

УДК

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ИЗ ПЕРВОГО КАТАЛОГА ОБЗОРА ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. ПЛАНКА

© 2015 г. В.С. Воробьев^{*1}, Р.А. Буренин¹, И.Ф. Бикмаев^{2,3}, И.М. Хамитов^{2,4},
С.Н. Додонов⁵, Р.Я. Жучков^{2,3}, Э.Н. Иртуганов^{2,3}, А.В. Мещеряков^{1,2},
С.С. Мельников^{2,3}, А.Н. Семена¹, А.Ю. Ткаченко¹, Н. Агханим⁶, Р.А. Сюняев^{1,7}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

⁴Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

⁵Специальная астрофизическая обсерватория, пос. Нижний Архыз, Россия

⁶Институт космической астрофизики, Орсэ, Франция

⁷Институт астрофизики им. Макса Планка, Гархинг, Германия

Поступила в редакцию 6 октября 2015 г.

Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из первого каталога скоплений обзора всего неба обсерватории им. Планка, которые, в основном, были отождествлены по данным оптических наблюдений, выполненных ранее нашей группой (Сообщество Планка, 2015а). Приводятся данные по 13-ти скоплениям галактик, расположенных на красных смещениях от $z \approx 0.2$ до $z \approx 0.8$, включая уточненное отождествление и измерение красного смещения для скопления PSZ1 G141.73+14.22, расположенного на $z = 0.828$. Измерения выполнены по данным 1,5-м Российско-Турецкого телескопа (РТТ-150), 2,2-м телескопа обсерватории Калар-Альто, а также по данным 6-м телескопа САО РАН (Большой телескоп азимутальный, БТА).

ВВЕДЕНИЕ

В обзоре всего неба обсерватории им. Планка, при помощи наблюдения эффекта Сюняева-Зельдовича (Сюняев и Зельдович, 1972), обнаружено большое количество ($\sim 10^3$) скоплений галактик (Сообщество Планка, 2014б, 2015б,г). Чувствительность обзора оказывается распределенной более или менее равномерно по всему небу. При этом, как известно, амплитуда сигнала Сюняева-Зельдовича зависит в основном от массы скопления, а не от его красного смещения, поэтому в обзоре обсерватории им. Планка обнаруживаются все наиболее массивные (с массами $> 10^{15} M_\odot$) скопления галактик во Вселенной. Такая выборка скоплений галактик является уникальной и представляет большой интерес для различных космологических исследований, таких как получение ограничений на космологические параметры по измерениям функции масс

скоплений галактик (например, Вихлинин и др., 2009; Сообщество Планка, 2014а, 2015в).

Многие скопления, обнаруженные в обзоре обсерватории им. Планка, являются известными скоплениями галактик, которые были обнаружены ранее в различных оптических или рентгеновских обзорах. Однако, около половины обнаруженных кандидатов оказываются неизвестными ранее скоплениями, для которых, во многих случаях, необходимо провести дополнительные оптические наблюдения с целью отождествить эти объекты со скоплениями галактик в оптическом диапазоне, а также для того, чтобы измерить их красные смещения. Такая работа проводится на многих телескопах (Сообщество Планка, 2014б, 2015а,б,г,д), наша группа также принимает участие в этой работе.

Для некоторых скоплений, отождествленных в нашей группой ранее, нами были выполнены только фотометрические оценки красных сме-

*Электронный адрес: vorobyev@iki.rssi.ru

щений (Сообщество Планка, 2015a). Точность этих оценок (около 3%) недостаточна для точного измерения функции масс скоплений. Для того, чтобы получить спектроскопические измерения красных смещений этих скоплений, в течение 2014 года нами были проведены дополнительные оптические наблюдения на телескопах РТТ-150, 2,2-м телескопе обсерватории Калар-Альто и на 6-м телескопе БТА. Результаты этих измерений представлены ниже.

НАБЛЮДЕНИЯ

Галактики, входящие в состав скопления, отождествлялись при помощи наблюдения красной последовательности галактик на диаграмме цвет-величина. По цвету красной последовательности ранее были получены фотометрические оценки красных смещений скоплений (Сообщество Планка, 2015a). Для того, чтобы получить надежное измерение красного смещения скопления достаточно измерить красное смещение нескольких наиболее ярких галактик в центре скопления, или даже одной ярчайшей галактики в центре скопления регулярной формы. Оказывается, что с помощью 1,5–2-м телескопов с эффективным использованием наблюдательного времени можно получить спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик, расположенных на $z < 0.4$. Для измерения красных смещений скоплений, расположенных на более высоких z , необходимо использовать телескоп с большим диаметром зеркала.

