

## ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК СРЕДИ ОБЪЕКТОВ ВТОРОГО КАТАЛОГА ИСТОЧНИКОВ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. ПЛАНКА

© 2019 г. И. А. Зазнобин<sup>1\*</sup>, Р. А. Буренин<sup>1</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>2,3</sup>, И. М. Хамитов<sup>2,4</sup>,  
Г. А. Хорунжев<sup>1</sup>, В. В. Коноплев<sup>1</sup>, М. В. Еселевич<sup>5</sup>, В. Л. Афанасьев<sup>6</sup>,  
С. Н. Додонов<sup>6</sup>, Х.-А. Рубино-Мартин<sup>7</sup>, Н. Агханим<sup>8</sup>, Р. А. Сюняев<sup>1,9</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Академия наук Татарстана, Казань, Россия

<sup>4</sup>Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

<sup>5</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>6</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

<sup>7</sup>Канарский институт астрофизики, Тенерифе, Испания

<sup>8</sup>Институт космической астрофизики, Орсэ, Франция

<sup>9</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 30.10.2018 г.; после доработки 30.10.2018 г.; принята к публикации 30.10.2018 г.

Представлены результаты работ по оптическому отождествлению и спектроскопическим измерениям красных смещений скоплений галактик из второго каталога источников сигнала Сюняева–Зельдовича обзора всего неба обсерватории им. Планка. Используются данные наблюдений 1.5-м российско-турецкого телескопа (РТТ-150), 1.6-м телескопа Саянской обсерватории АЗТ-ЗЗИК, 3.5-м телескопа обсерватории Калар-Альто, а также данные 6-м телескопа САО РАН (Большой телескоп азимутальный, БТА). Для наблюдений были отобраны источники сигнала Сюняева–Зельдовича, не отождествленные со скоплениями галактик с известными красными смещениями. Наблюдения проводились в течение трех лет, в результате которых для набора скоплений галактик были получены прямые изображения в различных фильтрах, а также спектры наиболее ярких галактик красной последовательности этих скоплений. Для 38 скоплений галактик были получены спектроскопические измерения красных смещений.

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

DOI: 10.1134/S0320010819020074

### ВВЕДЕНИЕ

Обзор всего неба космической обсерватории им. Планка источников Сюняева–Зельдовича выпуска 2015 г. (PSZ2, Сообщество Планка, 2016в) включает в себя 1653 объекта, которые были найдены в результате измерения эффекта Сюняева–Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972). Среди всех этих объектов 1203 источника являются подтвержденными массивными скоплениями галактик. Это наиболее массивные скопления галактик, которые наблюдаются равномерно на всем небе в наблюдаемой части Вселенной (Сообщество Планка,

2014б, 2016в). Эта выборка активно используется для измерения функции масс скоплений галактик и ограничения на параметры космологической модели по этим данным (Сообщество Планка, 2014а, 2016б). В будущем все эти скопления галактик, скорее всего, войдут в космологическую выборку обзора всего неба космической обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ).

Среди неотожествленных источников сигнала Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка имеется некоторое количество ложных обнаружений, но также имеется большое количество неотожествленных скоплений галактик. Оптические отождествления для некоторых скоплений галактик можно получить при помощи

\*Электронный адрес: zaznobin@iki.rssi.ru

более полного использования данных обзоров неба, в первую очередь Слоановского обзора (Буренин, 2017; Стреблянская и др., 2018). Однако в большинстве случаев для того, чтобы отождествить эти скопления в оптическом диапазоне, требуются дополнительные наблюдения в оптическом диапазоне. Эта работа активно проводится в настоящее время (например, Сообщество Планка, 2014б, 2015б, 2016в,г; Амодео и др., 2017; Буренин и др., 2018; Буше и др., 2018; Боада и др., 2018).

Наша научная группа располагает значительным количеством наблюдательного времени на различных телескопах, где имеется возможность получить как глубокие прямые изображения хорошего качества, так и спектры наиболее ярких галактик скоплений на красных смещениях вплоть до  $z \approx 0.7-0.9$ . Это позволило организовать большую программу фотометрических и спектроскопических наблюдений скоплений галактик из обзора Планка на всем диапазоне красных смещений. С момента выпуска обзора обсерватории им. Планка наша группа принимает активное участие в работах по оптическому отождествлению и измерению красных смещений скоплений галактик из этого обзора (Сообщество Планка, 2014б, 2015а,б, 2016в; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018).

В настоящее время нашей группой проводятся работы по оптическому отождествлению скоплений галактик из второго каталога Планка (Сообщество Планка, 2016в). Недавно были опубликованы результаты работ по отождествлению скоплений, расположенных на высоких красных смещениях  $z \approx 0.8$  (Буренин и др., 2018). Ниже представлены результаты оптических наблюдений скоплений галактик из второго каталога Планка, расположенных как на низких, так и на умеренно высоких красных смещениях, до  $z \approx 0.6$ . Получены оптические отождествления и спектроскопические измерения красных смещений для 38 скоплений галактик. Дополнительные результаты по отождествлению скоплений из второго каталога Планка будут также опубликованы в последующих статьях.

## ОТБОР ОБЪЕКТОВ

Работы по фотометрическим и спектроскопическим наблюдениям скоплений из второго каталога Планка были начаты нашей группой в 2015 г. Отбор объектов для наблюдений проводился среди источников преимущественно на северном внегалактическом небе на склонении  $\delta > -20^\circ$ , при этом использовались данные Слоановского обзора (Сообщество СДСС, 2017), а также данным обзора всего неба обсерватории *WISE* (Райт и др., 2010). Для источников Сюняева–Зельдовича, которые не

находятся на полях Слоановского обзора, были получены прямые изображения на 1.5-м Российско-Турецком телескопе (РТТ-150) в фильтрах *gri* Слоановского обзора. Так же, после появления в общем доступе данных обзора *Pan-STARRS1*, использовались прямые изображения из этого обзора (Чэмберс и др., 2016).

Из изображений обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм вычитались изображения всех звезд в поле, положения которых были определены по данным Слоановского обзора или обзора *Pan-STARRS1*. Очищенные от звезд ИК-изображения сглаживались при помощи бета-модели. На таких изображениях скопления галактик хорошо видны вплоть до высоких красных смещений,  $z \approx 1-2$ , и их светимость в ИК-диапазоне хорошо коррелирует с массой скопления (например, Буренин, 2015, 2017). По этим данным производится отбор галактик для последующих спектроскопических наблюдений.

Если сравнивать прямые изображения в фильтрах *gri* Слоановского обзора со сглаженным изображением *WISE* в полосе 3.4 мкм при помощи бета-модели, можно определить области на изображении, на которых мы можем найти галактики, являющиеся членами скопления. Чтобы определить, для каких объектов этих областей требуется измерить спектроскопическое красное смещение, необходимо найти красную последовательность галактик на диаграмме цвет–величина. Для этого использовались фотометрические данные прямых изображений в фильтрах *gri*, полученных на РТТ-150, и данные обзора *Pan-STARRS1*. Красную последовательность галактик на диаграмме цвет–величина составляют эллиптические галактики. Для спектроскопических наблюдений были отобраны наиболее яркие галактики красной последовательности, которые находятся вблизи центров яркости на инфракрасных изображениях *WISE*. Если галактики красной последовательности обрываются скопление неправильной формы, в которых не наблюдалось центральной ярчайшей галактики, для спектроскопических наблюдений отбирались несколько наиболее ярких галактик скопления, и красное смещение скопления определялось как среднее значение между красными смещениями этих галактик. Такой подход к отбору объектов для последующих спектроскопических наблюдений является надежным и позволяет экономить значительное количество наблюдательного времени.

