

УДК 524.77

# ПЕКУЛЯРНЫЕ ДВИЖЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК В ОБЛАСТЯХ СВЕРХСКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК CORONA BOREALIS, BOOTES, Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809

© 2017 Ф. Г. Копылова\*, А. И. Копылов

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 мая 2017 года; принята в печать 9 августа 2017 года

Мы представляем результаты исследования пекулярных движений 57 скоплений и групп галактик в областях сверхскоплений галактик Corona Borealis (CrB), Bootes (Boo), SC124, SC138, SC161 и скоплений галактик, расположенных вне массивных структур ( $0.05 < z < 0.10$ ). По данным каталога SDSS (Data Release 8) составлена выборка галактик ранних типов в исследуемых системах, построены их фундаментальные плоскости, определены относительные расстояния и пекулярные скорости. В пределах сверхскоплений галактик наблюдаются значительные пекулярные движения вдоль луча зрения со среднеквадратичными отклонениями (СКО)  $652 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  — в CrB,  $757 \pm 70 \text{ км с}^{-1}$  — в Boo. У самого массивного скопления A 2065 в сверхскоплении CrB пекулярная скорость не обнаружена. Пекулярные движения остальных скоплений галактик могут быть вызваны их гравитационной связанностью как с A 2065, так и со сверхскоплением A 2142. Найдено, что в области сверхскопления Bootes есть два сверхскопления, проецирующиеся друг на друга, с разницей лучевых скоростей примерно  $3000 \text{ км с}^{-1}$ . В сверхскоплении Z 5029/A 1424, около богатого скопления Z 5029, наблюдаются самые большие пекулярные движения со СКО  $1366 \pm 170 \text{ км с}^{-1}$ . СКО пекулярных скоростей 20 скоплений, не входящих в крупные структуры, равно  $0 \pm 20 \text{ км с}^{-1}$ . Вся выборка исследуемых скоплений галактик имеет среднюю пекулярную скорость относительно трехградусного микроволнового фона  $83 \pm 130 \text{ км с}^{-1}$ .

Ключевые слова: галактики: скопления: индивидуальные: Corona Borealis, Bootes, Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809, A 2142 — крупномасштабная структура Вселенной

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В крупномасштабной структуре Вселенной самые большие системы галактик — сверхскопления — связаны между собой филаментами из галактик и располагаются по границам разреженных (пустых) областей. Такие большие системы (или их отдельные части) могут быть гравитационно связанными, если в их пределах достаточен контраст средней плотности галактик (см., например, [1]). Если в сверхскоплениях скопления галактик расположены достаточно компактно в проекции на небесную сферу, можно ожидать наличия в них больших пекулярных скоростей, которые можно измерить, определив расстояния до скоплений галактик. Такими компактными сверхскоплениями в пределах  $0.05 < z < 0.1$  являются сверхскопления Corona Borealis (CrB), Ursa Major (UMa) и Bootes (Boo). Наиболее изученными являются сверхскопления CrB и UMa, а наименее изученным — сверхскопление Boo.

В результате детального исследования семи скоплений галактик A 2061, A 2065, A 2067, A 2079, A 2089, A 2092, A 2124 в CrB [2] получено, что при дисперсии лучевых скоростей  $1300 \text{ км с}^{-1}$  и размере  $18.6 \text{ Мпк}$  масса сверхскопления составляет  $1.2 \times 10^{16} M_{\odot}$ . Этой массы достаточно для того, чтобы система была гравитационно связанной, и пекулярные скорости не превышали  $2200 \text{ км с}^{-1}$ . Смолл и др. [3], существенно увеличив количество галактик с измеренными красными смещениями, на основе моделирования сверхскопления с такими же параметрами, как у CrB, определили массу сверхскопления равной  $4.3 \times 10^{16} M_{\odot}$  и подтвердили идею, высказанную Постманом и др. в статье [2] о гравитационной связанности сверхскопления. Они также предположили, что сверхскопление находится в динамической фазе начального гравитационного сжатия. Справедливость последнего предположения мы попытались продемонстрировать в работе [4], проведя измерения с использованием соотношения Корменди [5]

\*E-mail: flera@sao.ru

расстояний скоплений галактик, входящих в сверхскопление. Недавние исследования пекулярных движений скоплений галактик в сверхскоплении с помощью фундаментальной плоскости (ФП) и соотношения Корменди (данные SDSS, DR7) выявили в СгВ большие пекулярные скорости, указывающие на гравитационную связанность скоплений галактик [6]. В работе [7] оценена масса сверхскопления по вириальной теореме, методом каустик и с помощью модельных расчетов (модель сферического коллапса) и получено, что центральная область сверхскопления (A 2056, A 2061, A 2065, A 2067, A 2089) с массой около  $1.43 \times 10^{16} M_{\odot}$  гравитационно связана, достигла радиуса поворота («turnaround») и находится в состоянии коллапса.

Изучение распределения гравитационного потенциала по данным SDSS (DR10) в области СгВ выявило две глубокие потенциальные ямы, которые соответствуют системам скоплений галактик на  $z \sim 0.074$  и на  $z \sim 0.09$ : одна система находится вблизи сверхскопления СгВ, в другой системе имеется очень богатое скопление A 2142 [8]. Определенная по теореме вириала масса системы с A 2142 превышает массу системы с СгВ в 1.4 раза. Найдено, что эти системы скоплений галактик связаны филаментом из галактик и, возможно, гравитационно связаны. По данным SDSS (DR8, DR10) в области скопления A 2142 найдено сверхскопление, состоящее из 14 систем галактик (с десятью и больше членами), которое имеет оцененную массу  $M_{\text{est}} = 6.2 \times 10^{15} M_{\odot}$  [9]. Обнаруженное сверхскопление, видимо, является частью еще большей системы на  $z \sim 0.09$ .

Подобный метод исследования, примененный к другому массивному сверхскоплению — Shapley, позволил обнаружить, что центральное ядро Shapley, состоящее из пяти скоплений галактик, также находится в стадии начального гравитационного коллапса [10].

Модельные расчеты пекулярных движений скоплений галактик (с учетом ошибок) для модели CDM с  $\Omega = 0.3$  показали, что распределение одномерных пекулярных скоростей скоплений имеет пик на  $400 \text{ км с}^{-1}$  и протягивается до  $1500 \text{ км с}^{-1}$ . Их среднеквадратичное отклонение (СКО)  $\langle V_{1D}^2 \rangle^{1/2} = 544 \text{ км с}^{-1}$ , а в наблюдениях получено  $725 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  [11]. В работе также отмечено, что, несмотря на регистрируемые пекулярные скорости свыше  $2000 \text{ км с}^{-1}$ , наблюдательные данные согласуются с модельными предсказаниями на уровне примерно  $1-3\sigma$ .

Соотношение Талли—Фишера между параметрами спиральных галактик позволило в работе [12] найти СКО пекулярных скоростей вдоль луча зрения 31 скопления галактик, равное  $368 \pm 40 \text{ км с}^{-1}$

(для «In»-выборки членов скоплений галактик), что близко к модельным вычислениям.

Воспользовавшись результатами изучения структуры, динамики и пекулярных скоростей скоплений галактик ( $z = 0.22$ , SDSS DR10 [13]), составляющих сверхскопление SC 0028-0005, мы получили оценку СКО одномерных пекулярных скоростей с квадратичным учетом ошибок, равную примерно  $540 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  (поскольку в указанной работе это не сделано). Пекулярные скорости там определены с помощью ФП галактик ранних типов.

Определение пространственной структуры и пекулярных движений в области сверхскопления Ursa Major (SDSS DR4) показало, что в картинной плоскости сверхскопление имеет размеры  $40 \times 15 \text{ Мпк}$  и выглядит компактным [14]. Оно состоит из трех волокнистых структур, которые не пересекаются и не воздействуют друг на друга, и поэтому в сверхскоплении не наблюдаются значительные пекулярные движения: СКО наблюдаемых пекулярных скоростей  $\langle V^2 \rangle^{1/2} = 290 \pm 120 \text{ км с}^{-1}$  с учетом ошибок измерений [14]. Пекулярные движения определены также с помощью ФП галактик ранних типов.

