

РАСШИРЕНИЕ КАТАЛОГА СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ОБЗОРА ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. ПЛАНКА

© 2017 г. Р. А. Буренин*

Институт космических исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 20.11.2016 г.

Представлен каталог скоплений галактик, обнаруженных на картах параметра комптонизации y обзора всего неба обсерватории им. Планка, и отождествленных при помощи данных ИК-обзора обсерватории ВАЙЗ, а также данных Слоановского обзора. Каталог включает в себя около 3000 скоплений галактик, обнаруженных по этим данным на полях Слоановского обзора. Показано, что полнота этой выборки является высокой для скоплений галактик с массами выше $M_{500} \approx 3 \times 10^{14} M_{\odot}$, расположенных на красных смещениях $z < 0.7$. На красных смещениях выше $z \approx 0.4$ наш каталог содержит примерно на порядок больше скоплений галактик по сравнению с выборкой второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Этот каталог может быть использован для отождествления массивных скоплений галактик в будущих больших обзорах, таких как рентгеновский обзор всего неба обсерватории SRG.

Ключевые слова: Скопления галактик, обзоры неба.

DOI: 10.7868/S0320010817080034

ВВЕДЕНИЕ

Измерение функции масс скоплений галактик является одним из основных методов получения ограничений на параметры космологической модели (например, Вихлинин и др., 2009а,б; Сообщество Планка, 2014а, 2016б). Для решения таких задач требуются большие выборки массивных скоплений галактик.

Одним из самых больших каталогов массивных скоплений галактик является каталог скоплений, обнаруженных по наблюдению эффекта Сюняева–Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972) в обзоре всего неба обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014б, 2016в). В этом обзоре, более или менее равномерно на всем небе, обнаруживаются наиболее массивные скопления галактик в наблюдаемой части Вселенной. Каталог источников Сюняева–Зельдовича, обнаруженных в этом обзоре, выпуска 2015 г. (PSZ2, Сообщество Планка, 2016в) содержит 1653 объекта, из которых 1203 являются подтвержденными массивными скоплениями галактик. Эти скопления имеют массы, в основном, больше $M_{500} \sim 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, т.е. они являются наиболее массивными объектами, число которых в единице объема Вселенной очень мало и функция масс таких объектов является очень крутой.

Поскольку амплитуда эффекта Сюняева–Зельдовича зависит, в основном, от массы скопления, понижение порога обнаружения скоплений в обзоре обсерватории им. Планка должно позволить обнаружить объекты несколько меньшей массы, и поэтому должно приводить к быстрому росту числа обнаруженных скоплений. Так, например, понижение порога обнаружения до массы $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ должно привести к увеличению числа обнаруженных скоплений на $z \approx 0.5$ примерно на порядок (см., например, Вихлинин и др., 2009б). Порог обнаружения скоплений галактик по эффекту Сюняева–Зельдовича можно было бы понизить в том случае, если в дополнение к данным обзора обсерватории им. Планка была бы возможность использовать дополнительные данные, при помощи которых можно было бы надежно отождествить скопления галактик и, таким образом, отсеять ложные источники.

Ниже показано, что, используя данные обзора обсерватории им. Планка вместе с данными Слоановского обзора, а также с данными обзора ВАЙЗ, можно получить полезную выборку скоплений галактик с массами выше $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ на красных смещениях $z < 0.7$. Представлен каталог из около 3000 скоплений галактик, обнаруженных по этим данным на полях Слоановского обзора.

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

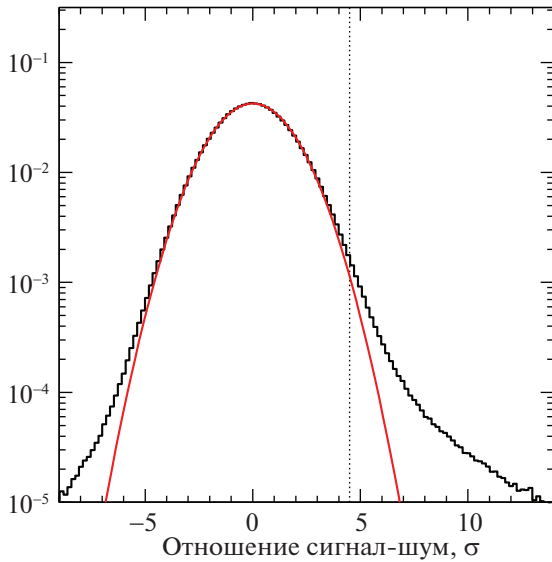


Рис. 1. Распределение отношения сигнал—шум параметра комптонизации y внутри маски переднего плана Галактики. Пунктирной вертикальной линией отмечен порог регистрации источников.

ПОИСК ИСТОЧНИКОВ НА КАРТАХ ПАРАМЕТРА КОМПТОНИЗАЦИИ

Поиск источников сигнала Сюняева—Зельдовича для каталогов Сообщества Планка проводился при помощи специализированных процедур, которые учитывают спектральную и пространственную форму источника (см., например, Сообщество Планка, 2016в). Кроме того, были также составлены карты параметра комптонизации y (Сообщество Планка, 2016а), которые использовались в основном для исследования спектра мощности сигнала Сюняева—Зельдовича. Однако, как было показано, имеется хорошее согласие между объектами из каталога источников сигнала Сюняева—Зельдовича и источниками, обнаруженными по картам параметра комптонизации y . Поэтому, для простоты, в нашей работе для поиска скоплений галактик были использованы карты параметра комптонизации.

Карты параметра комптонизации y и его стандартного отклонения были скачаны из архива обсерватории им. Планка¹. Была использована версия этих карт, опубликованная в выпуске данных 2015 г. (Сообщество Планка, 2016а). Поиск источников проводился по картам *NILC*, поскольку они имеют несколько меньшие шумы на малых угловых масштабах (см. подробнее в работе Сообщества Планка, 2016а). Карта стандартного отклонения была сглажена медианным фильтром радиусом 1° . Из карты соотношения сигнал—шум, полученной

из карты сигнала и сглаженной карты стандартного отклонения, была вычтена крупномасштабная анизотропия, оцененная путем сглаживания этой карты также медианным фильтром радиусом 1° .