## НАБЛЮДЕНИЯ

Спектроскопические наблюдения выполнялись на 1.5-м Российско-Турецком телескопе (РТТ-150) с помощью спектрографа *TFOSC*<sup>1</sup>, на 1.6-м

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

телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской Солнечной Обсерватории ИСЗФ СО РАН с помощью спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016), на 6-м телескопе БТА САО РАН (Большой телескоп азимутальный) при помощи спектрографов СКОРПИО (Афанасьев и Моисеев, 2005) и СКОРПИО-2 (Афанасьев и Моисеев, 2011), на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто с помощью прибора MOSCA<sup>2</sup>.

В качестве диспергирующих элементов в спектрографах АДАМ, СКОРПИО и СКОРПИО-2 использовались объемные фазовые голографические решетки (VRNG) различных спектральных диапазонов. На телескопе АЗТ-ЗЗИК для получения большинства спектров использовалась гризма 600G с разрешением около 600–900 в диапазоне 3600–7250 Å, а так же 600R с немного более высоким разрешением в диапазоне от 6430–10 000 Å. Обе решетки содержат 600 штрихов на миллиметр, для гризмы 600R использовался дополнительный фильтр, который позволяет убрать второй порядок спектра. На телескопе БТА при использовании спектрографа СКОРПИО использовались гризмы 550R и 550G со схожими характеристиками, для спектрографа СКОРПИО-2 использовалась преимущественно решетка 940@600 для диапазона 3500–8500 Å. На спектрографе TFOSS Российско-Турецкого телескопа использовалась гризма 15 с широким спектральным диапазоном 3230–9120 Å.

Для спектров эллиптических галактик характерно резкое понижение плотности потока в ультрафиолетовой части спектра около фраунгоферовых линий H, K CaII — так называемый провал 4000 Å (например, Брузуал, Шарло, 2003). Кроме того, на спектрах cD-галактик можно отчетливо различить G линию и натриевый дублет, а также небольшое падение потока около триплета линий MgI. Для наблюдений галактик гризмы подбирались таким образом, чтобы с учетом их предполагаемого красного смещения провал в области 4000 Å, а также часть спектра до дублета линий MgI попадала в спектральной диапазон гризмы. Экспозиции выбирались равными 1200 с, в отдельных случаях использовались экспозиции 600 и 900 с. Количество экспозиций также определялось заранее, исходя из того условия, чтобы отношения сигнала к шуму превышало значение, равное примерно 5.

Среди отобранных объектов большинство находится на красных смещениях до  $z = 0.4–0.6$ , поэтому спектры этих объектов можно получить

на телескопах РТТ-150 и АЗТ-ЗЗИК. Для скопленных галактик, оценка красных смещений которых превышает  $z \approx 0.4$ , была подготовлена программа наблюдений на телескопе БТА и на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Для спектрографов, которые установлены на эти телескопы, можно изменить положение длинной щели, поэтому программы готовились таким образом, чтобы при заданном значении позиционного угла щели спектрографа свет как можно большего числа галактик красной последовательности попал на входную щель спектрографа. При наблюдениях на БТА с использованием спектрографа СКОРПИО объекты после каждой экспозиции смещались вдоль щели. Это требуется для того, чтобы учесть влияние интерференции на тонкой подложке ПЗС-матрицы спектрографа СКОРПИО, которая возникает при наблюдениях в ближнем ИК-диапазоне.

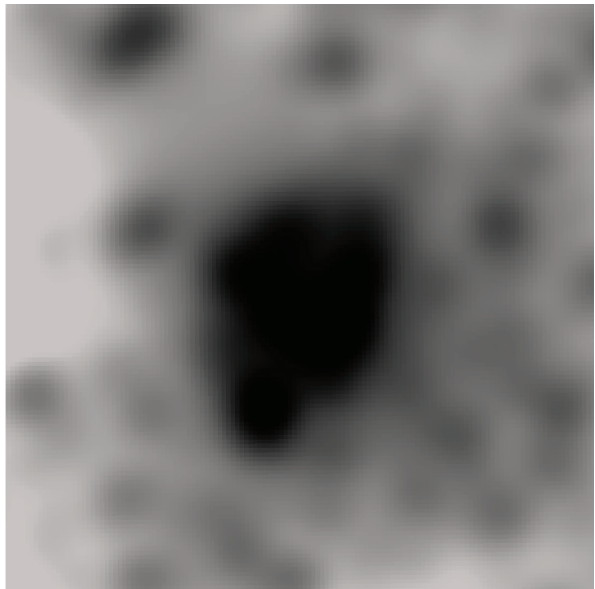
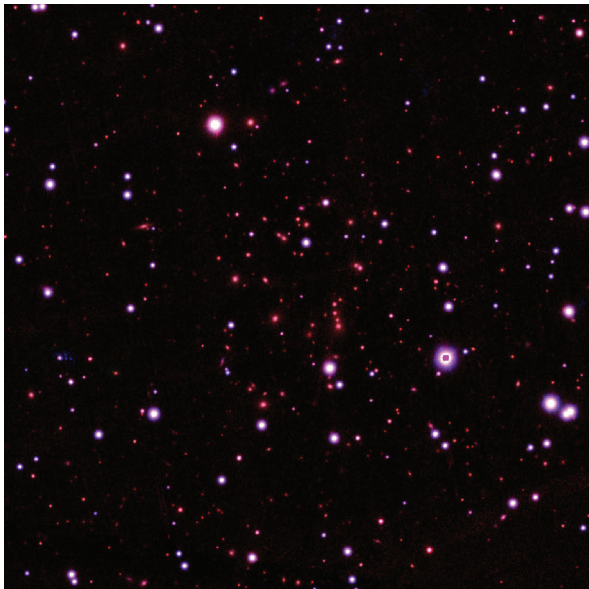
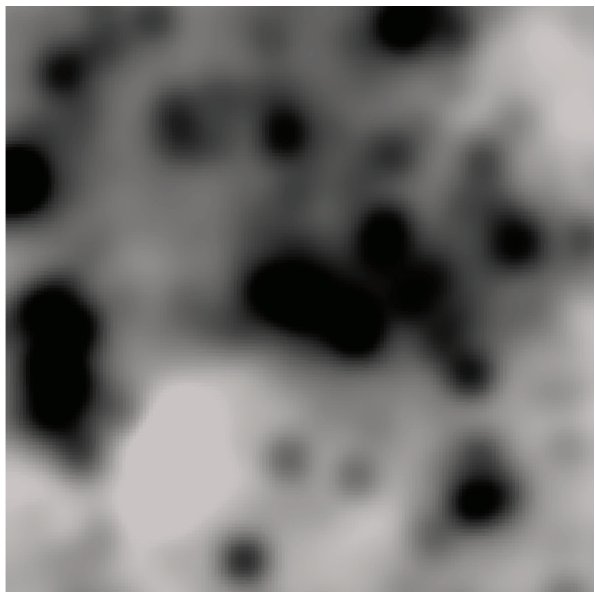
Для обработки спектральных изображений использовалась стандартная процедура обработки изображений длиннощелевых спектрографов. Для каждого изображения применялась процедура вычитания напряжения смещения усилителя, вычитания темнового тока не производилось из-за его малой величины у всех используемых ПЗС-матриц. При получении каждой серии спектральных изображений выполнялась съемка калибровочных изображений ламп непрерывного и линейчатого спектра. При помощи этих калибровочных спектров для каждой серии спектральных изображений выполнялась поправка на плоское поле и вычислялось двумерное дисперсионное решение. Обработка данных была выполнена с помощью программного пакета IRAF<sup>3</sup>, а также собственного математического обеспечения. Для калибровки плотности потока спектральных изображений были получены спектры спектрофотометрических стандартов, взятых из списка стандартов Европейской южной обсерватории<sup>4</sup>.