Процедура оптического отождествления скоплений и измерения их красных смещений, которая использовалась в нашей работе, основана на процедуре, которая применялась при работе над рентгеновским обзором скоплений галактик *400d* (Буренин и др., 2007) и ранее, при работе над обзором *160d* (Вихлинин и др., 1998). Более подробно эта процедура описана в статье Сообщества Планка (2015a). При поиске далеких скоплений галактик среди неотожествленных источников Сюняева-Зельдовича, использовались также данные ИК обзора спутника *WISE* (Райт и др., 2010), так, как это описано в работе Буренина (2015).

Для получения оптических спектров галактик скоплений на РТТ-150 использовался прибор *TFOSC* (TUBITAK Faint Object Spectrograph and Camera^{1,2}), в режиме длиннорежимной спектроскопии с гризмой #15 с разрешением $\approx 12\text{\AA}$

и спектральным диапазоном 3900–9100Å при использовании щели размером 1.8'' (100 мкм). На спектроскопические наблюдения скоплений из обзора обсерватории им. Планка, представленные в этой работе, на телескопе РТТ-150 было затрачено семь наблюдательных ночей в конце 2013 и в течение 2014 г.

Некоторые измерения красных смещений скоплений были выполнены на 2.2-м телескопе в обсерватории Калар-Альто при помощи инструмента CAFOS³ (Calar Alto Faint Object Spectrograph), наблюдения велись в течение 4 ночей осенью 2014 г. Для спектроскопических измерений использовалась гризма G-200, которая позволяла получить спектральное разрешение около 10Å в диапазоне 4000–8500Å.

Спектроскопические измерения красных смещений далеких скоплений ($z > 0.4$) были выполнены на 6-м. Большом телескопе (БТА) САО РАН при помощи прибора *SCORPIO-2* (Афанасьев и Моисеев, 2005, 2011). Была использована объемно-голографическая решетка 940@600, которая позволяла получать спектры с разрешением около 10Å в диапазоне 4000–8500Å. Для получения спектроскопических данных было использовано 3 наблюдательных ночи в ноябре 2014 г, в течение которых удалось получить около 12 часов чистого наблюдательного времени.

Наблюдения проводились примерно одинаковым образом на всех телескопах. Как правило, для каждой галактики снималась серия из двух-трех спектров с экспозицией 600–1200 с, также снимались спектры ламп плоского поля и сравнения. При последующей обработке, серия из спектров объекта выравнивалась по пространственной оси и объединялась в один спектр для дальнейшего извлечения одномерных спектров. Все спектроскопические данные были обработаны с помощью стандартного программного обеспечения IRAF⁴, предоставляющее средства обработки спектров, полученных с помощью длиннорежимной спектроскопии, а также при помощи собственного ПО.

Оказывается, что для достаточно точного спектроскопического измерения красного смещения эллиптических галактик не обязательно получать спектры с высоким отношением сигнал-шум: даже если отдельные спектральные особенности не определены достаточно хорошо, красное смещение может быть измерено достаточно точно с помощью сравнения с шаблонным спек-

