

## СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА ПОЛЯ ЛОКМАНА ТЕЛЕСКОПА еРОЗИТА НА БОРТУ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

© 2021 г. И. А. Зазнобин<sup>1\*</sup>, Р. А. Буренин<sup>1</sup>, А. Р. Ляпин<sup>1</sup>,  
Г. А. Хорунжев<sup>1</sup>, В. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, А. А. Гроховская<sup>2</sup>, С. Н. Додонов<sup>2</sup>,  
М. В. Еселевич<sup>3</sup>, Р. И. Уклеин<sup>2</sup>, И. Ф. Бикмаев<sup>4,5</sup>, И. М. Хамитов<sup>4,6</sup>,  
М. Р. Гильфанов<sup>1,7</sup>, Н. С. Лыскова<sup>1</sup>, П. С. Медведев<sup>1</sup>, Р. А. Сюняев<sup>1,7</sup>

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

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Казанский федеральный университет, Казань, Россия

<sup>5</sup>Академия наук Татарстана, Казань, Россия

<sup>6</sup>Государственная обсерватория ТЮБИТАК, Анталья, Турция

<sup>7</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 15.12.2020 г.

После доработки 29.12.2020 г.; принята к публикации 29.12.2020 г.

Представлены первые результаты программы оптических наблюдений скоплений галактик из рентгеновского обзора поля Локмана телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ. Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений 11 скоплений галактик, которые были отождествлены в оптическом диапазоне среди протяженных рентгеновских источников обзора СРГ/еРОЗИТА, используя данные обзоров неба в оптическом и ИК-диапазонах. Спектроскопические наблюдения проводились, в конце 2019 г. – начале 2020 г. на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН и на 6-м Большом Азимутальном Телескопе САО РАН (БТА).

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

**DOI:** 10.31857/S0320010821030098

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Поле Локмана (“дыра Локмана”) представляет собой область с наименьшей колонкой нейтрального водорода (Локман и др., 1986; Дикей, Локман, 1990). В этой области наблюдается колонковая плотность нейтрального водорода  $N_H = 5.7 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$  (Хайзингер и др., 1993), что позволяет с большей чувствительностью наблюдать в рентгеновском диапазоне слабые источники, такие как квазары или скопления галактик (см., например, Хайзингер и др., 1993, 2005; Янг и др., 2004; Матеос и др., 2005).

Наблюдение поля Локмана с помощью телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021; Предель и др., 2020)

было выполнено в ноябре 2019 г. в рамках программы подтверждения характеристик телескопов обсерватории. В результате этих наблюдений был получен обзор области площадью около 20 кв. градусов. Среднее значение экспозиции в каждой точке составило около 8 ксек или около 4.8 ксек с поправкой на виньетирование. Такой обзор, хотя и является менее глубоким по сравнению с обзорами телескопов Чандра и ХММ-Ньютон, однако он покрывает значительно большую площадь на небе, что, в частности, позволяет обнаружить в этой области неба значительно большее число скоплений галактик по сравнению с обзорами телескопов Чандра и ХММ-Ньютон.

Всего в обзоре поля Локмана в качестве протяженных рентгеновских источников обнаружено около 200 скоплений галактик. Подробное описание рентгеновских характеристик этого обзора вы-

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

ходит за рамки этой статьи. Здесь мы отметим, что поскольку поле Локмана имеет довольно хорошее спектроскопическое покрытие в Слоановском обзоре (Сообщество СДСС, 2017), красные смещения скоплений уже доступны вплоть до  $z \approx 0.5$ . Основную сложность здесь представляют измерения красных смещений более далеких скоплений. Таких скоплений в выборке оказывается всего несколько десятков и поэтому имеется возможность получить спектроскопические измерения красных смещений для всей выборки за относительно небольшое время. Это позволит в дальнейшем получить надежные измерения рентгеновской функции светимости и функции масс скоплений галактик на высоких красных смещениях по данным этого обзора.

Для того чтобы провести эти измерения, в первой половине 2020 г. нами была начата программа спектроскопических наблюдений скоплений галактик из обзора поля Локмана SRG/eROZITA на 6-м телескопе САО РАН (Большой телескоп азимутальный, БТА). Наблюдения некоторых скоплений проводились также на 1.6-м Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН (АЗТ-ЗЗИК). В этой статье приведены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 11 скоплений галактик, большинство которых расположено на  $z > 0.5$ , а два скопления галактик расположены на красных смещениях  $z > 0.9$ .

## 2. ОТБОР ОБЪЕКТОВ

Отбор объектов проводился среди протяженных источников рентгеновского излучения обзора поля Локмана SRG/eROZITA. Методы поиска и отбора протяженных рентгеновских источников в обзоре поля Локмана будут обсуждаться в последующих статьях. Примеры изображений этих источников для далеких скоплений галактик приведены на рис. 1. Для отождествления скоплений галактик мы использовали данные обзоров *Pan-STARRS1* (Чэмберс и др., 2016) и *DESI LIS* (Дей и др., 2019) в оптическом диапазоне и данные космической обсерватории *WISE* (Райт и др., 2010; Мейснер и др., 2017).