В качестве карты переднего плана Галактики была использована маска из работы Хатри (2016). Эта маска учитывает не только излучение пыли Галактики, но и также излучение монооксида углерода, в частности, в высокоширотных молекулярных облаках, сигнал которого по своему спектру похож на сигнал Сюняева—Зельдовича и сильно загрязняет карты параметра комптонизации. Была использована маска 61%, которая имеется в общем доступе в сети².

На рис. 1 показано распределение отношения сигнал—шум параметра комптонизации y , полученного указанным выше образом, внутри маски, о которой говорилось выше. Видно, что при малых отклонениях от среднего значения это распределение хорошо описывается распределением Гаусса, поскольку наблюдаемый сигнал состоит из инструментального шума, а также из усредненного сигнала большого количества слабых источников. При отношениях сигнал—шум больше примерно 5 распределение заметно отклоняется от гауссова, так как, по-видимому, при таких отклонениях от среднего на картах появляются отдельные источники Сюняева—Зельдовича, связанные с массивными скоплениями галактик.

Поскольку для поиска скоплений галактик далее будут существенно задействованы ИК- и оптические данные, которые позволят эффективно убрать из выборки ложные источники, в нашем случае порог регистрации источников на картах параметра y можно принять низким. В нашей работе в качестве источников Сюняева—Зельдовича рассматривались пики на картах отношения сигнал—шум параметра y с максимальным значением выше 4.5σ (это значение показано пунктирной линией на рис. 1). Среди источников около этого порога должно быть еще много проекций слабых источников, но также должно быть и значительное количество отдельных массивных скоплений, которые можно отождествить при помощи данных в оптическом и ИК-диапазонах.

Рассматривались только источники, попадающие в маску переднего плана, о которой говорилось выше. Кроме того, рассматривались только источники с галактическим склонением $|b| > 20^\circ$, поскольку иначе было бы сложно проводить их отождествление в оптическом и ИК-диапазонах из-за большого количества звезд Галактики. Таких источников на всем небе оказалось 20 290, из них на полях Слоановского обзора — 9227. Уже из числа источников видно, что, по сравнению со 2-м

¹ <http://pla.esac.esa.int/>

² <http://theory.tifr.res.in/~khatri/szresults/>

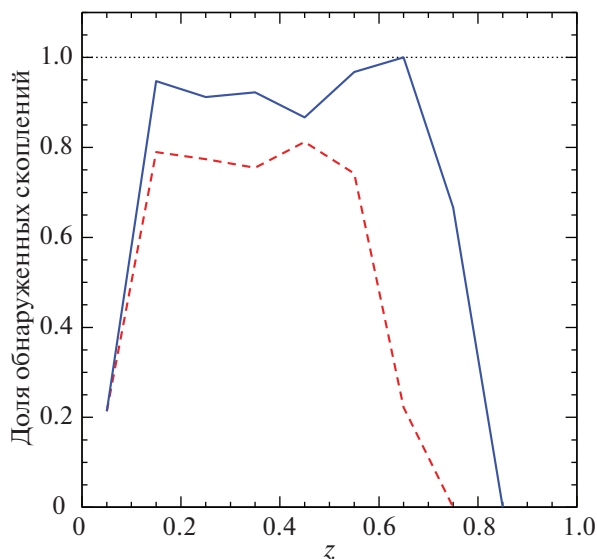


Рис. 2. Доля подтвержденных скоплений из 2-го каталога обзора обсерватории им. Планка, обнаруженных на полях Слоановского обзора при помощи алгоритма *redMaPPer* (красная штриховая линия, не учтена маска *redMaPPer*), а также при помощи нового алгоритма поиска скоплений с использованием данных ИК-обзора спутника ВАЙЗ (сплошная синяя линия).

каталогом источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016в), порог обнаружения по массе скоплений понижен не более чем в ~ 2 раза, т.е. эти источники (за исключением самых близких) не имеет смысла отождествлять со скоплениями с полной массой меньше $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ

Каталог *redMaPPer* Слоановского обзора

Поиск скоплений галактик можно довольно эффективно проводить, используя фотометрические измерения в оптическом диапазоне, поскольку большинство галактик в скоплениях имеют примерно одинаковые цвета, образуя т.н. красную последовательность (например, Глэддэрс, Йи, 2000). Для отождествления источников Сюняева–Зельдович, обнаруженных на картах параметра комптонизации, в нашей работе был использован каталог скоплений, полученный по данным Слоановского обзора при помощи алгоритма *redMaPPer* (Рыкофф и др., 2014) версии 6.3, доступный в сети³. Этот каталог содержит около 26 000 скоплений галактик, для каждого из которых приводятся довольно хорошие фотометрические оценки красных смещений, а также оценка

богатства скопления, которая хорошо коррелирует с полной массой скопления.

Поскольку нас интересуют массивные скопления галактик, с массами выше $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$, к выборке далеких ($z > 0.25$) скоплений из этого каталога применялось ограничение $\lambda > 40$, где λ — богатство скопления, определенное в каталоге *redMaPPer*. Это ограничение позволяет отбросить маломассивные скопления, но оставить в выборке практически все скопления с массами $M_{500} > 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ (Розо и др., 2015).

Доля подтвержденных скоплений из 2-го каталога обзора обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016в), обнаруженных на полях Слоановского обзора при помощи алгоритма *redMaPPer*, согласно использованной нами версии этого каталога, показана на рис. 2 красной штриховой линией. Здесь применяется также ограничение на богатство скоплений, о котором говорилось выше, но, как и следовало ожидать, оно почти не меняет количество обнаруженных скоплений. Отметим, что здесь не учтена маска обзора *redMaPPer*, это может быть одной из главных причин того, что доля обнаруженных скоплений в максимуме оказывается меньше 100%. Видно, что доля обнаруженных скоплений быстро падает на красных смещениях $z > 0.55$.

