

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований Российской академии наук

На правах рукописи

**Хорунжев Георгий Андреевич**

Поиск и исследование  
активных ядер галактик и далеких квазаров  
по данным рентгеновских обзоров неба и наземных телескопов

01.03.02 Астрофизика, звездная астрономия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
профессор РАН, д.ф.-м.н. Сазонов С. Ю.

Москва, 2018

*Данная диссертационная работа выполнена в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН, всем сотрудникам которого я благодарен за поддержку и всегда бодрую рабочую атмосферу.*

*Отдельную благодарность хотелось бы выразить руководителям нашего коллектива: академику Рашиду Алиевичу Сюняеву и д.ф.-м.н. Павлинскому Михаилу Николаевичу.*

*Хочу выразить глубокую благодарность моему научному руководителю профессору РАН, д.ф.-м.н. Сергею Юрьевичу Сазонову и к.ф.-м.н. Родиону Анатольевичу Буренину, ваш стиль работы всегда служил для меня примером, к которому нужно стремиться. Значение вашей научной школы для меня невозможно переоценить.*

*Я благодарен моей семье за постоянную поддержку и понимание.*

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>5</b>
1.1	Цели работы и актуальность . . . . .	11
1.2	Основные положения, выносимые на защиту . . . . .	13
1.3	Список публикаций по теме диссертации . . . . .	15
1.4	Апробация работы . . . . .	16
1.5	Личный вклад автора . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Измерение масс черных дыр и темпов аккреции в активных ядрах галактик близкой Вселенной</b>	<b>21</b>
2.1	Введение . . . . .	21
2.2	Выборка . . . . .	22
2.3	Оценка масс СМЧД по эмпирическим соотношениям . . . . .	24
2.3.1	Оценка по инфракрасной светимости балджа (по данным обзора 2MASS)	24
2.3.2	Оценка по параметрам широких линий (по данным наблюдений на телескопе РТТ-150) . . . . .	29
2.4	Сравнение различных методов определения массы . . . . .	32
2.5	Темп аккреции . . . . .	35
2.6	Заключение к главе 2 . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Поиск рентгеновских квазаров на больших красных смещениях</b>	<b>41</b>
3.1	Введение . . . . .	41
3.2	Выборка рентгеновских источников с оптической и инфракрасной фотометрией	42
3.3	Аппроксимация фотометрических данных спектральными шаблонами . . . . .	45
3.3.1	Библиотека шаблонов . . . . .	45
3.3.2	Критерии отбора кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$ . . . . .	46
3.3.3	Примеры объектов из каталога . . . . .	48
3.4	Каталог и его свойства . . . . .	53
3.5	Точность определения фотометрического красного смещения, полнота и чистота каталога . . . . .	67
3.6	Площадь рентгеновского обзора и кривая подсчетов . . . . .	70
3.7	Заключение к главе 3 . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Оптическая спектроскопия кандидатов в квазары на <math>3 &lt; z &lt; 5</math></b>	<b>76</b>
4.1	Введение . . . . .	76
4.2	Наблюдения на телескопе АЗТ-33ИК со спектрографом низкого и среднего разрешения АДАМ . . . . .	77
4.3	Результаты . . . . .	78
4.3.1	Квазар 3ХММ J125329.4+305539 на $z = 5.08$ . . . . .	78
4.3.2	Замечания по отдельным источникам . . . . .	79
4.3.3	Дополнительные замечания к каталогу K16 . . . . .	81
4.3.4	Чистота квазислучайной спектроскопической выборки и каталога K16 .	83

4.3.5	Систематические наблюдения далеких квазаров . . . . .	83
4.4	Заключение к главе 4 . . . . .	84
<b>5</b>	<b>Рентгеновская функция светимости <math>3 &lt; z &lt; 5</math></b>	<b>92</b>
5.1	Введение . . . . .	92
5.2	Выборка . . . . .	93
5.2.1	Подвыборка ярких квазаров из каталога <i>K16</i> . . . . .	93
5.2.2	Подвыборка более слабых квазаров из работы Вито и др. . . . .	94
5.3	Площадь обзора . . . . .	96
5.4	Полнота отождествления рентгеновских источников . . . . .	97
5.4.1	Метод расчета поправки на неполноту . . . . .	98
5.5	Функция светимости . . . . .	101
5.5.1	Аналитические оценки функции светимости . . . . .	101
5.5.2	Непараметрическая оценка функции светимости ( $1/V_{\max}$ ) . . . . .	104
5.6	Эволюция пространственной плотности далеких квазаров . . . . .	106
5.7	Обсуждение результатов . . . . .	107
5.7.1	Сравнение $\gamma_2$ с предыдущими оценками . . . . .	108
5.8	Заключение к главе 5 . . . . .	111
	<b>Заключение</b>	<b>121</b>

# Глава 1

## Введение

Активные ядра галактик (АЯГ) — это сложные центральные структуры некоторых галактик, где идет интенсивное падение вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД) (Зельдович, 1964; Зельдович и Новиков, 1964; Солпитер, 1964). Падающее вещество образует аккреционный диск, где происходит переработка углового момента вещества в излучение (Шакура и Сюняев, 1973). Эта картина устройства АЯГ создана для описания наблюдаемых свойств источников, привлекающих внимание астрономов и астрофизиков с середины 20 века.

Астроном Карл Сейферт обнаружил широкие линии в спектрах близких галактик с ярким звездообразным ядром и предположил, что их уширение носит доплеровский характер и связано с движением газа со скоростями  $\approx 8000$  км/с (Сейферт, 1943). Некоторые галактики оказались ярчайшими радио-источниками и попали в кембриджский каталог радиоисточников. Спустя 20 лет Шмидт (1963) определил красное смещение линий в спектре «квази-звездного» радиоисточника 3C 273:  $z = 0.16$ . Это означало, что объект удален от нас на 2 млрд. св. лет и имеет очень высокую светимость  $\sim 10^{46}$  эрг/с. С этого момента началось «соревнование» по поиску далеких квазаров, которое продолжается и сегодня: последний рекорд принадлежит квазару *ULAS J134208.10+092838.61*, обнаруженному на красном смещении  $z = 7.54$  (Банадос и др., 2017). Исторически сложилось, что галактики с активными ядрами, где светимость ядра не превышает светимости родительской галактики, называются *сейфертовскими галактиками*. Если светимость активного ядра гораздо больше светимости родительской галактики, то такой объект называют *квазаром*.

Почти сразу после открытия квазаров была обнаружена оптическая переменность линий в их спектрах на масштабах дней (Дибай и Есипов, 1965). В работе Дибай и Проник (1968) было показано существование двухкомпонентной распределенной структуры газа в центральной области АЯГ: внутри  $\sim 1$  парсека находится плотный газ, движущийся с большими скоростями, а снаружи находится разреженная неоднородная оболочка, простирающаяся на несколько килопарсек, см. например Хайнлайн и др. (2013). Позднее за соответствующими областями закрепятся названия: область широких линий (Broad Line Region, BLR) и узких линий (Narrow Line Region, NLR), см. обзор Бочкарев и Гаскелл (2009). Характерный спектр квазара в видимом диапазоне показан на рис. 1.1.

Была обнаружена и измерена задержка между изменениями потоков в континууме и в широких линиях во временных рядах спектров близких сейфертовских галактик (Черепашук и Лютый, 1973). Авторы предположили, что данная задержка связана с временем пролета фотонов из центральных областей аккреционного диска до облаков в области широких линий. Измерение этой временной задержки позволяет точнее оценить размер области широких линий.

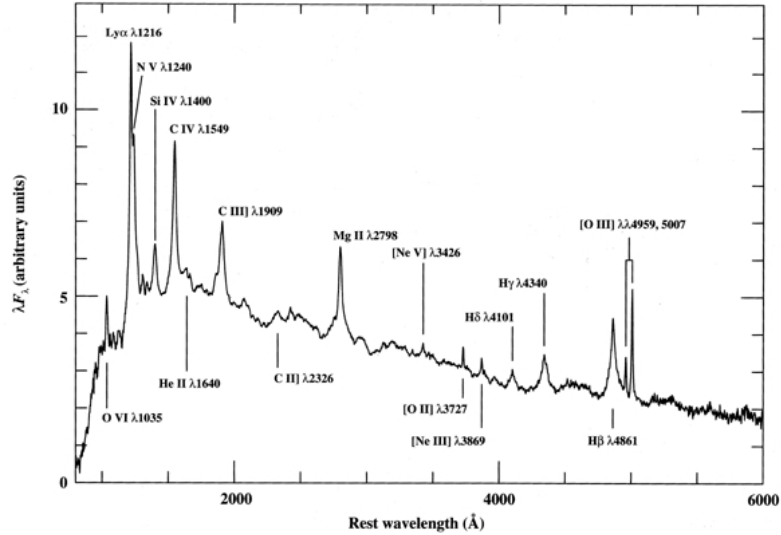


Рис. 1.1: Средний спектр квазара (Францис и др., 1991) в собственной системе отсчета. Отчетливо видны сильно уширенные линии, возникающие из-за переработки излучения в области широких линий в центральной окрестности СМЧД: водорода (линия  $Ly\alpha$  и бальмеровские линии  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ), углерода, магния и других элементов. Доплеровское уширение данных линий свидетельствует о движении газа со скоростями  $\geq 2000$  км/с. Также видны узкие запрещенные линии кислорода, неона, которые рождаются на расстоянии до нескольких десятков килопарсек (Хайнлайн и др., 2013) от СМЧД в конусе ионизации, где движение газа происходит со скоростями  $\sim 100$  км/с.

На основе полученных сведений о структуре центральной области активных ядер галактик были разработаны способы измерения масс СМЧД. Согласно теореме вириала масса сверхмассивной черной дыры будет определяться как:

$$M_{\text{СМЧД}} \sim \frac{c\tau(\Delta V)^2}{G}, \quad (1.1)$$

где  $c$  — скорость света,  $\tau$  — временная задержка между изменением потоков в континууме и широких линиях,  $(\Delta V)^2$  — дисперсия скоростей газа, измеряемая по ширине линии.

На рубеже веков Корменди и Гебхард (2001) подтвердили корреляции между массой сверхмассивной черной дыры и светимостью, дисперсией скоростей звезд сфероида галактики (балджа). Эти зависимости стали использоваться для оценки масс СМЧД. На рис. 1.2 показана обновленная корреляция масса СМЧД — дисперсия скоростей звезд балджа для большой выборки близких галактик из статьи Гюльтекин и др. (2009). К сожалению, данный метод оценки масс содержит ряд недостатков и нуждается в доработке. Независимые измерения масс СМЧД возможны только для близких галактик, большинство из которых — неактивные. Поэтому, при использовании данной корреляции для оценки массы СМЧД по измеренной дисперсии делается допущение, что данная зависимость не чувствительна к возрасту галактики, её структуре, активности в центре и прочим факторам.

Новый этап в изучении АЯГ начался с появлением рентгеновской астрономии. Первыми внегалактическими источниками, обнаруженными в рентгене были: *Лебедь А*, *M87* (Буйрам и др., 1966; Брадт и др., 1967) и *3C273*, *NGC 5128* (*Центавр А*) (Бойер и др., 1970), см. также обзор Гурски и Шварц (1977). Наблюдения этих источников проводились с помощью рентгеновских детекторов, запускаемых на геофизических ракетах типа «Aerobee». В 1970 году был запущен спутник «Ухуру» (Джакони и др., 1971), который стал первым орбитальным рентгеновским телескопом. Данный спутник проработал 2.5 года, провел рент-

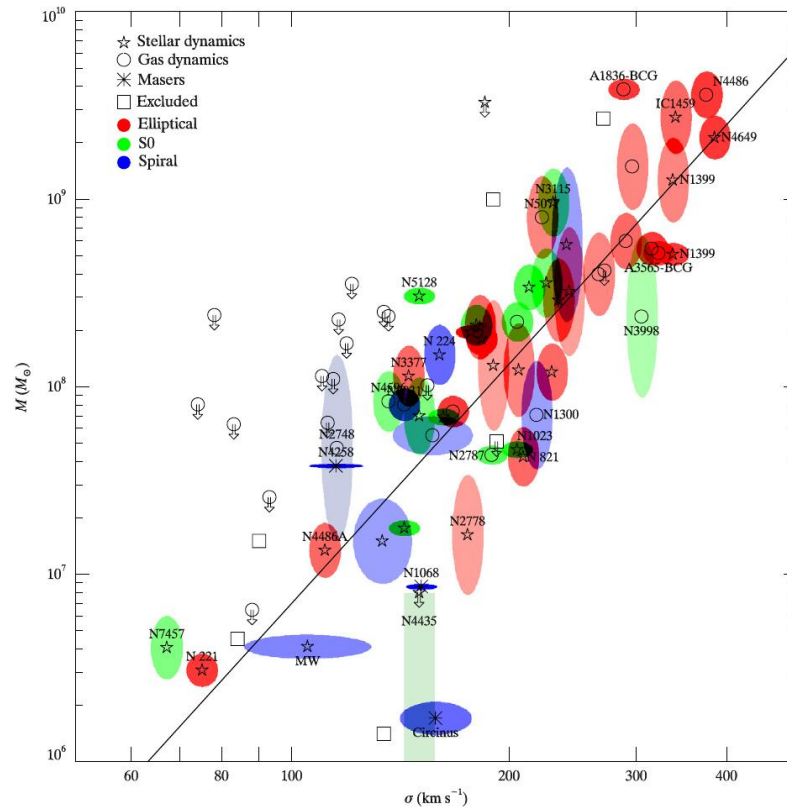


Рис. 1.2: Корреляция между массой СМЧД, выраженной в солнечных массах ( $M_{\odot}$ ), и дисперсией скоростей звезд балджа  $\sigma$  для разных типов галактик (Гюльтекин и др., 2009). Овалы показывают ошибки на параметры  $M$  и  $\sigma$ . Цветами обозначены различные типы галактик: эллиптические, линзовидные, спиральные. Символами обозначены способы измерения массы СМЧД.

геновский обзор неба и обнаружил 339 источников в диапазоне 2-6 кэВ (Форман и др., 1978). Оказалось, что значительная часть открытых рентгеновских источников отождествляется или с известными сейфертовскими галактиками, или с блазарами — радиоисточниками с сильной и быстрой оптической переменностью.

Последовательное улучшение качества рентгеновских детекторов и внедрение рентгеновских зеркал косоугольного падения привели к созданию современных космических обсерваторий: *ROSAT* (1990-1999), *Chandra* (1999-н.в.) и *XMM-Ньютон* (2000-н.в.). Их чувствительность на несколько порядков превосходит чувствительность первых рентгеновских телескопов. Угловое разрешение рентгеновской оптики косоугольного падения телескопа *Chandra* составляет  $\approx 1$  угловую секунду, что сравнимо с разрешением наземных телескопов, работающих в видимом диапазоне.

Рост чувствительности телескопов привел к увеличению числа новых рентгеновских источников. Во втором каталоге источников (*2RXS*) обзора неба спутника *ROSAT* обнаружено 135 000 рентгеновских источников с потоками  $\geq 10^{-13}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5-2 кэВ (Боллер, 2016). Готовящаяся к запуску обсерватория *Спектр-РГ* (Павлинский и др., 2011; Мерлони, 2014) проведет новый рентгеновский обзор неба, который будет на порядок чувствительней предыдущего обзора спутника *ROSAT*. Такое повышение чувствительности позволит получить статистически значимые и представительные выборки источников, ранее недоступных для исследования, например: сейфертовских галактик низкой светимости; далеких квазаров на  $z > 3$ . Предполагается, что в обзоре *Спектр-РГ* будет обнаружено 3 миллиона АЯГ на красных смещениях  $0 < z < 7$ , сотни тысяч скоплений галактик и полмиллиона звезд.

Для огромного числа источников обзора *Спектр-РГ* потребуется провести классифика-

цию и определить расстояния до них. Это можно сделать только с привлечением данных ультрафиолетовых, оптических, инфракрасных обзоров большой площади. Использование многоволновой поддержки позволит отобрать среди источников *Спектр-РГ* кандидаты для спектроскопии, получить оценки фотометрического красного смещения источников, провести детальное изучение каждого источника.

Исследование АЯГ в широком спектральном диапазоне важно для уточнения картины их внутренней структуры, понимания физических процессов, ответственных за формирование и рост СМЧД, совместную эволюцию АЯГ и окружающей её галактики, длительность активного цикла аккреции. В настоящее время популярна «Модель объединения АЯГ», предложенная Антонуччи (1993) на основе обобщения многоволновых данных и описывающая структуру АЯГ в радиусе  $\sim 100$  пк. Согласно этой модели, все АЯГ имеют единую структуру: центральную сверхмассивную черную дыру, аккреционный диск, газопылевой тор; а наблюдаемые различия в ширинах линий квазаров и поглощении вызваны ориентацией относительно наблюдателя. На рис. 1.3 приведена наглядная иллюстрация данной модели из монографии (Бекман и Шрадер, 2012).

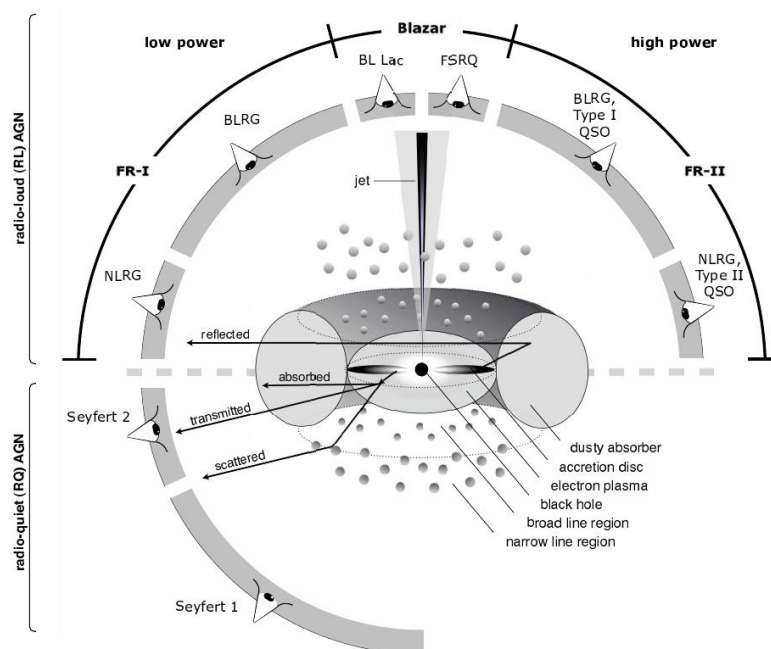


Рис. 1.3: Устройство АЯГ (Антонуччи, 1993; Урри и Падовани, 1995) и наблюдаемые различия в классификации в зависимости от расположения стороннего наблюдателя (Бекман и Шрадер, 2012).