¹<http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/>

²http://www.tug.tubitak.gov.tr/tug_summary.html

³<http://w3.caha.es/alises/cafos/cafos22.html>

⁴<http://iraf.noao.edu/>

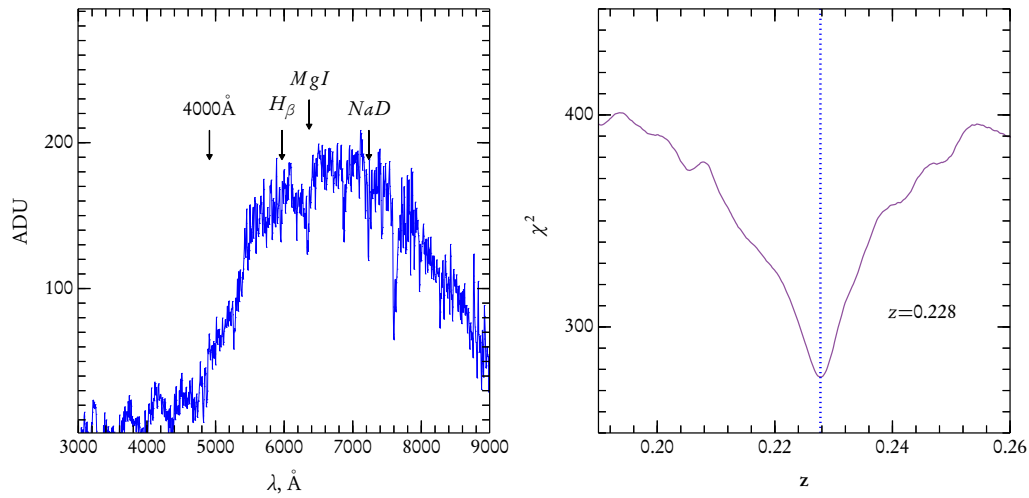


Рис. 1. Спектр ярчайшей галактики скопления PSZ1 G114.81–11.80, $z = 0.2277$, полученный на телескопе РТТ-150 при помощи спектрометра *TFOSC* (слева). Справа показана зависимость χ^2 от z , полученная при сравнении спектра с шаблонным спектром эллиптической галактики. Минимум величины χ^2 соответствует наиболее вероятному значению красного смещения скопления.

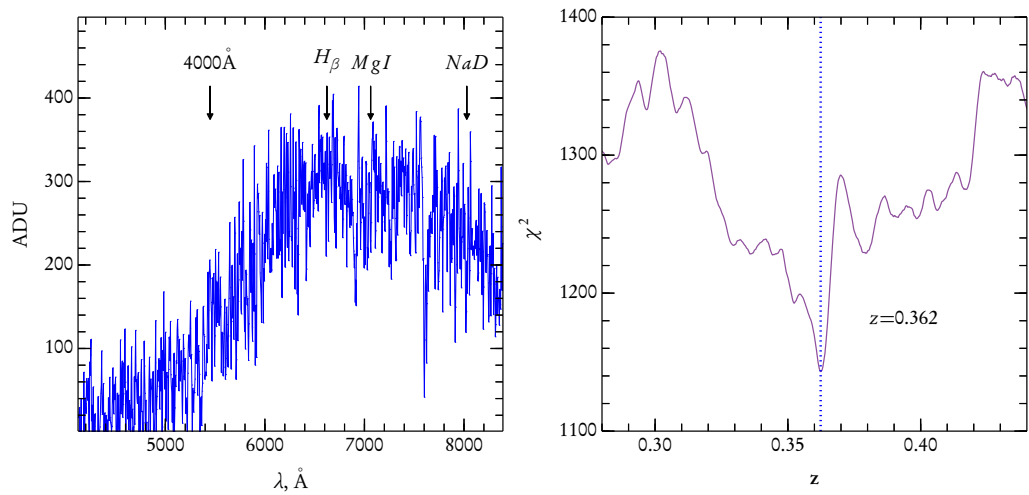


Рис. 2. Спектр ярчайшей галактики скопления PSZ1 G157.84+21.23, $z = 0.3623$, полученный на 2.2-м телескопе обсерватории Калар-Альто при помощи спектрометра *CAFOS* (слева). Справа — зависимость χ^2 от z , полученная при сравнении спектра с шаблонным спектром эллиптической галактики.