Скопления по данным обзора спутника ВАЙЗ и Слоановского обзора

Для того чтобы более эффективно обнаружить скопления на более высоких красных смещениях, в дополнение к данным Слоановского обзора в нашей работе были использованы также данные ИК-обзора спутника ВАЙЗ. Обзор всего неба обсерватории ВАЙЗ (Райт и др., 2010) был начат в 2009 г. и выполнен в 4-х фотометрических полосах: 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм, по окончании криогенной фазы в 2010 г. и вплоть до настоящего времени обзор продолжается в полосах 3.4 и 4.6 мкм (Майнцер и др., 2014). Для поиска далеких скоплений галактик основной интерес представляет обзор в фотометрической полосе 3.4 мкм. В этой полосе далекие скопления галактик хорошо видны на красных смещениях вплоть до $z \approx 1-2$ (см., например, Буренин, 2015).

Для поиска скоплений галактик на изображениях обзора всего неба обсерватории ВАЙЗ в полосе 3.4 мкм в нашей работе использовалась полностью автоматическая процедура, основанная на алгоритме, который является дальнейшим развитием алгоритма, описанного в нашей более ранней работе (Буренин, 2015). Как и раньше, изображения обзора ВАЙЗ сначала очищались от звезд, далее

³ <http://risa.stanford.edu/redMaPPer/>

поиск ИК-источников проводился по этим изображениям, свернутым с β -моделью разного углового размера, и, наконец, внутри обнаруженных источников, с использованием данных Слоановского обзора, проводился поиск ярчайших галактик скопления и красной последовательности.

В отличие от нашей более ранней работы, цитированной выше, для поиска скоплений галактик использовалась сборка обзора всего неба, полученная с учетом последних данных спутника ВАЙЗ, представленная в работе Мейснера и др. (2016) и доступная в сети⁴ (см. также работу Ланга, 2014). Измерение потоков и вычитание источников на изображениях обзора ВАЙЗ проводилось при помощи более полной модели функции рассеяния точки, которая правильно учитывает не только ее крылья на больших угловых масштабах, но и асимметрию относительно центра. Данные о наличии источников, а также их положения на небе были взяты из Слоановского обзора, выпуск 13 (Сообщество СДСС, 2017), при этом подгонка модели для слабых источников выполнялась без изменения их положений на небе (т.е. была использована так называемая “принудительная фотометрия”). Для более ярких галактик, где требовалось, кроме функции рассеяния точки, учитывать также и форму галактик, использовалась “принудительная фотометрия” из работы Ланга и др. (2016). Кроме того, был улучшен алгоритм поиска красной последовательности галактик в ИК-источниках. Версия этого алгоритма, которая и имеется в нашем распоряжении в настоящее время, является предварительной. Предполагается, что в будущем она будет еще улучшена, однако уже сейчас результаты работы этого алгоритма можно использовать для отождествления богатых скоплений галактик среди источников Сюняева–Зельдовича из обзора обсерватории им. Планка.

Поскольку в нашем случае источники Сюняева–Зельдовича из обзора обсерватории им. Планка имеет смысл отождествлять только с массивными скоплениями, среди скоплений, обнаруженных на ИК-изображениях спутника ВАЙЗ, требуется отобрать скопления с массами выше $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$. В качестве оценки массы для этих целей можно использовать инфракрасную светимость скоплений (например, Лин и др., 2004; Копылова, Копылов, 2006). На рис. 3 показано соотношение ИК-светимости⁵ в полосе 3.4 мкм и полной массы M_{500} скоплений из 2-го каталога обсерватории им. Планка. ИК-светимость скоплений была рассчитана как суммарная светимость

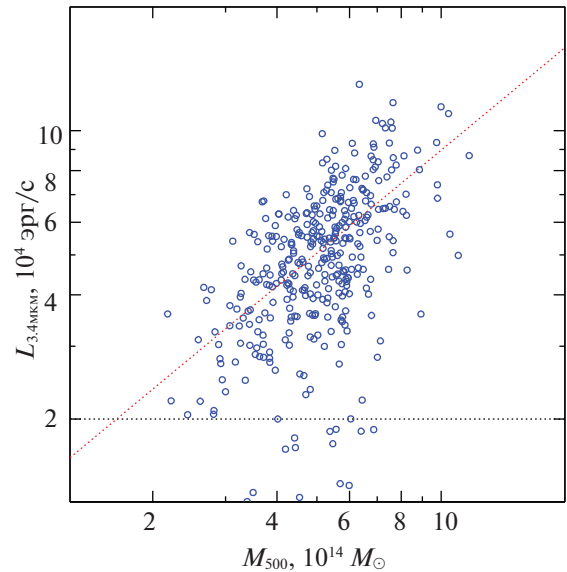


Рис. 3. Соотношение ИК-светимости в полосе 3.4 мкм, внутри радиуса 1 Мпк, и полной массы M_{500} скоплений из 2-го каталога обсерватории им. Планка.

галактик красной последовательности внутри проекции радиуса 1 Мпк. Калибровки нуль-пункта и ширины полосы пропускания для величин в полосе 3.4 мкм ВАЙЗ взяты из работы Джарретта и др. (2011). Расчет K -поправки в полосе 3.4 мкм проводился при помощи синтетического шаблона спектра звездного населения возрастом 11 Глет, металличностью $Z = 0.02$, взятого из работы Брузуал и Шарло (2003) — можно показать, что такой шаблон очень хорошо отражает изменение всех цветов красной последовательности на красных смещениях $z < 0.8$.

Из рис. 3 видно, что ИК-светимость, рассчитанная таким способом, довольно хорошо коррелирует с полной массой скопления. Степенной наклон этого соотношения составляет $\approx 0.83 \pm 0.05$. Как и следовало ожидать, он отличается от единицы в меньшую сторону, поскольку расчет светимости проводится внутри постоянного физического радиуса, а не внутри радиуса постоянного контраста плотности. Разброс ИК-светимости около этого соотношения, исключая выбросы больше чем на 2.5σ , составляет $\sigma_{\ln L} = 0.25$ или $\pm 29\%$. Таким образом, вычисленные нами ИК-светимости скоплений позволяют получить, хотя и несколько менее точную оценку масс скоплений, но все же сопоставимую по точности по сравнению с оценками этой величины из рентгеновской светимости скоплений (Вихлинин и др., 2009б), а также из их оптического богатства (Розо и др., 2015).