Модель объединения АЯГ объясняет наблюдаемые различия основных классов активных ядер галактик 1-го и 2-го типа. В АЯГ 1-го типа мы напрямую видим область широких линий и ультрафиолетовый избыток излучения аккреционного диска. В спектрах АЯГ 1-го типа кроме того наблюдаются: рентгеновское излучение от короны горячего газа, расположенного над аккреционным диском в ближайшей окрестности СМЧД; узкие линии в видимом диапазоне; интенсивное излучение в ИК области — переработанное в газопылевом торе излучение идущее из центральных областей АЯГ. В активных ядрах галактик 2-го типа центральная область заслоняется структурами газопылевого тора и галактики. Ультрафиолет и мягкий рентген оказываются поглощенными. В видимом диапазоне спектр окружающей галактики доминирует над оптическим излучением аккреционного диска. В спектрах АЯГ 2-го типа присутствуют только узкие линии, излучение в ИК области и жесткий рентген от короны. На рис. 1.4 сравниваются спектры электромагнитного излучения АЯГ 1-го и 2-го типа (Сазонов и др., 2004). Приведенные спектры показывают наблюдаемое распределение по длинам



волн переработанной в различных структурах АЯГ энергии, высвободившейся в результате аккреции вещества на сверхмассивную черную дыру. Видно, что у активных ядер галактик 2-го типа не наблюдается излучение аккреционного диска (ультрафиолетовый избыток) в диапазоне  $10000 - 1\text{\AA}$

Отсутствие интенсивного оптического излучения в спектрах АЯГ 2-го типа сильно затрудняет их поиск и детальное исследование, а также изучение всей популяции АЯГ в целом. Для исследования таких объектов приходится использовать инфракрасный и жесткий рентгеновский диапазоны электромагнитного спектра. Наблюдения таких источников в видимом диапазоне возможны только с помощью телескопов большого диаметра.

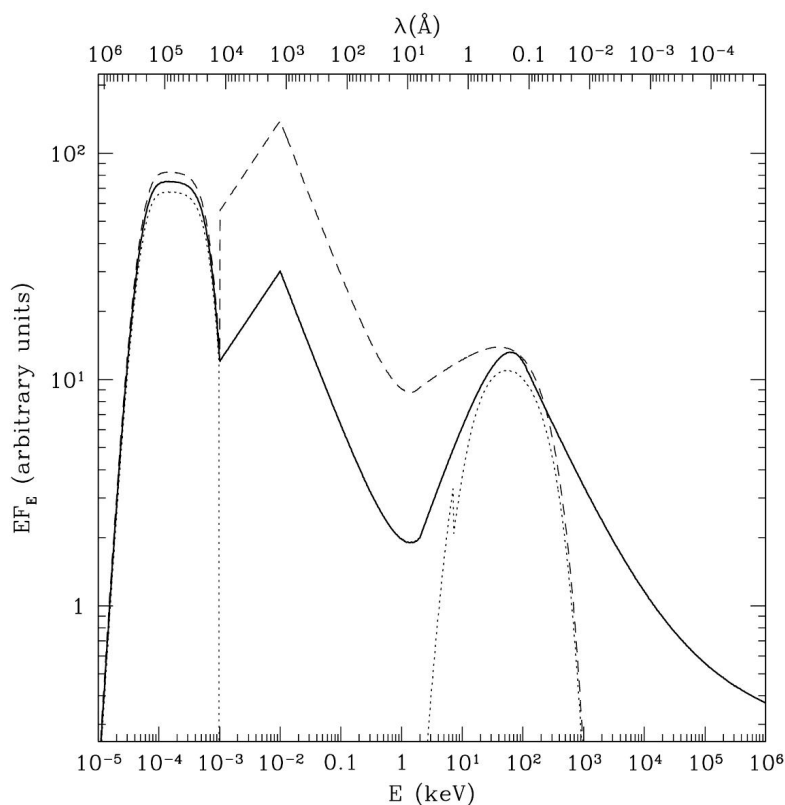


Рис. 1.4: Сравнение средних спектров АЯГ в широком диапазоне электромагнитных волн от рентгена до далекого ИК (Сазонов и др., 2004). Сплошной линией показан спектр квазара, форма которого определяется средней излучательной способностью всей выборки АЯГ, которая включает в себя АЯГ 1-го и 2-го типов. Штриховой линией показан спектр непоглощенного квазара (1-го типа). Линией из точек показан спектр поглощенного квазара (2-го типа). Спектры квазаров 1-го и 2-го типов для наглядности умножены на 1.1 и 0.9, соответственно.

Ожидается, что результаты планируемой миссии *Спектр-РГ* совместно с фотометрией и спектроскопией в видимом диапазоне обзора *SDSS* (Аболфати и др., 2018), фотометрией инфракрасных обзоров *2MASS* (Скрутски и др., 2006), *WISE* (Райт и др., 2010) смогут улучшить наше понимание активных ядер галактик и истории роста сверхмассивных черных дыр во Вселенной. Обсерватория *Спектр-РГ* состоит из двух рентгеновских телескопов: *eROSITA*, работающего в диапазоне 0.2-10 кэВ, и *ART-XC*, работающего в диапазоне 6-30 кэВ. Обзор телескопа *eROSITA* станет самым чувствительным рентгеновским обзором всего неба в диапазоне 0.5-2 кэВ, а более жесткий рентгеновский обзор телескопа *ART-XC* позволит получить практически несмещенную из-за поглощения выборку АЯГ 1-го и 2-го типов. Совокупность этих данных образует уникальную выборку отобранных в рентгене АЯГ, охватывающую яркие квазары Вселенной в промежутке времени от 1 миллиарда лет со вре-

мени «большого взрыва» до наших дней. Для создания и исследования такой выборки нужно провести: классификацию рентгеновских источников с помощью предложенных оптических и инфракрасных обзоров; измерение их красных смещений; отбор приоритетных объектов для спектроскопической проверки; измерение основных параметров АЯГ — массы СМЧД, темпа аккреции и проч. В этой диссертации описываются методы решения перечисленных задач на примере выборок близких сейфертовских галактик и далеких квазаров на  $3 < z < 5$ .

## 1.1 Цели работы и актуальность

Целью первой части диссертационной работы (глава 2) является измерение масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД) и темпов аккреции для представительной выборки (Кривонос и др., 2007; Сазонов и др., 2007, 2012) близких сейфертовских галактик, зарегистрированных прибором *IBIS/ISGR1* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Выборка составлена на основе наблюдений в жестком рентгеновском диапазоне, поэтому практически не страдает от обычных эффектов селекции, связанных с поглощением излучения в АЯГ или трудностью его детектирования на ярком фоне галактики.

Глава 2 начинается с обсуждения свойств рентгеновского каталога. Затем описываются применяемые способы измерения масс СМЧД. Первый способ (Грэм, 2007) основан на масштабном соотношении между массой СМЧД и инфракрасной светимостью сферoidalного компонента родительской галактики (балджа). Для всех источников произведен расчет светимости балджа по данным фотометрического инфракрасного обзора всего неба *2MASS*. Второй способ (Вестергард и Петерсон, 2006) основан на вириальном соотношении между массой СМЧД и параметрами балмеровской линии водорода  $H_{\beta}$  — шириной и светимостью. Для 17 сейфертовских галактик 1-го типа по спектрам, полученным на телескопе РТТ-150, были определены параметры линии  $H_{\beta}$  и измерены массы СМЧД. Далее проводится анализ полученных результатов, делается сравнение оценок со значениями масс СМЧД, полученных другими научными группами с помощью эхокартирования (реверберации) или динамических методов. Производится расчет болометрической и эддингтоновской светимости, темпа аккреции.

Метод измерения масс СМЧД по корреляции «масса СМЧД — светимость балджа» будет востребован для оперативной оценки масс и темпов аккреции жестких рентгеновских источников обзора обсерватории СРГ. Освоение этого метода важно, потому что ожидаемый размер выборки источников, которые обнаружит телескоп АРТ-ХС (Павлинский и др., 2011) обсерватории СРГ в диапазоне 6-30 кэВ, на порядок превзойдет число источников в жестких рентгеновских обзорах неба *ИНТЕГРАЛ* (Кривонос и др., 2017) и ВАТ AGN Spectroscopic Survey (Косс, 2017). Этот метод позволит эффективно отбирать наиболее интересные объекты для измерения массы СМЧД более точными способами.

Другой способ измерения массы черной дыры основан на корреляции параметров широких линий в спектрах сейфертовских галактик 1-го типа и массы СМЧД. Данный способ имеет меньший систематический разброс, чем оценки по корреляции «масса СМЧД — светимость балджа». В главе 2 приводятся значения масс СМЧД, полученных по корреляции параметров широких линий (Вестергард и Петерсон, 2006). Для некоторых АЯГ из выборки (Кривонос и др., 2007) масса СМЧД впервые была измерена с такой высокой точностью. Оценки основаны на результатах наблюдений близких сейфертовских галактик прибором TFOSS 1.5-м телескопа РТТ-150. Важно, что этот способ определения параметров широких линий и измерения масс СМЧД освоен на телескопе РТТ-150, который входит в комплекс наземной поддержки обсерватории СРГ. Ведь спектроскопические наблюдения — это важнейшая научная задача поддержки любого рентгеновского обзора, см. например (Косс, 2017).

Вторая часть диссертации посвящена поиску и отождествлению далеких рентгеновских квазаров среди источников «случайного» обзора всего неба рентгеновской обсерватории *ХММ-Ньютон* — главы 3 и 4, соответственно. В главе 5 обсуждаются результаты отбора на примере яркой подвыборки источников со светимостями  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с, исследуется их функция светимости. Цель второй части диссертации — это получение оценки плотности далеких квазаров на  $z > 3$  и измерение их рентгеновской функции светимости. Уточнение параметров моделей рентгеновской функции светимости квазаров — актуальная астрофизическая задача, которую пытаются решать многие научные группы (Колодзиг и др., 2013; Калфоунцоу и др., 2014; Георгакакис и др., 2015; Тасним и др., 2017).

Размера имеющихся выборок далеких рентгеновских квазаров не достаточно, чтобы оценить плотность квазаров на  $z > 3$  и полноту их детектирования в *Слоановском обзоре (SDSS)*. Поэтому необходимо расширить существующие выборки, провести дополнительный поиск далеких рентгеновских квазаров на красных смещениях  $z > 3$  на основе доступных фотометрических данных оптического *Слоановского обзора* и инфракрасных обзоров *2MASS* и *WISE*. Эта задача находит свое решение в главе 3, где проводится отождествление рентгеновских источников из обзора рентгеновской обсерватории *XMM-Ньютон* с оптическими и инфракрасными данными обзоров *SDSS*, *2MASS*, *WISE*. В этой главе обосновывается необходимость проведения поиска далеких рентгеновских квазаров на красных смещениях  $z > 3$  в дополнение к уже известным источникам. Описывается метод поиска квазаров на  $z > 3$ . При помощи этого метода составлен каталог квазаров (*K16*), в который вошли уже известные квазары и новые кандидаты. Там же рассматривается вопрос о недостаточной чувствительности *Слоановского обзора* для полного отождествления всех рентгеновских источников.

Получение оценок полноты фотометрической и спектроскопической идентификации далеких квазаров в *SDSS* чрезвычайно важно для определения объема задач поддержки рентгеновского обзора всего неба *СРГ*. Предполагается, что *СРГ* обнаружит более 20000 рентгеновских квазаров на  $z > 3$  (Колодзиг и др., 2013; Георгакакис и др., 2015). Это будет выборка всех ярчайших рентгеновских квазаров ранней Вселенной. Поэтому важно знать, какой процент рентгеновских источников будет иметь фотометрию и спектроскопию *SDSS*. В главе 4 проводится проверка новых кандидатов в квазары. Ее результаты затем используются для выяснения чистоты выборки новых кандидатов, оценки качества метода поиска далеких квазаров и получения надежной выборки для построения рентгеновской функции светимости, преимущественно состоящей из спектроскопически подтвержденных квазаров.

В главе 5 описывается способ составления подвыборки ярких квазаров со светимостью  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с из каталога *K16*, которая затем используется для исследования рентгеновской функции светимости. Обсуждаются проблемы полноты отождествления ярких квазаров в обзоре *SDSS*. Пересчитывается поправка на неполноту отождествления в оптике с помощью корреляции между рентгеновской и ультрафиолетовой светимостями квазаров. С учетом данной поправки производится расчет параметров моделей рентгеновской функции светимости. Делаются выводы об изменении плотности квазаров с увеличением возраста Вселенной. Полученные результаты сравниваются с выводами других работ, посвященных исследованию рентгеновской функции светимости квазаров. Площадь обзора, используемого в нашей работе, на порядок превышает размеры обзоров других авторов, обсуждаемых в главе 5. Поэтому наши оценки функции светимости сделаны с учетом самых ярких и самых далеких квазаров, которые просто не попали в достаточном количестве в обзоры меньшей площади.

Исследованные в работе методы в дальнейшем будут применяться к источникам из обзора *Спектр-РГ*. Важно, что уже сейчас имеется проверенный и надежный метод поиска далеких квазаров — наиболее редких и интересных объектов. На практике проверена возможность получения их спектров на телескопах, которые будут осуществлять наземную поддержку *Спектр-РГ*. Экспериментально измеренные чистота и полнота отбора квазаров по  $z_{\text{фот}}$  будут использоваться для сравнения при разработке новых методов оценки фотометрического красного смещения. Результаты данной работы могут быть применимы к накопленным данным уже работающих рентгеновских телескопов (*Чандра*, *XMM-Ньютон*, *SWIFT*) и готовящихся миссий.

## 1.2 Основные положения, выносимые на защиту

1. Проведено измерение масс сверхмассивных черных дыр и темпов аккреции вещества на них для представительной выборки близких АЯГ, отобранных в жестком рентгене. Измерено отношение болометрической к критической эддингтоновской светимости, которое для большинства объектов составляет от 1 до 100%. Это значит, что аккреция газа на СМЧД в сейфертовских галактиках происходит в высоком темпе и радиационно эффективном режиме.
2. Показано, что способ оценки масс сверхмассивных черных дыр в сейфертовских галактиках по масштабному соотношению «масса СМЧД — инфракрасная светимость балджа» приводит к завышенным оценкам массы СМЧД в диапазоне  $M_{\text{вн}} < 10^8 M_{\odot}$ . Это, возможно, указывает на то, что рост черных дыр в таких объектах ещё далек от завершения.
3. Разработана методика поиска далеких рентгеновских квазаров в диапазоне  $3 < z < 5$  и измерения их фотометрического красного смещения по открытым данным оптических и инфракрасных фотометрических широкополосных обзоров неба. Получен каталог 903 источников, отобранных по фотометрическому красному смещению. Это самая большая выборка квазаров на  $z > 3$ , отобранных в рентгене. Каталог состоит на 57% из уже известных, спектроскопически подтвержденных квазаров и на 43% из новых неподтвержденных кандидатов. Относительно выборки известных квазаров полнота отбора этим методом составляет около 80%, нижний предел чистоты отбора — не менее 50%. Можно почти в 1.5 раза увеличить число далеких рентгеновских квазаров на  $z > 3$  по отношению к известным объектам в области покрытия *Слоановского обзора*, если провести их дополнительный поиск и спектроскопическую проверку.
4. Осуществлена спектроскопическая проверка 18 квазислучайно выбранных кандидатов в квазары на  $z > 3$ , которая показала, что действительно чистота выборки новых кандидатов превышает 50%. Таким образом, после проверки всех новых кандидатов итоговая чистота каталога должна составить 70-80%.
5. В ходе программы спектроскопической проверки новых кандидатов был открыт редкий источник — далекий рентгеновский квазар *3ХММ 125329.4+305539* на красном смещении  $z = 5.08$ . На момент обнаружения *3ХММ 125329.4+305539* было известно только 3 отобранных в рентгене оптически ярких квазара на  $z > 5$ . Согласно полученным оценкам наблюдаемой плотности квазаров на  $z > 5$ , в обзоре СРГ может быть найдено несколько таких источников вблизи полюсов эклиптики. Большинство рентгеновских квазаров на  $z > 5$  из обзора СРГ в оптике будут слабее порога детектирования *Слоановского обзора*.
6. Фотометрические оценки красного смещения в площадках и по данным *Слоановского обзора* могут быть получены для  $\geq 50\%$  рентгеновских квазаров обзора *Спектр-РГ* со светимостями  $L_{\text{X},2-10} \approx 10^{45}$  эрг/с на  $z \sim 3$ . Такие источники будут иметь рентгеновские потоки  $\approx 1.1 \times 10^{14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5-2 кэВ, что соответствует средней чувствительности по небу 4-х летнего обзора СРГ.
7. Построена рентгеновская функция светимости квазаров 1-го типа для подвыборки источников со светимостью  $L_{\text{X},2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с из каталога кандидатов в квазары на

красных смещениях  $3 < z < 5$ . Это самая большая выборка далеких рентгеновских квазаров  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с. Впервые получены статистически значимые оценки плотности квазаров со светимостями  $L_{X,2-10} \geq 2 \times 10^{45}$  эрг/с на  $z \gtrsim 3$ . Существенно улучшено ограничение величины степенного наклона яркой части рентгеновской функции светимости. Доказано, что пространственная плотность рентгеновских квазаров высокой светимости эволюционировала между  $z \approx 5$  и  $z \approx 3$  медленней, чем плотность квазаров более низкой светимости.