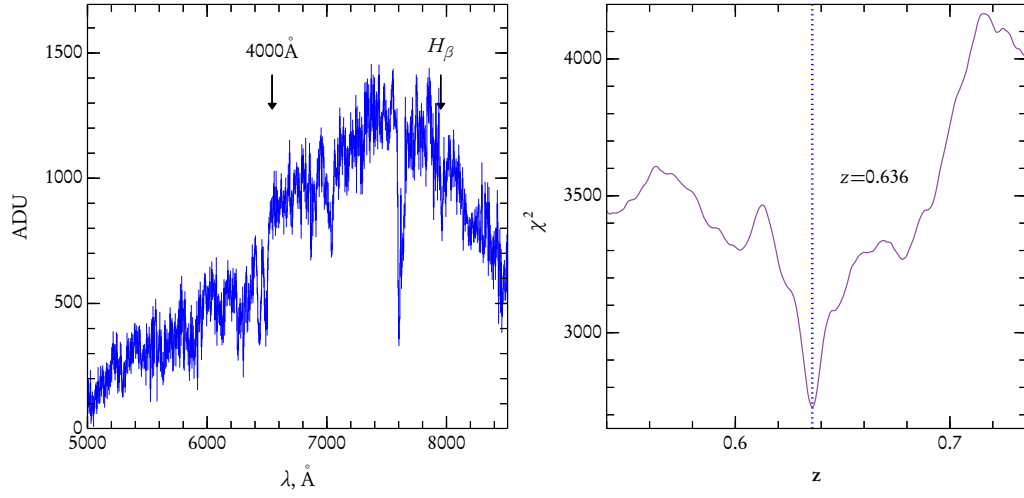


Рис. 3. Спектр ярчайшей галактики скопления PSZ1 G183.26+12.25, $z = 0.6359$, полученный на 6-м телескопе БТА при помощи спектрометра *SCORPIO-2* (слева). Справа — зависимость χ^2 от z , полученная при сравнении спектра с шаблонным спектром эллиптической галактики.

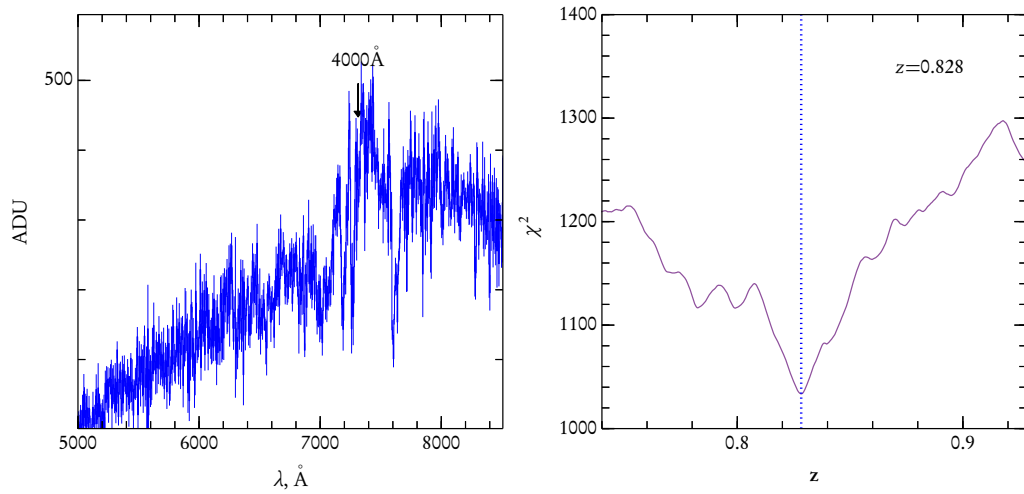


Рис. 4. Спектр ярчайшей галактики скопления PSZ1 G141.72+14.22, $z = 0.8283$, полученный на телескопе БТА при помощи спектрометра *SCORPIO-2* (слева), зависимость χ^2 от z (справа).

тром эллиптической галактики. Точность спектроскопических измерений красных смещений, представленных в этой работе, можно оценить по изменению χ^2 , а также при помощи сравнения с другими имеющимися измерениями красных смещений. Эта точность составляет величину не хуже 0.5%, кроме одного случая, где полученный спектр оказался слишком шумным и точность измерения z составляет около 1% (см. ниже).

Для примера на рисунках 1-4 слева показаны спектры ярчайших галактик скоплений на разных красных смещениях, полученные на телескопах РТТ-150, 2.2-м обсерватории Калар-Альто и БТА соответственно. В правой части рис. 1-4 показана величина χ^2 как функции от z из подгонки спектра скопления под шаблонный спектр эллиптической галактики. Минимум величины χ^2 соответствует наиболее вероятному значению красного смещения, на которое наблюдаемый спектр сдвинут относительно шаблонного.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты спектроскопических измерений у скоплений галактик из первого каталога показаны в табл. 1. В ней представлены названия объектов, координаты оптических центров скоплений и красные смещения, измеренные в нашей работе. Координаты оптических центров скоплений взяты из работы Сообщества Планка (2015a) и приведены здесь для полноты. В последней колонке приведена ссылка, которая указывает на каком именно телескопе было проведено измерение красного смещения. Для двух скоплений, PSZ1 G060.12+11.42 и PSZ1 G071.57–37.96, красные смещения были измерены также на телескопах Северной европейской обсерватории (Сообщество Планка, 2015д), и эти измерения находятся в хорошем согласии с нашими.