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 (Мейснер и др., 2017), очищенные от звезд и сглаженные с помощью бета-модели (Сарацин, 1986) радиуса 24". Примеры этих изображений, вместе с псевдоцветными изображениями *DESI LIS*, также приведены на рис. 1.

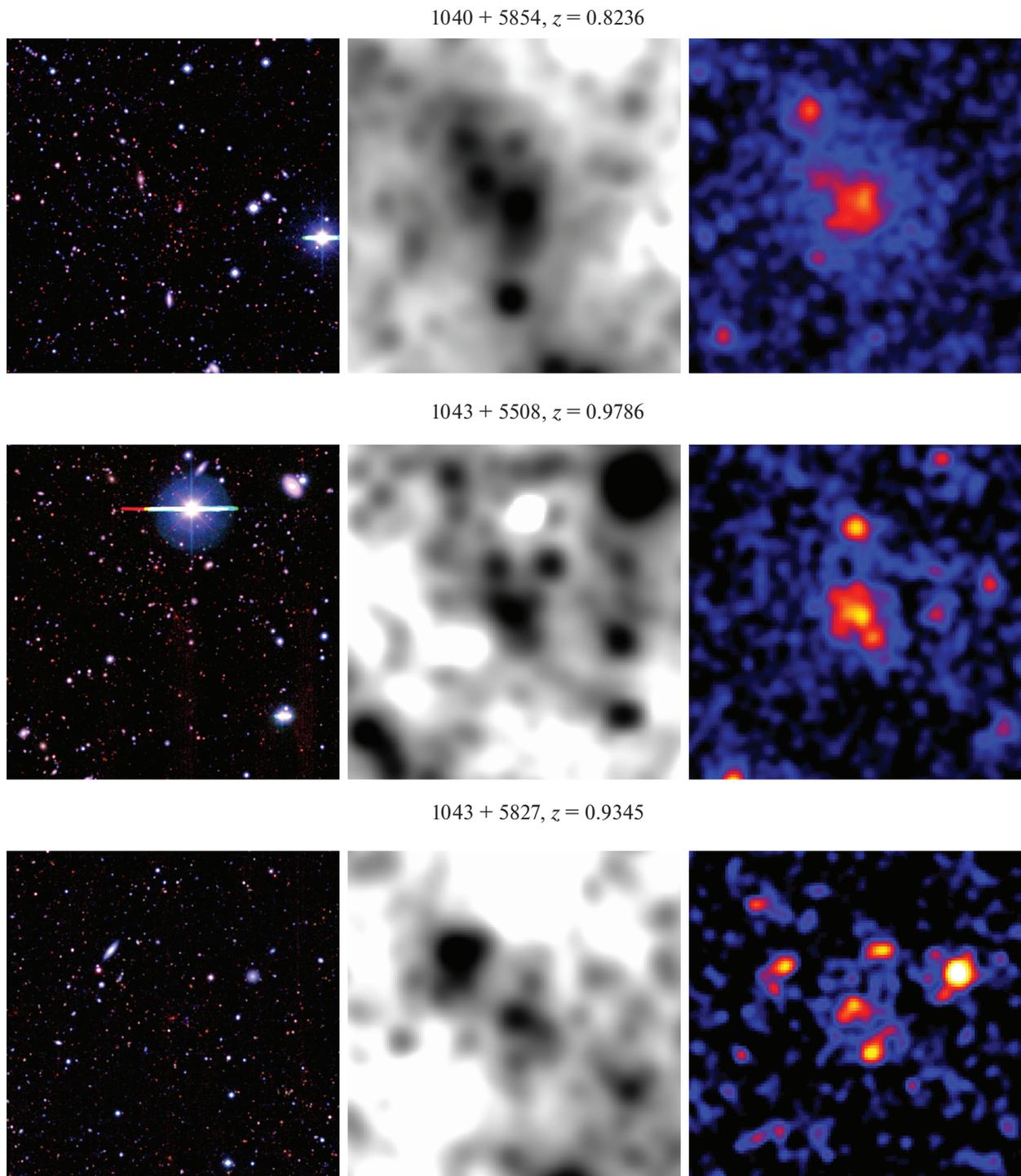
На этом рисунке показаны и рентгеновские изображения скоплений. Видно, что область повышенной рентгеновской яркости хорошо согласуется с областью повышенной поверхностной яркости на ИК-изображениях обзора *WISE*. Поиск галактик, входящих в скопление, осуществлялся среди галактик, расположенных внутри этой области.