### 1.3 Список публикаций по теме диссертации

1. *Массы и темпы аккреции сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик из обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ.*  
Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Ткаченко А.Ю., 2012,  
Письма в Астрономический журнал, 38, 539
2. *Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ , отобранных среди рентгеновских источников обзора 3XMM-DR4 обсерватории XMM-Ньютон*  
Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю., 2016, Письма в Астрономический журнал, 42, 313
3. *Оптическая спектроскопия кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$  из рентгеновского обзора обсерватории XMM-Ньютон. Далекий рентгеновский квазар на  $z=5.08$*   
Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., 2017,  
Письма в Астрономический журнал, 43, 159
4. *Catalog of  $3 < z < 5.5$  Quasar Candidates Selected among XMM-Newton Sources and Its Spectroscopic Verification*  
Khorunzhev G., Sazonov S., Burenin R., Eselevich M., 2017,  
Front. Astron. Space Sci., 4, 37 <https://doi.org/10.3389/fspas.2017.00037>
5. *Рентгеновская функция светимости квазаров на  $3 < z < 5$ , отобранных по данным «случайного» обзора обсерватории XMM-НЬЮТОН*  
Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., 2018,  
Письма в Астрономический журнал, 44, 546

## 1.4 Апробация работы

Основные результаты диссертации были представлены на конференциях:

1. VIII Конференция молодых ученых “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*” — ИКИ РАН, Москва, апрель 2011 г.  
Устный доклад: “Измерение масс сверхмассивных чёрных дыр в активных ядрах галактик”.
2. Международная конференция “*Second Specturm-RG/eROSITA Conference*” — Казань, 2012 г.  
Стендовый доклад: “An identification of active galactic nuclei in the SRG survey”.
3. Всероссийская конференция “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*” — ИКИ РАН, Москва, 24–27 декабря 2012 г.  
Стендовый доклад: “Поддержка СРГ с помощью обзоров WISE и SDSS”.
4. X Конференция молодых ученых “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*” — ИКИ РАН, Москва, апрель 2013 г.  
Устный доклад: “Отождествление рентгеновских источников обзора обсерватории СРГ вне галактической плоскости с помощью обзоров WISE, SDSS”.
5. XI Конференция молодых ученых “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*” — ИКИ РАН, Москва, 9–11 апреля 2014 г.  
Устный доклад: “Отождествление рентгеновских источников обзора обсерватории СРГ вне галактической плоскости с помощью обзоров WISE, SDSS”.
6. Международная конференция “*Cosmology and relativistic astrophysics, Zeldovich-100*” — ИКИ РАН, Москва, 16–20 июня 2014 г.  
Стендовый доклад: “An identification of active galactic nuclei in the SRG survey”.
7. Всероссийская конференция “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*” — ИКИ РАН, Москва, 22–25 декабря 2014 г.  
Стендовый доклад: “Поиск квазаров на  $z > 3$  в каталоге XMMSSC”.
8. XII Конференция молодых ученых “*Фундаментальные и прикладные космические исследования*” — ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2015 г.  
Устный доклад: “Поиск квазаров на  $z > 3$  в каталоге XMMSSC”.
9. Всероссийская конференция “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*” — ИКИ РАН, Москва, 21–24 декабря 2015 г.  
Устный доклад: “Каталог кандидатов в квазары на  $z > 3$  среди рентгеновских источников обсерватории XMM-NEWTON”.
10. Всероссийская конференция “*Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра*” — ИКИ РАН, Москва, 20–23 декабря 2016 г.  
Устный доклад: “Каталог рентгеновских кандидатов в квазары на  $z > 3$ . Результаты спектроскопической проверки”.
11. Международная конференция “*Quasar at all cosmic epoch*” Италия, Падуя, 2–7 апреля 2017 г.  
Стендовый доклад: “Catalog of  $3 < z < 5.5$  quasar candidates selected among XMM-Newton sources and its spectroscopic verification”.



12. Всероссийская конференция *“Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”* — ИКИ РАН, Москва, 18-21 декабря 2018 г.  
Устный доклад: "Рентгеновская функция светимости квазаров на  $3 < z < 5$ ".
13. XV Конференция молодых ученых *“Фундаментальные и прикладные космические исследования”* — ИКИ РАН, Москва, 11–13 апреля 2018 г.  
Устный доклад: "Рентгеновская функция светимости квазаров на  $3 < z < 5$ , отобранных по данным обсерватории ХММ-Ньютон".
14. VII Пулковская молодежная конференция *“Фундаментальные и прикладные космические исследования”* — ГАО РАН, Санкт-Петербург, 28–30 мая 2018 г.  
Устный доклад: "Рентгеновская функция светимости квазаров 1-го типа на  $3 < z < 5$ , отобранных по данным обсерватории ХММ-Newton".

## 1.5 Личный вклад автора

По теме диссертации опубликовано 5 работ в рецензируемых научных изданиях, определяющую роль в подготовке и написании которых сыграл автор диссертации, в том числе в плане выполнения аналитических расчетов, кросс-корреляции каталогов, наблюдений на телескопах, подготовки к ним и обработки полученных данных, а также интерпретации результатов и обсуждении перспектив. Программный код для измерения параметров широких линий в сейфертовских галактиках был написан Р.А. Бурениным и С.Ю. Сазоновым.

# Литература

- Аболфати и др. (B. Abolfathi, D. Aguado, G. Aguilar, P. Allende, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **235**, 42 (2018)
- Антонуччи Р. (Antonucci R.) *Annu. rev. Astron. Astrophys.* **31**, 473 (1993)
- Банадос Э. и др. (Banados E., Venemans B.P., C. Mazzucchelli et al.) *Nature* , 25180 (2017)
- Бекман и Шрадер (V. Beckmann, C. Shrader) *Active Galactic Nuclei*, ISBN-13: 978-3527410781, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2012
- Боллер и др. (Boller T., Freyberg M., Trumper J., et al.) *Astron. Astrophys.* **588**, 103 (2016)
- Бойер и др. (Bowyer S., Lampton M., Mack J., de Mendonca F.) *Astrophys. J.* **161**, 1 (1970)
- Бочкарев Н.Г., Гаскелл Ч.М. () *Письма в Астрон. журн.* **35**, 322 (2009)
- Брадт и др. (Bradt H., Mayer W., Naranan S., Rappaport S., Spada G.) *Astrophys. J.* **150**, 199 (1967)
- Буйрам и др. (Byram E., Chubb T., Friedman H.) *Science* **152**, 66 (1966)
- Вестергаард и Петерсон (Vestergaard, M., & Peterson, B.M.), 2006, *ApJ*, 641, 689
- 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)
- Грэм (Graham, A.W.), 2007, *MNRAS*, 379, 711
- Гюльтекин и др. (Gültekin, K., Richstone, D., Gebhardt, K., et al.), 2009, *ApJ*, 698, 198
- Гурски и Шварц (Gursky H. & Schwartz D.) *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **15**, 541 (1977)
- Джакони и др. (Giacconi R., Kellogg E., Gorenstein P., Gursky H., Tananbaum H.) *Astrophys. J.* **165**, 27 (1971)
- Дибай Э.А.и Есипов В.Ф. (Dibai E.A., and Esipov V.F.) *Astron. Circ. No.* 349 (USSR)
- Дибай Э.А. и Проник В.И. (Dibai, E. A. & Pronik, V. I.) *Soviet Ast.* **11**, 767 (1968)
- Зельдович Я.Б. (Zeldovich Ya. B.) *ДАН СССР* **155**, 67 (1964)
- Зельдович Я.Б. и Новиков И. Д. (Zeldovich Ya. B. & Novikov I. D.) *ДАН СССР* **158**, 811 (1964)
- Калфоунцоу и др. (E. Kalfountzou, F. Civano, M. Elvis, M. Trichas, P. Green) *MNRAS* **445**, 1430 (2014)

- Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, M. Brusa) *Astron. Astrophys.* **558**, 89 (2013)
- Корменди Дж. и Гебхард К. (Kormendy J. & Gebhardt K.) *American Institute of Physics Conference Series* **586**, 363 (2001)
- Косс и др. (Koss, M., Trakhtenbrot, B., Ricci, C., et al.), 2017, *ApJ*, 850, 74
- Кривонос и др. (Krivonos, R., Revnivtsev, Lutovinov, A., et al.), 2007, *A&A*, 475, 775
- Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, I. Mereminskiy, A. Lutovinov, S. Sazonov, R. Sunyaev) *MNRAS* **470**, 512 (2017)
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, et al.) *eROSITA Science Book*, (2014) <http://arxiv.org/pdf/1209.3114v2.pdf>
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, V. Arefiev, A. Glushenko, et al.) *Proceedings of the SPIE* **8147**, 5 (2011)
- Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.) *Astron. J.* **140**, 1868 (2010)
- Сейферт К. (Seyfert C.) *Astrophys. J.* **97**, 285 (1943)
- Скрутски и др. (Skrutskie, M.F., Cutri, R.M., Stiening, R., et al.), 2006, *AJ*, 131, 1163
- Солпитер Э. (Salpeter E.) *Astrophys. J.* **140**, 796 (1964)
- Сазонов и др. (S. Sazonov, J. Ostriker, R. Sunyaev), 2004, *MNRAS*, 347, 144
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Revnivtsev, M., Krivonos, R., et al.), 2007, *A&A*, 462, 57
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Willner S., Goulding A., et al.), 2012, *ApJ*, 757, 181
- Тасним и др. (A. Tasnim, M. Salvato, S. LaMassa, M. Urry, et al.) *Astrophys. J.* **850**, 66 (2017)
- Урри и Падовани (M. Urry & P. Padovani) *PASP* **107**, 803 (1995)
- Францис и др. (P. Francis, P. Hewett, C. Foltz, et al.) *Astrophys. J.* **373**, 465 (1991)
- Форман и др. (Forman W., Jones C., Cominsky L., et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **38**, 357 (1978)
- Хайнлайн и др. (K. Hainline, R. Hickox, J. Greene, et al.) *Astrophys. J.* **774**, 145 (2013)
- Черепашук А.М. и Лютый В.М. (Cherepashchuk A.M., Lyutyi V.M.) *Astrophys. J. (Letters)* **13**, 165 (1973)
- Шакура Н.И. и Сюняев Р.А. (Shakura, N.I., & Sunyaev, R.A.), 1973, *A&A*, 24, 337
- Шмидт М. (Schmidt M.) *Nature* **197**, 1040 (1963)

## Глава 2

# Измерение масс черных дыр и темпов аккреции в активных ядрах галактик близкой Вселенной

Эта глава основана на результатах статьи Г.А. Хорунжев, С.Ю. Сазонов, Р.А. Буренин, А.Ю. Ткаченко, Письма в астрономический журнал, 2012, 38, 475

### 2.1 Введение

Измерение масс сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в ядрах галактик является важной составляющей различных исследований как самих СМЧД, так и взаимосвязи между эволюцией галактик и ростом черных дыр в их центральных областях.

Наиболее надежный известный способ определения массы СМЧД связан с измерением кинематики звезд или движений газа в гравитационном поле центральной черной дыры. К сожалению, из-за конечного углового разрешения телескопов применимость этого метода пока ограничена близкими галактиками: динамические оценки масс СМЧД получены для примерно 50 ядер галактик (Гюльтекин и др., 2009), в подавляющем большинстве обычных (неактивных).

Отдельный интерес представляет измерение масс СМЧД в активных ядрах галактик (АЯГ) — в сейфертовских галактиках и квазарах, так как в них происходит активный рост черных дыр. Достаточно надежным считается метод эхокартирования (реверберации), применимый к АЯГ первого типа (с широкими эмиссионными линиями в оптическом спектре). Он заключается в: 1) измерении размера области, в которой рождаются широкие линии, по задержке между вариациями потоков излучения в линиях и непрерывном спектре, 2) измерении дисперсии скоростей газа в этой области по ширине линий и 3) применении вириальной теоремы для определения массы черной дыры по этим двум характеристикам. Основной проблемой, связанной с методом эхокартирования, является необходимость проведения многократных спектрофотометрических наблюдений АЯГ в течение нескольких недель или месяцев. Поэтому до сих пор таким способом удалось измерить массы СМЧД лишь в нескольких десятках сейфертовских галактик и квазаров (Каспи и др., 2000; Петерсон и др., 2004).

Из-за сложности применения описанных выше методов, которые могут считаться прямыми, для оценки масс СМЧД активно используются также косвенные методы. Так в случае АЯГ первого типа в последнее время широко используются эмпирическая зависимость между массой СМЧД и характеристиками (ширина и светимость) широких линий (например, Вестергард и Петерсон 2006). Физическое обоснование существования подобной зависимости было предложено Дибам (1977). Также в последнее время массы СМЧД в АЯГ (как

первого, так и второго типа) стали часто оценивать по корреляции с массой или дисперсией скоростей родительского звездного сфероида — эллиптической галактики или балджа спиральной галактики (Феррарезе и Мерритт, 2000; Тремейн и др., 2002; Маркони и Хант, 2003; Гюльтекин и др., 2009).

В связи со все более активным использованием косвенных методов для определения масс СМЧД в АЯГ встает вопрос о том, насколько надежны такие оценки. В частности, является ли оправданным использование установленной для обычных галактик корреляции между свойствами звездного балджа и массой центральной СМЧД в случае активных галактик? Ранее уже предпринимались попытки ответить на эти вопросы (например, Онкен и др. 2004; Грэм и др. 2011), однако четких ответов получено не было. В качестве иллюстрации существующей неопределенности можно отметить, что в выборке 49 галактик, использовавшихся в работе (Гюльтекин и др., 2009) для построения корреляции между массами балджа и СМЧД, присутствуют 3 сейфертовские галактики с высокоточными (по мазерному излучению) оценками масс СМЧД, и у одной из них (галактика Циркуль) измеренная масса черной дыры оказывается примерно в 30 раз ниже ожидаемой по корреляции со звездной дисперсией скоростей!

Мы решили сравнить между собой различные методы оценки массы СМЧД на основе представительной выборки близких сейфертовских галактик, составленной по результатам жесткого рентгеновского обзора всего неба обсерватории «ИНТЕГРАЛ». Еще одной целью данного исследования было определить, используя полученные оценки масс СМЧД, эддингтоновские светимости АЯГ и узнать, в каком темпе (по сравнению с критическим) происходит аккреция газа на черные дыры в этих объектах.

## 2.2 Выборка

Мы использовали каталог АЯГ (Кривонос и др., 2007; Сазонов и др., 2007), зарегистрированных в жестком рентгеновском диапазоне энергий (17–60 кэВ) прибором IBIS/ISGRI (Убертини и др., 2003) на борту обсерватории «ИНТЕГРАЛ» (Винклер и др., 2003) в течение первых трех с половиной лет миссии, с октября 2002 по июнь 2006 г. В данной работе используется полная выборка 68 сейфертовских галактик первого (33 объекта) и второго (35 объектов) типов, не включающая блазары и объекты, расположенные вблизи галактической плоскости ( $|b| < 5^\circ$ ). Все АЯГ представляют близкую Вселенную (самый далекий объект имеет красное смещение  $z = 0.14$ ). Основное достоинство выборки состоит в том, что она составлена на основе наблюдений в жестком рентгеновском диапазоне и поэтому практически не страдает от обычных эффектов селекции, связанных с поглощением излучения в АЯГ или трудностью его детектирования на ярком фоне галактики. Таким образом, она может считаться представительной выборкой сейфертовских галактик.

В таблице 2.1 собрана основная информация об исследуемых объектах. Морфологические типы и красные смещения галактик взяты в основном из баз данных HyperLeda и NED. Типы активных ядер, характеризующие их оптические свойства и радиогромкость, взяты из наших предыдущих работ (Сазонов и др., 2007, 2012), в которых приведены ссылки на первоисточники информации. Фотометрические расстояния до объектов рассчитывались по их красным смещениям для следующих значений космологических параметров:  $H_0=72$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup>,  $\Omega_m=0.3$  и  $\Omega_\Lambda=0.7$ . Для ряда близких объектов использовались более точные расстояния из каталога близких галактик (Талли и др., 2009; Талли, 1988). Расстояния до объектов использовались в частности для расчета светимостей АЯГ в диапазоне энергий 17–60 кэВ по потокам, измеренным (с точностью лучше 20%) прибором IBIS/ISGRI (Сазонов и др., 2007).

Таблица 2.1: Выборка АЯГ обзора обсерватории «ИНТЕГРАЛ» на  $|b| > 5^\circ$

Объект	№	Тип галактики	Тип АЯГ	$z$	$D$ (Мпк)	$\lg L_{17-60 \text{ keV}}$ (эрг/с)
MRK348	1	S0a	S2	0.015	63.4	43.56
MCG-01-05-047	2	Sc	S2	0.017	72.8	43.02
NGC788	3	S0a	S2	0.014	57.4	43.28
LEDA138501	4		S1	0.049	213.3	44.34
MRK1040	5	Sbc	S1.5	0.017	70.7	43.47
IGRJ02343+3229	6	Sb	S2	0.016	68.5	43.34
NGC1068	7	Sb	S2	0.004	14.4*	43.14
NGC1142	8	Sb <sup>(1)</sup>	S2	0.029	123.0	43.93
1H0323+342	9	Sb? <sup>(2)</sup>	NLS1	0.061	266.7	44.37
NGC1365	10	Sb	S1.8	0.005	17.9*	42.11
3C111	11	E	S1,BLRG	0.049	210.1	44.62
ESO033-G002	12	S0	S2	0.018	76.7	43.14
IRAS05078+1626	13	S0?	S1.5	0.018	75.8	43.61
ESO005-G004	14	Sb	S2	0.006	22.4*	42.18
MRK3	15	S0	S2	0.013	57.0	43.43
MRK6	16	S0a	S1.5	0.019	79.7	43.45
IGRJ07563-4137	17	S0a?	S2	0.021	89.1	43.08
ESO209-G012	18	Sa?	S1.5	0.041	174.4	43.79
IRAS09149-6206	19		S1	0.057	249.8	44.19
MRK110	20	Sa <sup>(1)</sup>	NLS1	0.035	151.5	44.21
IGRJ09446-2636	21		S1.5	0.142	658.2	45.31
NGC2992	22	Sa	S2	0.008	30.5*	42.76
MCG-5-23-16	23	S0	S2	0.009	35.7	43.18
NGC3081	24	S0a	S2	0.008	32.5*	42.77
ESO263-G013	25	Sb	S2	0.033	142.7	43.72
NGC3227	26	Sa	S1.5	0.004	20.6*	42.67
NGC3281	27	Sab	S2	0.011	45.1	42.98
IGRJ10386-4947	28		S1.5	0.060	262.1	44.09
IGRJ10404-4625	29	S0	S2	0.024	101.7	43.42
NGC3783	30	Sa	S1	0.010	38.5*	43.34
IGRJ12026-5349	31	S0	S2	0.028	119.5	43.62
NGC4151	32	Sab	S1.5	0.003	20.3*	43.37
MRK50	33	S0a <sup>(1)</sup>	S1	0.023	99.5	43.19
NGC4388	34	Sb	S2	0.008	16.8*	42.79
NGC4395	35	Sm	L,S1.8	0.001	4.6*	40.60
NGC4507	36	Sab	S2	0.012	49.7	43.51
NGC4593	37	Sb	S1	0.009	39.5*	43.04
NGC4945	38	Scd	S2	0.002	3.8*	41.54
ESO323-G077	39	S0	S1.2	0.015	63.4	43.13
IGRJ13091+1137	40	Sa	XBONG	0.025	106.9	43.68
IGRJ13149+4422	41	Sa	S2	0.037	157.2	43.81
CENA	42	E	S2,NLRG	0.002	3.6*	41.94
MCG-6-30-15	43	S0	S1.2	0.008	32.4	42.66
MRK268	44	Sb <sup>(1)</sup>	S2	0.040	171.8	43.79
IC4329A	45	S0a	S1.2	0.016	67.7	43.95
NGC5506	46	Sa	S1.9	0.006	28.7*	43.12
IGRJ14552-5133	47	Sc	NLS1	0.016	67.7	42.89
IGRJ14561-3738	48	Sa	S2	0.025	104.7	43.27
IC4518A	49		S2	0.016	66.4	43.11
WKK6092	50	Sb	S1	0.016	65.9	42.94
IGRJ16185-5928	51	Sc	NLS1	0.035	150.1	43.67
ESO137-G34	52	S0a	S2	0.009	38.7	42.48
IGRJ16482-3036	53		S1	0.031	133.9	43.75
NGC6221	54	Sc	S2	0.005	19.4*	41.94
IGRJ16558-5203	55		S1.2	0.054	234.9	44.29
NGC6300	56	Sb	S2	0.004	14.3*	42.07
IGRJ17418-1212	57		S1	0.037	159.8	43.90

Таблица 2.1: Выборка АЯГ обзора обсерватории «ИНТЕГРАЛ» на  $|b| > 5^\circ$

Объект	№	Тип галактики	Тип АЯГ	$z$	$D$ (Мпк)	$\lg L_{17-60 \text{ keV}}$ (эрг/с)
3C390.3	58	E	S1,BLRG	0.056	244.4	44.65
IGRJ18559+1535	59		S1	0.084	372.3	44.58
1H1934-063	60	E	NLS1	0.011	44.6	42.63
NGC6814	61	Sbc	S1.5	0.005	22.8*	42.47
CYGA	62	E	S2,NLRG	0.056	244.4	44.62
IGRJ20286+2544	63	Sd	S2	0.014	60.0	43.16
MRK509	64	S0a <sup>(1)</sup>	S1.2	0.034	147.5	44.16
NGC7172	65	Sa	S2	0.009	33.9*	42.92
MR2251-178	66	E <sup>(3)</sup>	S1	0.064	280.4	44.65
NGC7469	67	Sa	S1.2	0.016	68.9	43.43
MRK926	68	S0a <sup>(1)</sup>	S1.5	0.047	203.0	44.25

**Примечание.** Ссылки: (1) Петросян и др. (2007), (2) Жу и др. (2007), (3) Норгард-Нильсен др. (1986). Оптические и радио типы АЯГ: L — лайнер, S1–S2 — сейфертовская галактика, NLS1 — сейфертовская галактика 1-го типа с нетипично узкими линиями (narrow-line Seyfert 1 galaxy), BLRG — радиогалактика с широкими линиями (broad-line radio galaxy), NLRG — радиогалактика с узкими линиями (narrow-line radio galaxy), XBONG — яркая в рентгене, оптически нормальная галактика (X-ray bright optically normal galaxy).  $z$  — красное смещение.  $D$  — фотометрическое расстояние ( $H_0=72 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ,  $\Omega_m=0.3$ ,  $\Omega_\Lambda=0.7$ ). Для ряда близких объектов использованы точные расстояния (помечены звездочкой) из каталога близких галактик (Талли и др., 2009; Талли, 1988).  $L_{17-60 \text{ keV}}$  — светимость АЯГ в диапазоне 17–60 кэВ (ИНТЕГРАЛ/IBIS/ISGRI).