Для отождествления источников Сюняева–Зельдовича ниже будут использоваться только скопления с ИК-светимостями $L_{3.4\text{мкм}} > 2 \times$

⁴ <http://unwise.me/>

⁵ Здесь и ниже мы предполагаем космологическую модель с $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 p \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

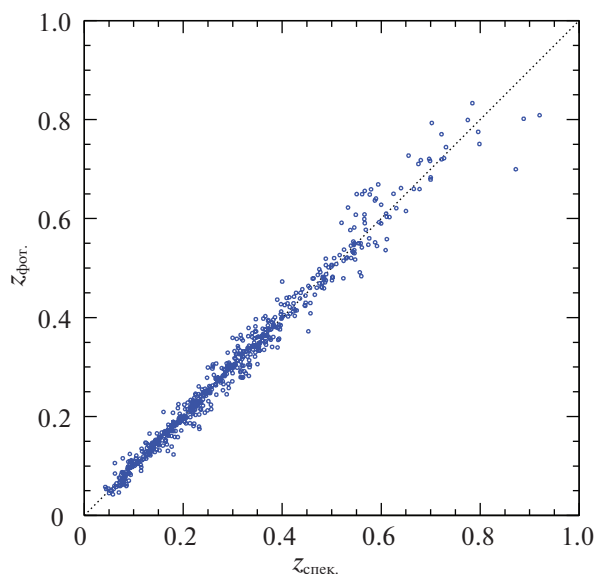


Рис. 4. Соотношение между спектроскопическими измерениями красных смещений скоплений и их фотометрическими оценками, полученными по фотометрическим данным обзора ВАЙЗ и Слоановского обзора.

$\times 10^{44}$ эрг с^{-1} . Как видно из рис. 3, такое ограничение оставляет в выборке подавляющее большинство скоплений галактик с массами $M_{500} > 3 \times 10^{14} M_{\odot}$. Доля подтвержденных скоплений из 2-го каталога обсерватории им. Планка, которые были обнаружены также и нашим алгоритмом, с учетом ограничения по ИК-светимости, показана на рис. 2 сплошной синей линией. Видно, что эта доля составляет около 90% на красных смещениях $z > 0.1$ и быстро падает на $z > 0.7$. Таким образом, использование этих данных позволяет существенно повысить полноту отождествления скоплений, по сравнению с данными каталога *redMaPPer*, главным образом, на красных смещениях $0.5 < z < 0.7$.

На рис. 4 показана фотометрическая оценка красных смещений скоплений, полученная при помощи нашего алгоритма поиска скоплений, по сравнению со спектроскопическими измерениями этой величины. Для того чтобы получить эту оценку, были использованы измерения цветов красной последовательности, а также величины ярчайшей галактики скопления, по данным Слоановского обзора и по данным обзора ВАЙЗ. Для калибровки этой фотометрической оценки использовались скопления 2-го каталога обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016в), скопления из рентгеновских обзоров скоплений галактик площадью 400 кв. градусов (*400d*, Буренин и др., 2007), а также из обзора 160 кв. градусов (*160d*, Вихлинин и др., 1998), выполненных по данным наведений телескопа РОСАТ. Кроме того, чтобы немного уве-

личить число далеких скоплений, расположенных на $z > 0.6$, пять таких скоплений были взяты из обзоров *EMSS* (Джойя, Луппино, 1994), *WARPS* (Перлман и др., 2002; Хорнер и др., 2008), *MACS* (Эбелинг и др., 2001), *NEP* (Генри и др., 2006), которые собраны в каталоге *МСХС* (Пифаретти и др., 2011).

Точность фотометрической оценки составляет $\delta z_{\text{фот.}} / (1 + z) \approx 0.01$ при $z < 0.5$ и $\delta z_{\text{фот.}} / (1 + z) \approx 0.02$ при $0.5 < z < 0.7$. Как видно из рис. 4, фотометрические оценки красных смещений скоплений на $z > 0.7$ (а с ними и оценки ИК-светимости) становятся ненадежными, поэтому ниже для отождествления источников СЗ будут использоваться только скопления с фотометрическими оценками красных смещений $z_{\text{фот.}} < 0.7$.

КАТАЛОГ СКОПЛЕНИЙ

Как обсуждалось выше, внутри маски переднего плана Галактики (а также на $|b| > 20$), на картах параметра комптонизации, на полях Слоановского обзора, было обнаружено 9227 источников Сюняева–Зельдовича. Для всех этих источников, используя данные, которые подробно обсуждались выше, было проведено отождествление со следующими объектами:

- с объектами из 2-го каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка (*PSZ2*, Сообщество Планка, 2016в);
- с массивными скоплениями галактик из каталога *redMaPPer* Слоановского обзора (Рыкофф и др., 2014);
- с массивными скоплениями галактик, которые были обнаружены нами в полях этих источников, по данным обзора спутника ВАЙЗ и Слоановского обзора.

Среди источников Сюняева–Зельдовича при помощи этих данных было отождествлено 2964 скоплений галактик. Из них 483 скопления входят также в каталог *PSZ2* (см. подробнее ниже), 1795 источников отождествлено при помощи каталога *redMaPPer*, 2573 — при помощи нашего алгоритма по данным обзора спутника ВАЙЗ и Слоановского обзора. Многие скопления отождествляются несколькими способами одновременно, например, 1459 скоплений, отождествленных с помощью алгоритма *redMaPPer*, отождествляются также и по данным обзора спутника ВАЙЗ и Слоановского обзора.