Ниже приводятся замечания по нескольким отдельно взятым объектам.

PSZ1 G141.73+14.22

Измерение красного смещения этого скопления, $z = 0.828$, которое приводится в табл. 1, является существенное более точным (ошибка составляет около 0.2%), по сравнению красным смещением, приведенным в работе Сообщества Планка (2015a). Дело в том, что в нашей работе мы использовали спектр ярчайшей галактики скопления, измеренный с существенно более высоким отношением сигнал-шум, который

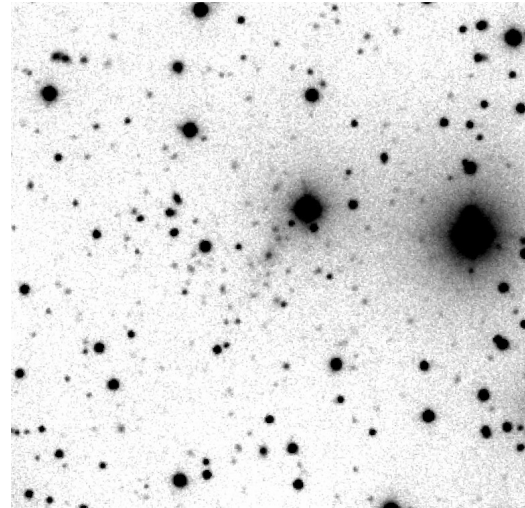


Рис. 5. Глубокое изображение скопления PSZ1 G141.72+14.22 ($z = 0.8283$) в фильтре i , полученное на 2.2-м телескопе обсерватории Калар Альто.

также был получен на 6-м телескопе БТА (см. рис. 4). Кроме того, при помощи 2.2-м телескопа обсерватории Калар-Альто, нам удалось получить существенно более глубокое изображение этого скопления, показанное на рис. 5, которое не оставляет сомнений в правильности отождествления этого объекта.

PSZ1 G157.44+30.34

Спектр ярчайшей галактик этого скопления, полученный на 2.2-м телескопе обсерватории Калар-Альто, является довольно шумным. Однако, тем не менее, мы оцениваем ошибку определения красного смещения этого объекта величиной не выше 1%, и для получения измерения с точностью существенно лучше 1% необходимо более глубокое экспонирование объекта.

PSZ1 G183.26+12.25

В работе Сообщества Планка (2015a) для этого скопления была приведена фотометрическая оценка красного смещения $z_{\text{фот.}} = 0.85$. Спектроскопическое красное смещение $z = 0.636$ (см. рис. 3), измеренное в нашей работе и приведенное в табл. 1, заметно отличается от первоначальной фотометрической оценки. Причина этого состоит в том, что прямые изображения, по которым была сделана фотометрическая оценка z , были получены в неопределенных фотометрических условиях и, по-видимому, эти условия, на самом деле оказались непригодными для фотометрических измерений необходимой точности.

Таблица 1. Красные смещения скоплений галактик.

Название	Координаты (J2000)		z	телескоп*	Другое название
	α	δ			
PSZ1 G048.22–65.03	23 09 51.0	–18 19 57	0.413	2,3	
PSZ1 G060.12+11.42	18 58 46.0	+29 15 34	0.225	1	
PSZ1 G071.57–37.96	22 17 15.8	+09 03 10	0.291	1	ACO 2429
PSZ1 G080.11–77.29	00 15 24.4	–17 30 34	0.462	3	
PSZ1 G134.31–06.57	02 10 25.1	+54 34 09	0.334	3	
PSZ1 G141.73+14.22	04 41 05.8	+68 13 16	0.828	3	
PSZ1 G157.44+30.34	07 48 54.3	+59 42 06	0.403	2	[ATZ98] B100
PSZ1 G157.84+21.23	06 40 32.7	+57 45 36	0.363	2,3	
PSZ1 G183.26+12.25	06 43 09.9	+31 50 55	0.636	3	
PSZ1 G205.56–55.75	03 15 22.0	–18 12 22	0.236	1	
PSZ1 G210.55–44.61	04 03 42.5	–17 08 04	0.143	2	ACO 472
PSZ1 G223.04–20.27	05 54 37.3	–17 44 35	0.163	1	
PSZ1 G224.01–11.14	06 30 55.3	–14 51 00	0.560	3	