## 2.3 Оценка масс СМЧД по эмпирическим соотношениям

Мы применили оба известных косвенных метода определения массы СМЧД, описанных во Введении, к нашим объектам.

### 2.3.1 Оценка по инфракрасной светимости балджа (по данным обзора 2MASS)

В последние 10–15 лет было надежно установлено существование корреляции между массой СМЧД и свойствами сфероидального компонента родительской галактики, т.е. балджа спиральной галактики или всей эллиптической галактики. При этом вопрос о том, какая именно характеристика сфероида (масса, светимость, дисперсия скоростей и т.д.) более тесно связана с массой центральной черной дыры, остается открытым, так как различные построенные корреляции характеризуются примерно одинаковой дисперсией — разбросом индивидуальных значений около среднего тренда (например, Маркони и Хант 2003; Грэм 2007; Гюльтекин и др. 2009). При этом, как уже говорилось, любые такие корреляции надежно установлены лишь для обычных (неактивных) галактик, а их применимость для АЯГ остается под вопросом.

В этой работе мы использовали корреляцию массы СМЧД со светимостью балджа/эллиптической галактики в близком инфракрасном диапазоне (Грэм, 2007):

$$\lg M_{\text{ВН}} = -0.37(\pm 0.04)(M_{\text{К,б}} + 24) + 8.29(\pm 0.08), \quad (2.1)$$

где  $M_{\text{ВН}}$  — масса чёрной дыры в массах Солнца, а  $M_{\text{К,б}}$  — поправленная за межзвездное поглощение абсолютная звездная величина балджа (или эллиптической галактики) в полосе К.

Эмпирическая зависимость (2.1) была построена Грэмом по 21 близкой галактике, для которых существуют динамические измерения массы СМЧД. Разброс значений  $\lg M_{\text{ВН}}$  в этой выборке вокруг среднего тренда (включая погрешности измерений) составляет 0.33.

Для наших целей зависимость (2.1) удобно переписать через светимость балджа  $L_{\text{К,б}}$  (используя характеристики фильтра  $K_S$  обзора 2MASS: центральная длина волны — 2.16 мкм,



ширина полосы пропускания —  $3.186 \times 10^{13}$  Гц, спектральная плотность потока, соответствующая нулевой звездной величине — 666.7 Ян):

$$\lg M_{\text{ВН}} = 0.93 \lg L_{K,b} - 33.41, \quad (2.2)$$

где  $L_{K,b}$  измеряется в эрг/с.

Корреляция  $M_{\text{ВН}}-L_{K,b}$  практически эквивалентна корреляции массы СМЧД с массой балджа, т.к. инфракрасная светимость галактик примерно пропорциональна их звездной массе. Мы предпочли использовать именно эту зависимость главным образом потому, что практически для всех наших объектов можно легко оценить инфракрасную светимость галактики по общедоступным данным Двухмикронного обзора всего неба (Two-Micron All-Sky Survey, 2MASS), который покрыл 99% неба в трёх фильтрах:  $J(\lambda = 1.24$  мкм),  $H(\lambda = 1.66$  мкм) и  $K_S(\lambda = 2.16$  мкм).

Таблица 2.2: Оценки масс СМЧД по корреляции со светимостью балджа

Объект	№	$R_{\text{eff}}$ (угл. сек)	$m_K$	$A_K$	$\lg L_K$ (эрг/с)	$P_{\text{AGN}}$	$P_b$	$\lg L_{K,b}$ (эрг/с)	$\lg M_{\text{ВН}}$ ( $M_{\odot}$ )
MRK348	1	9.0	10.10	0.024	42.70	0.72	0.25	< 42.10	< 7.71
MCG-01-05-047	2	23.9	9.39	0.010	43.10	0.08	0.08	41.97	7.58
NGC788	3	14.0	9.07	0.010	43.02	0.18	0.25	42.33	7.92
MRK1040	5	17.8	9.27	0.035	43.13	0.22	0.13	42.14	7.75
IGRJ02343+3229	6	24.1	8.77	0.036	43.31	0.11	0.2	42.56	8.13
NGC1068	7	15.2	5.79	0.012	43.13	0.17	0.2	42.36	7.95
NGC1142	8	27.0	9.02	0.026	43.71	0.16	0.2	42.94	8.48
1H0323+342	9	2.4	11.79	0.078	43.30	1.19	0.2	< 42.60	< 8.17
NGC1365	10	59.5	6.37	0.007	43.09	0.01	0.2	42.38	7.97
3C111	11	3.1	11.38	0.605	43.46	1.44	1	< 43.46	< 8.97
ESO033-G002	12	6.0	10.03	0.053	42.91	0.17	0.25	42.23	7.82
IRAS05078+1626	13		*11.61	0.110	42.29	2.10		$\leq$ 42.29	$\leq$ 7.88
ESO005-G004	14	27.5	8.14	0.052	42.59	0.04	0.2	41.88	7.50
MRK3	15	8.6	8.97	0.069	43.08	0.22	0.25	42.37	7.96
MRK6	16	2.8	9.56	0.050	43.13	0.21	0.25	42.42	8.01
IGRJ07563-4137	17	5.2	10.13	0.283	43.09	0.10	0.25	42.44	8.02
ESO209-G012	18	4.2	10.09	0.095	43.62	0.15	0.25	42.94	8.49
IRAS09149-6206	19		*9.43	0.067	44.18	0.10		$\approx$ 44.13	$\approx$ 9.59
MRK110	20	2.2	11.80	0.005	42.77	2.74	0.25	< 42.17	< 7.77
IGRJ09446-2636	21	2.5	12.71	0.031	43.69	4.14	*0.25	$\leq$ 43.09	$\leq$ 8.62
NGC2992	22	14.2	8.60	0.022	42.67	0.12	0.25	42.01	7.62
MCG-5-23-16	23	5.2	9.35	0.040	42.51	0.47	0.25	41.63	7.28
NGC3081	24	21.6	8.91	0.020	42.60	0.15	0.25	41.92	7.55
ESO263-G013	25	17.9	10.53	0.062	43.25	0.30	0.2	42.40	7.98
NGC3227	26	38.7	7.64	0.008	42.70	0.09	0.25	42.06	7.67
NGC3281	27	32.6	8.31	0.035	43.13	0.07	0.25	42.49	8.07
IGRJ10386-4947	28	2.2	11.82	0.179	43.31	0.60	*0.25	$\leq$ 42.71	$\leq$ 8.27
IGRJ10404-4625	29	5.4	10.38	0.058	43.01	0.25	0.25	42.28	7.88
NGC3783	30	11.9	8.65	0.044	42.86	0.30	0.25	42.10	7.71
IGRJ12026-5349	31	2.6	9.95	0.075	43.33	0.19	0.25	42.64	8.20
NGC4151	32	16.6	7.38	0.010	42.80	0.38	0.25	41.99	7.61
MRK50	33	3.5	12.00	0.006	42.33	0.73	0.25	< 41.73	< 7.36
NGC4388	34	36.1	8.00	0.012	42.38	0.26	0.2	41.56	7.20
NGC4395	35	48.5	9.98	0.006	40.47	0.14	0.06	39.18	5.01
NGC4507	36	11.9	8.87	0.036	42.99	0.33	0.25	42.21	7.81
NGC4593	37	30.2	7.99	0.009	43.13	0.08	0.2	42.40	7.98
NGC4945	38	172.7	4.48	0.065	42.52	0.01	0.06	41.30	6.96
ESO323-G077	39	3.0	8.80	0.037	43.23	0.08	0.25	42.59	8.16
IGRJ13091+1137	40	9.9	10.18	0.009	43.12	0.36	0.25	42.32	7.91
IGRJ13149+4422	41	6.0	10.82	0.007	43.20	0.41	0.25	42.36	7.95

Таблица 2.2: Оценки масс СМЧД по корреляции со светимостью балджа

Объект	№	$R_{\text{eff}}$ (угл. сек)	$m_K$	$A_K$	$\lg L_K$ (эрг/с)	$P_{\text{AGN}}$	$P_b$	$\lg L_{K,b}$ (эрг/с)	$\lg M_{\text{BH}}$ ( $M_{\odot}$ )
CENA	42	82.6	3.94	0.042	42.68	0.02	1	42.67	8.24
MCG-6-30-15	43	3.2	9.58	0.023	42.33	0.22	0.25	41.62	7.26
MRK268	44	4.5	10.88	0.006	43.25	0.35	0.2	42.37	7.95
IC4329A	45	2.7	8.80	0.022	43.28	0.47	0.25	42.40	7.98
NGC5506	46	12.4	8.19	0.022	42.78	0.22	0.25	42.07	7.68
IGRJ14552-5133	47	6.7	10.36	0.243	42.74	0.14	0.08	41.58	7.23
IGRJ14561-3738	48	9.6	9.63	0.031	43.33	0.09	0.25	42.69	8.25
IC4518A	49		*11.73	0.058	42.10	1.01		$\leq 42.10$	$\leq 7.71$
WKK6092	50	12.1	10.24	0.071	42.70	0.17	0.2	41.92	7.54
IGRJ16185-5928	51	4.0	11.14	0.118	43.07	0.40	0.08	41.76	7.39
ESO137-G34	52	23.7	8.26	0.123	43.05	0.03	0.25	42.44	8.02
IGRJ16482-3036	53	3.0	11.34	0.124	42.90	0.71	*0.25	$\leq 42.30$	$\leq 7.89$
NGC6221	54	42.4	7.12	0.061	42.88	0.01	0.08	41.78	7.41
IGRJ16558-5203	55		*10.88	0.142	43.58	0.52		$\leq 43.58$	$\leq 9.07$
NGC6300	56	54.3	6.93	0.036	42.68	0.02	0.2	41.97	7.59
IGRJ17418-1212	57		*11.29	0.210	43.10	0.62		$\leq 43.10$	$\leq 8.64$
3C390.3	58	2.1	11.54	0.026	43.30	2.24	1	$< 43.30$	$< 8.82$
IGRJ18559+1535	59	4.3	12.53	0.346	43.40	1.53	*0.25	$\leq 42.79$	$\leq 8.35$
1H1934-063	60	5.3	9.67	0.108	42.60	0.11	1	42.56	8.13
NGC6814	61	31.8	7.66	0.067	42.81	0.05	0.13	41.90	7.53
CYGA	62	13.4	10.28	0.140	43.85	0.59	1	$< 43.85$	$< 9.33$
IGRJ20286+2544	63	8.1	9.87	0.164	42.80	0.23	0.06	41.47	7.12
MRK509	64	2.1	10.01	0.021	43.47	0.49	0.25	42.58	8.15
NGC7172	65	19.0	8.32	0.010	42.87	0.11	0.25	42.21	7.81
MR2251-178	66	1.9	11.13	0.014	43.58	1.18	1	$< 43.58$	$< 9.08$
NGC7469	67	4.7	8.85	0.025	43.28	0.14	0.25	42.61	8.18
MRK926	68	5.4	10.64	0.015	43.49	0.57	0.25	$< 42.89$	$< 8.44$

**Примечание.**  $R_{\text{eff}}$  – эффективный угловой размер галактики (из каталогов XSC и LGA обзора 2MASS).  $m_K$  – видимая звёздная величина всей галактики (из каталогов XSC и LGA), или (помечено звездочкой) точечного источника (из каталога PSC обзора 2MASS).  $A_K$  – межзвездное поглощение в направлении на источник (Шлегель и др., 1998).  $L_K$  – поправленная за поглощение светимость всей галактики, или точечного источника PSC.  $P_{\text{AGN}}$  – доля активного ядра в  $L_K$ .  $P_b$  – массовая доля балджа; принята равной 0.25 в случае отсутствия морфологической информации о галактике (помечено звездочкой).  $L_{K,b}$  – светимость балджа.  $M_{\text{BH}}$  – масса СМЧД.

Большинство (62) объектов нашей выборки присутствуют либо в каталоге протяженных источников (Extended Source Catalog, XSC, Джарретт и др. 2000), либо в атласе больших галактик (Large Galaxy Atlas, LGA, Джарретт и др. 2003) обзора 2MASS, где приводится видимая звездная величина ( $m_K$ ) всей галактики в полосе  $K$ . Это позволило нам определить полные инфракрасные светимости галактик ( $L_K$ ) с учетом межзвездного поглощения (таблица 2.2).

Активное ядро может давать заметный вклад в инфракрасную светимость галактики, так как часть излучения (в основном ультрафиолетового) аккреционного диска СМЧД поглощается и перерабатывается в окружающем газопылевом торе. Мы попытались оценить этот вклад,

$$P_{\text{AGN}} = \frac{L_{K,\text{AGN}}}{L_K}, \quad (2.3)$$

используя корреляцию между инфракрасной и жесткой рентгеновской светимостью АЯГ. Такая корреляция была надежно установлена, например, в нашей недавней работе (Сазонов и др., 2012) с помощью наблюдений инфракрасным телескопом «Спитцер» той же самой выборки АЯГ обзора «ИНТЕГРАЛ», которая используется здесь. Из результатов указанной работы, а также ряда опубликованных спектральных распределений энергии, усредненных

по представительным выборкам квазаров (Элвис и др., 1994; Сазонов и др., 2004; Ричардс и др., 2006; Шанг и др., 2011), следует, что светимость пылевого тора в полосе  $K$  составляет

$$L_{K,AGN} \sim 0.1L_{17-60 \text{ keV}}, \quad (2.4)$$

где  $L_{17-60 \text{ keV}}$  — светимость АЯГ, измеренная в диапазоне энергий обзора «ИНТЕГРАЛ» (таблица 2.1). При этом отношение  $L_{K,AGN}/L_{17-60 \text{ keV}}$  может варьироваться от объекта к объекту в  $\sim 2$  раза.

Найденные по формулам (2.3) и (2.4) значения  $P_{AGN}$  приведены в таблице 2.2. В случае сейфертовской галактики NGC 1068 пылевой тор является оптически толстым по комптоновскому рассеянию, поэтому измеренная обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» светимость составляет лишь малую долю (порядка процента, см., например, Сазонов и др. 2012) истинной светимости горячей короны аккреционного диска в жестком рентгеновском диапазоне. Мы оценили эту светимость по формулам (2.15) и (2.16), приводимым ниже, и только затем вычислили величину  $P_{AGN}$  по формулам (2.3) и (2.4).

Дополнительным индикатором вклада активного ядра в инфракрасную светимость галактики может служить эффективный угловой размер галактики на изображении 2MASS ( $R_{\text{eff}}$ ) — радиус, внутри которого содержится половина полной светимости галактики в полосе  $K$ . Значения  $R_{\text{eff}}$  из каталогов XSC и LGA приведены в таблице 2.2. Их следует сравнивать с угловым разрешением обзора 2MASS, которое составляет  $\sim 2.5''$  (Скрутски и др., 2006): если значение  $R_{\text{eff}}$  составляет всего несколько угловых секунд, то это может указывать на то, что вклад активного ядра в  $L_K$  является доминирующим. Однако при этом необходимо иметь в виду, что для наиболее далеких объектов нашей выборки угловой размер галактики может быть мал сам по себе.

Для 17 объектов оцененный по рентгеновской светимости вклад активного ядра в инфракрасную светимость галактики оказался больше 50% ( $P_{AGN} > 0.5$ ). Поэтому (принимая во внимание некоторую неопределенность, связанную с формулой (2.4)) надежно вычесть вклад АЯГ из полной светимости галактики для таких объектов оказывается невозможно, а измеренные для них значения  $L_K$  могут использоваться лишь для получения верхних пределов на массу СМЧД по корреляции со светимостью балджа. Кроме того, во всех этих случаях, за исключением MRK 348 и CYG A, размер галактики  $R_{\text{eff}} \lesssim 5''$ , что тоже косвенно указывает на значительный вклад центрального пылевого тора в  $L_K$ .