Отбор галактик для получения их спектров проводился путем поиска красной последовательности галактик на диаграмме цвет—величина для объектов в поле превышения ИК-яркости. После этого мы выбирали наиболее яркие галактики красных последовательностей для последующих спектроскопических наблюдений. Более подробно методика отбора галактик скоплений для спектроскопических наблюдений описана нами ранее в статьях по измерению красных смещений скоплений галактик из обзора космической обсерватории им. Планка Сообщество Планка (2015); Буренин и др. (2018); Зазнобин и др. (2019, 2020). Эта методика позволяет получать надежные спектроскопические измерения красных смещений и позволяет значительно экономить наблюдательное время.

## 3. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на 6-м телескопе БТА на спектрографе СКОРПИО-2 (Афанасьев и Моисеев, 2011) и на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК с использованием спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016) в декабря 2019 г. — июне 2020 г. При наблюдениях использовались в качестве диспергирующего элемента объемные фазовые голографические решетки (VRHG). Выбор решеток осуществлялся таким образом, чтобы на спектрах эллиптических галактик, как минимум, 4000 Å — провал, линии К, Н кальция и линия G фраунгоферовой серии попадали в спектральный диапазон решетки. Наблюдения на БТА проводились для объектов, имеющих как можно большую фотометрическую оценку красного смещения  $z_{\text{phot}} > 0.5$ . Наблюдения на АЗТ-ЗЗИК проводились для объектов с фотометрической оценкой красного смещения  $z_{\text{phot}} < 0.6$ . Это позволяет наиболее эффективно использовать наблюдательное время на телескопах при наблюдениях как для близких  $z = 0.1-0.4$ , так и для далеких  $z > 0.7$  скоплений галактик.

При наблюдениях на спектрографе СКОРПИО-2 использовалась, в основном, решетка VRHG940@600 940 штрихов на миллиметр со спектральным диапазоном 3500–8500 Å, спектральным разрешением (FWHM) 7.0 Å для щели



**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  $\beta$ -моделью радиусом  $24''$ , справа: рентгеновские изображения обзора *СРГ/еРОЗИТА*, сглаженные гауссианой радиусом  $12''$ . Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений. Размер поля  $7.5' \times 7.5'$  (семь с половиной угловых минут).

1<sup>''</sup>. Для объекта 1043 + 5508 наблюдения проводились в решетке VPHG1200@860 1200 штрихов на миллиметр со спектральным диапазоном 7445–10900 Å, спектральным разрешением (FWHM) 5.1 Å для щели 1<sup>''</sup>. Выбор этой решетки обусловлен тем, что фотометрическая оценка красного смещения этого объекта приблизительно составляет  $z_{\text{phot}} \approx 1$ . На таком красном смещении спектральные особенности эллиптических галактик находятся в спектральном диапазоне этой решетки, но выходят за пределы диапазона решетки VPHG940@600. При наблюдениях на спектрографе АДАМ наблюдения проводились в решетке VPHG600G с 600 штрихов на миллиметр, спектральным разрешением (FWHM) 4.3 Å для щели 2<sup>''</sup> (Буренин и др., 2006).

Наблюдения проводились с использованием длинной щели шириной 1<sup>''</sup> на спектрографе СКОРПИО-2 и 2<sup>''</sup> на спектрографе АДАМ. Наблюдения на спектрографе АДАМ выполнялись с позиционным углом щели, равным 0°, поэтому мы получали спектры каждой галактики отдельно. Позиционный угол щели при наблюдениях на спектрографе СКОРПИО-2 выбирался таким образом, чтобы как можно большее число объектов красной последовательности находилось на изображении щели. При наблюдениях слабых объектов положение щели выбиралось таким образом, чтобы на щель попал свет яркой звезды для выравнивания спектров относительно друг друга при обработке. Положение объекта смещалось вдоль щели в случайном направлении на 5–15<sup>''</sup> после получения каждого спектрального изображения. После окончания получения серии спектроскопических изображений мы получали изображения калибровочных ламп непрерывного и линейчатого спектров.

Каждую ночь мы получали спектры во всех используемых решетках для спектрофотометрических стандартов из списка, представленного на сайте Европейской южной обсерватории<sup>2</sup>. Обработка проводилась с использованием программного пакета IRAF<sup>3</sup> и собственного программного обеспечения.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Были получены спектры галактик, входящих в 11 скоплений. Эти спектры мы сравнивали с шаблоном спектра синтетического звездного населения возрастом 2.5 млрд лет и металличностью

$Z = 0.008$  из работы Брузуал и Шарло (2003). На рис. 2 приведены примеры спектров галактик, полученных на телескопе БТА в период с начала февраля по конец июня 2020 г. с указанием характерных для эллиптических галактик спектральных особенностей. Так же приведены распределения  $\chi^2$ , полученные при сравнении наблюдаемых спектров со спектрами шаблона. На этом распределении с большой вероятностью выраженный локальный минимум соответствует значению спектроскопического красного смещения объекта. Спектры зашумленные, однако измерения красных смещений, полученных при сравнении наблюдаемых спектров со спектрами шаблона, являются надежными, так как на спектрах имеются спектральные особенности, характерные для линий поглощения К, Н линий кальция, G линии, а также провал в области 4000 Å.