Глубокие прямые изображения были получены на РТТ-150 в фильтрах фотометрической системы Слоановского обзора *gri*. Прямые изображения получены при качестве изображений точечных источников лучше 1.5". Экспозиции в каждом фильтре составляли 300–600 с. Количество экспозиций рассчитывалось так, чтобы предельная звездная величина достигала 22<sup>m</sup>–24<sup>m</sup> в полосе *r*. Для различных скоплений общая экспозиция в каждом фильтре менялась в пределах от 10 до 60 мин. Между экспозициями в одном фильтре ось наведения телескопа сдвигалась на 10–20" в случайном направлении. Во время обработки фотометрических данных к каждому изображению применялись поправки на смещение усилителя и на

<sup>2</sup><http://w3.caha.es/CAHA/Instruments/MOSCA/>

<sup>3</sup><http://iraf.noao.edu/>

<sup>4</sup><https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards>

PSZ2G131.15–14.72,  $z = 0.223$ PSZ2G118.56–13.14,  $z = 0.278$ 

**Рис. 1.** Слева: псевдоцветное изображение поля в фильтрах *irg* (*RGB*). Справа: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$ . Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений.

плоское поле. После чего у каждого изображения вычитался уровень фона, который аппроксимировался двумерным полиномом второго порядка, исключая поток источников. Изображения совмещались и складывались, при этом использовались алгоритмы, которые позволяют уменьшить систематические ошибки калибровок плоского поля. Фотометрические измерения выполнялись методом апертурной фотометрии, при этом фотометрические калибровки были получены по наблюдениям фотометрических стандартов (Смит и др., 2002),

либо при помощи вторичных стандартов, взятых из данных Слоановского обзора или обзора *Pan-STARRS1*.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Примеры оптического отождествления скоплений галактик показаны на рис. 1. Для каждого скопления на рисунке слева приведено псевдоцветное *RGB* изображение в фильтрах *irg*, которое было либо получено нами при выполнении нашей



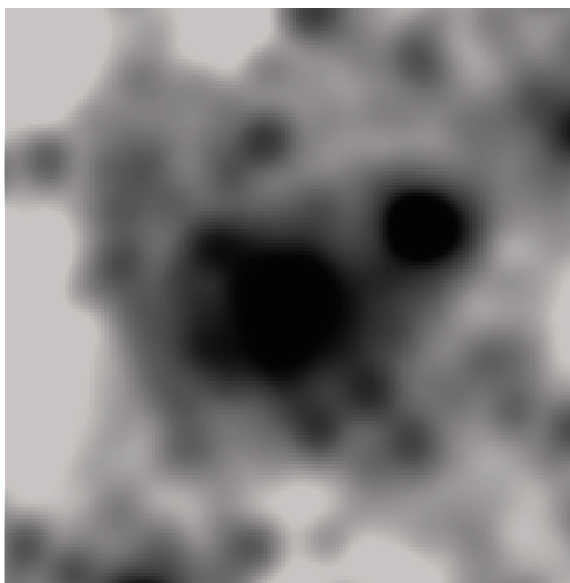
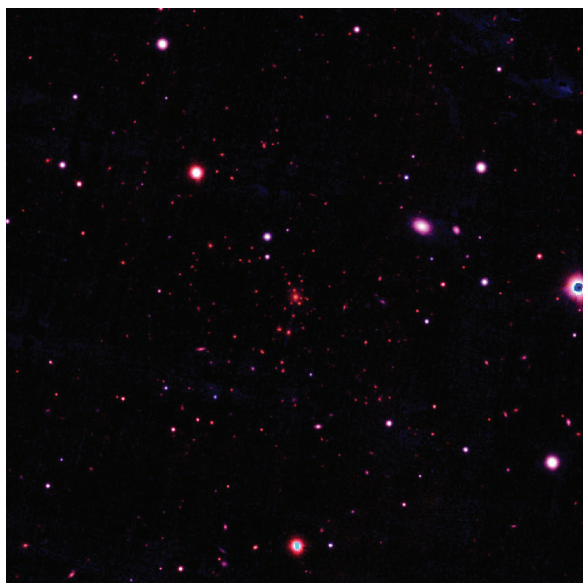
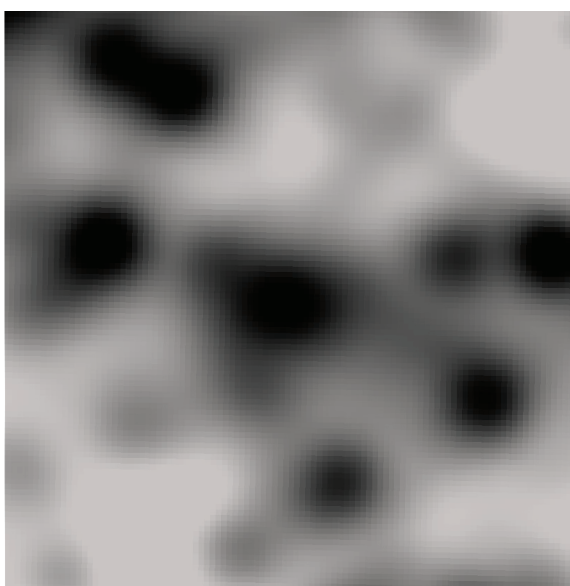
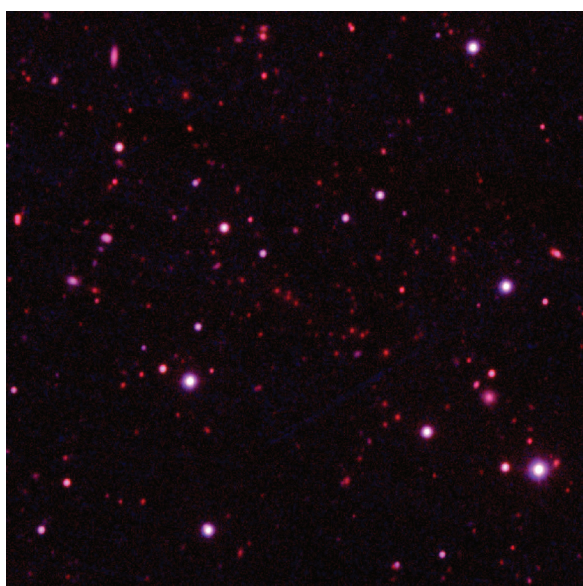
PSZ2G179.45–43.92,  $z = 0.401$ PSZ2G100.22 + 33.81,  $z = 0.599$ 

Рис. 1. Окончание.