Нами исследованы пекулярные движения 26 групп и скоплений галактик в областях сверхскоплений галактик Hercules и Leo ( $0.027 < z < 0.045$ ) по данным SDSS (DR8) с помощью ФП галактик ранних типов. Найдено, что, хотя для исследуемых сверхскоплений галактик выполняется закон Хаббла, в их пределах наблюдаются значительные пекулярные скорости скоплений галактик вдоль луча зрения с СКО  $736 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$  (Hercules) и  $625 \pm 70 \text{ км с}^{-1}$  (Leo) [15]. Эти результаты получены с помощью прямой («forward») ФП, без учета смещения Малмквиста.

Целью данной работы является изучение пекулярных движений групп и скоплений галактик, расположенных в областях массивных сверхскоплений галактик Corona Borealis и A 2142, Bootes, в областях более мелких сверхскоплений галактик, таких как SC124, SC138, SC161 [16], пар скоплений галактик. Кроме того, в нашей выборке имеется 20 скоплений галактик, практически не принадлежащих таким крупным сверхскоплениям галактик на красных смещениях  $0.05 < z < 0.10$ . Эти скопления могут образовывать пары или мелкие сверхскопления, но, по крайней мере, не имеют крупных спутников в пределах  $cz \pm 3000 \text{ км с}^{-1}$  и на расстоянии около 4 Мпк в картинной плоскости. При этом скопления A 1035A и A 1035B не являются гравитационно связанными системами [17]. В скоплениях A 1691, A 1024 и A поп1 имеются небольшие падающие на них группы галактик. Работа выполнена нами с привлечением данных

каталогов SDSS (Sloan Digital Sky Survey, DR7, DR8), NED.

Статья организована следующим образом. Во втором разделе описан отбор галактик ранних типов, построены ФП и определены относительные расстояния групп и скоплений галактик. В разделе 3 вычислены пекулярные скорости, определены их СКО в сверхскоплениях. В заключении перечислены полученные результаты. В работе мы использовали следующие космологические параметры:  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ ,  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ ГАЛАКТИК РАННИХ ТИПОВ

### 2.1. Описание выборки

Наша выборка составлена из 57 скоплений галактик, имеющих красные смещения  $z > 0.05$ . Часть скоплений галактик расположена в областях богатых сверхскоплений CгВ, Bootes, несколько систем галактик — в областях менее богатых сверхскоплений Z 5029/A 1424 (SC124), A 1190 (SC138), A 1750/A 1809 (SC161) (сверхскопления названы по самому богатому скоплению в них, в скобках указаны их номера из [18]). Нами включены в выборку две пары систем галактик A 2244+A 2245 и A 2029+A 2033, оставшиеся 20 скоплений галактик не входят в крупные структуры, а представляют собой поле из систем галактик. Оценки динамических характеристик систем галактик основаны на измерении одномерной дисперсии лучевых скоростей, по которой вычисляется вириальная масса в пределах эмпирического радиуса  $R_{200}$  в предположении  $M(r) \propto r$ . Радиус  $R_{200}$  близок (но меньше) к вириальному, и в его пределах плотность системы превышает критическую плотность Вселенной в 200 раз.  $R_{200}$  можно оценить по формуле  $R_{200} = \sqrt{3}\sigma/10H(z) \text{ Мпк}$  [19].

В предположении  $M_{200} \simeq M_{\text{vir}}$  масса в пределах  $R_{200}$  равна  $M_{200} = 3G^{-1}R_{200}\sigma_{200}^2$ . Сначала мы оценили среднюю лучевую скорость скопления  $\langle cz \rangle$  и ее дисперсию  $\sigma$ , потом по дисперсии — радиус  $R_{200}$ . Галактики со скоростями больше  $2.7\sigma$  считались фоновыми. Для остальных галактик опять определяли  $\langle cz \rangle$ ,  $\sigma$ ,  $R_{200}$ . Итеративным способом мы нашли все характеристики скоплений галактик в пределах данного радиуса. Как правило, в качестве центра скопления галактик нами бралась ярчайшая галактика, вблизи которой расположен центр рентгеновского излучения. Скопления галактик, не относящиеся к крупным сверхскоплениям, подобным CгВ и Boo, имеют  $\sigma > 500 \text{ км с}^{-1}$ , а в CгВ и Boo взяты все принадлежащие им скопления галактик, с меньшей дисперсией также. В таблице 1 представлены измеренные динамические параметры скоплений галактик для радиуса  $R_{200}$ :

имя скопления, координаты центра, красное смещение в системе CMB (поправка взята из базы данных NED), радиус  $R_{200}$  в Мегапарсеках, количество галактик с измеренными лучевыми скоростями ( $r_{\text{Pet}} < 17^m77$ ), дисперсия лучевых скоростей с космологической поправкой  $(1+z)^{-1}$  и с ошибкой, масса  $M_{200}$  с ошибкой, соответствующей ошибке определения  $\sigma$ . Для скоплений галактик, помеченных звездочкой, в качестве центра взят центроид, поскольку в центральной области у них расположено несколько ярких галактик.

### 2.2. Комментарии к выборке

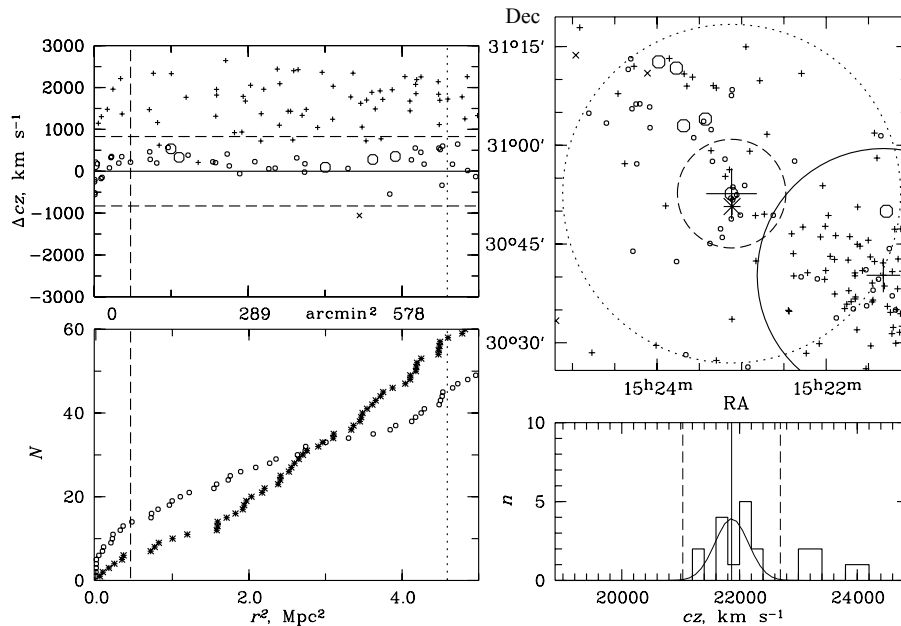
*Сверхскопление Corona Borealis.* Первое исследование динамики скоплений галактик в области сверхскопления CгВ опиралось на шесть систем: A 2061, A 2067, A 2065, A 2079, A 2089, A 2092 [2]. Для более детального исследования этой области в обзоре Norrgis Survey [3, 20, 21] Смолл и его коллеги включили в сверхскопление еще две системы: A 2056 и CL 1529+29. В каталоге сверхскоплений галактик [18] к скоплениям галактик [2] добавлены A 2019 и A 2124. В работе [4] для определения динамического состояния сверхскопления CгВ были использованы восемь скоплений галактик из каталога [2] и соотношение Корменди для галактик ранних типов. Для определения динамического состояния сверхскопления с помощью ФП галактик ранних типов по данным каталога SDSS (DR7) в работе [6] рассматривались шесть систем галактик, как в исследовании [2], а затем, в работе [7] — восемь, как в статье [3].

Для того чтобы получить новые измерения пекулярных скоростей, мы сначала определили динамические характеристики самих скоплений галактик по данным SDSS (DR7), поскольку, например, в области A 2067 мы, в отличие от многих других авторов, не находим такую богатую систему галактик. Чтобы детальнее охарактеризовать структуру и кинематику скопления A 2067, а также его ближайших окрестностей, на рис. 1 в качестве примера представлены:

- отклонение лучевых скоростей галактик—членов скопления и галактик, отнесенных к фону, от средней лучевой скорости скопления в зависимости от квадрата радиуса (расстояния от центра скопления);
- интегральное распределение числа галактик в зависимости от квадрата радиуса;
- расположение галактик в картинной плоскости в экваториальных координатах;
- гистограмма распределения лучевых скоростей всех галактик в пределах радиуса  $R_{200}$ .