Каталог скоплений

Номер	α	δ	С/Ш	$\delta\alpha$	$\delta\delta$	z	N_z	Замечание
	(J2000)			угл. мин.				
1	00 00 48.9	+29 06 52	4.58	0.37	3.64	0.1928	3	
2	00 01 11.8	+21 33 49	7.77	-0.42	2.01	0.4110	5	PSZ2 G107.67-39.78
3	00 01 24.0	-00 00 53	4.55	-0.43	0.97	0.2479	5	
4	00 02 01.1	+12 03 28	9.52	0.62	-0.44	0.1989	17	PSZ2 G104.30-48.99
5	00 02 49.6	-01 04 06	4.99	-4.60	4.99	0.7600	1	**
6	00 02 47.9	-05 48 37	5.86	-3.21	4.33	0.4586	1	
7	00 03 06.0	-06 05 13	14.20	-1.48	0.47	0.2334	3	** PSZ2 G092.16-66.01
8	00 03 33.3	+10 02 17	6.10	-2.59	0.83	0.3707	4	
9	00 03 45.3	+02 04 55	7.21	-1.09	0.93	0.0924		** PSZ2 G099.57-58.64
10	00 04 01.1	+30 41 26	5.52	1.43	-0.96	0.7397	2	
11	00 03 58.1	-11 00 51	4.87	0.21	3.00	0.241*		
12	00 04 09.2	+04 35 54	5.36	-1.55	0.21	0.6396	1	
13	00 05 24.6	+16 11 23	7.22	-0.11	-1.81	0.1155	13	
14	00 06 16.1	-10 21 40	5.19	1.57	4.39	0.2180	1	**
15	00 06 21.4	+10 53 57	11.20	0.26	2.14	0.1669	15	PSZ2 G105.40-50.43
16	00 07 01.8	+25 05 02	5.64	1.36	-1.29	0.2409	2	
17	00 07 06.0	+10 34 21	4.83	-0.17	-0.26	0.1649	6	
18	00 07 27.4	+12 33 49	6.80	2.02	-3.61	0.697*		
19	00 08 12.4	+02 03 14	8.91	0.42	1.98	0.3651	3	PSZ2 G101.55-59.03
20	00 08 57.1	+13 06 46	4.68	-0.55	-0.26	0.195*		**
21	00 09 01.8	+32 10 09	5.42	2.26	-2.13	0.4790	2	
22	00 09 13.6	+03 56 18	4.83	-3.27	-3.06	0.1015	2	**
23	00 09 20.2	+06 49 06	10.04	-0.09	-0.34	0.2361	2	PSZ2 G104.71-54.54
24	00 09 42.4	+03 43 36	4.72	1.23	1.60	0.5622	2	
25	00 09 54.6	+12 17 28	8.18	-3.89	-0.63	0.1745	10	
26	00 09 59.7	+17 54 37	7.46	3.71	0.08	0.5583	2	
27	00 10 03.9	+25 52 01	7.46	0.08	-0.98	0.3211	6	**
28	00 10 08.0	+33 06 23	5.65	-0.15	-0.84	0.1136	1	**
29	00 10 13.5	+17 44 40	8.31	-1.42	0.47	0.1715	5	PSZ2 G109.22-44.01
30	00 10 18.2	+06 39 47	8.59	0.48	-0.75	0.2648	3	PSZ2 G104.98-54.79
31	00 10 26.6	+11 31 16	6.37	-2.58	1.32	0.0924	4	
32	00 10 48.4	+29 10 23	9.68	-1.09	0.50	0.3332	6	PSZ2 G112.35-32.86
33	00 10 50.8	-01 02 34	5.83	-3.54	-1.27	0.4646	1	**
34	00 10 56.0	+18 29 42	4.65	0.74	-2.00	0.5668	2	
35	00 11 45.5	+32 24 27	16.12	0.29	-1.04	0.1012	15	PSZ2 G113.29-29.69
36	00 12 13.5	+14 00 41	9.62	-0.39	-0.61	0.3895	2	PSZ2 G108.71-47.75
37	00 12 33.4	-00 16 23	5.07	0.86	-2.66	0.4027	2	
38	00 12 43.8	+06 08 08	5.26	-0.20	4.55	0.4310	1	
39	00 12 47.7	-08 58 27	8.86	-0.37	-2.76	0.3384	3	** PSZ2 G094.46-69.65
40	00 14 58.3	-00 55 06	6.03	1.14	2.08	0.5349	5	
...	

* Фотометрическая оценка красного смещения.

** В поле источника обнаружено несколько скоплений на разных красных смещениях, в качестве отождествления выбрано скопление с наибольшей оценкой массы по данным в оптическом и ИК-диапазонах.

Примечание. Здесь для примера представлена только небольшая часть таблицы, полная таблица содержит 2964 строки и доступна в электронной версии журнала, а также по адресу: <http://hea.iki.rssi.ru/psz/>

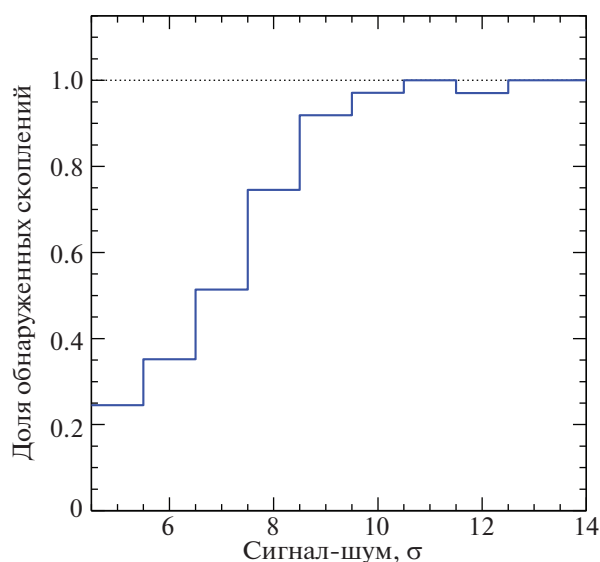


Рис. 5. Доля источников СЗ, отождествленных с массивными скоплениями галактик, в зависимости от отношения сигнал—шум.

На рис. 5 показана доля источников, отождествленных с массивными скоплениями галактик, в зависимости от отношения сигнал—шум. При низких отношениях сигнал—шум с массивными скоплениями галактик отождествляется только небольшая часть источников. Остальные источники, по-видимому, связаны с негауссовостью карт параметра комптонизации, которая должна возникать из-за проекций менее массивных скоплений и групп галактик.

