ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2019, том 45, № 3, с. 220–224

ПОПРАВКИ К СТАТЬЕ РЕНТГЕНОВСКАЯ ФУНКЦИЯ СВЕТИМОСТИ КВАЗАРОВ НА $3 < z < 5$ ПО ДАННЫМ "СЛУЧАЙНОГО ОБЗОРА" ОБСЕРВАТОРИИ XMM-НЬЮТОН, том 44, №8–9 2018 г.

© 2019 г. Г. А. Хорунжев[1*], С. Ю. Сазонов[1], Р. А. Буренин[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва*

Поступила в редакцию 10.11.2017 г.

Измерена рентгеновская функция светимости далеких ($3 < z < 5.1$) квазаров первого типа. Использована выборка далеких квазаров большой светимости ($10^{45} \leq L_{X,2-10} < 7.5 \times 10^{45}$ эрг/с в диапазоне энергий 2–10 кэВ) из каталога Хорунжева и др. 2016, составленного по данным каталога 3XMM-DR4 "Случайного обзора" рентгеновской обсерватории XMM-Ньютон и Слоановского оптического обзора (SDSS). Эта выборка состоит из 101 источника. Большинство из них (90) имеют спектроскопические красные смещения $z_{\text{спек.}} \geqslant 3$, остальные — кандидаты в квазары с фотометрическими оценками красных смещений $z_{\text{фот.}} \geqslant 3$. Спектроскопические красные смещения 8 источников измерены с помощью телескопов БТА и AZT33IK. Благодаря рекордной площади покрытия неба ($\simeq$250 кв. град на рентгеновских потоках $\sim 10^{-14}$ эрг с$^{-1}$ см$^{-2}$ в диапазоне 0.5–2 кэВ), по которой составлена выборка, впервые удалось получить надежные оценки пространственной плотности далеких рентгеновских квазаров со светимостями $L_{X,2-10} > 2 \times 10^{45}$ эрг/с. Их сопутствующая плотность остается постоянной с ростом красного смещения от $z = 3$ до $z = 5$ с точностью до множителя 2. Впервые надежно ограничен степенной наклон рентгеновской функции светимости далеких квазаров в ее яркой части (выше излома). Диапазон возможных значений наклона для модели "эволюции плотности, зависящей от светимости" (LDDE) квазаров составляет $\gamma_2 = 2.78^{+0.00}_{-0.04} \pm 0.20$, где сначала указаны нижняя и верхняя границы γ_2 с учетом остающейся неопределенности в полноте обнаружения рентгеновских источников в обзоре SDSS, затем — статистическая ошибка наклона.

DOI: 10.1134/S0320010819160010

ПОПРАВКИ

В результате повторной проверки результатов статьи нами было обнаружено, что, к сожалению, в расчетах функции светимости была допущена ошибка. Ошибка была связана с неправильным включением в расчеты площади подвыборки K16. Ошибка исправлена. Проведен перерасчет результатов, итоги которого приводятся ниже. Изменениям подверглись: таблица 2, где приводятся параметры моделей функции светимости; рисунки 6–9. В целом, после перерасчета основные результаты, рассуждения и выводы статьи не изменились. Отличия между старыми и новыми значениями параметров моделей не превышают 1σ. Значимым изменениям подверглись только оценки в интервале рентгеновских светимостей $L_{X,2-10}$: 10^{45} — 2×10^{45} эрг/с. Мы публикуем новые параметры модели, исправленные рисунки и изменения в обсуждении результатов.

К разделу "Эволюция пространственной плотности далеких квазаров"

На рис. 7 видно, что сопутствующая плотность ярких квазаров ($45.3 \leq L_{X,2-10} < 45.9$) изменяется не более чем в 2 раза между $z = 3$ и $z = 5$, в то время как плотность квазаров меньшей светимости ($44.5 \leq L_{X,2-10} < 45.0$) уменьшается почти на порядок.