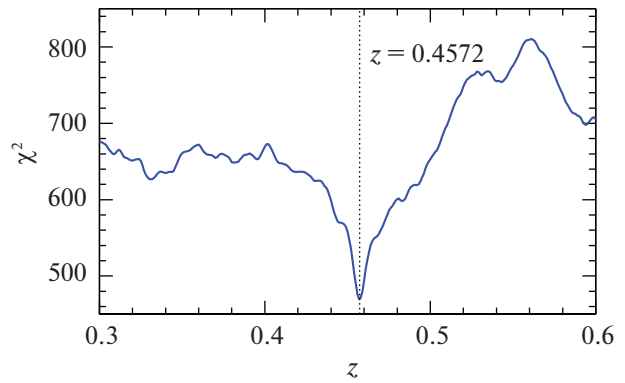
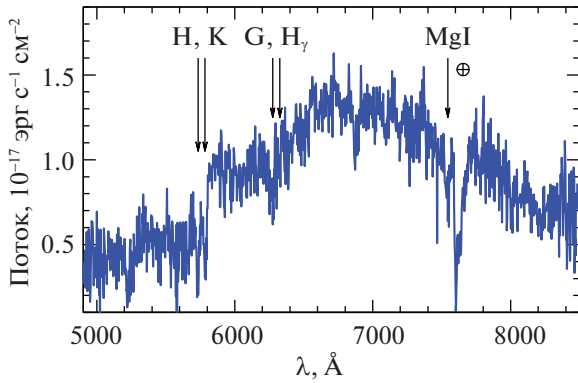
программы на телескопе РТТ-150, либо взято из данных обзора *Pan-STARRS1*. В центре изображения имеется яркая галактика, ее цвет совпадает с цветом окружающих ее галактик. Все эти галактики находятся в области повышенной инфракрасной яркости на сглаженном  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$  изображении *WISE* в полосе 3.4 мкм, что показано для каждого скопления на рисунке справа.

Для спектроскопических наблюдений отбирались наиболее яркие галактики, цвет которых согласуется с цветом красной последовательности и положение которых совпадает с центром поверх-

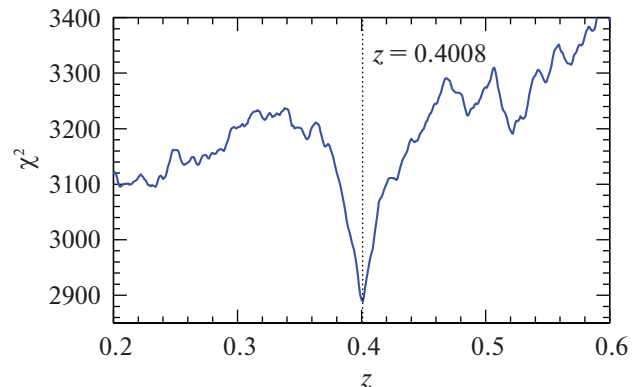
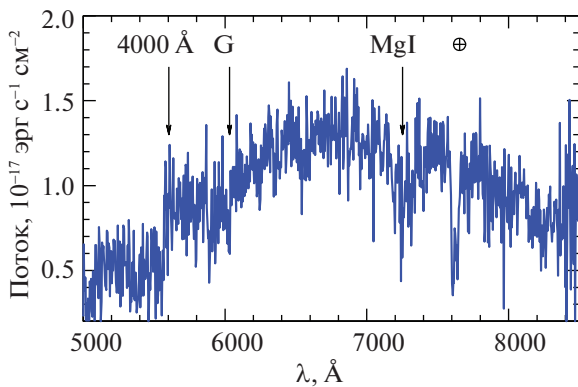
ностной яркости на сглаженном инфракрасном изображении обзора *WISE*. Масса сD-галактик значительно больше массы других галактик, входящих в скопление, к тому же они находятся практически в центре скоплений. Поэтому собственные движения этих галактик должны быть малы и их красные смещения сD-галактик должны с более высокой точностью совпадать с красными смещениями скоплений, в которых они находятся.

На рис. 2 приведены примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений для спектрографа СКОРПИО-2 телескопа БТА.

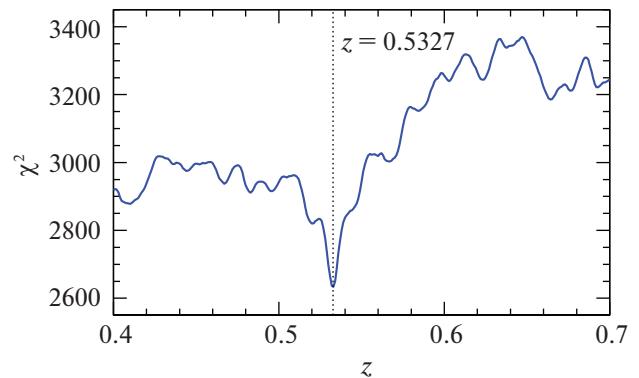
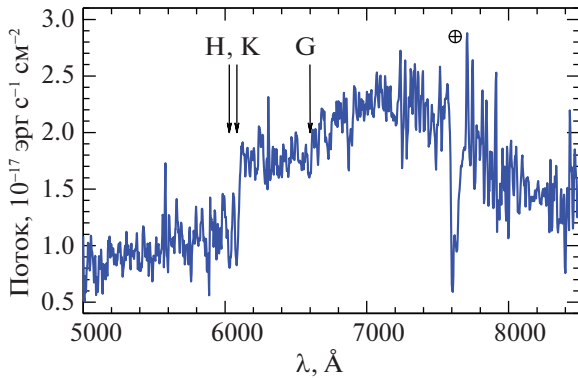
PSZ2G206.75–33.21