Следующий шаг в наших вычислениях — оценка доли балджа ( $P_b$ ) в светимости галактики в полосе  $K$  (т.е. по сути массовой доли балджа). К сожалению, сделать точный учет для большинства объектов выборки не возможно, так как нет фотометрических данных требуемого качества. Поэтому мы решили прибегнуть к менее точному методу, а именно, приписывать некие средние ожидаемые значения  $P_b$  галактикам исходя из их морфологических типов, указанных в таблице 2.1. Такой подход оправдан, так как массовая доля балджа коррелирует с типом галактики, хотя и существует заметный разброс значений  $P_b$  среди однотипных галактик. Неопределенность отсутствует лишь для эллиптических галактик, для которых, очевидно,  $P_b = 1$ . Для остальных типов мы по результатам работ (Лаурикайнен и др., 2007; Грэм и Ворли, 2008; Лаурикайнен и др., 2010) приняли следующие значения:  $P_b = 0.25$  (S0–Sab), 0.2 (Sb), 0.13 (Sbc), 0.08 (Sc), 0.06 (Scd и более поздние типы). Для 4 галактик (IGR J09446–2636, IGR J10386–4947, IGR J16482–3036, IGR J18559+1535), морфологический тип которых не установлен, но которые тем не менее присутствуют в каталоге 2MASS XSC, мы приняли  $P_b = 0.25$  в качестве грубой оценки доли балджа.

Таким образом, для большинства объектов светимость балджа в полосе  $K$  рассчитывалась следующим образом:

$$L_{K,b} = P_b(1 - P_{AGN})L_K, \quad (2.5)$$

а для объектов, в которых вклад активного ядра является доминирующим ( $P_{AGN} > 0.5$ ), были

получены соответствующие верхние пределы:

$$L_{K,b} < P_b L_K. \quad (2.6)$$

Пять объектов (IRAS 05078+1626, IRAS 09149–6206, IC 4518A, IGR J16558–5203, IGR J17418–1212) не входят ни в каталог протяженных источников, ни в атлас больших галактик, а содержатся только в каталоге точечных источников (Point Source Catalog, PSC, Скрутски и др. 2006) обзора 2MASS. Так как для этих объектов невозможно использовать описанный выше метод расчета, мы сделали для них более грубые оценки светимости балджа следующим образом. В каталоге PSC приведены видимые звездные величины источников в фильтре  $K$ , измеренные в апертуре радиусом  $4''$ . Этот угловой размер соответствует линейному размеру от  $\sim 1.3$  до  $\sim 5$  кпк для вышеперечисленных галактик, т.е. примерно соответствует размеру балджей типичных галактик. Поэтому мы предположили, что измеренная звездная величина точечного инфракрасного источника примерно соответствует светимости балджа галактики, из которой, правда, надо еще вычесть ожидаемую долю активного ядра. Таким образом, для указанных 5 объектов использовались модифицированные формулы:

$$P_{AGN} = \frac{L_{K,AGN}}{L_{K,PSC}}, \quad (2.7)$$

$$L_{K,b} = (1 - P_{AGN})L_{K,PSC}, \quad (2.8)$$

где  $L_{K,PSC}$  — светимость точечного источника в каталоге PSC.

Сейфертовская галактика LEDA 138501 расположена на небе близко к галактической плоскости, поэтому для нее отсутствуют достоверные фотометрические данные обзора 2MASS. Кроме того, не известен морфологический тип галактики. В результате этот объект является единственным, для которого невозможно установить даже надежный верхний предел на массу СМЧД по корреляции со светимостью звездного балджа. Оценки массы СМЧД (или верхние пределы) для остальных 67 объектов представлены в таблице 2.2.

Помимо самих оценок  $M_{BH}$  важны также связанные с ними неопределенности. Все исследуемые объекты являются яркими источниками обзора 2MASS, поэтому можно пренебречь погрешностями, связанными с фотометрическими измерениями их инфракрасной светимости. Основная неопределенность в наших расчетах связана с определением доли балджа в инфракрасной светимости галактики. По результатам упомянутых выше статистических исследований галактик (например, Лаурикайнен и др. 2010) систематическую погрешность в определении величины  $\lg P_b$ , а следовательно и  $\lg L_{K,b}$  по формуле (2.5), для галактик с известным морфологическим типом можно оценить на уровне  $\sim 0.3$ , т.е. светимость балджа можно определить с точностью до множителя 2. Для галактик с неизвестной морфологией погрешность в определении  $\lg L_{K,b}$ , очевидно, составляет  $\sim 0.5$  — это соответствует разбросу значений  $P_b$  от  $\sim 0.08$  до  $\sim 0.8$  вокруг предполагаемого значения 0.25, т.е. допускается практический любой тип галактики. Такую же большую погрешность ( $\sim 0.5$ ) можно приписать и объектам, для которых светимость балджа оценивалась по светимости точечного инфракрасного источника в каталоге PSC. Наконец, значениям  $\lg L_{K,b}$ , полученным для эллиптических галактик, можно приписать неопределенность  $\sim 0.1$ , чтобы учесть погрешности фотометрических измерений в обзоре 2MASS. Из-за приблизительно пропорциональной зависимости (2.2) между  $L_{K,b}$  и  $M_{BH}$  итоговые погрешности значений  $\lg M_{BH}$ , найденных по корреляции со светимостью балджа, ожидаются такими же, как и приведенные выше погрешности  $\lg L_{K,b}$ . Эти неопределенности учитываются в последующем статистическом анализе.

Конечно, существенная неопределенность может быть связана и с самим использованием корреляции  $M_{BH}$ – $L_{K,b}$  для определения масс СМЧД в АЯГ нашей выборки, но ее величину можно попытаться оценить только сравнением полученных этим способом оценок масс с оценками, полученными другими методами (см. ниже).

Таблица 2.3: Оценки масс СМЧД по параметрам бальмеровских линий

Объект	№	$F(H_\alpha)$ ( $10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1}$ $\text{см}^{-2}$ )	$F(H_\beta)$	$A_{V\text{Balm}}$	$A_{V\text{gal}}$	FWHM ( $H_\alpha$ ) (км/с)	$\lg L (H_\alpha)$ (эрг/с)	FWHM ( $H_\beta$ ) (км/с)	$\lg L (H_\beta)$ (эрг/с)	$\lg M_{\text{BH}}$ ( $M_\odot$ )
LEDA138501	4	8.22±0.20	3.14±0.30	0	<b>0.53</b>	5275±144	42.82±0.01	5981±530	42.48±0.04	8.53±0.08
MRK1040	5	6.13±0.17	1.07±0.11	<b>1.96±0.34</b>	0.32	3125±80	42.21±0.11	4349±497	41.72±0.17	7.77±0.14
1H0323+342	9	1.18±0.17	0.52±0.05	0	<b>0.71</b>	1879±99	42.23±0.06	1634±181	41.98±0.04	7.08±0.10
3C111	11	1.73±0.03	0.12±0.01	4.85±0.32	<b>5.46</b>	4757±89	43.75±0.01	6021±608	43.34±0.04	9.08±0.09
IRAS05078+1626	13	3.33±0.10	0.61±0.08	<b>1.81±0.41</b>	0.99	4034±132	41.95±0.13	4549±608	41.47±0.20	7.65±0.17
MRK110	20	7.38±0.59	2.21±0.10	0.27±0.29	<b>0.04</b>	2546±99	42.32±0.10	2369±141	41.80±0.14	7.29±0.10
NGC3227	26	24.10±1.55	6.52±0.86	<b>0.59±0.46</b>	0.08	3504±200	41.28±0.15	3704±584	40.80±0.22	7.05±0.20
NGC4151	32	75.80±1.98	20.90±1.50	<b>0.53±0.24</b>	0.09	5030±160	41.75±0.08	5430±469	41.26±0.12	7.67±0.10
MRK50	33	2.47±0.11	0.86±0.09	0	<b>0.05</b>	4064±212	41.48±0.02	4192±495	41.03±0.05	7.30±0.11
NGC4593	37	6.74±0.33	2.34±0.26	0	<b>0.08</b>	3645±200	41.13±0.02	4260±563	40.68±0.05	7.10±0.12
IGRJ17418-1212	57	1.19±0.10	0.20±0.07	2.04±1.07	<b>1.90</b>	6137±469	42.18±0.35	5586±1733	41.68±0.52	7.96±0.42
1H1934-063	60	3.80±0.33	1.00±0.14	0.68±0.51	<b>0.97</b>	1768±64	41.27±0.04	1418±200	40.83±0.06	6.24±0.13
NGC6814	61	6.12±0.31	2.04±0.25	0	<b>0.79</b>	2998±146	40.84±0.02	4015±589	40.47±0.05	6.91±0.13
MRK509	64	24.00±0.81	7.23±0.47	0.26±0.23	<b>0.19</b>	4024±127	42.86±0.08	4580±372	42.36±0.11	8.22±0.10
MR2251-178	66	10.80±0.42	3.75±0.49	0	<b>0.13</b>	5564±243	43.05±0.02	6735±791	42.61±0.06	8.71±0.11
NGC7469	67	22.20±0.83	5.89±0.54	<b>0.65±0.31</b>	0.23	3205±118	42.31±0.10	3148±346	41.83±0.15	7.56±0.13
MRK926	68	8.07±0.23	3.00±0.28	0	<b>0.14</b>	6709±250	42.65±0.01	9012±1050	42.24±0.04	8.73±0.10

$F(H_\alpha, H_\beta)$  — непоправленные за поглощение потоки в линиях.

$A_{V\text{Balm}}$  — поглощение по соотношению бальмеровских линий.

$A_{V\text{gal}}$  — поглощение в Галактике (Шлегель и др., 1998).

FWHM ( $H_\alpha, H_\beta$ ) — ширины линий на полувысоте.

$L(H_\alpha, H_\beta)$  — светимости линий, поправленные за поглощение (использовалось выделенное жирным значение  $A_{V\text{gal}}$  или  $A_{V\text{Balm}}$ ).

$M_{\text{BH}}$  — масса СМЧД.

### 2.3.2 Оценка по параметрам широких линий (по данным наблюдений на телескопе РТТ-150)

Широкие эмиссионные линии, присутствующие в спектрах АЯГ первого типа, рождаются в облаках фотоионизованного газа, расположенных внутри сферы гравитационного влияния СМЧД. Это дает принципиальную возможность использовать вириальную теорему для определения массы СМЧД:

$$M_{\text{BH}} \sim \frac{Rv^2}{G}, \quad (2.9)$$

где  $R$  — характерное расстояние от СМЧД, на котором формируется излучение в какой-то широкой линии,  $v$  — дисперсия скоростей движения газа в этой области,  $G$  — гравитационная постоянная.

Формула (2.9) определена с точностью до множителя порядка единицы, так как существует неопределенность в том, как устроено поле скоростей в области излучения широких линий. Характерную скорость  $v$  легко оценить по доплеровскому уширению спектральных линий. Что же касается размера области  $R$ , то его можно измерить методом эхокартирования. Однако это предполагает спектроскопическое мониторингирование АЯГ в течение многих ночей, что далеко не всегда возможно. Поэтому в последнее время активно используют косвенный метод, основанный на оценке размера области излучения широких линий по светимости АЯГ ( $L$ ) либо в самой широкой линии, либо в непрерывном спектре излучения. Дибам (1977) была предсказана степенная зависимость  $R \propto L^\alpha$ , с наклоном  $\alpha = 1/3$ . Из реверберационных измерений следует, что  $\alpha \sim 0.5-0.7$  (Вандел и др., 1999; Каспи и др., 2000, 2005; Вестергард и Петерсон, 2006). Принципиальное достоинство данного метода состоит в том, что масса СМЧД в АЯГ может быть оценена на основе однократного измерения ширины линии и светимости линии или континуума.

Мы применили эмпирическую зависимость  $M_{\text{BH}}$  от параметров широкой бальмеровской линии  $H_\beta$  ( $\lambda = 4861 \text{ \AA}$ ) из работы (Вестергард и Петерсон, 2006) для оценки масс СМЧД в

АЯГ первого типа из нашей выборки:

$$\lg M_{\text{BH}} = \lg \left[ \left( \frac{\text{FWHM}(\text{H}_\beta)}{1000 \text{ км с}^{-1}} \right)^2 \left( \frac{L(\text{H}_\beta)}{10^{42} \text{ эрг с}^{-1}} \right)^{0.63} \right] + 6.67, \quad (2.10)$$

где масса чёрной дыры  $M_{\text{BH}}$  выражена в солнечных массах, FWHM — ширина линии на полувысоте,  $L$  — светимость линии с учётом поглощения на луче зрения. Зависимость (2.10) характеризуется внутренним разбросом (значений  $\lg M_{\text{BH}}$  около среднего тренда)  $\sim 0.43$  (Вестергард и Петерсон, 2006).

В 2008–2010 гг. на Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150) была проведена серия спектральных наблюдений выборки 19 сейфертовских ядер галактик первого типа из обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ, со склонением  $\delta > -20^\circ$ . Наблюдения проводились при помощи спектрометра низкого и среднего разрешения TFOSC. На первом этапе наблюдений для всех объектов были получены спектры в широкой полосе 3230–9120 Å с разрешением 12 Å с помощью гризмы #15 и щели 67 мкм (1.74 угл. сек). Затем для части объектов были получены спектры более высокого разрешения в полосе 3900–6800 Å с разрешением 4 Å (гризма #7, щель 54 мкм, 1.40 угл. сек) и полосе 5850–8270 Å с разрешением 3 Å (гризма #8, щель 54 мкм, 1.40 угл. сек).

Обработка данных оптических наблюдений и калибровка спектров проводилась при помощи стандартного математического обеспечения *IRAF*<sup>1</sup>. Из двумерных спектров вычиталось изображение смещения, затем изображения выравнивались при помощи спектров плоского поля, полученных из спектра галогенной лампы. Одномерные спектры объектов извлекались в линейной апертуре центрированной на максимуме излучения объекта и имеющей достаточно большой размер, так чтобы за пределы этой апертуры попадала только пренебрежимо малая часть потока широких бальмеровских линий. Спектральная плотность излучения калибровалась обычным образом, при помощи наблюдений спектрофотометрических стандартных звезд.

В большинстве случаев во время наших наблюдений угловое разрешение из-за дрожания атмосферы было таким, что размер точечного источника превышал размер щели. Поэтому потоки во всех полученных спектрах были исправлены за щель в предположении, что щель обрезает часть потока от источника, который имеет форму двумерной гауссианы.

Последующий научный анализ заключался в вычитании континуума, который описывался полиномом высокой степени, и моделировании линейчатых спектров в районе  $\text{H}_\alpha$  и  $\text{H}_\beta$ . Модель спектра около  $\text{H}_\beta$  состояла из широких и узких разрешенных линий  $\text{H}_\beta$  (длина волны  $\lambda = 4861.3$  Å), и двух запрещенных линий [OIII] ( $\lambda_1 = 4958.9$ ,  $\lambda_2 = 5006.8$  Å). При этом фиксировалось соотношение потоков линий в дуплете [OIII]:  $F_2/F_1 = 2.91$ . Профили всех линий предполагались гауссовыми. Свободными параметрами модели являлись интенсивность, уширение (измеряемое в км/с) и системная скорость всех перечисленных линий, но предполагалось, что уширения и скорости всех узких линий ( $\text{H}_\beta$  и [OIII]) одинаковы (что разумно, так эти линии рождаются примерно в одном и том же газе). Для спектра в районе линии  $\text{H}_\alpha$  использовалась аналогичная модель, в которую наряду с широкой и узкой линиями  $\text{H}_\alpha$  входит дуплет запрещенных линий [NII] ( $\lambda_1 = 6548.0$ ,  $\lambda_2 = 6583.4$  Å,  $F_2/F_1 = 2.96$ ). При этом предполагалось, что уширения и скорости узких линий  $\text{H}_\alpha$  и [NII] одинаковы. Все измеренные уширения линий были затем поправлены за спектральное разрешение измерений.

Описанная модель позволила достаточно надежно измерить параметры интересующих нас линий для большинства объектов (таблица 2.3). В случае сейфертовской галактики первого типа с узкими линиями 1H 0323+342 из-за невозможности различить узкие компоненты бальмеровских линий использовалась упрощенная модель, в которой у линий  $\text{H}_\alpha$  и  $\text{H}_\beta$  есть только широкие компоненты (тем не менее для двух других АЯГ того же типа, MRK 110 и

<sup>1</sup><http://iraf.noao.edu>

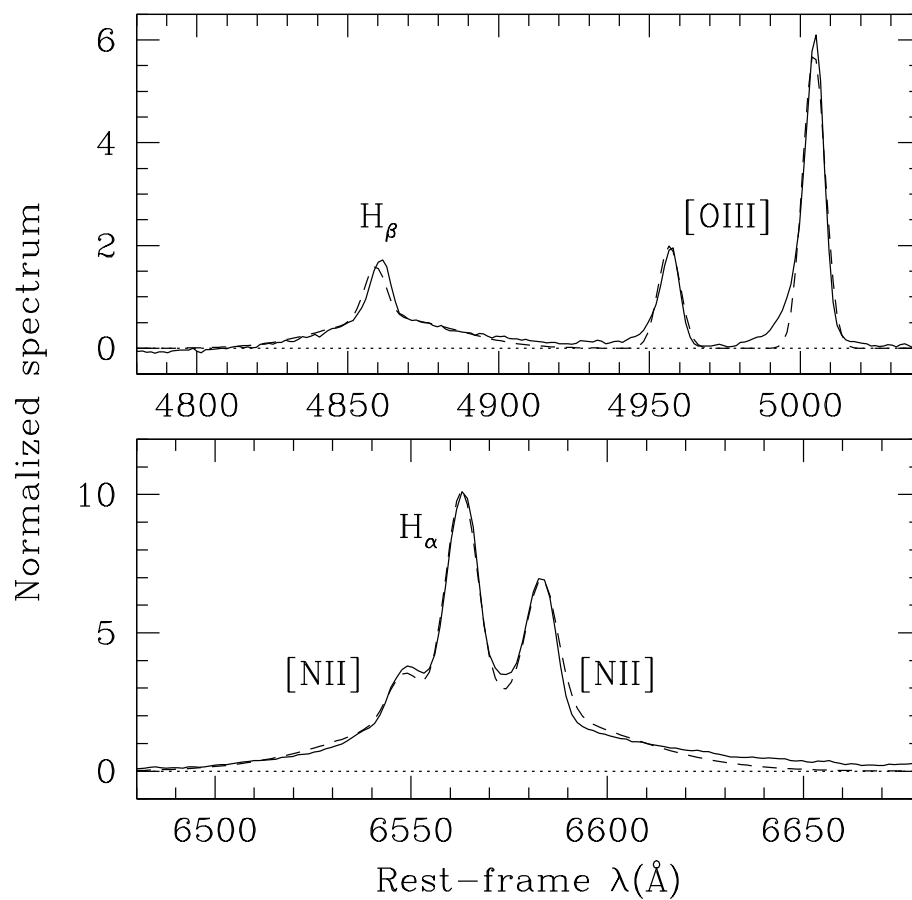


Рис. 2.1: Пример моделирования спектра, снятого на телескопе РТТ-150. Сплошной линией показан спектр сейфертовской галактики NGC 7469 в областях линий  $H_\beta$  и  $H_\alpha$ , полученный с разрешением  $\sim 4 \text{ \AA}$ . В модель (штриховая линия) входят широкие и узкие бальмеровские линии, а также узкие запрещенные линии [OIII] и [NII]. Непрерывный спектр был описан полиномом и вычтен.