Каталог этих скоплений представлен в таблице. В таблице дан номер источника в списке, его координаты (α , δ , в эпоху J2000), значимость на картах комптонизации (С/Ш), смещение оптического центра относительно центра источника Сюняева—Зельдовича, ($\delta\alpha$, $\delta\delta$ — в угловых минутах), красное смещение (z) и число галактик (N_z), по которым красное смещение определено (см. подробнее ниже). В последней колонке указано название источника в каталога *PSZ2* и отмечены случаи, где в поле источника обнаружено несколько скоплений на разных красных смещениях, а в качестве отождествления выбрано скопление с наибольшей оценкой массы по данным в оптическом и ИК-диапазонах. Таких скоплений в нашей выборке оказывается довольно много — около 37%. Отметим, что доля проекций среди источников Сюняева—Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка является высокой даже при больших отношениях сигнал—шум, что связано с недостаточно высоким угловым разрешением телескопа (Сообщество Планка, 2013, 2015а).

Красные смещения скоплений

Красные смещения скоплений, которые приведены в таблице, в большинстве случаев получены из спектроскопических измерений красных смещений галактик в Слоановском обзоре. Это оказывается возможным благодаря тому, что ярчайшие галактики скоплений являются одновременно большими красными галактиками, спектроскопия которых проводится в Слоановском обзоре с целью исследования барионных акустических осцилляций (Эйзенштейн и др., 2001). Кроме того, в последнее время, в рамках Слоановского обзора проводится также спектроскопия галактик из скоплений, отобранных по наблюдениям в рентгеновском диапазоне (Клерк и др., 2016).

Для спектроскопических измерений красных смещений, взятых из данных Слоановского обзора, в таблице приведено также количество галактик, по которым было определено красное смещение скопления (N_z). Для этих измерений отбирались галактики на угловом расстоянии от оптического центра скопления < 540 кпк в проекции, со спектроскопическими измерениями красных смещений в пределах ошибки фотометрического красного смещения скопления. Далее красное смещение скопления находилось как медиана красных смещений этих галактик, при этом отбрасывались значения z , которые отстояли на $\delta z > 0.01$ от медианного значения. Если разброс измерений красных смещений был слишком большим, и медианное значение таким способом получить не удавалось, для таких скоплений в каталоге были оставлены фотометрические оценки красных смещений. Отметим, что эти спектроскопические красные смещения могут не быть вполне надежными в случаях, когда имеется только малое число измерений красных смещений галактик, и когда нет измерения красного смещения ярчайшей галактики скопления. Тем не менее в подавляющем большинстве случаев их точность и надежность значительно выше точности и надежности фотометрических оценок.

Оказывается, что для большинства скоплений из нашего каталога, т.е. для 2541 объекта из 2964, имеются спектроскопические измерения красных смещений. Распределение скоплений по красным смещениям показано на рис. 6. Серым цветом на этом рисунке показано распределение по z для тех скоплений, где не имеется спектроскопических измерений красных смещений, таких скоплений в нашем каталоге 423.

Скопления из каталога PSZ2

Внутри маски переднего плана Галактики, на $|b| > 20$, во 2-м каталоге источников Сюняева—Зельдовича обзора обсерватории им. Планка

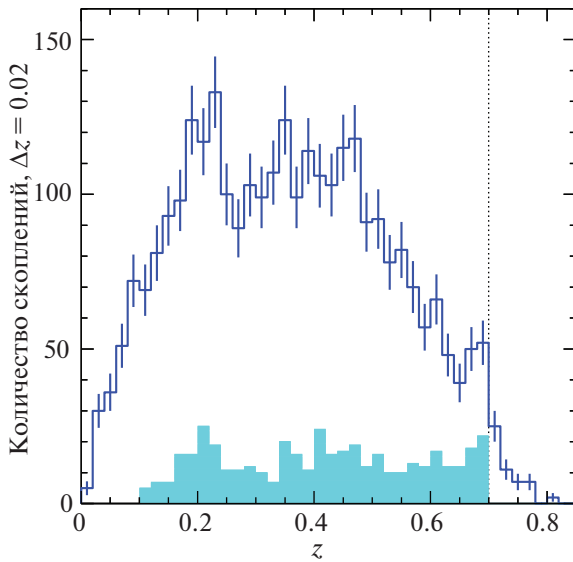


Рис. 6. Распределение скоплений по красным смещениям. Серым цветом показано распределение скоплений, для которых в нашем каталоге нет спектроскопических измерений красных смещений.

(*PSZ2*, Сообщество Планка, 2016в) имеется 1174 объекта. Из них 1135 объектов были обнаружены также нами на картах параметра комптонизации. Основная часть этих источников (около 1000) имеют отношение сигнал—шум в максимуме >7 .

По картам параметра y не были обнаружены 39 источников из каталога *PSZ2*. Из них, объекты *PSZ2 G006.84+50.69*, *PSZ2 G056.62+88.42*, *PSZ2 G061.75+88.11* и *PSZ2 G341.09–33.15* расположены на краях очень ярких источников СЗ — массивных скоплений А2029, Волосы Вероники и А3667. Пара источников *PSZ2 G096.77–50.29* и *PSZ2 G096.78–50.20* расположена на угловом расстоянии $5.5'$, и, таким образом, является дубликатом.

Причины отсутствия в нашем списке других объектов из 2-го каталога Планка установить не удалось. Отметим, однако, что среди них имеется всего три подтвержденных скопления. Кроме того, отметим, что на оптических изображениях полей подавляющего большинства этих источников видны молекулярно-пылевые облака, которые могут давать ложный сигнал Сюняева—Зельдовича, например, из-за излучения монооксида углерода (Хатри, 2016). Таким образом, почти все источники каталога *PSZ2*, не попадающие в наш список источников СЗ, либо являются ложными источниками, либо не подтверждаются в качестве скоплений галактик.