PSZ2G179.45–43.92



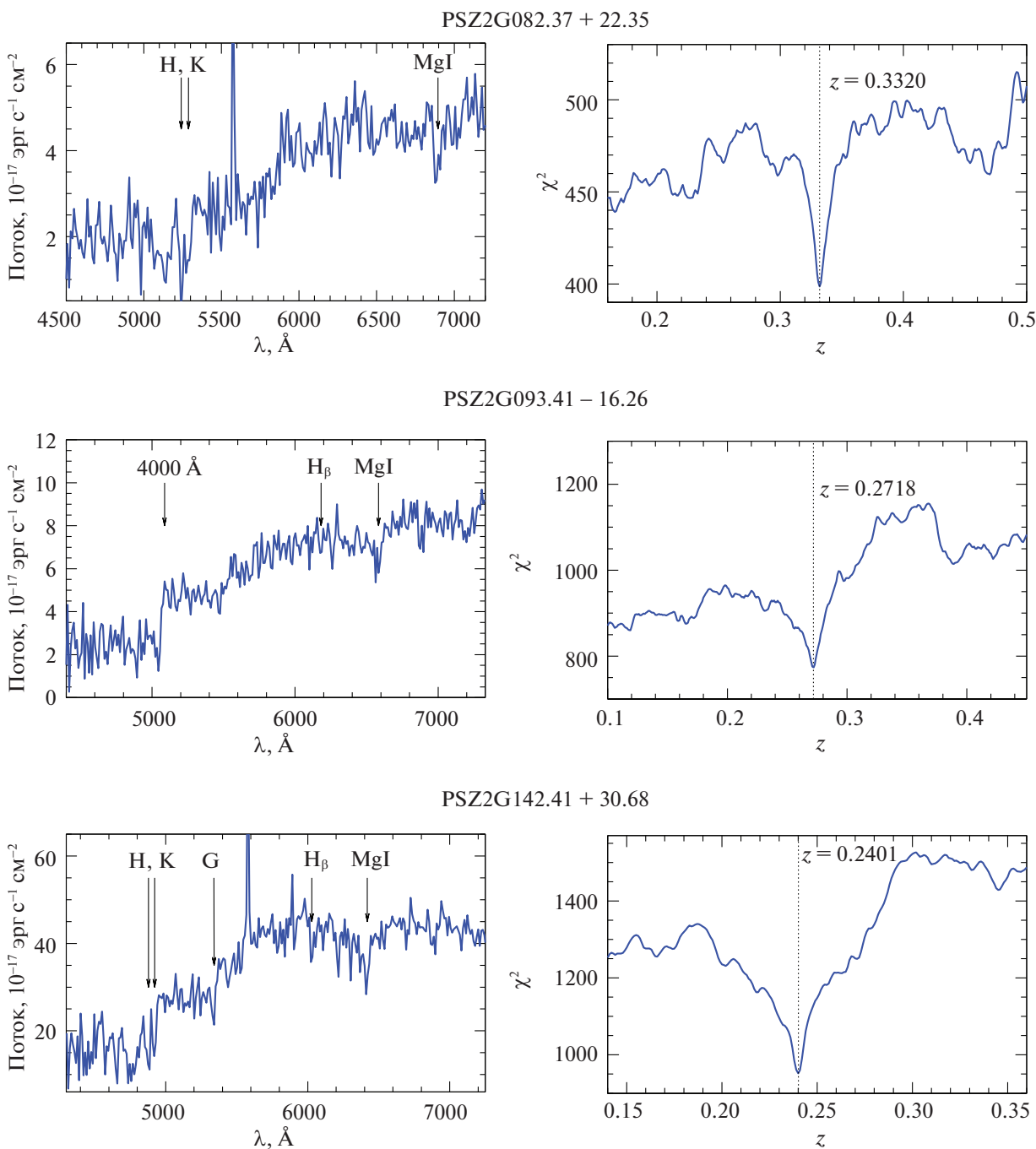
PSZ2G202.61–26.26



**Рис. 2.** Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа СКОРПИО-2. Справа: значение  $\chi^2$ , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений для спектрографа АДАМ телескопа АЗТ-33ИК показаны на рис. 3. На этих рисунках для каждого скопления слева показан измеренный спектр ярчайшей галактики скопления с указанием положения отождествленных линий фраунгоферовской серии и линий водорода и гелия, справа — значение  $\chi^2$ , которое получено в резуль-

тате сравнения данного спектра с шаблоном синтетического спектра звездного населения возрастом 11 млрд. лет, металличностью  $Z = 0.02$ , взятого из работы Брузуал и Шарло (2003). Значение красного смещения принимается равным значению локального минимума распределения  $\chi^2$ . Ошибка измерения красного смещения составляет величину примерно  $\delta z = 0.001–0.003$ . Для всех скопле-



**Рис. 3.** Примеры спектроскопических измерений красных смещений скопления. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-3ЗИК при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ. Справа: значение  $\chi^2$ , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

ний, представленных в нашей работе, результаты измерения спектроскопических красных смещений галактик скопления согласуются с оценкой фотометрического красного смещения скопления, полученного по положению красной последовательности галактик на диаграмме цвет—величина.

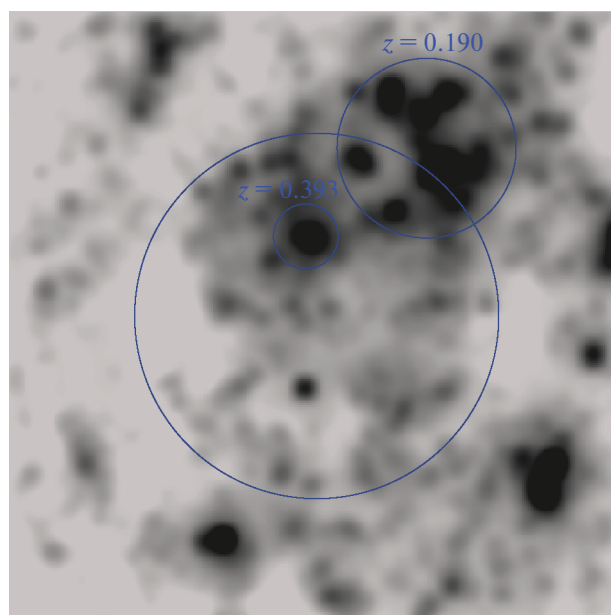
В табл. 1 приведен список скоплений галактик,

которые были отождествлены по результатам нашей работы, и для которых были получены достоверные результаты спектроскопических измерений красных смещений. В таблице приводятся названия скоплений галактик из второго каталога источников Сюняева—Зельдовича обсерватории им. Планка, координаты ( $\alpha$   $\delta$ ) оптического центра

Таблица 1. Скопления галактик из второго каталога обсерватории им. Планка

Название	Координаты (J2000)		$z$	$N_{gal}$	Ссылки	Замечания
	$\alpha$	$\delta$				
PSZ2G009.04+31.09	16 18 25.4	-04 11 47	0.242	3	1*	CO
PSZ2G033.83-46.57	21 45 12.3	-18 42 59	0.441	1	2	
PSZ2G045.20+15.63	18 16 04.6	+17 46 59	0.133	1		CO
PSZ2G045.47+17.80	18 08 14.7	+18 51 53	0.376	1		
PSZ2G056.38+23.36	18 01 16.5	+30 23 20	0.298	1		
PSZ2G066.85+22.48	18 20 13.0	+39 17 34	0.249	2		
PSZ2G067.21-20.49	21 13 22.7	+17 59 38	0.366	2	1, 3	
PSZ2G069.35-15.58	21 02 38.0	+22 42 27	0.096	1	1	
PSZ2G069.47-29.06	21 46 02.1	+14 01 26	0.392	1	1*, 3*	*
PSZ2G079.36+38.06	16 59 18.6	+52 04 48	0.301	4		
PSZ2G082.37+22.35	18 44 26.6	+53 00 48	0.332	1		
PSZ2G086.35-13.94	21 49 42.5	+35 43 08	0.279	2		CO
PSZ2G090.12-13.87	22 03 36.2	+38 04 46	0.073	1		
PSZ2G093.41-16.26	22 24 00.1	+38 00 56	0.268	2	1*	
PSZ2G094.31-11.31	22 12 59.2	+42 35 03	0.204	1	1*	CO
PSZ2G098.44+56.59	14 27 25.0	+55 45 00	0.131	1	3, 4*	
PSZ2G100.22+33.81	17 13 42.0	+69 21 33	0.599	5	1*	
PSZ2G105.00+39.68	15 52 52.9	+70 31 39	0.199	2		
PSZ2G106.11+24.11	19 21 31.8	+74 33 26	0.101	1	5	<i>fg</i>
PSZ2G106.21+26.32	18 48 31.2	+75 03 30	0.114	1		<i>fg</i>
PSZ2G118.49+48.17	13 23 55.0	+68 39 31	0.355	1		
PSZ2G118.56-13.14	00 25 13.4	+49 30 35	0.278	1		
PSZ2G120.30+44.47	13 16 38.1	+72 32 18	0.261	1		
PSZ2G125.84-18.72	01 06 56.0	+44 03 39	0.188	5	1*	
PSZ2G126.36-19.11	01 09 26.7	+43 37 06	0.200	1	1*	
PSZ2G126.72-21.03	01 10 24.9	+41 41 18	0.198	1	1*, 3	<i>fg</i> , *
PSZ2G131.15-14.72	01 38 44.4	+47 22 39	0.223	1		
PSZ2G142.41+30.68	07 56 35.8	+72 35 31	0.240	1		
PSZ2G147.17+42.67	09 50 00.6	+64 55 27	0.440	1		<i>SDSS</i>
PSZ2G159.40-40.67	02 42 23.0	+14 15 15	0.254	1		
PSZ2G171.22-26.03	03 52 47.1	+19 21 51	0.358	2		CO
PSZ2G179.45-43.92	03 19 18.4	+02 05 35	0.401	1	1*, 3*	
PSZ2G188.33-34.98	04 04 18.0	+02 23 56	0.273	1		CO, <i>ZwCl</i> 401.8+0219
PSZ2G202.61-26.26	04 59 51.9	-03 24 42	0.533	3		
PSZ2G206.75-33.21	04 41 39.2	-09 46 32	0.457	1		
PSZ2G210.57-44.61	04 03 33.5	-17 06 49	0.142	1		<i>Abell</i> 472
PSZ2G323.96+43.81	13 54 04.6	-16 30 08	0.363	1		
PSZ2G325.19+49.12	13 49 57.7	-11 13 40	0.205	2		