Таблица 1. Положение систем галактик на небе и их динамические свойства

Cluster	$\alpha$ (J2000), hh mm ss.s	$\delta$ (J2000), dd mm ss	$z_{\text{spec}}$	$R_{200}$ , Mpc	$N_z$	$\sigma$ , km s $^{-1}$	$M_{200}$ , $10^{14} M_{\odot}$
SCI CrB							
A 2019	15 03 28.9	+27 09 16	0.0817	0.82	14	345 ± 92	0.68 ± 0.50
A 2056	15 19 02.8	+28 20 32	0.0754	0.57	5	237 ± 106	0.22 ± 0.30
A 2061	15 21 20.6	+30 40 15	0.0782	1.70	121	712 ± 65	6.03 ± 1.65
A 2065	15 22 29.2	+27 42 27	0.0726	2.64	210	1104 ± 76	22.53 ± 4.29
A 2067	15 23 02.0	+30 52 39	0.0733	0.68	14	286 ± 76	0.39 ± 0.31
A 2079	15 23 45.1	+28 55 43	0.0661	1.48	85	618 ± 67	3.96 ± 1.29
A 2089	15 32 49.8	+28 02 22	0.0739	1.27	51	531 ± 74	2.50 ± 1.05
A 2092	15 33 15.4	+31 08 42	0.0669	1.17	37	486 ± 80	1.93 ± 0.88
A 2124	15 44 59.0	+36 06 34	0.0660	1.77	85	736 ± 80	6.70 ± 2.18
CL 1529+29*	15 30 28.4	+28 57 03	0.0845	0.98	19	411 ± 94	1.16 ± 0.80
A 2142	15 58 20.0	+27 14 00	0.0904	2.28	190	963 ± 70	14.82 ± 3.23
SCI Bootes							
A 1775A	13 42 42.0	+26 14 23	0.0656	0.78	18	324 ± 76	0.57 ± 0.40
A 1781*	13 44 45.5	+29 44 44	0.0630	0.87	25	362 ± 72	0.80 ± 0.48
A 1795	13 48 52.5	+26 35 34	0.0632	1.86	125	775 ± 70	7.83 ± 2.12
A 1825	13 58 03.3	+20 37 08	0.0641	1.52	40	633 ± 100	4.26 ± 2.02
A 1828	13 58 14.7	+18 20 46	0.0634	0.80	13	335 ± 93	0.63 ± 0.52
A 1831A	13 59 10.7	+27 56 26	0.0637	1.15	34	480 ± 82	1.86 ± 0.95
A 1775B	13 41 49.1	+26 22 24	0.0759	1.39	62	581 ± 74	3.28 ± 1.25
A 1800	13 49 23.6	+28 06 26	0.0761	1.68	67	705 ± 86	5.86 ± 2.14
A 1831B	13 59 15.1	+27 58 34	0.0762	2.27	89	952 ± 101	14.43 ± 4.59
A 1898*	14 20 38.9	+25 15 28	0.0792	1.04	21	434 ± 95	1.36 ± 0.89
CL 1350+29	13 50 15.5	+29 13 17	0.0772	0.86	23	359 ± 75	0.77 ± 0.48
SCI Z 5029/A 1424							
A 1424	11 57 29.0	+05 0 5 21	0.0771	1.51	63	632 ± 80	4.22 ± 1.60
A 1516	12 18 52.4	+05 14 44	0.0773	1.58	61	660 ± 84	4.80 ± 1.83
Z 4905	12 10 16.8	+05 23 10	0.0780	1.36	42	568 ± 88	3.06 ± 1.42
Z 5029	12 17 41.1	+03 39 21	0.0785	2.18	126	912 ± 81	12.67 ± 3.38
SCI A 1190							
A 1173	11 09 15.3	+41 33 41	0.0770	1.23	35	516 ± 87	2.30 ± 1.16
A 1190	11 11 43.6	+40 49 15	0.0762	1.60	79	670 ± 75	5.03 ± 1.69
A 1203	11 13 48.2	+40 17 09	0.0761	0.99	42	416 ± 64	1.20 ± 0.55
SCI A 1750/A 1809							
A 1750	13 30 50.6	-01 51 43	0.0869	1.78	93	747 ± 77	6.93 ± 2.14
A 1773	13 42 09.6	+02 13 38	0.0784	1.98	83	832 ± 91	9.62 ± 3.16
A 1780	13 44 40.6	+02 51 43	0.0788	1.13	37	474 ± 78	1.78 ± 0.88
A 1809	13 53 06.4	+05 08 59	0.0802	1.74	84	729 ± 80	6.46 ± 2.13



**Рис. 1.** Распределение галактик в скоплении А 2067 ( $r_{\text{Pet}} < 17^{\text{m}}77$ ). На левой верхней панели показано отклонение лучевых скоростей галактик от средней лучевой скорости скопления, определенной по галактикам в пределах радиуса  $R_{200}$ . Горизонтальные штриховые линии соответствуют отклонениям  $\pm 2.7\sigma$ , вертикальной штриховой линией отмечен радиус  $R_{200}$ , пунктирной линией — радиус Эйбелла  $R_A$  (2.14 Мпк). Кружками большего размера отмечены галактики ярче  $M_K < -24^{\text{m}}5$ , плюсами — галактики заднего фона (из скопления А 2061), крестиками — галактики переднего фона. На левой нижней панели дано интегральное распределение полного числа галактик в зависимости от квадрата расстояния от центра скопления. Кружки соответствуют галактикам, обозначенным кружками на левом верхнем рисунке, звездочки — галактикам фона. Штриховая и пунктирная линии обозначают то же, что и на панели вверх. На правой верхней панели показано распределение на небе в экваториальной системе координат галактик, которые представлены на верхнем левом рисунке. Кругами выделены области с радиусом  $R_{200}$ ,  $R_A$ . Обозначения те же. Область исследования ограничена  $25^{\text{h}}15'$ . Большим крестом отмечен центр скопления А 2067, ниже звездочкой помечен центр рентгеновского излучения согласно работе [22]. В правом углу сплошной линией показана область с радиусом  $R_{200}$  скопления А 2061, крестом указан его центр. На правой нижней панели представлено распределение по лучевым скоростям всех галактик в пределах радиуса  $R_{200}$ . Сплошной линией для членов скопления показана гауссиана, соответствующая  $\sigma$  скопления. Сплошная вертикальная линия указывает среднюю лучевую скорость скопления, штриховые линии соответствуют отклонениям  $\pm 2.7\sigma$ .

На правой верхней панели рис. 1 большие кресты соответствуют центрам скоплений А 2061 (в нижнем углу) и А 2067 (в центре), а найденные нами радиусы  $R_{200}$  показаны сплошной и штриховой линиями соответственно. Можно заметить, что А 2067 является небольшой группой в филаменте, протянувшемся от богатого скопления А 2061. Поскольку у системы зарегистрировано рентгеновское излучение, она не является случайной проекцией галактик, а стала обособляться из филамента в отдельную группу (верхняя левая панель рис. 1). Система галактик А 2056 также является небольшой группой, но без зарегистрированного рентгеновского излучения. Система галактик CL 1529+29 является двойной не вириализованной системой с двумя ярчайшими галактиками примерно одинаковой яркости. В качестве центра этой системы взят центроид галактик.

*Сверхскопление Bootes.* В каталоге сверхскоплений галактик [18] сверхскопление Bootes

определено как состоящее из 12 членов. Данные SDSS показывают, что два скопления из каталога Эйбелла: А 1861 и А 1927 — более далекие системы, а два — А 1827 и А 1873 — очень бедные группы, которые мы в своем исследовании не стали рассматривать. Кроме того, мы определили, что скопления А 1775 и А 1831 являются бимодальными скоплениями галактик [23, 24], где основные скопления, обозначенные нами как А 1775В и А 1831В (поскольку они более далекие), имеют зарегистрированное рентгеновское излучение. Область сверхскопления Bootes представляет собой слоистую структуру: в ближнем слое с  $z \sim 0.064$  нами найдено шесть систем галактик, среди которых самым богатым скоплением является А 1795, в дальнем слое с  $z \sim 0.077$  — пять систем галактик с самым богатым скоплением А 1831В. Скопления А 1825 и А 1828 в ближней системе расположены несколько в стороне от основной выборки, а скопление А 1898 — в стороне от дальней выборки.