Оценки плотности в диапазоне светимостей $44.5 \leq L_{X,2-10} < 45.0$ по данным Георгакакис и др. (2015) оказываются несколько ниже полученных в этой работе. В интервале светимостей $45.0 \leq L_{X,2-10} < 45.3$, который является общим для

*Электронный адрес: horge@iki.rssi.ru

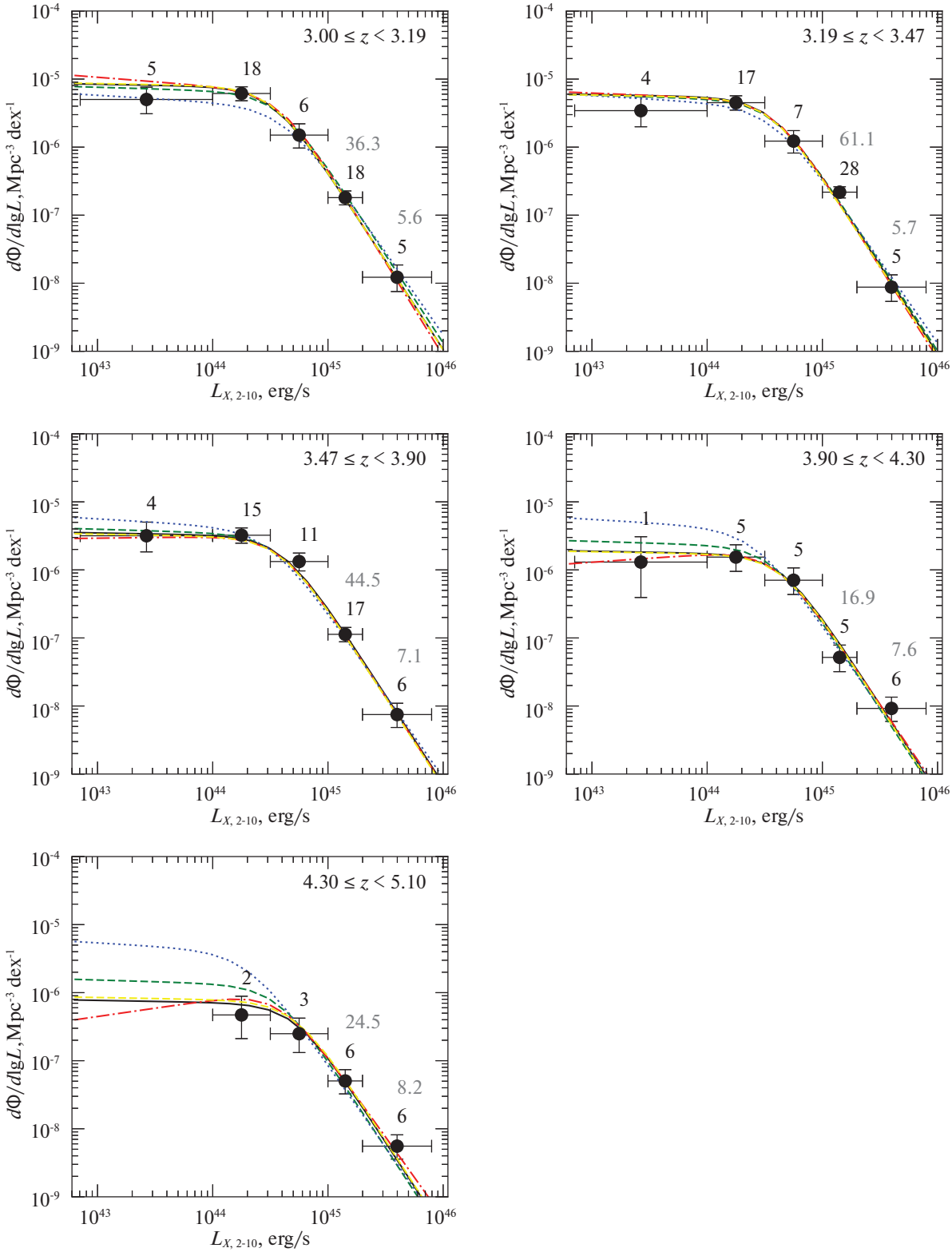

Рис. 6. Дифференциальная функция светимости квазаров 1-го типа в зависимости от красного смещения, полученная на основе подвыборок K16 и V14U. Точками с ошибками показана непараметрическая оценка функции светимости, полученная методом $1/V_{\max}$ с использованием поправки на неполноту II. Черным шрифтом показано число объектов выборки в рассматриваемых интервалах $\Delta \log L - \Delta z$, а серым шрифтом — ожидаемое полное число объектов, с учетом неполноты подвыборки K16. Черная сплошная линия — модель LADE, красный штрихпунктир — LDDE, зеленая штриховая — PDE, желтая штриховая — ILDE, синие точки — PLE. Все модели рассчитаны для поправки на неполноту II.