Результаты измерений приведены в табл. 1. В первых двух столбцах указаны координаты ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) оптических центров скоплений галактик, определенных по данным изображений WISE и DESI LIS. В третьем столбце приведено количество галактик скоплений, по спектрам которых мы измерили их красные смещения. В четвертом и пятом столбце приведены значения измеренных красных смещений методом сравнения спектра с шаблоном, а также рассчитанные ошибки. Красное смещение каждого скопления галактик мы определяли как среднее значение спектроскопических красных смещений всех галактик скопления, для которых эти значения известны. В шестом столбце приведены названия телескопов, на которых были получены спектры галактик скоплений. В последнем столбце приведены замечания по некоторым объектам.

Полученные нами спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик 1035 + 5956, 1036 + 5528, 1046 + 5459, 1058 + 5730 согласуются с измерениями Слоановского обзора для некоторых галактик в поле скопления. Однако галактики, спектры которых были измерены в Слоановском обзоре, значительно удалены от областей локализации протяженных рентгеновских источников, отождествляемых со скоплениями галактик (см. обсуждение скопления 1035 + 5956 ниже). Для этих скоплений мы получили спектры ярчайших галактик красных последовательностей, расположенных в центральных областях локализации протяженных рентгеновских источников.

##### 4.1. Замечания по отдельным объектам

**1035 + 5956.** Для одной галактики из поля этого скопления мы получили спектр на телескопе БТА и измерили красное смещение, которое оказалось равным  $z = 0.5561$ . Данное красное смещение согласуется с красным смещением скопления

<sup>1</sup> [https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/grisms\\_eng.html](https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/grisms_eng.html)

<sup>2</sup> <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards.html>

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

Таблица 1. Скопления галактик из поля Локмана

Координаты (J2000)		$N_{gal}$	$z$	$\delta z$	Телескоп	Замечания
$\alpha$	$\delta$					
10 34 58.6	+59 05 23	1	0.7295	0.0020	БТА	
10 35 14.8	+59 56 25	1	0.5561	0.0012	БТА	*, SDSS, WHL
10 35 49.4	+55 27 59	1	0.1460	0.0007	АЗТ-ЗЗИК	SDSS
10 39 47.3	+58 54 17	3	0.8236	0.0017	БТА	*, XMM
10 40 30.0	+55 39 46	2	0.3105	0.0017	АЗТ-ЗЗИК	WHL
10 40 54.4	+59 18 15	1	0.5271	0.0010	АЗТ-ЗЗИК	
10 42 47.7	+55 08 03	2	0.9786	0.0044	БТА	*
10 43 04.8	+58 27 01	3	0.9345	0.0033	БТА	
10 46 21.0	+54 59 00	2	0.3836	0.0036	АЗТ-ЗЗИК	SDSS
10 57 53.0	+57 43 50	2	0.3541	0.0065	АЗТ-ЗЗИК	XMM
10 58 09.7	+59 22 39	2	0.6426	0.0013	БТА	SDSS

**Примечание.** \* Обсуждается в этой работе; SDSS — значения спектроскопического красного смещения согласуются с данными Слоановского обзора (Сообщество СДСС, 2020); WHL — объект отождествлен со скоплением галактик из работы Вэнь и др. (2012); XMM — объект отождествлен с рентгеновским источником, обнаруженным космической обсерваторией XMM-Ньютон (Розен и др., 2016).

WHL J103514.3 + 595619  $z = 0.5543$  из каталога WHL (Вэнь и др., 2012). Спектроскопическое красное смещение, очевидно, определено по двум галактикам WISEA J103506.37 + 595510.5  $z = 0.55631 \pm 0.00022$ , WISEA J103508.47 + 595617.7  $z = 0.55220 \pm 0.00011$ , красное смещение которых измерено в Слоановском обзоре (Сообщество СДСС, 2020). На рис. 3 показано изображение поля скопления в оптическом диапазоне.

Галактика, для которой мы получили спектр, обозначена синей стрелочкой. Эта галактика расположена ближе к области локализации рентгеновского источника, изображенного на рис. 3. К тому же около этой галактики находится большое количество галактик с близкими показателями цвета. Поэтому наше измерение позволяет получить гораздо более надежное измерение красного смещения скопления галактик 1035 + 5956.