*Сверхскопление Z 5029/A 1424* — часть сверхскопления SC124. В каталоге сверхскоплений галактик [16] к этой системе отнесены два эйбелловских скопления A 1424 и A 1516, но самой массивной системой в этой области является скопление Z 5029 (на рис. 10 в статье [16] это скопление ошибочно обозначено как A 1516). Скопление A 1516 располагается в картинной плоскости выше Z 5029, а рядом с ним находится скопление Z 4905. Согласно полученным динамическим параметрам этих скоплений галактик (таблица 1), у них близкие лучевые скорости.

*Сверхскопление A 1190* — часть сверхскопления SC138. В каталоге сверхскоплений галактик [16] и в более ранних каталогах в этой области найдено пять скоплений галактик: A 1155, A 1173, A 1187, A 1190, A 1203. Мы определили параметры этих систем и нашли, что скопления A 1155 и A 1187 соответствуют бедным группам галактик с дисперсией лучевых скоростей меньше  $200 \text{ км с}^{-1}$ , поэтому здесь мы их не рассматриваем. Реально в этом сверхскоплении расположены три богатых скопления галактик, из которых A 1190 является самой массивной системой.

*Сверхскопление A 1750/A 1809* — часть сверхскопления SC161. Мы определили пекулярные движения только для самых массивных систем галактик в этом сверхскоплении [16]. Все три сверхскопления имеют близкие красные смещения и характеризуются тем, что в распределении лучевых скоростей составляющих их скоплений присутствуют несколько пиков, то есть они являются формирующимися системами.

Кроме крупных сверхскоплений галактик нами рассмотрены также пары скоплений галактик A 2029 и A 2033, A 2244 и A 2245.

### 2.3. Отбор галактик ранних типов

В настоящей работе для определения относительных расстояний скоплений галактик мы использовали параметры галактик, представленные в каталоге SDSS Data Release 8 [25]. По данным этого выпуска, в котором учтены ошибки обработки изображений галактик большого размера, допущенные в предыдущих выпусках, была построена ФП 93 000 галактик ранних типов с  $z < 0.2$  во всех фильтрах [26]. Мы воспользовались формой полученной ФП, уточнив при этом нуль-пункт для нашей выборки. При отборе галактик ранних типов в исследуемых группах и скоплениях мы использовали следующие критерии, немного отличающиеся от критериев работы [26]:

1) центральная дисперсия скоростей звезд —  $100 < \sigma < 420 \text{ км с}^{-1}$ ;

2) параметр, характеризующий вклад профиля Вокулера в профиль поверхностной яркости —  $\text{fracDeV}_r \geq 0.8$ ;

3) индекс концентрации, равный отношению радиусов, содержащих 90% и 50% потоков Петросьяна —  $r_{90}/r_{50} \geq 2.6$ ;

4) ограничение по цвету —  $\Delta(u-r) > -0.2$ , чтобы исключить галактики поздних типов, где  $\Delta(u-r) = (u-r) + 0.108 M_r - 0.3$  [27];

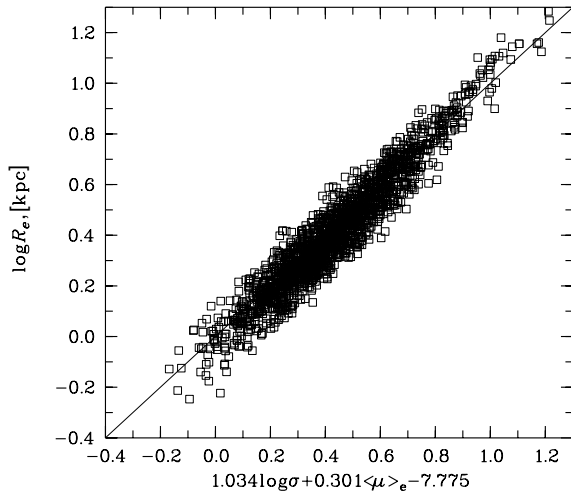
5) соотношение осей галактик —  $\text{deVAB} \geq 0.3$ ;

6) отношение  $S/N$  в спектрах галактик —  $\text{snMedian} > 10$ ;

7) предельная величина, которая для нашей выборки соответствует спектроскопическому пределу SDSS, равному неисправленной за поглощение величине,  $r_{\text{Pet}} = 17^{\text{m}}77$  [28].

Количество используемых галактик играет ключевую роль в определении относительных расстояний скоплений галактик, поскольку стандартная ошибка среднего расстояния равна стандартному отклонению, деленному на  $\sqrt{N}$ . Однако при этом важно, чтобы галактики были отобраны однородным способом. Наши критерии близки к критериям, примененным в [7]. Основными у нас являются критерии (1) и (2). Из-за галактик с  $\sigma < 100 \text{ км с}^{-1}$  разброс в определяемых расстояниях возрастает [29]. Точность измерения таких  $\sigma$  ниже, чем точность измерения больших скоростей. Критерий (4) позволяет исключить галактики поздних типов, оставшиеся после применения критерия (2). Остальные критерии обеспечивают более жесткий отбор галактик ранних типов. Кроме того, при одной и той же дисперсии лучевых скоростей  $\sigma$  у галактик могут быть небольшие популяционные различия (металличность, возраст) [29]. Такие галактики мы исключили по их остаточным отклонениям от ФП (рис. 3, пункт 2.4).

Нами взяты параметры галактик, которые получены путем подгонки профиля Вокулера к наблюдаемому профилю галактик. Все поправки: апертурные поправки ( $\sigma_0 = \sigma_{\text{sdss}}(r_{\text{fiber}}/(r_{\text{cor}}/8))^{0.04}$ , где  $r_{\text{cor}} = r_{\text{dev}} \sqrt{b/a}$  — модельный радиус галактики из SDSS с учетом ее эллиптичности), поправки за поглощение в Галактике (по данным SDSS),  $K$ -поправка [30] — сделаны в соответствии с работой [26]. Лучевые скорости скоплений галактик приведены к системе трехградусного реликтового фона: поправки взяты из базы данных NED. В поправке за космологическое потускнение средней



**Рис. 2.** Проекция ФП галактик ранних типов вдоль длинной оси, эффективного радиуса, для скоплений галактик. Линия соответствует общему нуль-пункту выборки  $\gamma = -7.775$ .

поверхностной яркости («dimming»)

$$\begin{aligned} \mu_e &= m_{\text{dev}} + 2.5 \lg(2\pi r_{\text{dev}}^2) \\ &- K(z) - 5 \lg(1 + z_{\text{ph}}) - 5 \lg(1 + z_{\text{sp}}) \end{aligned}$$

учтено, что  $z_{\text{sp}}$  — измеренное красное смещение, в которое входит и пекулярная скорость объекта, а  $z_{\text{ph}}$  — красное смещение, соответствующее истинному космологическому расстоянию [31]. В оценке поверхностной яркости учтена только первая часть поправки, ее вторая часть учтена в нуль-пункте при определении зависимости Хаббла (Подраздел 2.4).

#### 2.4. Фундаментальная плоскость

На рис. 2 приведена полученная ФП в фильтре  $r$  (SDSS) для 1732 галактик ранних типов, отобранных по приведенным выше критериям. Линия соответствует прямой («forward») регрессии [26] относительно  $\lg R_e$  и имеет вид:

$$\lg R_e [\text{kpc}] = 1.034 \lg \sigma + 0.301 \langle \mu \rangle_e + \gamma, \quad (1)$$

где  $R_e$  — эффективный радиус галактики в килопарсеках,  $\langle \mu_e \rangle$  — средняя поверхностная яркость в пределах этого радиуса и  $\sigma$  — центральная дисперсия лучевых скоростей звезд. Мы уточнили величину нуль-пункта  $\gamma$  для нашей выборки и получили  $\gamma = -7.775$ . Среднеквадратичное отклонение нуль-пункта ФП равно  $0.068 \pm 0.003$ , что эквивалентно примерно 16% ошибке определения расстояния для одной галактики. Формальная ошибка определения расстояния скопления зависит от числа используемых галактик и меняется от 2% до 12%. Ошибки измерения параметров

галактик, входящих в ФП, дают вклад в среднеквадратичное отклонение на ФП 0.045 (данные SDSS [6]). Дополнительный разброс могут вносить возраст и металличность галактик, определяемые по линии  $\text{Mg}_2$ , но, согласно [32], при сравнении остаточных отклонений от ФП и от зависимости  $\text{Mg}_2 - \sigma$  сильная корреляция между ними не обнаружена. Найдено небольшое влияние галактик  $E$  и  $SO$  по отдельности на коэффициенты и нуль-пункт ФП [32]. Кроме того, разброс галактик на ФП увеличивают подсистемы, присутствующие в изучаемых скоплениях галактик [33]. Значительный вклад в разброс галактик на ФП вносит однородный сдвиг Малмквиста, поправку за него мы внесли согласно [34]. Нуль-пункт изменяется с расстоянием галактик, если  $\lg R_e$  измеряется в угловых секундах, поскольку другие параметры —  $\langle \mu_e \rangle$  и  $\sigma$  — с расстоянием не меняются. Согласно [34], при использовании «forward» ФП для оценки расстояний нужно учитывать поправки за однородный сдвиг Малмквиста (уравнение (A3) в этой работе). Мы учли это смещение при определении расстояний скоплений галактик.

