р.А., Рубино-Мартин Х.-А., Агханов Н., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **45**, 77 (2019) [I.A. Zaznabin, et al., *Astron. Lett.* **45**, 49 (2019)].
20. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **46**, 79 (2020) [I.A. Zaznabin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 79 (2020)].
21. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р., Еселевич М.В., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **47**, 79 (2021a) [I.A. Zaznabin, et al., *Astron. Lett.* **47**, 61 (2021a)].
22. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Ляпин А.Р., Хорунжев Г.А., Афанасьев В.Л., Гроховская А.А., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Уклеин Р.И., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Гильфанов М.Р., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **47**, 89 (2021b) [I.A. Zaznabin, et al., *Astron. Lett.* **47**, 71 (2021b)].
23. Кенникатт (J. Kennicutt and C. Rober), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **36**, 189 (1998).
24. Кляйн и др. (M. Klein, J.J. Mohr, S. Desai, H. Israel, S. Allam, A. Benoit-Lévy, et al.), *MNRAS* **474**, 3324 (2018).
25. Кравцов А.В., Вихлинин А.А., Мещеряков А.В., Письма в Астрон. журн. **44**, 4 (2018) [A.V. Kravtsov, et al., *Astron. Lett.* **44**, 8 (2018)].
26. МакДональд и др. (M. McDonald, M. Bayliss, B.A. Benson, R.J. Foley, J. Ruel, P. Sullivan, et al.), *Nature* **488**, 349 (2012).
27. МакНамара и др. (B.R. McNamara, D.A. Rafferty, L. Birzan, J. Steiner, M.W. Wise, P.E.J. Nulsen, et al.), *Astrophys. J.* **648**, 164 (2006).
28. Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, E.F. Schlafly, and D.J. Schlegel), *Res. Not. Am. Astron. Soc.* **5**, 200 (2021).
29. Мещеряков А.В. и др., Письма в Астрон. журн., в печати (2023).
30. Пиффаретти и др. (R. Piffaretti, M. Arnaud, G.W. Pratt, E. Pointecouteau, and J.B. Melin), *Astron. Astrophys.* **534**, A109 (2011).
31. Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В., Желтухов С.Г., Ландер В.Ю., Постнов К.А., Саввин А.Д., Татарников А.М., Черепашук А.М., Черязов Д.В., Чилингарян И.В., Шацкий Н.И., Письма в Астрон. журн. **46**, 894 (2020) [S.A. Potanin, et al., *Astron. Lett.* **46**, 836 (2020)].
32. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
33. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Maihzer, V.T. Ressler, R.M. Curti, T. Jarret, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
34. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014).
35. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015).
36. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016a).
37. Сообщество Планка (Planck Collaboration, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Arnoud, C. Baccigalupi, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A22 (2016b).

38. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
39. Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Лыскова Н.С., Круглов А.А., Буренин Р.А., Гильфанов М.Р., Гороховская А.А., Додонов С.Н., Сазонов С.Ю., Старобинский А.А., Сюняев Р.А., Хабибуллин И.И., Чуразов Е. М., *Письма в Астрон. журн.* **48**, 3 (2022) [I.M. Khamitov, et al., *Astron. Lett.* **48**, 1 (2022)].
40. Хилтон и др. (M. Hilton, C. Sifon, S. Naess, M. Madhavacheril, M. Oguri, E. Rozo, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 3 (2021).
41. Чамберс и др. (K. Chambers and Pan-STARRS Team), *Am. Soc. Meet. Abstract #231*, v. 231 of Am. Soc. Meet. Abstract, p. 102.01 (2018).
42. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *MNRAS* **450**, 1984 (2015).
43. Шацкий и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, et al.), in I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin, A.F. Valeev, D.O. Kudryavtsev, eds., *Ground-Based Astronomy in Russia, 21st Century*, p. 127 (2020).
44. Шлафли и др. (E.F. Schlafly, G. Green, D.P. Finkbeier, M. Juric, H.W. Rix, N.F. Martin, et al.), *Astrophys. J.* **789**, 15 (2014).
45. Эйбл и др. (G.O. Abell, J. Corwin, G. Harold, and R.P. Olwin), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **70**, 1 (1989).