**Примечание.** Ссылки: 1 — Стрелянская и др. (2018); 2 — Амдео и др. (2017); 3 — Буренин (2017); 4 — Сообщество Планка (2016в); 5 — Боада и др. (2018); \* — опубликованное в указанной работе красное смещение скопления является фотометрической оценкой; Замечания: \* — имеется обсуждение в тексте; CO — поле источника попадает в маску монооксида углерода из работы Хатри (2016); *fg* — остаток группы; *SDSS* — красное смещение подтверждается спектроскопическими данными Слоановского обзора.



**Рис. 4.** Изображения поля источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47–29.06 из обзора WISE в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$ . Центр изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа  $5'$ . На изображении справа видно, что скопление на красном смещении  $z = 0.392$  находится значительно ближе к центру источника.

скоплений, результат спектроскопических измерений красных смещений скоплений, число галактик скопления, для которых получены измерения красных смещений, а также ссылки и замечания.

Как видно из этой таблицы, некоторые были ранее отождествлены в других работах (Амодео и др., 2017; Буренин, 2017; Стреблянская и др., 2018; Боада и др., 2018). Однако во многих случаях для этих скоплений ранее были опубликованы фотометрические оценки красных смещений, что указано в таблице. Так например, ранее для скопления PSZ2 G098.44+56.59 во втором каталоге источников Сюняева–Зельдовича обзора Планка была приведена фотометрическая оценка  $z$ , полученная в результате работы алгоритма *redMaPPer* (Рыкофф и др., 2014). Кроме того, значительная часть опубликованных ранее красных смещений для скоплений отождествленных по данным Слоановского обзора также являются фотометрическими оценками (Буренин, 2017; Стреблянская и др., 2018).

В колонке с замечаниями отмечены источники, поля которых попадают в маску монооксида углерода из работы Хатри (2016). Кроме того, на оптических изображениях этих источников почти во всех случаях хорошо видны молекулярные облака. Излучение монооксида углерода, который содержится в этих молекулярных облаках, может быть причиной обнаружения ложного сигнала Сюняева–Зельдовича в обзоре Планка (Хатри, 2016), поэтому оценка массы скопления по данным

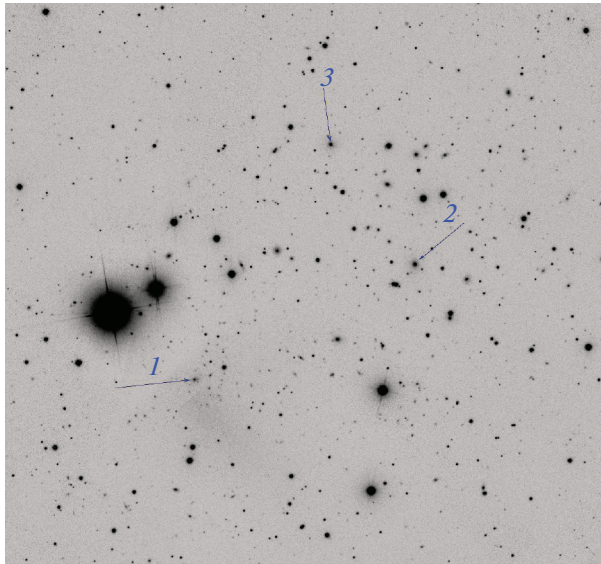
обзора Планка для этих скоплений может быть в значительной степени завышенной.

В таблице отмечены скопления, которые по своим характеристикам оказываются похожи на так называемые остатки групп — группы галактик, в которых доминирует яркая центральная галактика, тогда как все остальные галактики имеют значительно меньшие яркости (Понман и др., 1994; Вихлинин и др., 1999; Воеводкин и др., 2010). Пример такого скопления приведен ниже.

#### Замечания по отдельным объектам

**PSZ2 G069.47–29.06.** В поле данного источника излучения Сюняева–Зельдовича были найдены две красные последовательности на диаграмме цвет–величина по данным *Pan-STARRS1*. Они соответствуют двум превышениям яркости ИК-излучения, как это показано на рис. 4. Для двух самых ярких галактик красной последовательности с меньшим значением фотометрической оценки красного смещения проводились спектроскопические наблюдения на телескопе АЗТ-ЗЗИК, они указаны стрелочками под номером 2 и 3 на рис. 5. Результаты спектроскопических измерений красных смещений этих галактик согласуются, их красное смещение равно  $z = 0.190$ . Галактика под номером 1 является ярчайшей галактикой красной последовательности, расположенной на большем красном смещении. Значение красного смещения этой галактики  $z = 0.392$ , что фактически означает,





**Рис. 5.** Изображение поля источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47–29.06 в фильтре  $i$ . Пронумерованными стрелочками отмечены объекты, для которых проводились спектроскопические наблюдения на телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории.

что эта галактика является сD-галактикой вдвое более далекого скопления.

На основе имеющихся данных о яркости в инфракрасном диапазоне трудно определить, какое скопление является более массивным. Однако более далекое скопление галактик расположено ближе к центру источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G069.47–29.06. Поэтому в табл. 1 этот источник отождествлен со скоплением на красном смещении  $z = 0.392$ . Таким же образом поступили наши коллеги в работе Стреблянского и др. (2018), однако в работе Буренина (2017) этот источник был отождествлен с более близким скоплением, расположенным на  $z = 0.190$ , поскольку оно все же имеет более высокую светимость в ИК-диапазоне. Отметим, что и в том и другом случае отождествление не является однозначным, поскольку по имеющимся данным невозможно определить, какое из скоплений дает больший вклад в сигнал Сюняева–Зельдовича.