На полях Слоановского обзора, внутри использованной нами маски Галактики, оказывается 519 источников из каталога *PSZ2*. Из них 483 источника оказываются отождествлены со

скоплениями галактик по данным в оптическом и ИК-диапазонах, как это обсуждалось выше. Из оставшихся 36 источников, два источника (*PSZ2 G152.47+42.11* и *PSZ2 G199.73+36.98*) могут быть отождествлены, как при помощи нашего алгоритма, так и при помощи алгоритма *redMaPPer*, со скоплениями галактик, которые имеют оптическое богатство и ИК-светимость ниже использованных нами пороговых значений. Кроме того, еще несколько скоплений могут быть отождествлены с далекими скоплениями галактик, расположенными на $z > 0.7$. В настоящее время для таких скоплений в нашем распоряжении имеются только фотометрические оценки, и поэтому они не включены в наш каталог. Остальные источники Сюняева—Зельдовича из этого списка не могут быть подтверждены в качестве скоплений галактик по имеющимся данным.

Таким образом, в качестве скоплений галактик подтверждается около 93% источников из каталога *PSZ2*, которые вошли также и в наш список источников СЗ. Эта доля оказывается заметно выше доли отождествленных объектов в каталоге *PSZ2* (1203 из 1653, т.е. около 73%) как за счет использования маски монооксида углерода (Хатри, 2016), так и за счет того, что 28 неподтвержденных ранее скоплений из каталога *PSZ2* были отождествлены в нашей работе (см. таблицу).

ОБСУЖДЕНИЕ

Внутри использованной нами маски Галактики на площадках Слоановского обзора нами было обнаружено 2964 скопления галактик, тогда как во 2-м каталоге источников Сюняева—Зельдовича (*PSZ2*, Сообщество Планка, 2016в) в этой области неба имеется 483 скопления. Еще в большей степени в нашем каталоге увеличивается количество далеких скоплений. Так, в нашем каталоге имеется 1218 скоплений, расположенных на красных смещениях $z > 0.4$, тогда как в каталоге *PSZ2* в этой же области неба имеется только 97 таких скоплений. Как обсуждалось выше, это согласуется с тем, что в нашем каталоге предел обнаружения по массе скопления понижен примерно в 2 раза, по сравнению с каталогом *PSZ2*, что на $z > 0.4$ соответствует скоплениям с массами $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$.

На рис. 7 показан примерный диапазон масс и красных смещений скоплений галактик из нашего каталога. Для сравнения, на этом рисунке также показаны массы и красные смещения скоплений из каталога *PSZ2*, и примерные нижние пределы масс скоплений галактик, которые были (будут) достигнуты в обзорах всего неба обсерватории им. Планка и обсерватории СРГ. Предел масс для скоплений из обзора обсерватории им. Планка взят

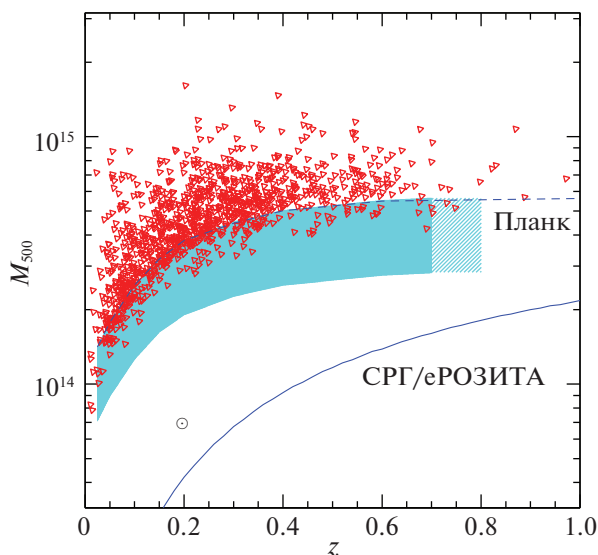


Рис. 7. Затененной областью показан примерный диапазон масс и красных смещений скоплений галактик из нашего каталога. Красными точками показаны массы и красные смещения скоплений из 2-го каталога обзора обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016в). Также штриховой и сплошной линиями показаны примерные нижние пределы масс скоплений галактик, которые были (будут) достигнуты в обзорах всего неба обсерватории им. Планка и обсерватории SRG.

из работы Сообщества Планка (2016в), предел для будущего обзора телескопа eРОЗИТА обсерватории SRG пересчитан из предела по рентгеновскому потоку $f_X > 3 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (0.5–2 кэВ), используя соотношение масса–светимость из работы Вихлинина и др. (2009б). Отметим, что для масс скоплений около $3 \times 10^{14} M_\odot$ двукратное уменьшение порога по массе приводит примерно к десятикратному росту числа наблюдаемых скоплений галактик.

Отметим также, что примерный нижний предел масс для далеких скоплений в нашем каталоге, $M_{500} > 3 \times 10^{14} M_\odot$, соответствует массам скоплений, которые будут обнаружены на любых красных смещениях в рентгеновском обзоре всего неба телескопа eРОЗИТА космической обсерватории SRG (Чуразов и др., 2015). Из этого можно заключить, что в наш каталог входит существенная часть наиболее массивных скоплений, которые будут обнаружены в будущем обзоре обсерватории SRG (см. также рис. 7). Такие скопления будут обнаружены уже в первый год работы обсерватории SRG и впоследствии будут входить во все космологические выборки скоплений галактик северного неба обзора SRG и других больших обзоров скоплений галактик.

Подчеркнем, что поиск скоплений в нашей работе проводится около порога обнаружения в об-

зоре обсерватории им. Планка. Из-за этого значительное число скоплений с массами около порога может быть пропущено. Кроме того, угловое разрешение телескопа обсерватории им. Планка является, на самом деле, недостаточно высоким для поиска далеких скоплений галактик. По этой причине в нашем каталоге имеется большое количество проекций скоплений (около 37%), разрешить которые при помощи телескопа обсерватории им. Планка не представляется возможным. Таким образом, качество нашего каталога является невысоким и, скорее всего, получить какие-либо существенные космологические ограничения на основе этой выборки будет сложно. Однако наш каталог может быть использован для отождествления массивных скоплений галактик, которые будут обнаружены в будущих больших обзорах, таких как рентгеновский обзор всего неба телескопа eРОЗИТА космической обсерватории SRG.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выше представлен каталог скоплений галактик, обнаруженных на картах параметра комптонизации обзора обсерватории им. Планка, и отождествленных при помощи данных ИК-обзора обсерватории ВАЙЗ, а также данных Слоановского обзора. В каталоге представлено около 3000 скоплений с массами выше примерно $M_{500} \sim 3 \times 10^{14} M_\odot$. При этом на высоких красных смещениях $z > 0.4$, в нашем каталоге имеется примерно на порядок больше скоплений, по сравнению со списком скоплений из 2-го каталога обзора обсерватории им. Планка, расположенных в тех же областях неба.