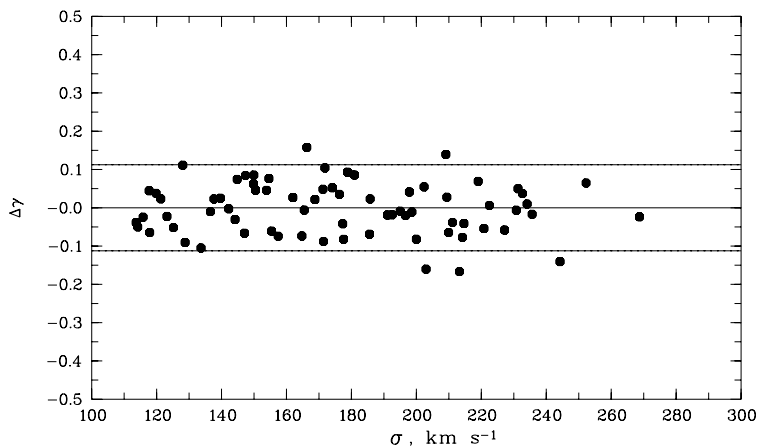
Остаточные отклонения от ФП

$$\Delta\gamma = \lg R_e [\text{arcsec}] - 1.034 \lg \sigma - 0.301 \langle \mu_e \rangle - \gamma$$

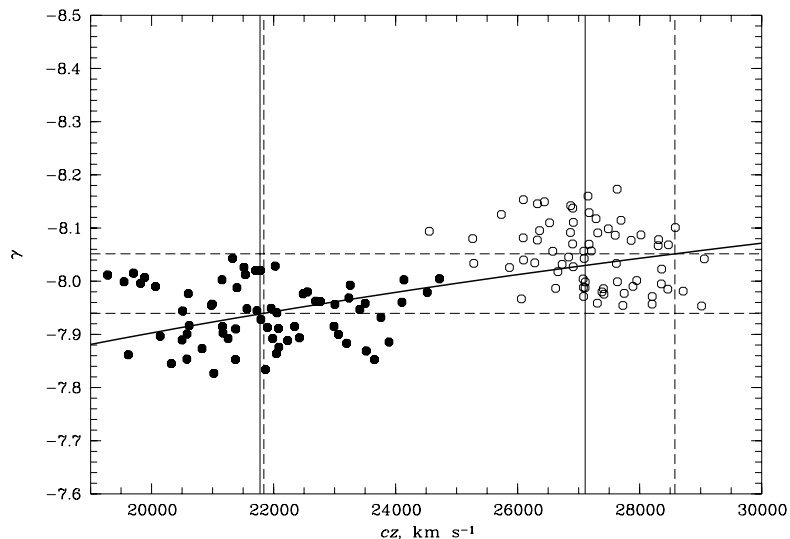
не зависят от центральной дисперсии звезд в галактиках. Мы использовали этот факт для уточнения выборки отобранных ранее галактик в каждом из скоплений (рис. 3). Эмпирическим путем мы нашли, что практически все отклонения нуль-пунктов  $\gamma$  галактик от среднего нуль-пункта скопления не превышают  $2\sigma$ . На рисунке в качестве примера приведено скопление A 2065, в котором галактики, выходящие за  $2\sigma$  (горизонтальные линии на рисунке), не учитывались при вычислении среднего нуль-пункта скопления.

### 3. ПЕКУЛЯРНЫЕ СКОРОСТИ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

На рис. 4 приведены индивидуальные наблюдаемые расстояния (нуль-пункты  $\gamma$ , рассчитанные при  $\lg R_e$  в секундах дуги) галактик в скоплении A 2065 (заполненные кружки) и более далекого скопления A 2142 (пустые кружки) в зависимости от их лучевых скоростей относительно микроволнового фона. Жирной линией показана ожидаемая хаббловская зависимость между лучевой скоростью и расстоянием, рассчитанная для принятой нами модели и нуль-пункта ФП, равного  $-7.775$ . При этом сопутствующее радиальное расстояние  $D = (cz/H_0)(1 - 0.225z)/(1 + z)$  подсчитано при  $q_0 = -0.055$ , а в нуль-пункт ФП введена поправка за эволюцию звезд в галактике  $Q = 1.07z$  [26] и учтена часть геометрического потускнения света галактик  $5 \lg(1 + z_{\text{ph}})$ . Сплошные вертикальные



**Рис. 3.** Остаточные отклонения ФП  $\Delta\gamma$  в зависимости от центральной дисперсии звезд  $\sigma$  для скопления А 2065. Горизонтальные линии соответствуют отклонениям от средней величины  $\gamma$  на уровне  $\pm 2\sigma$ .



**Рис. 4.** Зависимость индивидуальных расстояний, нуль-пунктов ФП  $\gamma$  от лучевой скорости галактик, расположенных в пределах радиуса  $R_{200}$  в скоплениях А 2065 (заполненные кружки) и А 2142 (пустые кружки). Жирная линия соответствует хаббловской зависимости между лучевой скоростью и расстоянием. Сплошными вертикальными линиями показаны средние лучевые скорости скоплений  $cz_{СМВ}$ , которые на пересечении с хаббловской кривой дают соответствующие расстояния, штриховыми линиями — средние расстояния скоплений, найденные по ФП, и соответствующие им лучевые скорости  $cz_{ФР}$ .

линии у каждого скопления показывают их средние лучевые скорости относительно микроволнового фона, определенные для области радиусом  $R_{200}$ . Штриховые (горизонтальные) линии показывают средние расстояния скоплений галактик, определенные по ФП, и соответствующие им лучевые скорости (вертикальные линии). Разница лучевых скоростей характеризуется как пекулярная скорость группы или скопления галактик вдоль луча зрения. То есть  $V_{pec} = c(z_{СМВ} - z_{ФР}) / (1 + z_{ФР})$ , где  $c$  — скорость света,  $cz_{СМВ}$  — лучевая скорость скопления относительно реликтового фона, а  $cz_{ФР}$  — лучевая скорость скопления, соответствующая

расстоянию, определенному по ФП. Полученные результаты для исследуемых систем галактик представлены в таблице 2. В первой колонке дано имя системы галактик; во второй — среднее расстояние системы (наблюдаемый нуль-пункт  $\gamma$  с ошибкой); в третьей колонке приведено количество используемых галактик; в четвертой — красное смещение  $z_{ФР}$ , соответствующее  $\gamma$ ; в пятой — расстояние  $D$  в Мпк, соответствующее  $z_{ФР}$ ; в шестой колонке дана пекулярная скорость с ошибкой; в седьмой колонке — отношение пекулярной скорости к ее ошибке. В таблице 3 приведены средние пекулярные скорости систем скоплений галактик и



их СКО вдоль луча зрения с квадратичным учетом ошибок.