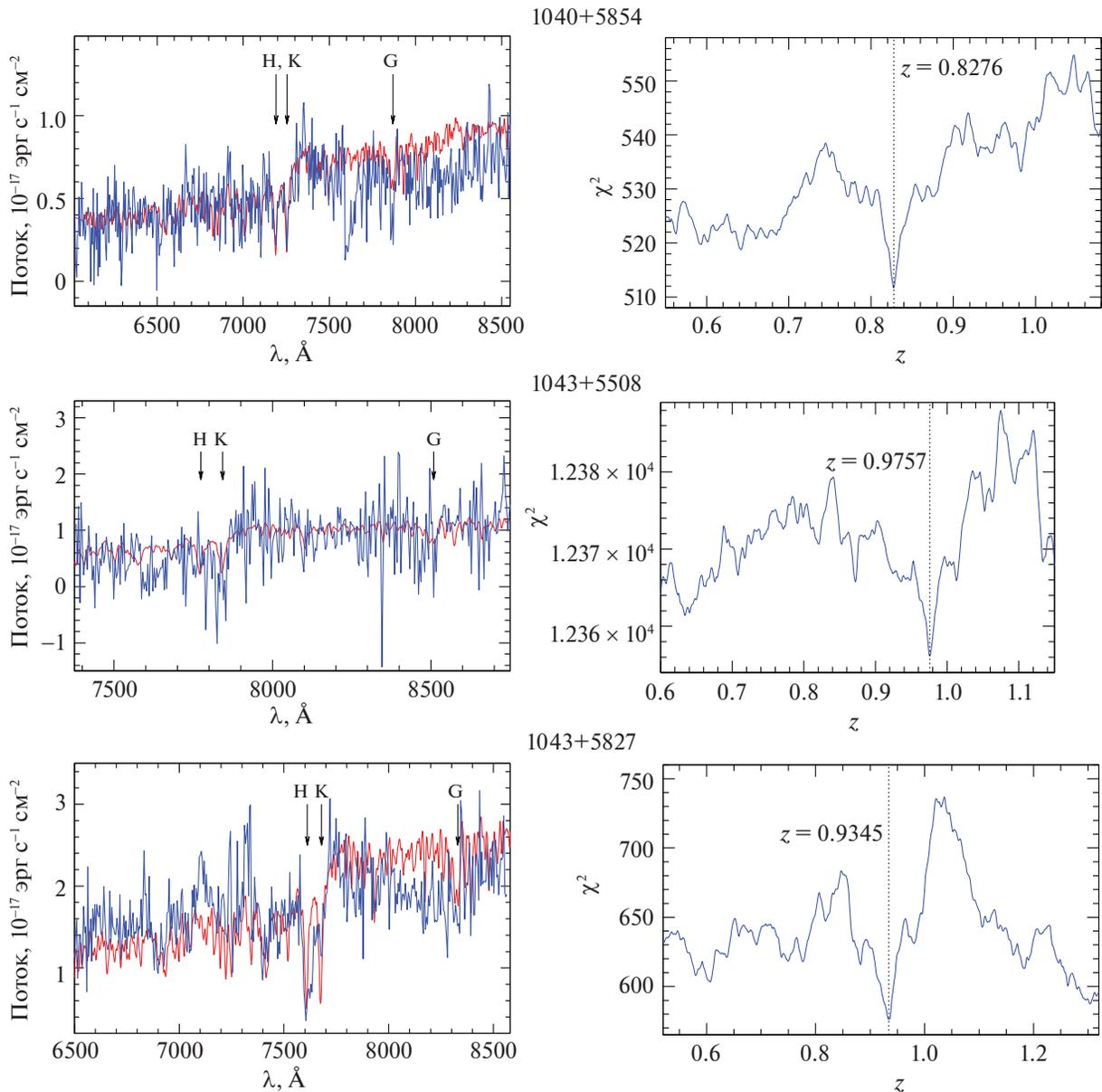
**1040 + 5854.** Это скопление галактик на красном смещении  $z = 0.8236$ , спектр которого был получен на телескопе БТА. Красное смещение этого скопления галактик было получено по трем галактикам. На рис. 1 представлены изображения поля

данного скопления в оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазонах.

На рентгеновском изображении обзора СРГ/ePOЗИТА виден тусклый протяженный источник, находящийся слева сверху от источника скопления 1040 + 5854. Данный источник можно отождествить с областью превышения ИК-яркости на изображении WISE по центру. Этот источник соответствует группе галактик на оптическом изображении обзора DESI LIS. В центре области повышенной ИК-яркости находится галактика WISEA J103953.02 + 585453.6 = SDSS J103953.03 + 585453.1 (рис. 4), которая является наиболее яркой галактикой. Для этой галактики было получено спектроскопическое красное смещение в Слоановском обзоре неба  $z = 0.35126 \pm 0.00021$  (Сообщество СДСС, 2020). Кроме того, эта галактика находится в центре области повышенной ИК-яркости.