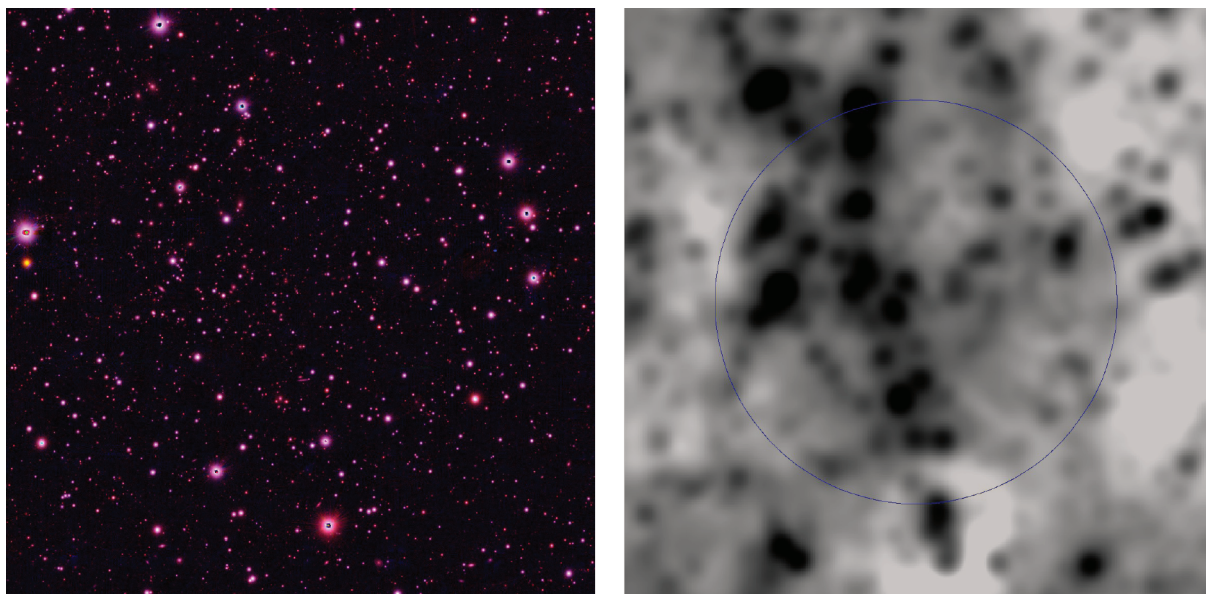
**PSZ2 G125.84–18.72.** Этот объект представляет собой пример рассеянного скопления, которое имеет очень большой угловой размер. На рис. 6 справа показано инфракрасное изображение *WISE* поля источника излучения Сюняева–Зельдовича. На инфракрасном изображении имеется множество ярких источников, образованных галактиками на красном смещении около  $z = 0.1883$ , которые составляют одну красную последовательность. Эти галактики образуют структуру, которая имеет угловой размер более  $10'$ , что соответствует линейному размеру около 2 Мпк. Вполне возможно, что часть этих галактик не входит в вириализованную область, а находится в структуре вокруг скопления.

Для спектроскопических наблюдений было отобрано несколько наиболее ярких галактик красной последовательности, которые находятся в центральных областях повышенной ИК-яркости. На рис. 7 пронумерованными стрелочками обозначены отобранные для наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК галактики. Для галактик под номером 1, 2, 3, 5, 6, 7 были получены спектроскопические изображения. Данные спектроскопических измерений красных смещений этих галактик не являются достоверными для галактики под номером 3, для остальных галактик данные измерений достоверные и согласуются между собой. Среднее значение красного смещения скопления галактик PSZ2 G125.84–18.72 по данным измерений красных смещений пяти ярчайших галактик красной последовательности равно  $z = 0.1883$ .

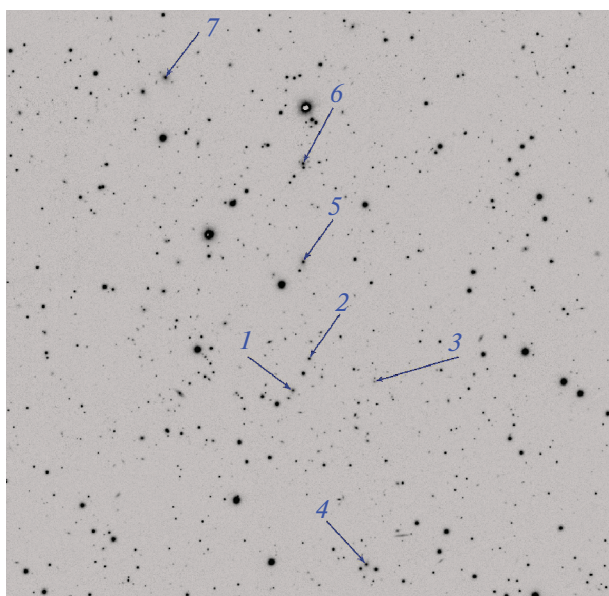
**PSZ2 G126.72–21.03.** Объект PSZ2 G126.72–21.03, изображения которого приведены на рис. 8, является примером так называемого остатка группы (Понман и др., 1994; Вихлинин и др., 1999; Воеводкин и др., 2010). В такой группе яркость сD-галактики значительно превышает яркость других галактик красной последовательности. Тем не менее такой объект также можно отождествить по наличию красной последовательности на диаграмме цвет–величина. Красная последовательность галактик для этого остатка группы приведена на рис. 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе представлены результаты оптического отождествления и измерений красных



**Рис. 6.** Изображение поля источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G125.84–18.72. Слева: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Справа: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$ . Центр изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа  $5'$ . На изображениях видно, что скопление галактик является рассеянным.



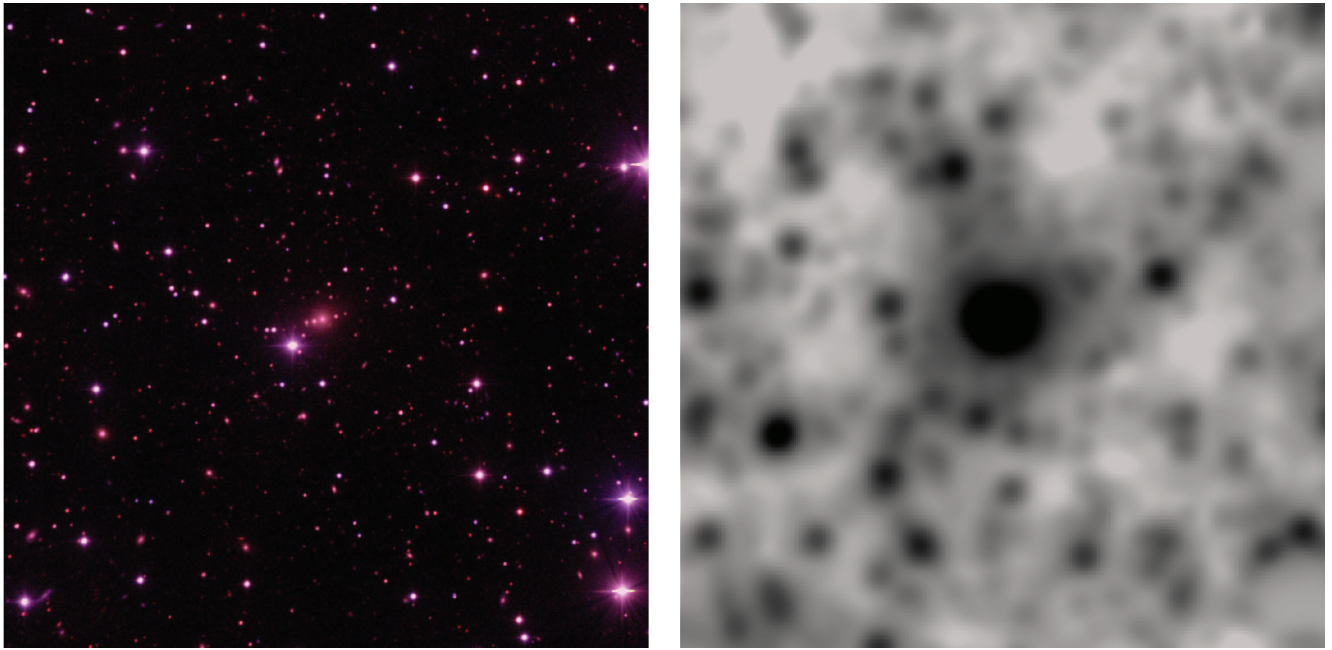
**Рис. 7.** Изображение поля источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G125.84–18.72 в фильтре *i*. Пронумерованными стрелочками отмечены объекты, которые были включены в программу спектроскопических наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК.