1H 1934–063, использовалась полная модель). Пример моделирования спектра приведен на рис. 2.1. Широкие линии в спектрах двух объектов — MRK 6 и 3C 390.3 — имеют сложную форму и плохо описываются гауссианой. Поэтому измеренные для них параметры не могут считаться надежными и исключены из дальнейшего рассмотрения.

По измеренному соотношению потоков в бальмеровских линиях (бальмеровский декремент) было оценено поглощение на пути от области излучения широких линий к наблюдателю:

$$A_{V,\text{Balm}} = 7.21 \lg \frac{F(\text{H}\alpha)}{B_0 F(\text{H}\beta)}, \quad (2.11)$$

где  $B_0 = F_0(\text{H}\alpha)/F_0(\text{H}\beta)$  — ожидаемый бальмеровский декремент для широких линий в АЯГ без поглощения, который предполагался равным 3.06 (Донг и др., 2008).

Измеренное таким образом значение  $A_{V,\text{Balm}}$  затем сравнивалось с межзвездным поглощением в нашей Галактике в направлении на объект  $A_{V,\text{gal}}$  (Шлегель и др., 1998). Если при этом оказывалось, что  $A_{V,\text{Balm}}$  превышает  $A_{V,\text{gal}}$  больше, чем на  $1\sigma$  (погрешность нашего измерения), то для последующих расчетов использовалось значение  $A_V = A_{V,\text{Balm}}$ , т.е. считалось, что излучение в широких линиях поглощается не только в межзвездной среде нашей Галактики, но и в самом объекте (в галактике или ее ядре). В противном случае использовалось значение  $A_V = A_{V,\text{gal}}$ . Итоговая поправка измеренных потоков в линиях за поглощение осуществлялась стандартным образом (Карделли и др., 1989):  $A(\text{H}\alpha) = 0.8177A_V$ ,  $A(\text{H}\beta) = 1.1643A_V$ . Полученные светимости в линиях приводятся в таблице 2.3.

В последней колонке таблицы 2.3 приводятся оценки масс СМЧД, сделанные по формуле (2.10). Приведенные погрешности учитывают неопределенности, связанные как с измерением параметров линии  $\text{H}\beta$ , так и с поправкой за поглощение. Последняя доминирует у объектов, у которых выявлено дополнительное (по отношению к поглощению в Галактике) поглощение по бальмеровскому декременту. Связанная с самой формулой (2.10) неопределенность не учитывалась.

## 2.4 Сравнение различных методов определения массы

В таблице 2.4 собраны вместе различные оценки масс СМЧД в 68 АЯГ из обзора «ИНТЕГРАЛ». Для 67 объектов представлены оценки ( $M_{\text{bulge}}$ ) по инфракрасной светимости балджа/эллиптической галактики, полученные по данным обзора 2MASS в данной работе. Для 17 сейфертовских галактик первого типа представлены оценки ( $M_{\text{H}\beta}$ ) по параметрам широкой линии  $\text{H}\beta$ , сделанные нами по данным телескопа РТТ-150. В дополнение к этому, для 10 сейфертовских галактик первого типа приведены измерения ( $M_{\text{rev}}$ ) методом эхокартирования (Петерсон и др., 2004; Онкен и Петерсон, 2002; Петерсон и др., 2005; Денни и др., 2006). Наконец, для 5 объектов приведены массы ( $M_{\text{dyn}}$ ), измеренные по кинематике звезд или газа вблизи СМЧД (Гюльтекин и др., 2009).

Таблица 2.4: Сводная таблица различных оценок масс СМЧД

Объект	№	$\lg M_{\text{dyn}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{rev}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{H}\beta}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{bulge}}$ ( $M_{\odot}$ )	$L_{\text{Edd,bulge}}$ ( $\text{эрг/с}$ )	$L_{\text{bol}}$ ( $\text{эрг/с}$ )	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,bulge}}$	$L_{\text{Edd,best}}$ ( $\text{эрг/с}$ )	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,best}}$
MRK348	1				$< 7.71$	$< 45.81$	44.76	$> 0.090$	$< 45.81$	$> 0.090$
MCG-01-05-047	2				7.58	45.68	44.22	0.035	45.68	0.035
NGC788	3				7.92	46.02	44.48	0.029	46.02	0.029
LEDA138501	4			$8.53^{8.61}_{8.45}$			45.54		46.63	0.082
MRK1040	5			$7.77^{7.91}_{7.63}$	7.75	45.85	44.67	0.067	45.87	0.064
IGRJ02343+3229	6				8.13	46.23	44.54	0.021	46.23	0.021
NGC1068	7	$6.94^{6.95}_{6.92}$			7.95	46.05	44.56	0.033	45.04	0.336
NGC1142	8				8.48	46.58	45.13	0.036	46.58	0.036
1H0323+342	9			$7.08^{7.18}_{6.98}$	$< 8.17$	$< 46.27$	45.57	$> 0.202$	45.18	2.485



Таблица 2.4: Сводная таблица различных оценок масс СМЧД

Объект	№	$\lg M_{\text{dyn}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{rev}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{H}\beta}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{bulge}}$ ( $M_{\odot}$ )	$L_{\text{Edd,bulge}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,bulge}}$	$L_{\text{Edd,best}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,best}}$
NGC1365	10				7.97	46.07	43.31	0.002	46.07	0.002
3C111	11			$9.08_{8.99}^{9.17}$	$< 8.97$	$< 47.07$	45.82	$> 0.057$	47.18	0.044
ESO033-G002	12				7.82	45.92	44.34	0.027	45.92	0.027
IRAS05078+1626	13			$7.65_{7.48}^{7.82}$	$\leq 7.88$	$\leq 45.98$	44.81	$\geq 0.068$	45.75	0.116
ESO005-G004	14				7.50	45.60	43.38	0.006	45.60	0.006
MRK3	15				7.96	46.06	44.63	0.038	46.06	0.038
MRK6	16				8.01	46.11	44.65	0.035	46.11	0.035
IGRJ07563-4137	17				8.02	46.12	44.28	0.015	46.12	0.015
ESO209-G012	18				8.49	46.59	44.99	0.025	46.59	0.025
IRAS09149-6206	19				$\leq 9.59$	$\leq 47.69$	45.39	$\leq 0.005$	$\leq 47.69$	$\leq 0.005$
MRK110	20		$7.40_{7.28}^{7.49}(1)$	$7.29_{7.19}^{7.39}$	$< 7.77$	$< 45.87$	45.41	$> 0.351$	45.50	0.823
IGRJ09446-2636	21				$\leq 8.62$	$\leq 46.72$	46.51	$\geq 0.624$	46.72	0.624
NGC2992	22				7.62	45.72	43.96	0.018	45.72	0.018
MCG-5-23-16	23				7.28	45.38	44.38	0.101	45.38	0.101
NGC3081	24				7.55	45.65	43.97	0.021	45.65	0.021
ESO263-G013	25				7.98	46.08	44.92	0.070	46.08	0.070
NGC3227	26	$7.18_{6.85}^{7.30}$	$7.56_{7.34}^{7.76}(2)$	$7.05_{6.85}^{7.25}$	7.67	45.77	43.87	0.013	45.28	0.039
NGC3281	27				8.07	46.17	44.18	0.010	46.17	0.010
IGRJ10386-4947	28				$\leq 8.27$	$\leq 46.37$	45.29	$\geq 0.084$	$\leq 46.37$	$\geq 0.084$
IGRJ10404-4625	29				7.88	45.98	44.62	0.044	45.98	0.044
NGC3783	30		$7.47_{7.38}^{7.54}(1)$		7.71	45.81	44.54	0.054	45.57	0.094
IGRJ12026-5349	31				8.20	46.30	44.82	0.034	46.30	0.034
NGC4151	32	$7.65_{7.60}^{7.70}$	$7.12_{6.94}^{7.25}(1)$	$7.67_{7.57}^{7.77}$	7.61	45.71	44.57	0.073	45.75	0.067
MRK50	33			$7.30_{7.19}^{7.41}$	$< 7.36$	$< 45.46$	44.39	$> 0.086$	45.40	0.099
NGC4388	34				7.20	45.30	43.99	0.050	45.30	0.050
NGC4395	35		$5.56_{5.40}^{5.67}(3)$		5.01	43.11	41.80	0.050	43.66	0.014
NGC4507	36				7.81	45.91	44.71	0.064	45.91	0.064
NGC4593	37		$6.99_{6.89}^{7.08}(4)$	$7.10_{6.98}^{7.22}$	7.98	46.08	44.24	0.015	45.09	0.143
NGC4945	38	$6.15_{5.95}^{6.32}$			6.96	45.06	42.74	0.005	44.25	0.031
ESO323-G077	39				8.16	46.26	44.33	0.012	46.26	0.012
IGRJ13091+1137	40				7.91	46.01	44.88	0.075	46.01	0.075
IGRJ13149+4422	41				7.95	46.05	45.01	0.092	46.05	0.092
CEN A	42				8.24	46.34	43.14	0.001	46.34	0.001
MCG-6-30-15	43				7.26	45.36	43.86	0.032	45.36	0.032
MRK268	44				7.95	46.05	44.99	0.088	46.05	0.088
IC4329A	45		$< 7.40(1)$		7.98	46.08	45.15	0.119	$< 45.50$	$> 0.452$
NGC5506	46				7.68	45.78	44.32	0.035	45.78	0.035
IGRJ14552-5133	47				7.23	45.33	44.09	0.058	45.33	0.058
IGRJ14561-3738	48				8.25	46.35	44.47	0.013	46.35	0.013
IC4518A	49				$\leq 7.71$	$\leq 45.81$	44.31	$\geq 0.032$	$\leq 45.81$	$\geq 0.032$
WKK6092	50				7.54	45.64	44.14	0.032	45.64	0.032
IGRJ16185-5928	51				7.39	45.49	44.87	0.243	45.49	0.243
ESO137-G34	52				8.02	46.12	43.68	0.004	46.12	0.004
IGRJ16482-3036	53				$\leq 7.89$	$\leq 45.99$	44.95	$\geq 0.092$	$\leq 45.99$	$\geq 0.092$
NGC6221	54				7.41	45.51	43.14	0.004	45.51	0.004
IGRJ16558-5203	55				$\leq 9.07$	$\leq 47.17$	45.49	$\geq 0.021$	$\leq 47.17$	$\geq 0.021$
NGC6300	56				7.59	45.69	43.27	0.004	45.69	0.004
IGRJ17418-1212	57			$7.96_{7.54}^{8.38}$	$\leq 8.64$	$\leq 46.34$	45.10	$\geq 0.023$	46.06	0.111
3C390.3	58		$8.46_{8.35}^{8.55}(1)$		$< 8.82$	$< 46.92$	45.85	$> 0.086$	46.56	0.197
IGRJ18559+1535	59				$\leq 8.35$	$\leq 46.45$	45.78	$\geq 0.216$	$\leq 46.45$	$\geq 0.216$
1H1934-063	60			$6.24_{6.11}^{6.37}$	8.13	46.23	43.83	0.004	44.34	0.313
NGC6814	61			$6.91_{6.78}^{7.04}$	7.53	45.63	43.67	0.011	45.01	0.046
CYGA	62	$9.43_{9.28}^{9.53}$			$< 9.33$	$< 47.43$	45.82	$> 0.025$	47.53	0.020
IGRJ20286+2544	63				7.12	45.22	44.36	0.140	45.22	0.140
MRK509	64		$8.16_{8.12}^{8.20}(1)$	$8.22_{8.12}^{8.32}$	8.15	46.25	45.36	0.130	46.26	0.127
NGC7172	65				7.81	45.91	44.12	0.016	45.91	0.016
MR2251-178	66			$8.71_{8.60}^{8.82}$	$< 9.08$	$< 47.18$	45.85	$> 0.047$	46.81	0.111

Таблица 2.4: Сводная таблица различных оценок масс СМЧД

Объект	№	$\lg M_{\text{dyn}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{rev}}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{H}\beta}$ ( $M_{\odot}$ )	$\lg M_{\text{bulge}}$ ( $M_{\odot}$ )	$L_{\text{Edd,bulge}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,bulge}}$	$L_{\text{Edd,best}}$ (эрг/с)	$L_{\text{bol}}/$ $L_{\text{Edd,best}}$
NGC7469	67		$7.09^{7.14}_{7.04}(1)$	$7.56^{7.69}_{7.43}$	8.18	46.28	44.63	0.023	45.19	0.279
MRK926	68			$8.73^{8.83}_{8.63}$	< 8.44	< 46.54	45.45	> 0.082	46.83	0.042

$M_{\text{dyn}}$  — динамическая оценка массы (Гюльтекин и др., 2009).  $M_{\text{rev}}$  — оценка массы методом эхокартирования из работ: (1) Петерсон и др. (2004), (2) Онкен и Петерсон (2002), (3) Петерсон и др. (2005), (4) Денни и др. (2006).  $M_{\text{H}\beta}$  — оценка массы по параметрам широкой линии  $\text{H}\beta$  (РТТ-150).  $M_{\text{bulge}}$  — оценка массы по светимости балджа (2MASS).  $L_{\text{bol}}$  — болометрическая светимость.  $L_{\text{Edd,bulge}}$  — эддингтоновская светимость, вычисленная по  $M_{\text{bulge}}$ .  $L_{\text{Edd,best}}$  — эддингтоновская светимость, вычисленная по наилучшей оценке массы.

Различные оценки масс СМЧД в АЯГ нашей выборки сравниваются на рис. 2.2 и 2.3. Чтобы получить количественное представление о том, как различные методы согласуются между собой, мы рассчитали линейную регрессию:

$$\begin{aligned} y &= \alpha + \beta x, \\ x &= \lg \frac{M_1}{10^8 M_{\odot}}, \\ y &= \lg \frac{M_2}{10^8 M_{\odot}}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — оценки массы СМЧД, полученные какими-то двумя разными способами. Нормировка масс на  $10^8 M_{\odot}$  (типичное значение для нашей выборки) позволяет минимизировать скоррелированность параметров регрессии  $\alpha$  и  $\beta$ .

В расчете использовалась методика, описанная в статье (Тремейн и др., 2002), и алгоритм FITEXU из (Пресс и др., 1992). А именно, параметры регрессии  $\alpha$  и  $\beta$  находятся минимизацией функции  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \alpha - \beta x_i)^2}{\epsilon_{y_i}^2 + \epsilon_0^2 + \beta^2 \epsilon_{x_i}^2}, \quad (2.13)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  — оценки для  $i$ -го объекта,  $\epsilon_{x_i}$  и  $\epsilon_{y_i}$  — соответствующие погрешности, а  $\epsilon_0$  — внутренний разброс корреляции. Значение  $\epsilon_0$  определяется, когда значение  $\chi^2$ , деленное на число степеней свободы, становится равным 1. Погрешности величин  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\epsilon_0$  находятся варьированием параметров в пределах, определяемых условием  $\chi^2 - \chi_{\text{min}}^2 \leq 1$ .

В таблице (2.5) приводятся результаты кросс-корреляционного анализа оценки массы СМЧД по светимости балджа ( $M_{\text{bulge}}$ ), которая использовалась в качестве переменной  $y$  в формуле (2.12), с другими типами оценок ( $M_{\text{H}\beta}$ ,  $M_{\text{rev}}$ ,  $M_{\text{dyn}}$ ). Также приводится результат аналогичного сравнения  $M_{\text{rev}}$  с  $M_{\text{H}\beta}$ . В расчете не принимались во внимание имеющиеся для ряда объектов верхние пределы на массу.

Мы не обнаружили статистически значимой корреляции между величинами  $M_{\text{rev}}$  и  $M_{\text{H}\beta}$ , что неудивительно, так как сравнивалось всего 6 объектов. Однако это сравнение подтверждает справедливость эмпирической формулы (2.10) для сейфертовских галактик, так как не выявлено систематического смещения оценок  $M_{\text{H}\beta}$  относительно оценок  $M_{\text{rev}}$ , а разброс индивидуальных значений около среднего тренда ( $\epsilon_0 = 0.34 \pm 0.05$ ) в нашей минивыборке хорошо согласуется с разбросом, найденным в работе (Вестергард и Петерсон, 2006) при калибровке формулы (2.10) по данным реверберационных наблюдений большей выборки (28 объектов) сейфертовских галактик и квазаров.

Что касается определения массы СМЧД по светимости балджа, то, как видно из рис. 2.2, такие оценки оказываются систематически выше значений, полученных другими методами при  $M_{\text{BH}} \lesssim 10^8 M_{\odot}$  (слишком малое количество объектов для сравнения не позволяет нам

Таблица 2.5: Кросс-корреляция масс СМЧД, найденных разными методами

Корреляция	N	$\beta \pm \Delta\beta$	$\alpha \pm \Delta\alpha$	$\epsilon_0 \pm \Delta\epsilon_0$	$\rho$	$P_\rho$	$r$	$P_r$
$M_{H\beta} - M_{\text{bulge}}$	8	$-0.12 \pm 0.13$	$-0.16 \pm 0.16$	$\sim 0$	0.26	0.53	0.06	0.89
$M_{\text{rev}} - M_{\text{bulge}}$	7	$1.20 \pm 0.31$	$0.52 \pm 0.35$	$0.51 \pm 0.06$	0.29	0.54	0.87	0.01
$M_{\text{rev}} - M_{\text{bulge}}$ (без NGC 4395)	6	$0.11 \pm 0.30$	$-0.05 \pm 0.23$	$\sim 0$	-0.14	0.79	0.18	0.73
$M_{\text{dyn}} - M_{\text{bulge}}$	4	$0.45 \pm 0.35$	$0.01 \pm 0.4$	$0.22 \pm 0.17$	0.20	0.80	0.68	0.32
$M_{\text{rev}} - M_{H\beta}$	6	$0.73 \pm 0.42$	$-0.05 \pm 0.30$	$0.34 \pm 0.05$	0.26	0.62	0.60	0.21

$N$  — количество объектов.

$\rho$  — коэффициент ранговой корреляции Спирмена,  $P_\rho$  — вероятность соблюдения нулевой гипотезы.

$r$  — коэффициент корреляции Пирсона,  $P_r$  — вероятность соблюдения нулевой гипотезы.