Исходя из этого, мы предполагаем, что рядом со скоплением галактик 1040 + 5854 расположено скопление галактик переднего плана значительно меньшей массы на красном смещении  $z = 0.3513$ .

Отметим, что вблизи центра области локализации протяженного рентгеновского источника нахо-

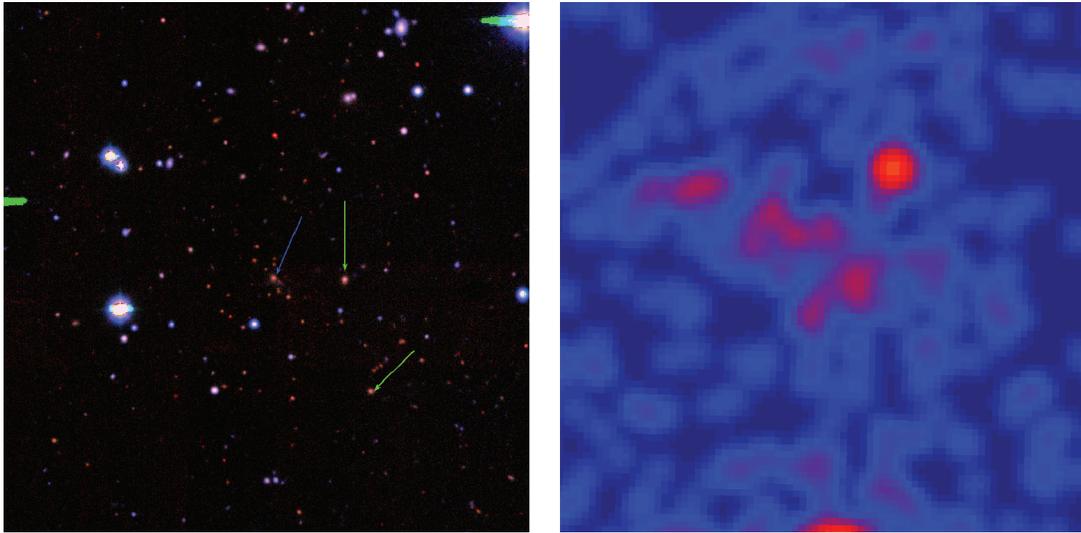


**Рис. 2.** Примеры спектроскопических измерений красных смещений далеких скоплений. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученных на 6-м телескопе БТА при помощи спектрографа СКОРПИО-2. Синей линией обозначен спектр галактики, полученный нами.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

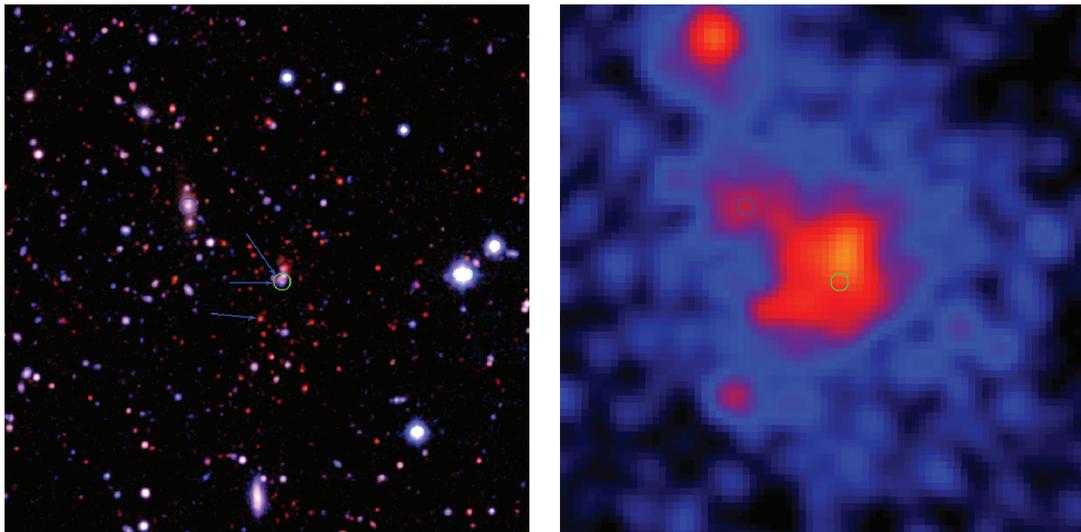
дится галактика с активным галактическим ядром на красном смещении  $z = 1.37793 \pm 0.00006$ , обнаруженная в Слоановском обзоре неба, выпуск 16 (Сообщество СДСС, 2020). На рис. 4 зеленой окружностью обозначены ее координаты по данным Слоановского обзора. Эта галактика может излучать в рентгеновском диапазоне, что может увеличивать поток от протяженного источника, к тому же она может линзироваться скоплением галактик.