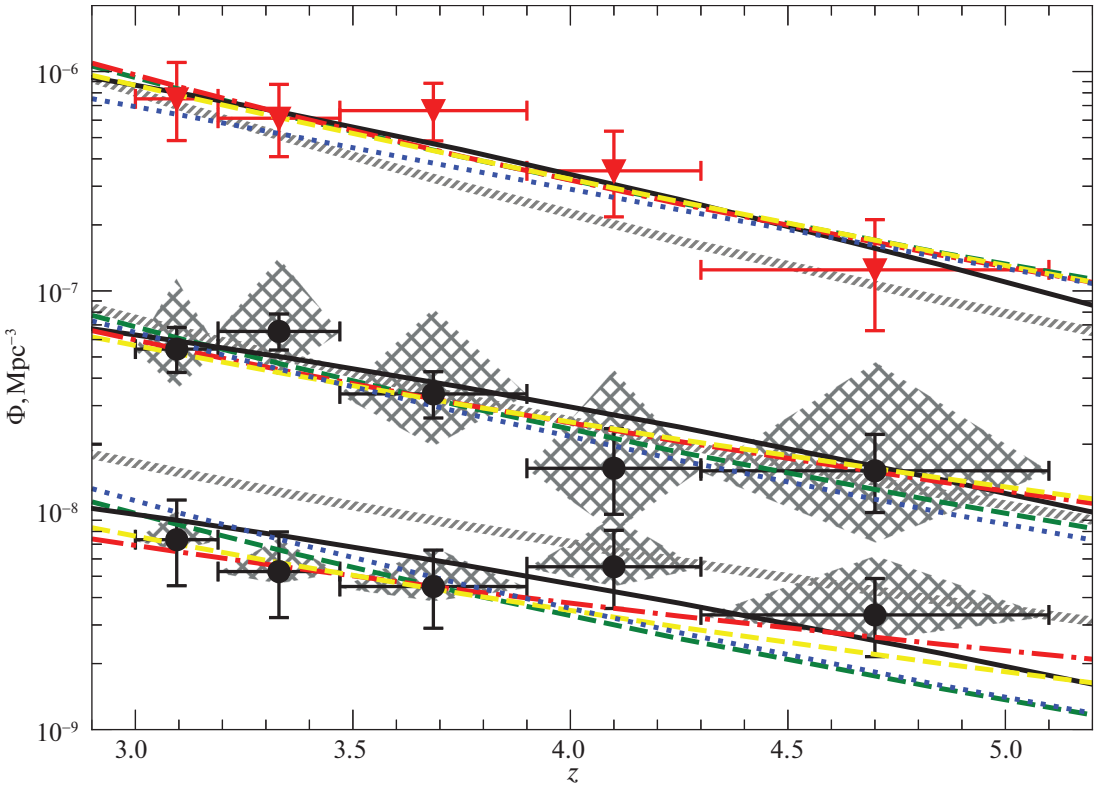

Рис. 7. Эволюция пространственной плотности (в сопутствующих координатах) далеких ярких квазаров 1-го типа. Треугольники — плотность квазаров с $44.5 \leq L_{X,2-10} < 45.0$, полученная по подвыборке V14U, кружки — плотность квазаров с $45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.3$ и $45.3 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$, полученная по подвыборке K16 для поправки на неполноту II. Заштрихованные области около точек K16 — разброс значений плотности, связанный с неопределенностью в полноте этой подвыборки. Линиями показаны модели функции светимости для поправки на неполноту II: LADE (черная сплошная), LDDE (красный штрихпунктир), ILDE (желтая штриховая), PDE (зеленая штриховая), PLE (синие точки). Серой штрихованной линией показана модель LADE, полученная в работе Георгакакис и др. (2015).

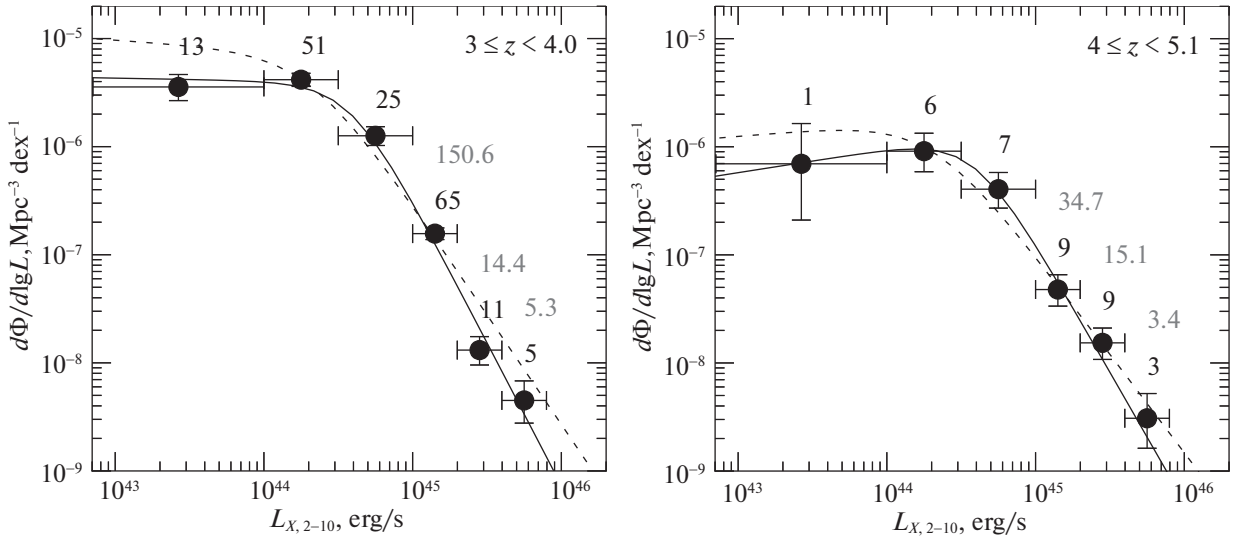

Рис. 8. Функция светимости квазаров в двух широких интервалах по красному смещению. Точками с ошибками показана непараметрическая функция светимости, полученная методом $1/V_{\max}$ для поправки на неполноту II. Черным шрифтом показано наблюдаемое число объектов в соответствующих интервалах $\Delta \log L - \Delta z$, а серым шрифтом — ожидаемое полное число объектов для поправки на неполноту II. Сплошная линия — модель LDDE для неполноты II при подгонке с общей нормировкой. Прерывистой линией показана модель LDDE из работы Георгакакис и др. (2015).