сформулировать соответствующий вывод в отношении более высоких масс). Регрессионный анализ не выявил статистически значимой корреляции величины  $M_{\text{bulge}}$  с величинами  $M_{H\beta}$  и  $M_{\text{dyn}}$ . Слабозначимая корреляция обнаружена между  $M_{\text{rev}}$  и  $M_{\text{bulge}}$ , причем найденная зависимость согласуется с линейной ( $\beta = 1.2 \pm 0.3$ ), однако основной вклад в эту корреляцию вносит единственный объект — NGC 4395. Его часто называют “карликовой сейфертовской галактикой” (см., например, Петерсон и др. 2005) из-за нетипично малой массы СМЧД ( $M_{\text{BH}} < 10^6 M_\odot$ ), особых спектральных свойств (он может быть отнесен к переходному типу лайнеров/сейфертовских галактик) и низкой светимости (он имеет намного меньшую светимость, чем остальные объекты нашей выборки, см. таблицу 2.1). Если исключить NGC 4395 из рассмотрения, то корреляция  $M_{\text{rev}}$  с  $M_{\text{bulge}}$  (по 6 объектам) перестает быть статистически значимой.

Главный вывод, который можно сделать из этого исследования, состоит в том, что оценки  $M_{\text{BH}}$  по инфракрасной светимости балджа находятся в плохом согласии и в среднем завышены относительно более надежных оценок масс СМЧД в сейфертовских галактиках.

## 2.5 Темп аккреции

Имея оценку массы СМЧД, можно вычислить эддингтоновский предел,

$$L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{46} \frac{M_{\text{BH}}}{10^8 M_\odot}, \quad (2.14)$$

и сравнить его с болометрической светимостью АЯГ. В нашей недавней работе (Сазонов и др., 2012) по совокупности данных инфракрасных наблюдений обсерваторией «Спитцер» и жестких рентгеновских наблюдений обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» той же выборки объектов, которая исследуется здесь, было показано, что светимость излучения в жестком рентгеновском диапазоне является хорошим индикатором болометрической светимости АЯГ, а именно

$$\frac{L_{\text{bol}}}{L_{17-60 \text{ keV}}} \sim 16. \quad (2.15)$$

В таблице (2.4) приводятся значения  $L_{\text{Edd}}$ ,  $L_{\text{bol}}$  и  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ , полученные для наших объектов по этим формулам, при использовании двух альтернативных типов оценки массы СМЧД: 1)  $M_{\text{bulge}}$  (по корреляции с инфракрасной светимостью балджа/эллиптической галактики и 2) наилучшей оценки — если для объекта имеется динамическая оценка массы ( $M_{\text{dyn}}$ ), то используется она, иначе (в порядке предпочтения) оценка методом эхокартирования ( $M_{\text{rev}}$ ), по параметрам широкой линии  $H\beta$  ( $M_{H\beta}$ ), по корреляции со светимостью балджа ( $M_{\text{dyn}}$ ).

Формула (2.15) не может использоваться для комптоновски-толстой сейфертовской галактики NGC 1068. Поэтому мы оценили ее болометрическую светимость по инфракрасной светимости (в районе длины волны 15 мкм) пылевого тора (Мэйсон и др., 2006), на основе

зависимости

$$\frac{L_{\text{bol}}}{L_{15\mu\text{m}}} \sim 3 \left( \frac{L_{15\mu\text{m}}}{10^{43} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}} \right)^{0.25}, \quad (2.16)$$

полученной в работе (Сазонов и др., 2012) по результатам наблюдений телескопом «Спитцер» сейфертовских галактик из обзора «ИНТЕГРАЛ».

Отношение  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  может рассматриваться как индикатор режима аккреции СМЧД. На рис. 2.4 представлены значения  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$ , вычисленные как на основе оценок  $M_{\text{bulge}}$  (вверху), так и на основе наилучших оценок массы СМЧД (внизу). Для большинства объектов  $0.01 < L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 1$ . Это указывает на то, что аккреция газа на СМЧД, скорее всего, происходит в радиационно эффективном режиме, через геометрически тонкий, оптически толстый диск (Шакура и Сюняев, 1973).

Однако у нескольких АЯГ болометрическая светимость оказывается сравнима с эддингтоновской или даже превышает ее. Два из них (1H 0323+342 и MRK 110) являются сейфертовскими галактиками первого типа с нетипично узкими линиями (narrow-line Seyfert 1 galaxy, NLS1), причем для них оценки  $L_{\text{Edd}}$  сделаны без использования корреляции  $M_{\text{BH}}-L_{\text{K}\alpha}$  (использовались значения  $M_{\text{H}\beta}$  и  $M_{\text{rev}}$  соответственно). У еще одного объекта этого типа — 1H 1934–063 — значение  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  оказывается тоже высоким (0.31), если использовать наилучшую оценку массы СМЧД —  $M_{\text{H}\beta}$ . Кроме того, для этого объекта значение  $M_{\text{bulge}}$  на два порядка превышает значение  $M_{\text{H}\beta}$ . Для остальных двух объектов типа NLS1 — IGR J14552–5133 и IGR J16185–5958 —  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} = 0.06$  и  $0.24$ , однако эти оценки не могут считаться надежными, так как получены по  $M_{\text{bulge}}$ . В целом, эти результаты подтверждают то, что в сейфертовских галактиках первого типа с нетипично узкими линиями происходит наиболее быстрый рост СМЧД в современную эпоху (Мазур, 2000), и указывают на то, что этот рост далек от завершения.

Для нескольких объектов  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} < 0.01$  (рис. 2.4). Это может означать, что аккреция газа на СМЧД происходит в низком темпе и/или с низкой эффективностью излучения электромагнитных волн. Однако во всех этих случаях значения  $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}$  получены на основе оценок  $M_{\text{bulge}}$  и поэтому могут быть сильно занижены.

## 2.6 Заключение к главе 2

Проведенное на основе представительной выборки близких АЯГ исследование показало, что оценка масс СМЧД в сейфертовских галактиках по инфракрасной светимости (а следовательно и по массе) звездного балджа не может считаться надежной и в среднем приводит к завышенным значениям  $M_{\text{BH}}$  (в диапазоне  $\lesssim 10^8 M_{\odot}$ ). Это может быть связано с тем, что рост черных дыр в таких объектах еще далек от завершения. Отношение болометрической к критической эддингтоновской светимости составляет от 1 до 100% для подавляющего большинства объектов. Это указывает на то, что аккреция газа на СМЧД в сейфертовских галактиках происходит в высоком темпе и в радиационно эффективном режиме.

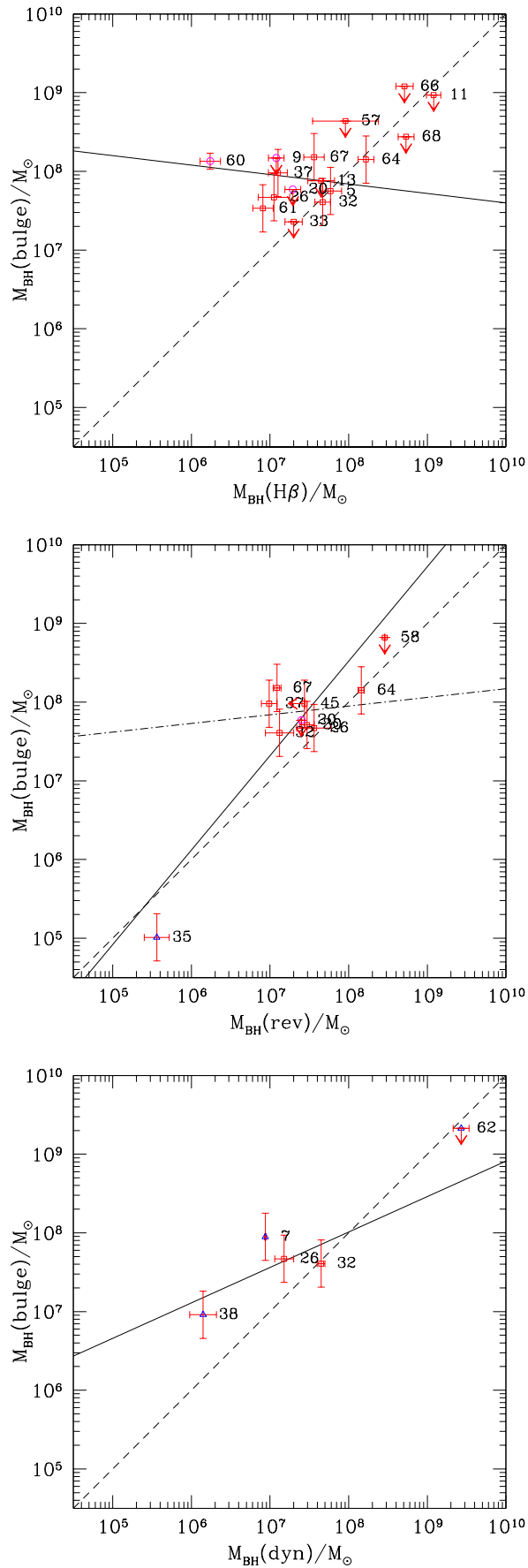


Рис. 2.2: Сравнение различных оценок масс СМЧД. Регрессии в логарифмическом пространстве показаны сплошными линиями. На среднем рисунке штрих-пунктирной линией показана регрессия без учета NGC 4395 (объект №35). Штриховой линией показано соотношение 1:1. Сейфертовские галактики первого типа отмечены квадратами, второго типа — треугольниками, первого типа с нетипично узкими линиями (NLS1) — кружками. Также указаны порядковые номера объектов в таблицах.

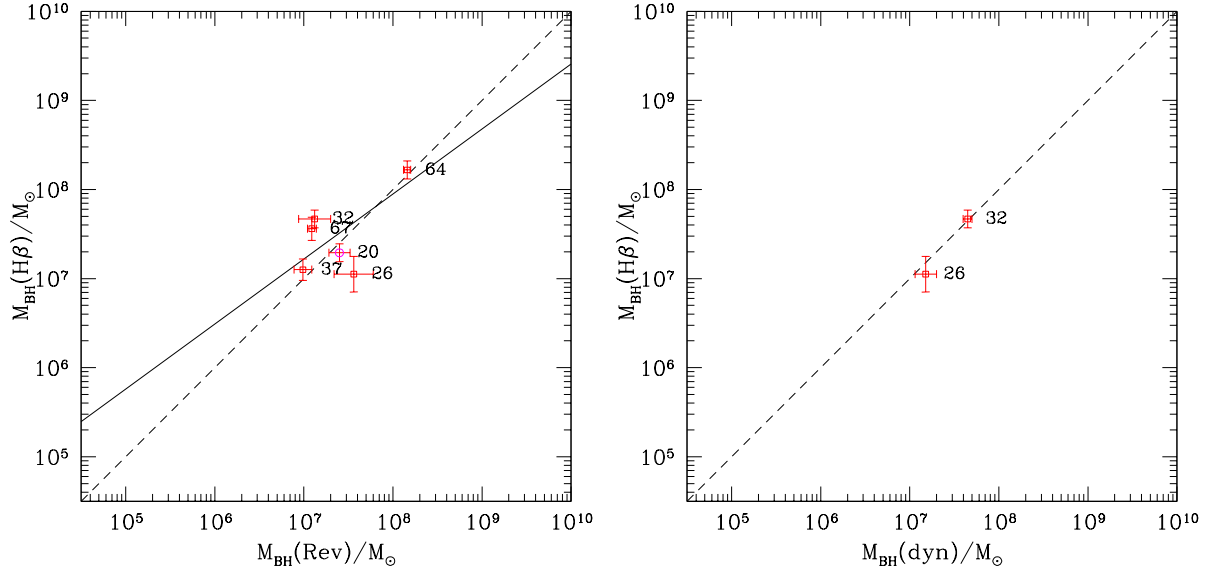


Рис. 2.3: Аналогично рис. 2.2, но для других корреляций.

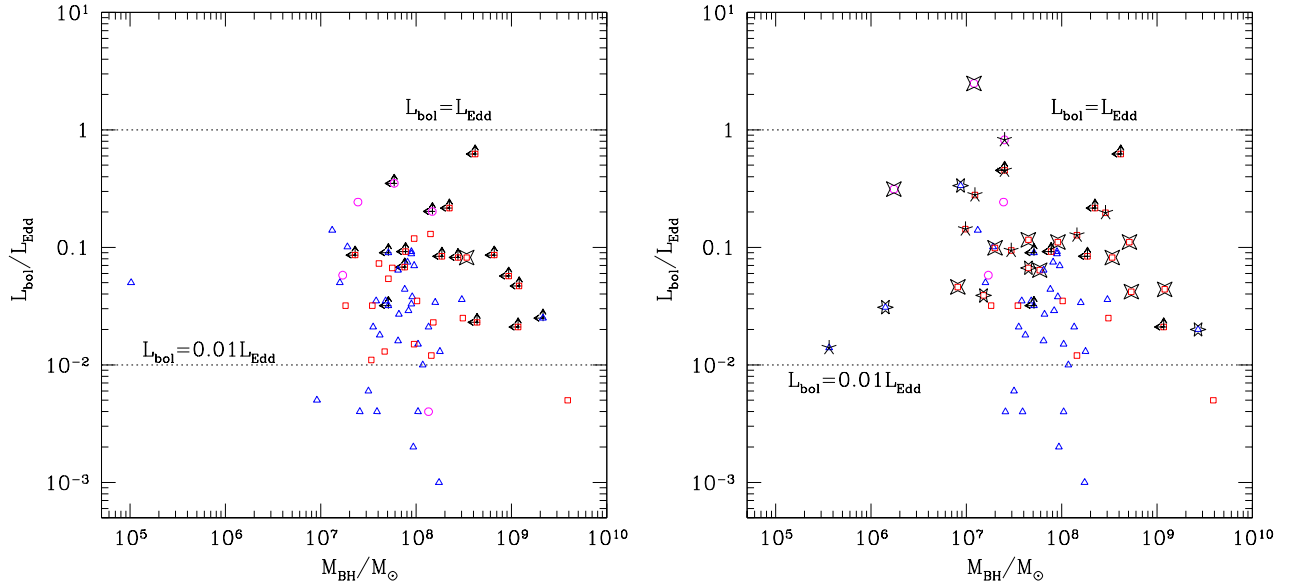


Рис. 2.4: Слева: Отношение болометрической к эддингтоновской светимости АЯГ в зависимости от массы СМЧД. Оценки  $M_{\text{BH}}$  сделаны по инфракрасной светимости балджа, за исключением LEDA 138501 (помечен четырехконечной звездой), для которого приведена оценка по параметрам широкой линии  $H\beta$ . Сейфертовские галактики первого типа отмечены квадратами, второго типа — треугольниками, первого типа с нетипично узкими линиями (NLS1) — кружками. Неопределенности измерений не показаны. Справа: Аналогично, только на основе наилучших оценок масс:  $M_{\text{dyn}}$  (шестиконечные звезды),  $M_{\text{rev}}$  (пятиконечные звезды),  $M_{H\beta}$  (четыреконечные звезды,  $M_{\text{bulge}}$  (остальные точки).

# Литература

- Вандел и др. (Wandel, A., Peterson, B.M., & Malkan, M.A.), 1999, ApJ, 526, 579
- Вестергаард и Петерсон (Vestergaard, M., & Peterson, B.M.), 2006, ApJ, 641, 689
- Винклер и др. (Winkler, C., Courvoisier, T.J.-L., Di Cocco, G., et al.), 2003, A&A, 411, L1
- Грэм (Graham, A.W.), 2007, MNRAS, 379, 711
- Грэм и Ворли (Graham, A.W., Worley, C.C.), 2008, MNRAS, 388, 1708
- Грэм и др. (Graham, A.W., Onken, C.A., Athanassoula, E., & Combes, F.), 2011, MNRAS, 412, 2211
- Гюльтекин и др. (Gültekin, K., Richstone, D., Gebhardt, K., et al.), 2009, ApJ, 698, 198
- Денни и др. (Denney, K.D., Bentz, M.C., Peterson, B. et al.), 2006, ApJ, 653, 152
- Джарретт и др. (Jarrett, T.H., Chester, T., Cutri, R., et al.), 2000, AJ, 119, 2498
- Джарретт и др. (Jarrett, T.H., Chester, T., Cutri, R., et al.), 2003, AJ, 125, 525
- Дибай Э.А. 1977, Письма в Астрономический журнал, 3, 3
- Донг и др. (Dong, X., Wang, T., Wang, J., et al.), 2008, MNRAS, 383, 581
- Жу и др. (Zhou, H., Wang, T., Yuan, W., et al.), 2007, ApJ, 658, L13
- Карделли и др. (Cardelli, J.A., Clayton, G.C., & Mathis, J.S.), 1989, ApJ, 345, 245
- Каспи и др. (Kaspi, S., Smith, P.S., Netzer, H., et al.), 2000, ApJ, 533, 631
- Каспи и др. (Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H., et al.), 2005, ApJ, 629, 61
- Кривонос и др. (Krivonos, R., Revnivtsev, Lutovinov, A., et al.), 2007, A&A, 475, 775
- Лаурикайнен и др. (Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., et al.), 2007, MNRAS, 381, 401
- Лаурикайнен и др. (Laurikainen, E., Salo, H., Buta, R., et al.), 2010, MNRAS, 405, 1089
- Мазур (Mathur, S.), 2000, MNRAS, 314, L17
- Маркони и Хант (Marconi, A., & Hunt, L.K.), 2003, ApJ, 589, L21
- Мейсон и др. (Mason, R.E., Geballe, T.R., Packham, C., et al.), 2006, ApJ, 640, 612
- Норгард-Нильсен и др. (Norgaard-Nielsen, H.U., Hansen, L., Jorgensen, H.E., et al.), 1986, A&A, 169, 49
- Онкен и др. (Onken, C.A., Ferrarese, L., Merritt, D., et al.), 2004, ApJ, 615, 645

- Онкен и Петерсон (Onken, C.A., & Peterson, B.M.), 2002, ApJ, 572, 746
- Петерсон и др. (Peterson, B.M., Ferrarese, L., Gilbert, K., et al.), 2004, ApJ, 613, 682
- Петерсон и др. (Peterson, B.M., Bentz, M.C., Desroches, L., et al.), 2005, ApJ, 632, 799
- Петросян и др. (Petrosian, A., McLean, B., Allen, R.J., et al.), 2007, ApJS, 170, 33
- Пресс и др. (Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., et al.), 1992, Numerical Recipes (2d ed.; Cambridge: Cambridge Univ. Press)
- Ричардс и др. (Richards, G.T., Lacy, M., Storrie-Lombardi, L.J., et al.), 2006, ApJS, 166, 470
- Сазонов и др. (Sazonov, S.Y., Ostriker, J.P., & Sunyaev, R.), 2004, MNRAS, 347, 144
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Revnivtsev, M., Krivonos, R., et al.), 2007, A&A, 462, 57
- Сазонов и др. (Sazonov, S., Willner S., Goulding A., et al.), 2012, ApJ, 757, 181
- Скрутски и др. (Skrutskie, M.F., Cutri, R.M., Stiening, R., et al.), 2006, AJ, 131, 1163
- Тремейн и др. (Tremaine, S., Gebhardt, K., Bender, R., et al.), 2002, ApJ, 574, 740
- Талли (Tully, R.B.), 1988, Nearby Galaxies Catalogue, Cambridge University Press
- Талли и др. (Tully, R.B., Rizzi, L., Shaya, E.J., et al.), 2009, AJ, 138, 323
- Убертини и др. (Ubertini, P., Lebrun, F., Di Cocco, G., et al.), 2003, A&A, 411, L131
- Феррарезе и Мерритт (Ferrarese, L., & Merritt, D.), 2000, ApJ, 539, L9
- Шакура и Сюняев (Shakura, N.I., & Sunyaev, R.A.), 1973, A&A, 24, 337
- Шанг и др. (Shang, Z., Brotherton, M.S., Wills, B.J., et al.), 2011, ApJS, 196, 2
- Шлегель и др. (Schlegel, D.J., Finkbeiner, D.P., Davis, M.), 1998, ApJ, 500, 525
- Элвис и др. (Elvis, M., Wilkes, B.J., McDowell, J.C., et al.) 1994, ApJS, 95, 1



# Глава 3

## Поиск рентгеновских квазаров на больших красных смещениях

Эта глава основана на результатах статьи Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, А.В. Мещеряков С.Ю. Сазонов, Письма в астрономический журнал, 2016, 42, 313

### 3.1 Введение

Поиск квазаров на  $z \gtrsim 3$  является одним из важнейших элементов исследования истории роста сверхмассивных черных дыр и эволюции массивных галактик во Вселенной. Для того, чтобы улучшить имеющиеся ограничения на модели рентгеновской функции светимости квазаров на  $z \gtrsim 3$ , требуется набрать большую рентгеновскую выборку далеких квазаров на высоких красных смещениях (см., например, Аирд и др., 2015). Яркие и далекие квазары — редкие объекты, для поиска которых нужны рентгеновские обзоры большой площади и достаточной глубины. Для работы с рентгеновскими источниками требуется фотометрическая и спектроскопическая поддержка в оптике. В современных работах по данной тематике Ассеф и др. (2010); Цивано и др. (2012); Калфоунцоу и др. (2014) прослеживается возрастающая роль методов оценки фотометрического красного смещения для определения  $z$  и классификации источников.