Для оценки величины усиления вследствие линзирования на скоплении галактик предположим,

что плотность в скоплении распределена по закону Наварро–Френка–Уайта (Наварро и др., 1996). Полную массу скопления оценим из соотношения между рентгеновской светимостью и массой (см., например, Вихлинин и др., 2009; Кеттула и др., 2015), параметр концентрации — из соотношения между параметром концентрации темного гало и массой (Даффи и др., 2008). Центр скопления зафиксируем на значениях, приведенных в табл. 1. Тогда квазар, расположенный за скоплением на  $z = 1.37793$ , оказывается усиленным в несколько



**Рис. 3.** Слева: псевдоцветное изображение поля скопления 1035 + 5956 из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg (RGB)*. Синей стрелочкой обозначена галактика, для которой мы получили спектр на БТА. Зелеными стрелочками обозначены объекты, спектры которых получены в Слоановском обзоре. Справа: рентгеновское изображение поля скопления 1035 + 5956 из обзора СРГ/еРОЗИТА, сглаженное гауссианой радиусом  $12''$ .

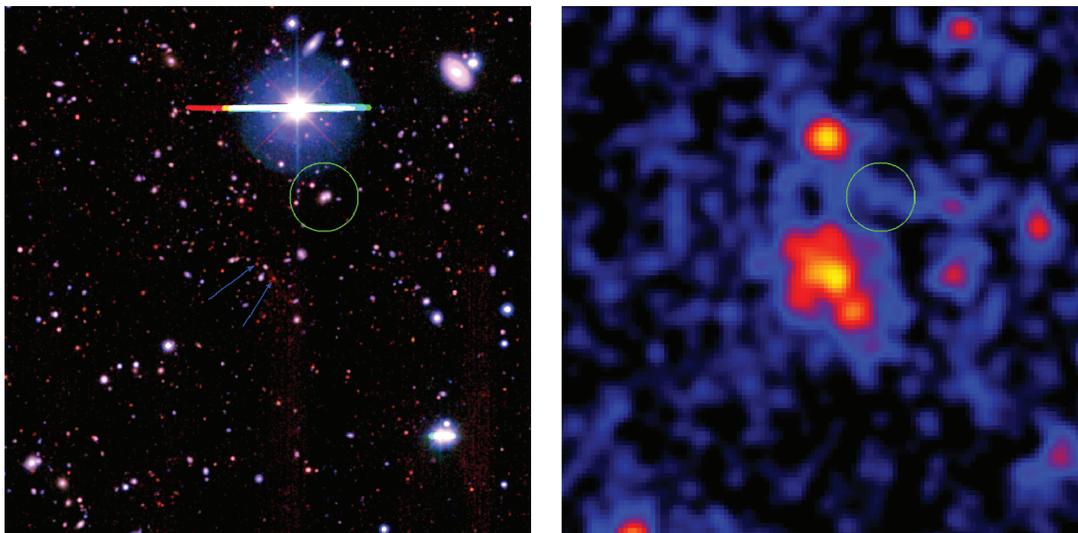


**Рис. 4.** Слева: псевдоцветное изображение поля скопления 1040 + 5854 из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg (RGB)*. Изображения поля скопления. Справа: рентгеновское изображение поля скопления из обзора СРГ/еРОЗИТА, сглаженное гауссианой радиусом  $12''$ . Стрелочками обозначены галактики скопления, для которых были получены спектры на телескопе БТА. Центр синей окружности совпадает с координатами объекта SDSS J103953.03 + 585453.1. Центр зеленой окружности совпадает с координатами галактики с активным ядром на красном смещении  $z = 1.37793$ . Радиус окружностей  $5''$ .

раз. Отметим, что значение усиления в значительной степени зависит от плотности распределения вещества в линзе и от взаимного расположения центра скопления и квазара.

**1043 + 5508.** В поле источника 1043 + 5508 на угловом расстоянии  $1.3'$  находится галактика SDSS J104241.96 + 550907.3 (рис. 5) с измеренным в Слоановском обзоре (Сообщество СДСС, 2020) спектроскопическим красным смещением

$z = 0.28685 \pm 0.00005$ , отождествленная также с галактикой WISE J104241.86 + 550907.8. В каталоге WHL (Вэнь и др., 2012) эта галактика включена в скопление галактик WHL J104242.0 + 550908. Однако в обзоре СРГ/еРОЗИТА на расстоянии, как минимум,  $30''$  от положения галактики в оптике отсутствуют рентгеновские источники (рис. 5). Вероятно, это связано с тем, что эти галактики



**Рис. 5.** Слева: псевдоцветное изображение поля скопления 1043 + 5508 из обзора *DESI LIS* в фильтрах *zrg* (*RGB*). Центр окружности совпадает с объектом SDSS J104241.96 + 550907.3, радиус окружности 30". Справа: рентгеновское изображение поля скопления 1043 + 5508 из обзора *SRG/eROSITA*, сглаженное гауссианой радиусом 12". Стрелочками обозначены галактики скопления, для которых были получены спектры на телескопе БТА. Центр окружности совпадает с объектом SDSS J104241.96 + 550907.3, радиус окружности 30".