смещений скоплений галактик из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка, расположенных, большей частью, на северном внегалактическом небе на склонении  $\delta > -20^\circ$ . В нашей работе среди источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка обнаружено 23 неизвестных ранее скопления галактик. Для 38 скоплений галактик получены

измерения спектроскопических измерений красных смещений, при этом для 33 из них такие измерения опубликованы впервые.

За последние три года нашей научной группой на указанных ранее телескопах проводились наблюдения значительно большего числа скоплений второго каталога с неизмеренными красными смещениями, чем указано выше. В их число

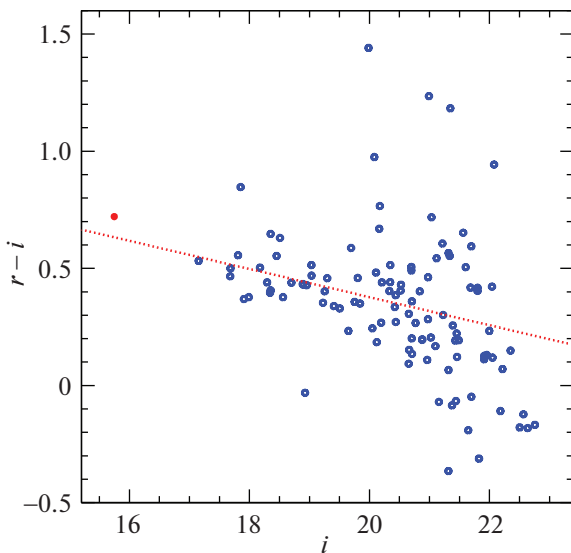




**Рис. 8.** Изображение поля источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G126.72–21.03. Слева: псевдоцветное изображение поля обзора *Pan-STARRS1* в фильтрах *irg* (*RGB*). Справа: изображение обзора *WISE* в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и свернутое с  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$ . Центр изображений совпадает с центром источника, диаметр большой окружности справа  $5'$ .

входит 7 наиболее далеких скоплений на красных смещениях  $z \approx 0.7–0.9$ , ранее опубликованных в работе Буренин и др. (2018). Скопления галактик, для которых не удалось получить достоверных ре-

зультатов измерений спектроскопических красных смещений, будут заново включены в нашу наблюдательную программу. Наша научная группа продолжит наблюдения этих скоплений галактик для получения достоверных результатов их красных смещений, эти данные будут опубликованы в наших последующих работах.



**Рис. 9.** Диаграмма цвет–величина галактик в поле источника излучения Сюняева–Зельдовича PSZ2 G126.72–21.03 по данным *Pan-STARRS1*. Прерывистой линией на диаграмме обозначено положение красной последовательности галактик. Красным кругом обозначена cD-галактика скопления.

Кроме того, нашей научной группой ведутся активные наблюдения скоплений галактик из расширенного каталога обзора Плана (Буренин, 2017, Б17) по программе поиска наиболее массивных скоплений галактик в наблюдаемой части Вселенной. В этом каталоге содержится более 400 отождествленных массивных скоплений галактик, имеющих массу  $M_{500} > 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ , для которых отсутствуют спектроскопические измерения красных смещений. К настоящему времени были измерены красные смещения более 50 скоплений галактик из этого каталога. Эти данные будут также опубликованы в наших последующих статьях. Все эти данные будут использованы в дальнейшем для отождествления массивных скоплений галактик, которые будут обнаружены в рентгеновском обзоре всего неба обсерватории Спектр–Рентген–Гамма (СРГ).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 18-12-00520. Авторы благодарят ТЮБИТАК, ИКИ РАН, КФУ и АН РТ за поддержку наблюдений скоплений галактик на Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150), а также ИКИ РАН, ИСЗФ СО РАН и ЦКП “Ангара” за поддержку наблюдений скоплений на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории. В значительной степени результаты работы основаны также на данных, полученных на 6-м телескопе САО РАН (БТА) при помощи спектрографов СКОРПИО и СКОРПИО-2, а также на данных, полученных на 2.2-м и 3.5-м телескопах обсерватории Калар Альто Испано-Германского астрономического центра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Амодео и др. (S. Amodeo, S. Mei, S.A. Stanford, C.R. Lawrence, J.G. Bartlett, D. Stern, et al.), arXiv:1711.00021.
- Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 194 (2005). [V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 214 (2005)].
- Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Balt. Astron.* **20**, 363–370 (2011).
- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., *Астрофиз. бюллетень* **71**, 514 (2016). [V.L. Afanasiev, et al., *Astrophys. Bull.* **71**, 479 (2016)].
- Буренин и др. (R.A. Burenin, A. Vikhlinin, A. Hornstrup, H. Ebeling, H. Quintana, and A. Mescheryakov), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 561 (2007).
- Буренин Р.А., Вихлинин А.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 395 (2012). [R.A. Burenin and A.A. Vikhlinin, *Astron. Lett.* **38**, 395 (2012)].
- Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **41**, 189 (2015) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **41**, 167 (2015)].
- Буренин Р.А., Амаросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С. и др. **42**, 333 (2016) [R. A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **41**, 295 (2016)].
- Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **43**, 507 (2017)].
- 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)].
- Буше и др. (V. Boucher, S. de Visscher, and C. Ringeval), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130**, 992 (2018).
- Брузуал, Шарло (G. Bruzual and S. Charlot), *MNRAS* **344**, 1000 (2003).
- Боада и др. (S. Boada, J.P. Hughes, F. Menanteau, P. Doze, L.F. Barrientos, and L. Infante), *Astrophys. J.*, in press (2018); arXiv:1809.06378.
- Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, A. Hornstrup, H. Quintana, W. Forman, C. Jones, and M. Way), *Astrophys. J.* **520**, L1 (1999).
- Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, A.V. Kravtsov, S.S. Murray, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009a).
- Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, S.S. Murray, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1060 (2009a).
- Воеводкин и др. (A. Voevodkin, K. Borozdin, K. Heitmann, S. Habib, A. Vikhlinin, A. Mescheryakov, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **708**, 1376 (2010).
- 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)].
- Понман и др. (T.J. Ponman, D. J. Allan, L.R. Jones, et al.), *Nature* **369**, 462 (1994).
- 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).
- Рыкофф и др. (E.S. Rykoff, E. Rozo, M.T. Busha, C.E. Cunha, A. Finoguenov, A. Evrard, et al.), *Astrophys. J.* **785**, 104 (2014).
- Смит и др. (A. Smith, D.L. Tucker, S. Kent, M.W. Richmond, M. Fukugita, and T. Ichikawa), *Astron. J.* **123**, 2121 (2002).
- Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014a).
- Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014a); arXiv:1303.5089.
- Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015a); arXiv:1407.6663.
- Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A14 (2015a); arXiv:1502.00543.
- Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016a); arXiv:1502.01597.
- Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016a); arXiv:1502.01598.

29. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **586**, A139 (2016a); arXiv:1504.04583.
30. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 25 (2017).
31. Стреблянска 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).
32. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.B. Zeldovich), *Comm. Astrophys. Sp. Phys.* **4**, 173 (1972).
33. Хатри (R. Khatri), *Astron. Astrophys.* **592**, A48 (2016).
34. Чэмберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, L. Denneau, P.W. Draper, et al.), arXiv:1612.05560 (2016).