**Таблица 2.** Пекулярные скорости групп и скоплений галактик

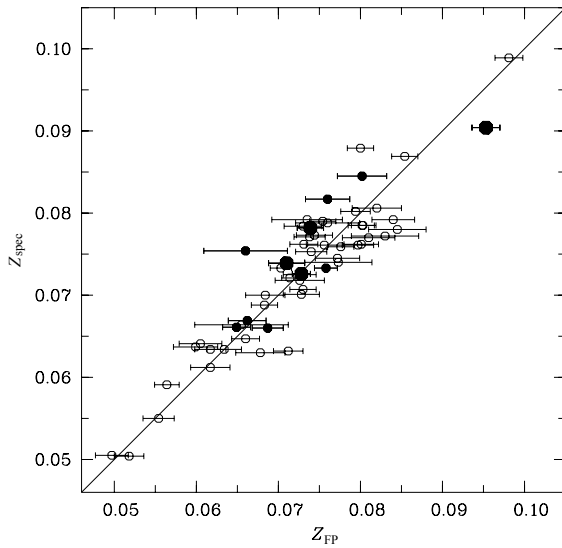
Cluster	$\gamma$	$N_{FP}$	$z_{FP}$	$D$ , Мpc	$V_{pec}$ , km s $^{-1}$	$V_{pec}/\Delta V_p$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
SCI CrB						
A 2019	$-7.958 \pm 0.016$	9	0.0760	319.9	$1591 \pm 810$	1.96
A 2056	$-7.898 \pm 0.032$	3	0.0660	278.5	$2645 \pm 1530$	1.73
A 2061	$-7.945 \pm 0.009$	40	0.0739	311.1	$1197 \pm 470$	2.55
A 2065	$-7.940 \pm 0.007$	66	0.0728	306.9	$-58 \pm 340$	0.17
A 2067	$-7.956 \pm 0.008$	7	0.0758	319.3	$-700 \pm 420$	1.67
A 2079	$-7.891 \pm 0.012$	24	0.0649	273.9	$347 \pm 520$	0.67
A 2089	$-7.929 \pm 0.014$	17	0.0710	299.3	$814 \pm 650$	1.25
A 2092	$-7.899 \pm 0.015$	15	0.0662	279.3	$205 \pm 680$	0.30
A 2124	$-7.915 \pm 0.012$	32	0.0687	289.5	$-747 \pm 550$	1.36
CL 1529+29	$-7.980 \pm 0.008$	18	0.0801	337.5	$1203 \pm 900$	1.34
A 2142	$-8.052 \pm 0.007$	67	0.0953	399.5	$-1343 \pm 510$	2.63
SCI Bootes						
A 1775A	$-7.895 \pm 0.037$	6	0.0655	276.6	$241 \pm 1720$	0.14
A 1781	$-7.910 \pm 0.019$	12	0.0678	281.7	$-1349 \pm 910$	1.48
A 1795	$-7.930 \pm 0.003$	29	0.0712	299.9	$-2223 \pm 540$	4.12
A 1825	$-7.862 \pm 0.018$	11	0.0605	255.7	$1006 \pm 780$	1.29
A 1828	$-7.881 \pm 0.014$	7	0.0634	267.5	$12 \pm 640$	0.02
A 1831A	$-7.858 \pm 0.019$	10	0.0599	253.2	$1063 \pm 820$	1.30
A 1775B	$-7.966 \pm 0.009$	27	0.0776	326.4	$-446 \pm 500$	0.89
A 1800	$-7.977 \pm 0.010$	30	0.0797	335.2	$-999 \pm 570$	1.75
A 1831B	$-7.941 \pm 0.009$	34	0.0731	307.8	$881 \pm 500$	1.76
A 1898	$-7.944 \pm 0.024$	7	0.0735	309.7	$1586 \pm 1290$	1.23
CL 1350+29	$-7.994 \pm 0.021$	13	0.0830	348.9	$-1615 \pm 1220$	1.32
SCI Z 5029/A 1424						
A 1424	$-7.945 \pm 0.011$	30	0.0738	310.6	$931 \pm 580$	1.60
A 1516	$-7.948 \pm 0.012$	26	0.0744	313.2	$820 \pm 650$	1.26
Z 4905	$-8.001 \pm 0.014$	25	0.0845	354.9	$-1794 \pm 1040$	1.72
Z 5029	$-7.980 \pm 0.009$	39	0.0802	337.2	$-461 \pm 520$	0.89
SCI A 1190						
A 1173	$-7.984 \pm 0.016$	20	0.0810	340.7	$-1112 \pm 960$	1.16

Таблица 2. Продолжение

Cluster	$\gamma$	$N_{\text{FP}}$	$z_{\text{FP}}$	$D$ , Мpc	$V_{\text{pec}}$ , km s $^{-1}$	$V_{\text{pec}}/\Delta V_p$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
A 1190	$-7.979 \pm 0.011$	38	0.0801	337.0	$-1098 \pm 630$	1.74
A 1203	$-7.952 \pm 0.013$	12	0.0751	316.2	$289 \pm 690$	0.37
SCI A 1750/A 1809						
A 1750	$-8.006 \pm 0.008$	45	0.0854	358.8	$418 \pm 490$	0.85
A 1773	$-7.940 \pm 0.013$	30	0.0730	307.4	$1515 \pm 680$	2.23
A 1780	$-7.946 \pm 0.025$	14	0.0740	311.5	$1352 \pm 1320$	1.02
A 1809	$-7.976 \pm 0.010$	37	0.0794	334.0	$223 \pm 550$	0.40
A 0602	$-7.870 \pm 0.017$	14	0.0617	260.5	$-142 \pm 740$	0.19
A 0671	$-7.783 \pm 0.016$	30	0.0497	210.5	$238 \pm 590$	0.40
A 1024	$-7.964 \pm 0.014$	14	0.0772	325.0	$-762 \pm 800$	0.95
A 1035A	$-7.913 \pm 0.010$	37	0.0683	288.1	$143 \pm 480$	0.30
A 1035B	$-7.954 \pm 0.018$	17	0.0754	317.4	$1014 \pm 910$	1.11
A 1066	$-7.939 \pm 0.012$	25	0.0728	306.8	$-747 \pm 600$	1.24
A 1205	$-7.992 \pm 0.013$	27	0.0833	349.9	$-1645 \pm 770$	2.14
A 1238	$-7.946 \pm 0.010$	16	0.0740	311.4	$386 \pm 560$	0.68
A 1371	$-7.913 \pm 0.014$	20	0.0684	288.3	$465 \pm 710$	0.65
A 1589	$-7.938 \pm 0.012$	34	0.0726	305.7	$-28 \pm 610$	0.04
A 1668	$-7.898 \pm 0.011$	25	0.0660	278.3	$-363 \pm 520$	0.70
A 1691	$-7.925 \pm 0.008$	40	0.0703	296.7	$832 \pm 380$	2.19
A 1767	$-7.940 \pm 0.009$	30	0.0730	307.5	$-641 \pm 480$	1.34
A 1904	$-7.931 \pm 0.006$	40	0.0714	301.0	$200 \pm 300$	0.67
A 1991	$-7.832 \pm 0.011$	28	0.0564	238.5	$756 \pm 450$	1.68
A 2029	$-7.980 \pm 0.009$	61	0.0803	337.8	$-518 \pm 410$	0.75
A 2033	$-7.989 \pm 0.015$	26	0.0820	344.6	$-372 \pm 900$	0.41
A 2064	$-7.964 \pm 0.022$	13	0.0773	325.2	$-921 \pm 1230$	0.75
A 2244	$-8.063 \pm 0.007$	33	0.0981	410.9	$229 \pm 510$	0.45
A 2245	$-7.979 \pm 0.008$	37	0.0800	336.6	$2185 \pm 470$	4.65
RXC J1022	$-7.825 \pm 0.014$	19	0.0554	234.5	$-127 \pm 580$	0.22
RXC J1351	$-7.870 \pm 0.013$	24	0.0617	260.7	$493 \pm 570$	0.86
SHK 352	$-7.796 \pm 0.015$	23	0.0518	219.2	$-409 \pm 550$	0.74
Z 6718	$-7.938 \pm 0.017$	12	0.0726	305.8	$-225 \pm 910$	0.25

На рис. 5 приведена диаграмма Хаббла для систем галактик из области сверхскопления Согопа

BoREALIS и скопления A 2142 на фоне всей выборки. Нами было показано ранее на рис. 1, что система

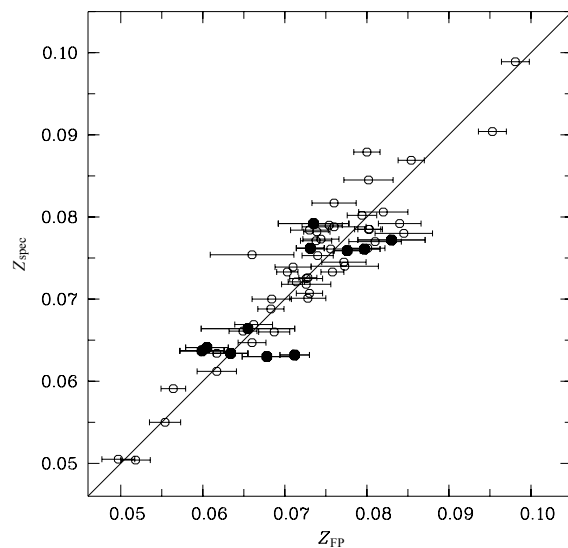


**Рис. 5.** Диаграмма Хаббла (скорость —  $z_{\text{спец}}$ , расстояние —  $z_{\text{FF}}$ ) для области сверхскопления галактик Согопа Vorealis: члены сверхскопления A 2061, A 2065 и A 2089 показаны большими, а остальные скопления — маленькими заполненными кружками. Пустые кружки — вся рассматриваемая выборка.