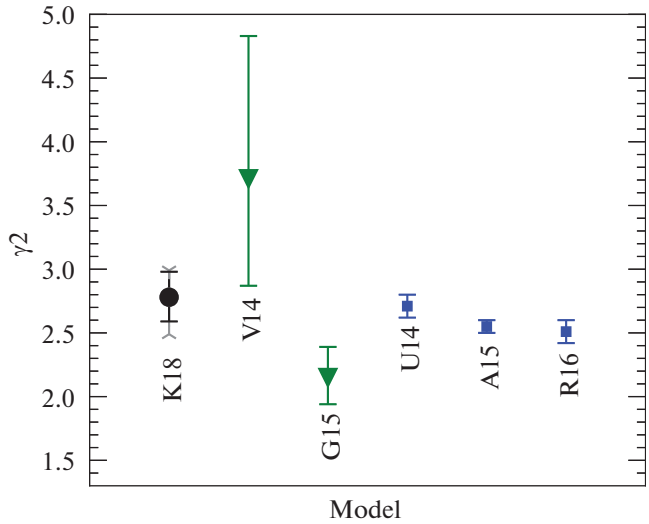

Рис. 9. Сравнение полученных в этой работе (K18) значений наклона яркой части функции светимости γ_2 модели LDDE с предыдущими оценками. Кружок с ошибкой — наклон $\gamma_2 = 2.78 \pm 0.20$ и его статистическая погрешность для модели LDDE и поправки на неполноту II. Серым показан диапазон значений γ_2 для поправок на неполноту I и III с учетом статистических погрешностей. Треугольниками показаны оценки γ_2 модели LDDE для квазаров на $z > 3$ из статей: V14 (Вито и др., 2014); G15 (Георгакакис и др., 2015). Квадратами показаны значения γ_2 модели LDDE, полученные по выборкам квазаров в широких диапазонах светимостей и красных смещений, где объекты на $z > 3$ составляют всего несколько процентов: U14 (Уеда, 2014); A15 "*Soft band LDDE2*" (Аирд и др., 2015) для источников, обнаруженных в диапазоне 0.5–2 кэВ; R16 (Раналлли и др., 2016).

Таблица 2. Параметры моделей рентгеновской функции светимости для подвыборок V14U и K16

Модель	$\log A$	$\log L_*$	γ_1	γ_2
PDE	$-5.15^{+0.11(-0.11)}_{-0.11(0.08)}$	$44.58^{+0.07(0.15)}_{-0.08(-0.09)}$	$0.05^{+0.15(0.09)}_{-0.17(-0.07)}$	$2.59^{+0.18(-0.03)}_{-0.17(0.00)}$
ILDE	$-5.04^{+0.12(-0.11)}_{-0.13(0.06)}$	$44.51^{+0.08(0.14)}_{-0.09(-0.08)}$	$0.03^{+0.16(0.12)}_{-0.18(-0.08)}$	$2.62^{+0.18(0.03)}_{-0.17(-0.01)}$
LADE	$-5.06^{+0.12(-0.11)}_{-0.12(0.06)}$	$44.51^{+0.08(0.14)}_{-0.09(-0.08)}$	$0.03^{+0.16(0.12)}_{-0.18(-0.08)}$	$2.61^{+0.18(0.03)}_{-0.17(-0.01)}$
LDDE	$-5.13^{+0.12(-0.13)}_{-0.12(0.08)}$	$44.59^{+0.07(0.14)}_{-0.07(-0.09)}$	$0.16^{+0.16(0.11)}_{-0.18(-0.09)}$	$2.78^{+0.20(0.00)}_{-0.19(-0.04)}$
PLE	$-5.40^{+0.12(-0.10)}_{-0.12(0.07)}$	$44.64^{+0.08(0.14)}_{-0.09(-0.09)}$	$0.10^{+0.15(0.08)}_{-0.17(-0.06)}$	$2.43^{+0.17(-0.08)}_{-0.16(0.02)}$

Модель	$p_{\rm lum}$	$p_{\rm den}$	β	ΔAIC	ΔBIC
PDE	$-4.83^{+0.68(0.20)}_{-0.70(-0.27)}$	–	2.3	0.0	
ILDE	$1.35^{+0.70(0.58)}_{-0.70(-0.31)}$	$-7.04^{+1.34(-0.35)}_{-1.36(0.11)}$	–	0.6	1.7
LADE	$1.38^{+0.71(0.56)}_{-0.70(-0.30)}$	$-0.65^{+0.12(-0.03)}_{-0.12(0.01)}$	–	0.3	1.3
LDDE	–	$-6.95^{+1.27(-0.24)}_{-1.33(0.08)}$	$2.64^{+1.31(0.57)}_{-1.28(-0.45)}$	0.0	1.0
PLE	$-2.10^{+0.39(0.01)}_{-0.41(-0.12)}$	–	–	24.6	22.4