Поиск скоплений на картах параметра y проводился около порога обнаружения. Кроме того, из-за недостаточно высокого углового разрешения телескопа обсерватории им. Планка в нашем каталоге имеется довольно много проекций (около 37%). Поэтому качество нашего каталога является невысоким, однако он может быть использован для отождествления массивных скоплений галактик в будущих больших обзорах, таких как рентгеновский обзор всего неба обсерватории SRG.

Отметим, что большая часть скоплений из нашего каталога уже имеет спектроскопические измерения красных смещений. Количество оставшихся скоплений (около 400) является вполне обозримым, и красные смещения для этих скоплений могут быть измерены спектроскопически на наземных телескопах, оснащенных эффективными спектрографами низкого разрешения. В настоящее время наша группа участвует в работах по измерению красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка, используя различные телескопы (Сообщество Планка, 2015а,б,

2016г; Воробьев и др., 2016). Для таких наблюдений в нашем распоряжении имеется доступ к значительному количеству наблюдательного времени на Российско-Турецком 1.5-м телескопе, на 6-м телескопе САО РАН, а также на 1.6-м телескопе Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, где недавно был введен в строй новый спектрограф среднего и низкого разрешения (Буренин и др., 2016). Это позволит провести измерения красных смещений для всех скоплений, из нашего каталога (для которых это еще необходимо) до запуска космической обсерватории СРГ.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-22-00271.

Замечание

После того, как эта статья была принята к публикации, в препринтах была опубликована работа Хурье и др. (2017), в которой авторы делают вывод о том, что в данных обзора всего неба обсерватории им. Планка можно обнаружить гораздо большее количество скоплений галактик, по сравнению с числом скоплений в каталоге *PSZ2*. Этот вывод хорошо согласуется с результатами нашей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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., Письма в Астрон. журн. **41**, 189 (2015) [R. A. Burenin, *Astron. Lett.* **41**, 167 (2016)].
- Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С., et al., Письма в Астрон. журн. **42**, 333 (2016) [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **41**, 295 (2016)].
- Брузуал, Шарло (G. Bruzual and S. Charlot), *MNRAS* **344**, 1000 (2003).
- Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, and A. Hornstrup), *Astrophys. J.* **502**, 558 (1998).
- 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 (2009b).
- 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)].
- Генри и др. (J.P. Henry, C.R. Mullis, W. Voges, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **162**, 304 (2006).
- Глэддэрс, Йи (M.D. Gladders and H.K.C. Yee), *Astron. J.* **120**, 2148 (2000).
- Джарретт и др. (T.H. Jarrett, M. Cohen, F. Masci, E. Wright, D. Stern, D. Benford, et al.), *Astrophys. J.* **735**, 112 (2011).
- Джойя, Луппино (I.M. Gioia and G.A. Luppino), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **94**, 583 (1994).
- Клерк и др. (N. Clerc, A. Merloni, Y.-Y. Zhang, A. Finoguenov, T. Dwelly, K. Nandra, et al.), *MNRAS* **463**, 4490 (2016).
- Копылова, Копылов, Письма в Астрон. журн. **32**, 95 (2006) [F.G. Kopylova, A.I. Kopylov, *Astron. Lett.* **32**, 84 (2006)].
- Ланг (D. Lang), *Astron. J.* **147**, 108 (2014).
- Ланг и др. (D. Lang, D.W. Hogg, and D.J. Schlegel), *Astron. J.* **151**, 36 (2016).
- Лин и др. (Y.-T. Lin, J.J. Mohr, and S.A. Stanford), *Astrophys. J.* **610**, 745 (2004).
- Майнцер и др. (A. Mainzer, J. Bauer, R.M. Cutri, T. Grav, J. Masiero, R. Beck, P. Clarkson, et al.), *Astrophys. J.* **792**, 30 (2014).
- Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, and D.J.A. Schlegel), arXiv:1603.05664.
- Перлман и др. (E.S. Perlman, D.J. Horner, L.R. Jones, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **140**, 265 (2002).
- Пифаретти и др. (R. Piffaretti, M. Arnaud, G.W. Pratt, E. Pointecouteau, and J.-B. Melin), *Astron. Astrophys.* **534**, A109 (2011).
- 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).
- Розо и др. (E. Rozo, E.S. Rykoff, J.G. Bartlett, and J.-B. Melin), *MNRAS* **450**, 592 (2015).
- 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).
- Сообщество Планка (Planck Intermediate Results IV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **550**, A130 (2013).
- 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 (2014b); 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 (2015b); arXiv:1502.00543.
- Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016a); arXiv:1502.01597.
- Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016b); arXiv:1502.01597.

32. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016в); arXiv:1502.01598.
33. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al.), *Astron. Astrophys.* **586**, A139 (2016г); arXiv:1504.04583.
34. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, in press (2017); arXiv:1608.02013.
35. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.B. Zeldovich), *Comments on Astrophysics and Space Physics* **4**, 173 (1972).
36. Хатри (R. Khatri), *Astron. Astrophys.* **592**, A48 (2016).
37. Хорнер и др. (D.J. Horner, E.S. Perlman, H. Ebeling, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **176**, 374 (2008).
38. Хурье и др. (G. Hurier, N. Aghanim, and M. Douspis), arXiv:1702.00075.
39. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *MNRAS* **450**, 1984 (2015).
40. Эбелинг и др. (H. Ebeling, A.C. Edge, and J.P. Henry), *Astrophys. J.* **533**, 668 (2001).
41. Эйзенштейн и др. (D.J. Eisenstein, J. Annis, J.E. Gunn, A.S. Szalay, A.J. Connolly, R.C. Nichol, et al.), *Astron. J.* **122**, 2267 (2001).