A 2067 является небольшой группой с дисперсией лучевых скоростей меньше  $300 \text{ км с}^{-1}$ . Система A 2056 является также бедной группой с небольшим количеством членов (таблица 1). Если их не рассматривать, то средняя пекулярная скорость A 2061+A 2065+A 2089, гравитационно связанного ядра сверхскопления [7], положительна и равна  $651 \pm 290 \text{ км с}^{-1}$ . Система скоплений галактик удаляется относительно микроволнового фона со скоростью, превышающей ошибку измерений в 2.2 раза. СКО их пекулярных скоростей равно  $668 \pm 150 \text{ км с}^{-1}$  (таблица 3).

Однако поскольку самое богатое скопление в СгВ A 2065 не имеет пекулярной скорости (таблица 2), то можно предположить, что только самые далекие скопления в СгВ, имеющие большие положительные пекулярные скорости, A 2019, A 2061 и CL 1529+29, движутся по направлению к массивному сверхскоплению галактик с A 2142 вдоль соединяющего их филамента [8]. По данным SDSS DR8 и DR10 найдено, что это сверхскопление с центром в A 2142 является сверхскоплением с коллапсирующим ядром [16].

A 2142 — массивное скопление (по нашим оценкам масса  $M_{200} = 1.5 \times 10^{15} M_{\odot}$ ) на  $z = 0.09$  с самой высокой рентгеновской светимостью [22] из всей выборки. На рис. 4 оно показано пустыми кружками, и можно отметить, что основная масса галактик находится дальше ( $\gamma$  меньше), чем должна по хаббловской зависимости (жирная линия). Скопление A 2142 имеет отрицательную



**Рис. 6.** То же, что на рис. 5, но для области сверхскопления Bootes.

пекулярную скорость, превышающую ошибку в 2.6 раза, то есть, возможно, скопление движется по направлению к сверхскоплению к СгВ. Таким образом, гравитационная связанность больших систем скоплений галактик сверхскопления СгВ и сверхскопления с A 2142 [8] подтверждается.

Скопления A 2079, A 2092 и A 2124 показывают небольшие пекулярные скорости, скорее всего, на них не оказывает существенного влияния центральная часть сверхскопления. Но в целом в пределах СгВ наблюдаются значительные пекулярные движения вдоль луча зрения с СКО  $652 \pm 50 \text{ км с}^{-1}$ , значительно превышающим движение скоплений галактик, не входящих в крупные структуры,  $0 \pm 20 \text{ км с}^{-1}$ . В более ранней работе [4] с помощью соотношения Корменди (двухпараметрического) нами найдены значительные отрицательные пекулярные скорости у скоплений галактик A 2089 и A 2092, в результате чего был сделан вывод о гравитационном сжатии ядра сверхскопления. В данной работе, выполненной с помощью ФП (трехпараметрической плоскости) и большего числа галактик, таких скоростей у этих систем галактик мы не находим. У остальных скоплений галактик знаки пекулярных скоростей, определенных двумя методами, совпадают, кроме бедной группы A 2067. Если сравнить полученные пекулярные скорости с результатами работы [7] по данным SDSS (DR7), то можно отметить, что знаки пекулярных скоростей совпадают у всех скоплений галактик, кроме систем A 2067 и A 2092.

На рис. 6 приведена диаграмма Хаббла для области сверхскопления Bootes. Сверхскопление состоит из двух сверхскоплений галактик, простирающихся друг на друга, и имеющих разницу

Таблица 3. Пекулярные скорости и СКО пекулярных скоростей в системах скоплений галактик

Sample	$N$	$\langle V_{\text{pec}} \rangle$	$\langle V_{\text{pec}}^2 \rangle^{1/2}$	Ref.
SCI CrB	9	$428 \pm 210$	$652 \pm 50$	this work
A 2061, A 2065, A 2089	3	$651 \pm 290$	$668 \pm 150$	this work
SCI Boo	11	$-168 \pm 280$	$757 \pm 70$	this work
	6	$-208 \pm 400$	$728 \pm 150$	this work
	5	$-118 \pm 400$	$791 \pm 120$	this work
SCI Z 5029/A 1424	4	$535 \pm 360$	$1366 \pm 170$	this work
SCI A 1190	3	$-640 \pm 450$	$496 \pm 130$	this work
SCI A 1750/A 1809	4	$877 \pm 420$	$630 \pm 170$	this work
Her	13	$-72 \pm 240$	$736 \pm 50$	[15]
Leo	13	$168 \pm 320$	$625 \pm 70$	[15]
A 2244+A 2245	2		$1473 \pm 540$	this work
A 2029+A 2033	2	$-445 \pm 700$	$0 \pm 170$	this work
field	20	$-59 \pm 140$	$0 \pm 20$	this work
total	57	$83 \pm 130$	$646 \pm 10$	this work

лучевых скоростей около  $4000 \text{ км с}^{-1}$ . Можно отметить, что пекулярные движения в обеих системах значительные, и их СКО больше, чем в сверхскоплении CrB. У большинства скоплений пекулярная скорость незначительно превышает точность измерений ( $V_{\text{pec}}/\Delta V_p < 1.8$ ). Неожиданно большой оказалась пекулярная скорость у самого богатого скопления в ближней подсистеме, A 1795, имеющего в пределах  $R_{200}$  оценку массы  $7.8 \times 10^{14} M_{\odot}$ . Она равна примерно  $2223 \text{ км с}^{-1}$  и превышает ошибку измерения в четыре раза. A 1795 является мощным источником рентгеновского излучения [22], содержит активную cD-галактику с пекулярной скоростью (относительно средней скорости скопления)  $245 \text{ км с}^{-1}$  и имеет в распределении лучевых скоростей галактик еще два пика, кроме центрального пика с cD-галактикой.

Самые большие СКО  $\langle V_{\text{pec}}^2 \rangle^{1/2}$  одномерных пекулярных скоростей наблюдаются в системе скоплений A 1750/A 1809 и паре богатых скоплений галактик A 2244 и A 2245. Скопление A 2244 является основным в этой паре, поскольку имеет рентгеновскую светимость на порядок больше, чем A 2245 [22]. При разнице лучевых скоростей между этими скоплениями  $3310 \text{ км с}^{-1}$  и расстоянии между ними около 45 Мпк скопление A 2245, находясь ближе к нам, чем скопление A 2244, движется по направлению к нему с большой положительной пекулярной скоростью. В

A 2245 имеется провал в распределении лучевых скоростей, то есть оно состоит из двух компонентов, имеющих разницу лучевых скоростей около  $1714 \text{ км с}^{-1}$ . Нами найдено, что оба компонента имеют положительные пекулярные скорости. В паре скоплений галактик A 2029 и A 2033  $\langle V_{\text{pec}}^2 \rangle^{1/2}$  равно нулю. Основной системой является A 2029 с очень высокой рентгеновской светимостью [22], а A 2033 — гравитационно связанная с ней система меньшего размера. Оба скопления находятся на одинаковом расстоянии  $\gamma$ , и их небольшие пекулярные скорости имеют одинаковый знак, они удаляются от нас. Вся выборка систем скоплений галактик имеет незначительную пекулярную скорость относительно микроволнового фона  $83 \pm 130 \text{ км с}^{-1}$ . СКО  $\langle V_{\text{pec}}^2 \rangle^{1/2}$  пекулярных скоростей 20 скоплений галактик вне массивных структур с  $\sigma > 500 \text{ км с}^{-1}$  равно  $0 \pm 20 \text{ км с}^{-1}$ ; если взять в сверхскоплениях такие же скопления, то получим СКО  $876 \pm 30 \text{ км с}^{-1}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Модельные расчеты показывают, что большие пекулярные скорости,  $V_{\text{pec}} > 10^3 \text{ км с}^{-1}$ , возникают в плотных сверхскоплениях галактик [11]. В настоящей работе мы анализируем динамику скоплений галактик в богатых сверхскоплениях Согопа

Borealis и Bootes, а также в более бедных сверхскоплениях Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809, в парах и в скоплениях галактик, не входящих в крупные структуры и не имеющих соседей сравнимых размеров в пределах примерно 4 Мпк в картинной плоскости в диапазоне лучевых скоростей  $\pm 3000$  км с<sup>-1</sup>. Работа выполнена с привлечением данных каталогов SDSS (DR8) и NED. Сверхскопления галактик CrB и Bootes — протяженные структуры в проекции на небесной сфере, занимающие примерно  $50 \times 45$  Мпк и  $50 \times 53$  Мпк. В этих пределах расположены в проекции десять и одиннадцать систем галактик соответственно, которые протянулись по третьей координате на 76 и 68 Мпк. Чтобы найти пекулярные движения скоплений галактик (57 систем), мы определили их относительные расстояния с помощью ФП галактик ранних типов и сравнили их с расстояниями, найденными по закону Хаббла.