могут входить в маломассивную группу, поток в рентгеновском диапазоне от которой очень мал.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений для 11 скоплений галактик, обнаруженных в рентгеновском обзоре поля дыры Локмана *SRG/eROSITA*. Из этих скоплений четыре имеют красные смещения  $0.7 < z < 1.0$ , а два расположены на красных смещениях  $z > 0.9$ . Для шести скоплений галактик на красных смещениях  $0.55 < z < 1.0$  спектры получены на 6-м телескопе БТА, еще для пяти скоплений галактик на красных смещениях  $z < 0.65$  были получены на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК. Для всех этих скоплений галактик спектроскопические красные смещения публикуются впервые. Для четырех скоплений галактик измерения красных смещений согласуются с данными спектроскопических измерений Слоановского обзора для некоторых галактик в поле скопления.

В этой работе публикуются первые результаты программы спектроскопических измерений красных смещений скоплений, обнаруженных в обзоре *SRG/eROSITA*. В будущем предполагается продолжить отождествление и измерение красных смещений скоплений в обзоре поля Локмана. Кроме того, в настоящее время на телескопах БТА, АЗТ-ЗЗИК, а также на 1.5-м Российско-Турецком телескопе (РТТ-150), была начата программа оптических наблюдений наиболее массивных скоплений галактик из обзора всего неба *SRG/eROSITA*.

Значительная часть этих скоплений должна будет впоследствии войти в космологическую выборку этого обзора.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-12-00520. Измерения на телескопе АЗТ-ЗЗИК выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара"<sup>4</sup>. Наблюдения на телескопах *CAO РАН* выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение No05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). В этом исследовании использованы данные наблюдений телескопа *eROSITA* на борту обсерватории *SRG*. Обсерватория *SRG* 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 *SRG/eROSITA* изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (*MPE*) при поддержке *DLR*. Космический аппарат *SRG* спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи

<sup>4</sup> <http://ckp-ri.ru/ckp/3056/>

в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Исползованные в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа ePOZITA.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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)].
- Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Balt. Astron.* **20**, 363 (2011).
- 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.* **41**, 295 (2016)].
- 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)].
- Брузуал, Шарло (G. Bruzual and S. Charlot), *MNRAS.* **344**, 1000 (2003).
- Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 2 (2009).
- Вэнь и др. (Z.L. Wen, J.L. Han, and F.S. Liu), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 2 (34) (2012).
- Даффи и др. (A.R. Duffy, J. Schaye, S.T. Kay, and C. Dalla Vecchia), *MNRAS.* **390**, 1 (2008).
- Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
- Дикей, Локман (J.M. Dickey and F.J. Lockman), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **28** (1990).
- 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)].
- 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)].
- Кеттула и др. (K. Kettula, S. Giodini, E. van Uitert, H. Hoekstra, A. Finoguenov, et al.), *MNRAS.* **451**, 2 (2015).
- Локман и др. (F.J. Lockman, K. Jahoda, and D. McCammon), *Astrophys. J.* **302**, 432 (1986).
- Матеос и др. (S. Mateos, X. Barcons, F.J. Carrera, M.T. Ceballos, G. Hasinger, et al.), *Astron. Astrophys.* **444**, 1 (2005).
- Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, and D.J. Schlegel), *Astron. J.* **154**, 161 (2017).
- Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), *Astrophys. J.* **462**, 563 (1996).
- 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).
- Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
- Розен и др. (S.R. Rosen, N.A. Webb, M.G. Watson, J. Ballet, D. Barret, et al.), *Astron. Astrophys.* **590**, A1 (2016).
- Сарацин (C.L. Sarazin), *Rev. Modern Phys.* **58**, 1 (1986).
- Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015a).
- Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 25 (2017). [SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.]
- Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: R. Ahumada, C.A. Prieto, A. Almeida, F. Anders, S.F. Anders et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **249**, 3 (2020).
- Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, et al.), *Astron. Astrophys.*, готовится к печати (2021).
- Хайзингер и др. (G. Hasinger, R. Burg, R. Giacconi, G. Hartner, M. Schmidt, et al.), *Astron. Astrophys.* **275** (1993).
- Хайзингер и др. (G. Hasinger, B. Altieri, M. Arnaud, X. Barcons, J. Bergeron, et al.), *Astron. Astrophys.* **365** (2001).
- Чэмберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, et al.), arxiv.org:1612.05560.pdf (2016).
- Янг и др. (Y. Yang, R.F. Mushotzky, A.T. Steffen, A.J. Barger, and L.L. Cowie), *Astron. J.* **128**, 1501 (2004).