Примечание. LDDE, ILDE, LADE, PDE, PLE — рассматриваемые модели, $\log A$ — десятичный логарифм нормировки (Мпк$^{-3}$), $\log L_*$ — десятичный логарифм светимости слома (эрг/с), γ_1 и γ_2 — показатели степени для слабой и яркой частей функции светимости, $p_{\rm lum}$ — параметр эволюции светимости, $p_{\rm den}$ — параметр эволюции плотности, β — параметр зависимости эволюции плотности от светимости, ΔAIC и ΔBIC — разность значений информационных критериев AIC и BIC данной модели и модели с наименьшими значениемя AIC и BIC (LDDE и PDE, соответственно). Значения параметров и их статистические погрешности (1σ) приведены для поправки на неполноту II. Сдвиг параметров для поправок на неполноту I и III относительно значений для поправки на неполноту II приведен в скобках внизу и вверху, соответственно.

выборок K16 и Георгакакис и др. (2015), наблюдается согласие между соответствующими оценками плотности. Возможные причины некоторых наблюдаемых различий обсуждаются в следующем разделе.

К разделу "Функция светимости"

Исправленные оценки параметров и их статистические погрешности приведены в табл. 2. Наилучшей моделью оказывается LDDE. Модели

LDDE, LADE, ILDE, PDE равнозначно подходят для описания данных.

К разделу "Обсуждение результатов"

Степенной наклон яркой части модели LDDE функции светимости и его статистическая погрешность равны $\gamma_2 = 2.78 \pm 0.20$. Неопределенность в полноте обнаружения квазаров почти не влияет на значение наклона.

К разделу "Сравнение γ_2 с предыдущими оценками"

Значения γ_2 правильно сравнивать только в пределах одной эмпирической модели функции светимости. Поэтому для сравнения с результатами Вито и др. (2014); Георгакакис и др. (2015) выберем нашу наилучшую модель LDDE. Наблюдается расхождение с результатами Георгакакис и др. (2015), где для модели LDDE была получена меньшая величина наклона, $\gamma_2 = 2.15 \pm 0.24$ (см. сравнение функций светимости, полученных в нашей работе и Георгакакис и др. 2015, на рис. 8). Величина светимости слома $L_* = 44.31 \pm 0.13$[1] Георгакакис и др. (2015) тоже оказывается ниже наших оценок (см. табл. 2).

Из рис. 8 следует, что разница между моделями LDDE из данной статьи и Георгакакис и др. (2015) оказывается не столь значимой, и они в пределах статистических ошибок согласуются между собой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аирд и др. (J. Aird, A. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, and P. Perez-Gonzalez), MNRAS **451**, 1892 (2015).
2. Вито и др. (F. Vito, R. Gilli, C. Vignali, A. Comastri, M. Brusa, N. Capelluti, and K. Iwasawa), MNRAS **445**, 3557 (2014).
3. Георгакакис и др. (A. Georgakakis, J. Aird, J. Buchner, M. Salvato, M. Menzel, W. Brandt, I. McGreer, T. Dwelly, et al.), MNRAS **453**, 1946 (2015).
4. Раналли и др. (P. Ranalli, E. Koulouridis, I. Georgantopoulos, S. Fotopoulou, L. Hsu, and M. Salvato), Astron. Astrophys. **590**, 80 (2016).
5. Уеда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, M. Watson), Astrophys. J. **786**, 104 (2014).

[1] Космологические параметры Ω_m и Ω_λ в нашей работе и статье (Георгакакис и др., 2015) немного отличаются.