Полученные нами пекулярные скорости по модулю варьируются от 12 до 2200 км с<sup>-1</sup>. Пять скоплений галактик имеют пекулярные скорости, превышающие ошибки измерений более чем в два раза (A 2061, A 2142, A 1773, A 1205, A 1691), два скопления, A 1795 и A 2245 — в четыре раза. СКО пекулярных скоростей максимально в сверхскоплении A 1750/1809 и в паре скоплений A 2244 и A 2245. В сверхскоплении CrB СКО пекулярных скоростей также велико и равно  $652 \pm 50$  км с<sup>-1</sup>, а в компонентах сверхскопления Воо —  $728 \pm 150$  км с<sup>-1</sup> и  $791 \pm 120$  км с<sup>-1</sup>. В сверхскоплениях галактик Hercules и Leo нами ранее были получены аналогичные результаты по данным SDSS (DR7) [15]. Эти результаты представлены в таблице 3. В сверхскоплении CrB самое массивное скопление A 2065 не имеет пекулярной скорости. Для объяснения наблюдаемых пекулярных скоростей остальных систем галактик возможны два варианта: коллапсирующая центральная область CrB, состоящая из A 2056, A 2061 A 2065, A 2067, A 2089 и, возможно, A 2092 [7], и движение самых далеких скоплений галактик A 2019, A 2061 и CL 1529+29 по направлению к сверхскоплению галактик, содержащему A 2142. Скопление A 2142, отстоящее от скопления A 2061 на 50 Мпк, в свою очередь, движется по направлению к сверхскоплению CrB, что подтверждает существование гравитационной связи этих систем скоплений галактик [8].

Основной вывод нашего исследования состоит в том, что СКО пекулярных скоростей скоплений галактик в сверхскоплениях больше  $500$  км с<sup>-1</sup> и намного выше, чем СКО пекулярных скоростей систем галактик, не принадлежащих крупным структурам. Средняя пекулярная скорость всей выборки

скоплений галактик относительно трехградусного микроволнового фона составляет  $83 \pm 130$  км с<sup>-1</sup>.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В работе были использованы базы данных NASA/IPAC Extragalactic Database (NED, <http://nedwww.ipac.caltech.edu>) и Sloan Digital Sky Survey (SDSS, <http://www.sdss.org>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Dünner, P. A. Araya, A. Meza, and A. Reisenegger, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **366**, 803 (2006).
2. M. Postman, M. J. Geller, and J. P. Huchra, *Astron. J.* **95**, 267 (1988).
3. T. A. Small, C.-P. Ma, W. L. W. Sargent, and D. Hamilton, *Astrophys. J.* **492**, 45 (1998).
4. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **24**, 491 (1998).
5. J. Kormendy, *Astrophys. J.* **218**, 333 (1977).
6. M. Batista and D. J. Batuski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **436**, 3331 (2013).
7. D. W. Pearson, M. Batista, and D. J. Batuski, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 1601 (2014).
8. G. C. Baiesi Pillastrini, *Astrophys. and Space Sci.* **361**, 176 (2016).
9. M. Einasto, M. Gramann, E. Saar, et al., *Astron. and Astrophys.* **580**, A69 (2015).
10. A. Reisenegger, H. Quintana, E. R. Carrasco, and J. Maze, *Astron. J.* **120**, 523 (2000).
11. N. A. Bahcall, M. Gramann, and R. Cen, *Astrophys. J.* **436**, 23 (1994).
12. K. L. Masters, C. M. Springob, M. P. Haynes, and R. Giovanelli, *Astrophys. J.* **653**, 861 (2006).
13. A. L. O'Mill, D. Proust, H. V. Capelato, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453**, 868 (2015).
14. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **33**, 211 (2007).
15. F. G. Kopylova and A. I. Kopylov, *Astronomy Letters* **40**, 595 (2014).
16. M. Einasto, L. J. Liivamägi, E. Tago, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, A5 (2011).
17. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **62**, 311 (2007).
18. M. Einasto, J. Einasto, E. Tago, et al., *Astron. J.* **122**, 2222 (2001).
19. R. G. Carlberg, H. K. C. Yee, E. Ellingson, et al., *Astrophys. J. Lett.* **485**, L13 (1997).
20. T. A. Small, W. L. W. Sargent, and D. Hamilton, *Astrophys. J. Suppl.* **111**, 1 (1997).
21. T. A. Small, W. L. W. Sargent, and D. Hamilton, *Astrophys. J.* **487**, 512 (1997).
22. H. Ebeling, A. C. Edge, H. Bohringer, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **301**, 881 (1998).
23. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **64**, 207 (2009).
24. A. I. Kopylov and F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **65**, 205 (2010).

25. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193**, 29 (2011).
26. C. Saulder, S. Mieske, W. W. Zeilinger, and I. Chilingarian, *Astron. and Astrophys.* **557**, A21 (2013).
27. F. G. Kopylova, *Astrophysical Bulletin* **68**, 253 (2013).
28. M. A. Strauss, D. H. Weinberg, R. H. Lupton, et al., *Astron. J.* **124**, 1810 (2002).
29. I. Jorgensen, M. Franx, and P. Kjaergaard, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280**, 167 (1996).
30. I. V. Chilingarian, A.-L. Melchior, and I. Y. Zolotukhin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1409 (2010).
31. J. J. Mohr and G. Wegner, *Astron. J.* **114**, 25 (1997).
32. M. J. Hudson, R. J. Smith, J. R. Lucey, and E. Branchini, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **352**, 61 (2004).
33. R. A. Gibbons, A. S. Fruchter, and G. D. Bothun, *Astron. J.* **121**, 649 (2001).
34. N. Kaiser and M. J. Hudson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **454**, 280 (2015).

### **Peculiar Motions of Galaxy Clusters in the Regions of the Corona Borealis, Bootes, Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809 Superclusters of Galaxies**

**F. G. Kopylova and A. I. Kopylov**

We present results of the study of peculiar motions of 57 clusters and groups of galaxies in the regions of the Corona Borealis (CrB), Bootes (Boo), Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809 superclusters of galaxies and the galaxy clusters located beyond massive structures ( $0.05 < z < 0.10$ ). Using the SDSS (Data Release 8) data, a sample of early-type galaxies was compiled in the systems under study, their fundamental planes were built, and relative distances and peculiar velocities were determined. Within the galaxy superclusters, significant peculiar motions along the line of sight are observed with rms deviations of  $652 \pm 50 \text{ km s}^{-1}$ —in CrB,  $757 \pm 70 \text{ km s}^{-1}$ —in Boo. In the most massive A 2065 cluster in the CrB supercluster, no peculiar velocity was found. Peculiar motions of the other galaxy clusters can be caused by their gravitational interaction both with A 2065 and with the A 2142 supercluster. It has been found that there are two superclusters projected onto each other in the region of the Bootes supercluster with a radial velocity difference of about  $4000 \text{ km s}^{-1}$ . In the Z 5029/A 1424 supercluster near the rich Z 5029 cluster, the most considerable peculiar motions with a rms deviations of  $1366 \pm 170 \text{ km s}^{-1}$  are observed. The rms deviations of peculiar velocities of 20 clusters that do not belong to large-scale structures is equal to  $0 \pm 20 \text{ km s}^{-1}$ . The whole sample of the clusters under study has the mean peculiar velocity equal to  $83 \pm 130 \text{ km s}^{-1}$  relative to the cosmic microwave background.

*Keywords: galaxies: clusters: individual: Corona Borealis, Bootes, Z 5029/A 1424, A 1190, A 1750/A 1809, A 2142—large scale structure of the Universe*