* — Телескоп, на котором измерено красное смещение скопления: 1 — 1.5-м телескоп РТТ-150; 2 — 2.2-м телескоп обсерватории Калар-Альто; 3 — 6-м телескоп БТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время программу оптических наблюдений скоплений галактик из первого каталога скоплений, обнаруженных обсерваторией им. Планка, можно считать завершённой. В результате этой работы было обнаружено 214 скоплений галактик, и, таким образом, первый каталог содержит 947 подтверждённых скоплений галактик, из них у 736 измерены спектроскопические красные смещения (Сообщество Планка, 2015б). В течение 2011–2013 гг. при помощи наблюдений на телескопе РТТ-150, а также на 6-м телескопе БТА нашей группе удалось обнаружить 47 неизвестных ранее скоплений и для 65 скоплений удалось измерить спектроскопические красные смещения (Сообщество Планка, 2015а).

В этой статье представлены спектроскопические измерения красных смещений ещё 12 скоплений, для одного далекого скопления (PSZ1 G141.73+14.22, $z = 0.828$), красное смещение было существенно уточнено. Соответствующие наблюдения были выполнены в течение 2014 г. на телескопах РТТ-150 и БТА, а также на 2.2-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Таким образом, общий вклад нашей группы в работу по оптическому отождествлению и измерению красных смещений скоплений из первого каталога обзора обсерватории им. Планка является существенным.

Недавно был опубликован второй каталог скоплений галактик (Сообщество Планка, 2015г), включающий в себя 1653 кандидатов,

из которых 1203 подтверждены как скопления галактик. Оптические наблюдения скоплений из этого каталога будут продолжены нашей группой на телескопах РТТ-150, БТА, а также на телескопах обсерватории Калар-Альто и, возможно, на других телескопах.

В будущем рентгеновском обзоре скоплений галактик космической обсерватории Спектр-рентген-гамма (СРГ), по-видимому, будут обнаружены все скопления из обзора космической обсерватории им. Планка. Поэтому наши наблюдения можно также считать началом работ по оптической поддержке будущего обзора рентгеновской обсерватории СРГ.

Работа поддержана грантом РФФИ 13-02-12250-офи-м. Авторы благодарят ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АНТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1,5-м телескоп в Анталии). И.Ф. Бикмаев, Р.Я. Жучков и А.В. Мещеряков благодарят финансовую поддержку за счет средств субсидии Правительства РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности КФУ среди мировых научно-исследовательских центров. Работа И.М. Хамитова выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев и Моисеев (V.L. Afanasyev, A.V. Moiseev), *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005).

2. Афанасьев и Моисеев (V.L. Afanasyev, A.V. Moiseev), *Balt. Astr.* **20**, 363-370 (2011).
3. Буренин и др. (R.A. Burenin, A. Vikhlinin, A. Hornstrup et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, i.2, 561-582 (2007).
4. Буренин Р.А., *Письма в Астрон. журн.* **41**, 167 (2015).
5. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, W. Forman et al.), *Astrophys. J.* **502**, 558 (1998).
6. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin et al.), *Astrophys. J.* **672**, i.2, 1060-1074 (2009).
7. 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).
8. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014a).
9. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014b); arXiv:1303.5089.
10. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2015a); arXiv:1407.6663.
11. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A14 (2015b); arXiv:1502.00543.
12. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2015v); arXiv:1502.01597.
13. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2015r); arXiv:1502.01598.
14. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.*, in press (2015d); arXiv:1504.04583.
15. Сюняев и Зельдович (R.A. Sunyaev, Ya.B. Zeldovich), *Comm. on Astrophys. and Space Phys.* **4**, 173 (1972).