В своей недавней работе Калфоунцоу и др. (2014) измерили плотность рентгеновских квазаров на  $z > 3$  на основе каталога из 209 рентгеновских источников, обнаруженных в различных площадках на небе общей площадью  $\approx 33$  кв. град. Этот каталог состоит из 2 частей: *C-COSMOS* — обзор рентгеновского телескопа Чандра площадью 0.9 кв. град, 122 источника с потоками<sup>1</sup>  $2 \times 10^{-16} < F_X < 2 \times 10^{-15}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> (Элвис и др., 2009) и *ChaMP* — «случайный» обзор, составленный по данным наведений телескопа Чандра площадью 33 кв. град, 87 источников с потоками  $3 \times 10^{-15} < F_X < 3 \times 10^{-14}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> (Ким и др., 2007). Обзор *C-COSMOS* имеет глубокое фотометрическое (с использованием набора среднеполосных фильтров) и спектроскопическое покрытие и благодаря этому  $\approx 90\%$  полноту отождествления объектов на  $z > 3$ . Для измерения и оценки красных смещений источников обзора *ChaMP* применялись спектроскопическая программа *ChaMP* (44 объекта) и различные фотометрические соотношения (43 объекта). Таким образом, можно считать, что примерно 70% выборки квазаров на  $z > 3$  Калфоунцоу и др. (2014) составляют объекты с надежно установленными красными смещениями.

Накопленные в течение последних 15 лет данные наблюдений многочисленных астрофизических объектов с помощью космического рентгеновского телескопа *XMM*-Ньютон представляют в совокупности уникальный «случайный» рентгеновский обзор неба (Ватсон и др.,

---

<sup>1</sup>Здесь и ниже все рентгеновские потоки и светимости приводятся в энергетическом диапазоне 0.5–2 кэВ.

2009) общей площадью около 800 кв. град с чувствительностью  $\approx 5 \times 10^{-15}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> (версия *3XMM-DR4*, Ватсон и др., 2009). По данным этого обзора можно надеяться получить выборку квазаров на  $z > 3$ , отобранных по их излучению в рентгеновском диапазоне, в разы превышающую выборку Калфоунцоу и др. (2014). Это и является целью нашей работы.

Для работы с рентгеновскими источниками каталога *3XMM-DR4* требуются фотометрическая и спектроскопическая поддержки. Решение задачи облегчают общедоступные обзоры: оптический фотометрический и спектроскопический Слоановские обзоры (*SDSS*, Алам и др., 2015; Аихара и др., 2011; Эйзенштейн и др., 2011) площадью  $\approx 14$  и  $\approx 10$  тыс. кв. град соответственно; инфракрасные фотометрические обзоры всего неба *2MASS* (Катри и др., 2003) и *WISE* (Райт и др., 2010).

По спектроскопическим программам *SDSS* у большого числа далеких квазаров сняты спектры и измерено красное смещение, поэтому в качестве первого шага естественно использовать спектроскопическую выборку объектов Слоановского обзора (Алам и др., 2015):  $\approx 60\,000$  квазаров с  $z_{\text{спек.}} > 3$  на  $\approx 10$  тыс. кв. град. Однако спектроскопический Слоановский обзор основан на достаточно сложном методе отбора кандидатов в квазары, полнота и чистота которого зависят от многих факторов: красного смещения, морфологических свойств объектов, качества фотометрии и др. (Росс и др., 2013). Чистота выборок кандидатов в далекие квазары для Слоановского обзора не превышает 50% (Росс и др., 2012). При этом не ясно, как полнота и чистота отбора кандидатов для спектроскопической программы Слоановского обзора ведут себя в зависимости от рентгеновского потока.

Для отбора кандидатов в квазары на  $z > 3$  среди рентгеновских источников обзора *3XMM-DR4* можно использовать методику сравнения спектрального распределения энергии источника в оптическом и ИК-диапазонах с шаблонными спектрами квазаров, звезд и галактик. Такая методика не только дает вероятность того, что объект является квазаром, но и позволяет получить фотометрическую оценку его красного смещения  $z_{\text{фот.}}$ . В случае квазаров на высоких красных смещениях,  $z > 3$ , надежность оценок их красных смещений по данным оптического диапазона растет, поскольку в оптический диапазон попадает скачок, образованный яркой линией  $\text{Ly}\alpha$ , а также  $\text{Ly}\alpha$ -лес в спектре квазара. Добавление инфракрасной фотометрии *WISE* повышает чистоту выборки кандидатов в далекие квазары и дает преимущество перед методами отбора, которые основаны только на фотометрии Слоановского обзора.

В этой главе представлена выборка кандидатов в квазары на  $z > 3$ , полученная в результате поиска таких объектов среди рентгеновских источников «случайного» обзора обсерватории *XMM-Ньютон*, *3XMM-DR4*, с использованием данных Слоановского обзора, а также обзоров *2MASS* и *WISE*. Обсуждаются свойства этой выборки. В дальнейшем (см. главу 5) эту выборку предполагается использовать для построения рентгеновской функции светимости квазаров на  $z > 3$ . В работе используются следующие значения космологических параметров:  $\Omega_0=0.3$ ,  $\Lambda_0=0.7$ ,  $H_0=70$  км с<sup>-1</sup> Мпк<sup>-1</sup>.

## 3.2 Выборка рентгеновских источников с оптической и инфракрасной фотометрией

В нашей работе мы использовали данные четвертого выпуска каталога рентгеновских источников *3XMM-DR4*<sup>2</sup>. Наша выборка состоит из 129 541 точечного (*SC\_Extent=0*) рентгеновского источника на галактических широтах  $|b| > 20^\circ$  и имеет площадь  $\approx 300$  кв. град, которая определяется площадью пересечения обзора *3XMM-DR4* со Слоановским обзором, расчет площади представлен ниже. Мы работаем с рентгеновским потоком в диапазоне 0.5–2 кэВ (сумма столбцов *SC\_EP2\_FLUX* и *SC\_EP3\_FLUX* каталога *3XMM-DR4*).

<sup>2</sup><http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/xmm-newton/xmmssc.html>

Мы провели кросс-корреляцию каталога рентгеновских источников с данными фотометрического Слоановского обзора 10-го выпуска и спектроскопического обзора 12-го выпуска (Аихара и др., 2011; Ан и др., 2012; Алам и др., 2015; Эйзенштейн и др., 2011). В радиусе  $2\sigma$ -ошибки координат рентгеновского источника (если она была меньше  $3\text{угл. с}$ , то в радиусе  $3\text{угл. с}$ ) был проведен поиск всех оптических источников Слоановского обзора. В результате был получен каталог из 64 714 рентгеновских источников, которые имеют оптического партнера среди объектов Слоановского обзора. При этом 2489 (4%) рентгеновских источников имеют более одного оптического партнера. В случае многозначного соответствия мы делали оценку  $z_{\text{фот.}}$  для всех возможных оптических партнеров данного рентгеновского источника. Оказывается, что для 12 823 ( $\approx 20\%$  выборки) рентгеновских источников в Слоановском обзоре имеются данные спектроскопических наблюдений. Мы считали спектроскопическое измерение красного смещения надежным при значении флага  $z\text{Warning}=0$ . Оказывается, что 390 источников каталога *3XMM-DR4* имеют  $z_{\text{спек.}} > 3$  и  $z\text{Warning}=0$ . Из них 280 имеют погрешность измерения звездной величины  $\delta m_z < 0.2$  (см. ниже).

Дополнительно мы провели кросс-корреляцию с каталогом квазаров из работы Флеш (2015). В этот каталог входят спектроскопически подтвержденные рентгеновские квазары, данные по которым опубликованы до 25 января 2015 г., а также выборка надежных (вероятность, что окажется квазаром  $>99\%$ ) фотометрических кандидатов из работ Бови и др. (2012); Ричардс и др. (2009). Из каталога Флеш (2015) было добавлено 49 объектов с  $z > 3$ , из них 5 объектов с фотометрическими оценками  $z$  (Ричардс и др., 2009). В итоге, была получена спектроскопическая выборка из 329 квазаров с красным смещением больше 3 (280 из спектроскопической выборки Слоановского обзора и 49 из работы Флеш (2015)). Эта выборка требуется для проверки полноты нашей выборки квазаров (см. ниже).

Мы провели поиск инфракрасных партнеров в каталогах обзоров всего неба *2MASS* (Катри и др., 2003) и *WISE* (Райт и др., 2010). Поиск проводился в радиусе 6 угл. сек относительно координат рентгеновского источника. Если мы не находили инфракрасный партнер для оптического источника, то мы ставили предел  $7\sigma$  для фотометрических полос *J*, *H*, *Ks* обзора *2MASS* и  $5\sigma$  для фотометрических полос *w1*, *w2*, *w3*, *w4* обзора *WISE*, используя данные фотометрии соседних источников. Для источников *2MASS* и *WISE* с детектированием не во всех полосах мы использовали верхние пределы, приводимые в соответствующих каталогах. Мы считали, что источники *2MASS* всегда соответствуют источникам с фотометрией *WISE*. Когда источник *WISE* отстоял от источника *SDSS* больше, чем на 2 угл. сек, то при оценке  $z_{\text{фот.}}$  мы дополнительно рассматривали вариант, что источник имеет только фотометрию *SDSS*. В этом случае значения верхних пределов в фильтрах *2MASS* и *WISE* принимались равными значениям звездных величин *WISE/2MASS* спорного источника.

Таким образом, мы имеем измерение потока или верхний предел на поток в 12 широких полосах (*u'*, *g'*, *r'*, *i'*, *z'*, *J*, *H*, *Ks*, *w1*, *w2*, *w3*, *w4*) для рентгеновских источников. Для расчета потоков во всех фотометрических полосах использовались величины, предназначенные для измерения потока точечных источников, какими и являются далекие квазары. Кроме того, поиск проводился только среди точечных источников *SDSS*.

В обзоре *SDSS* отсутствует фотометрия ярких звезд. Чтобы учесть их влияние на наш метод отбора квазаров, был проведен поиск партнеров рентгеновских источников *XMM-Newton* в радиусе 6 угл. сек в Каталоге опорных звезд (*GSC*, Ласкер и др., 2013). Этот каталог был получен в результате обработки фотопластинок обзоров Паломарской (северное полушарие), Сайдинг Спринг (южное полушарие) и еще ряда обсерваторий. В каталоге *GSC*  $\sim 19$  млн источников от 6 до 16 величины (отметим, что в *SDSS* пересвечены источники ярче 15 величины), часть из которых астрометрически классифицированы как звезды.

Доля рентгеновских источников каталога *3XMM-DR4*, для которых имеются оптические партнеры в фотометрическом обзоре *SDSS* и каталоге *GSC*, падает с уменьшением рентгеновского потока от  $\gtrsim 70\%$  на  $F_X \gtrsim 10^{-14}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  до  $\approx 20\%$  на  $F_X \lesssim 10^{-15}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  (см.

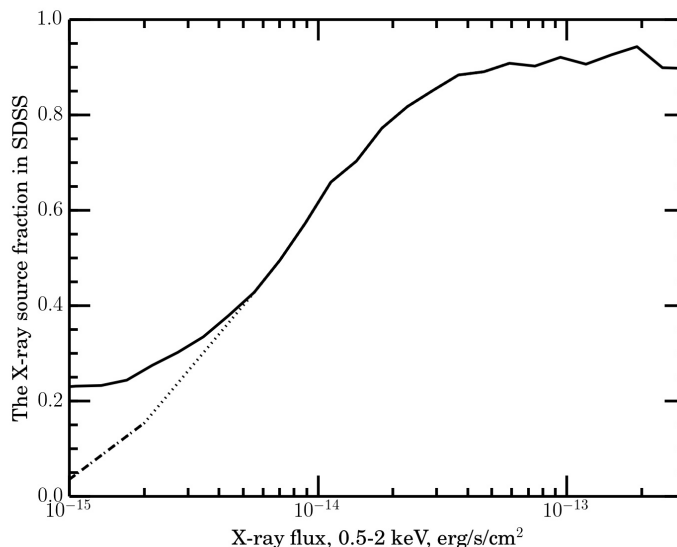


Рис. 3.1: Сплошная линия — доля рентгеновских источников каталога *3XMM-DR4*, зарегистрированных в фотометрическом обзоре *SDSS* ( $\delta m_z < 0.2$ ) или имеющих партнера в каталоге звезд *GSC*, в зависимости от рентгеновского потока. Пунктиром (на малых рентгеновских потоках) показана доля квазаров на  $z > 3$  из обзора *COSMOS* (Калфоунцоу и др., 2014), зарегистрированных в фотометрическом обзоре *SDSS*. Точками показана составленная на основе этих двух зависимостей и используемая в дальнейшем функция полноты обнаружения рентгеновских квазаров на  $z > 3$  в обзоре *SDSS* от рентгеновского потока.

рис. 3.1). На меньших рентгеновских потоках возрастает доля близких галактик ( $z < 1$ ) в выборке рентгеновских источников (Лемер и др., 2012), поэтому не происходит дальнейшего снижения полноты обнаружения объектов в *SDSS*.

Квазары на  $z > 3$  составляют небольшую часть всех рентгеновских источников, и для них доля объектов с оптическими компаньонами может отличаться от соответствующей доли для всех рентгеновских источников. Это предположение можно проверить с помощью представительной выборки квазаров с надежно измеренными  $z > 3$  из глубокого рентгеновского обзора *C-COSMOS* Калфоунцоу и др. (2014), о которой говорилось выше. Из 122 объектов этой выборки 32 имеют спектроскопические красные смещения ( $z_{\text{спек.}}$ ), 75 — надежные фотометрические красные смещения  $z_{\text{фот.}}$  (измеренные с помощью набора среднеполосных фильтров), 15 не имеют оптического партнера до  $m_r \approx 28$  и поэтому тоже считаются надежными кандидатами в квазары на  $z > 3$  (Калфоунцоу и др., 2014; Цивано и др., 2011). На рис. 3.1 показано, как меняется с рентгеновским потоком доля объектов из этой выборки, регистрируемых в фотометрическом обзоре *SDSS*. Доля объектов с оптическими партнерами, обнаруженными в Слоановском обзоре, среди квазаров на  $z > 3$  оказывается в несколько раз ниже таковой для всех рентгеновских источников на потоках ниже  $2 \times 10^{-15}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ .

Далее при учете влияния неполноты регистрации объектов в фотометрическом Слоановском обзоре на нашу итоговую выборку кандидатов в квазары на  $z > 3$ , мы используем приближенную гладкую функцию фотометрической полноты от рентгеновского потока, составленную из зависимости для полноты регистрации квазаров на  $z > 3$  на потоках ниже  $2 \times 10^{-15}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  и соответствующей зависимости для всех рентгеновских источников на потоках выше  $5 \times 10^{-15}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  (см. рис. 3.1).

### 3.3 Аппроксимация фотометрических данных спектральными шаблонами

В нашей работе для расчетов значений величины  $\chi^2$  при аппроксимации спектрального распределения энергии в оптическом и инфракрасном диапазонах при помощи различных спектральных шаблонов, а также для расчетов фотометрических оценок красных смещений было использовано программное обеспечение *EAZY* (Браммер и др., 2008), с помощью этого ПО, для каждого значения  $z$  на сетке красных смещений подбирается шаблон с наименьшим значением  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{N_{filt}} \frac{(T_{z,i,j} - F_j)^2}{(\delta F_j)^2}, \quad (3.1)$$

где  $N_{filt}$  — число фотометрических точек,  $T_{z,i,j}$  — плотность потока  $i$ -го шаблона на красном смещении  $z$  в фильтре  $j$ ;  $F_j$  — плотность потока в  $j$ -ом фильтре,  $\delta F_j$  — ошибка на поток, которая учитывает фотометрическую ошибку в фильтре  $j$ .

В ПО *EAZY* реализован алгоритм, позволяющий искать суперпозицию нескольких спектральных шаблонов, например спектров галактики и квазара. Однако в нашей работе мы используем только аппроксимацию одним шаблоном, так как мы ищем яркие квазары, излучение которых преобладает над излучением родительской галактики. Квазары характеризуются большим разбросом спектров и сильной переменностью (например, Ричардс и др., 2006), поэтому необходимо иметь достаточно полную библиотеку шаблонов.

Для каждого объекта были проведены отдельные итерации для библиотеки шаблонов квазаров и библиотеки шаблонов звезд. При аппроксимации шаблонами квазаров фотометрия *SDSS* была поправлена на затухание (экстинкцию) в нашей Галактике с помощью приведенных в фотометрическом каталоге *SDSS* значений этой величины для каждого объекта.

Для шаблонов звезд поправка фотометрии *SDSS* на затухание в Галактике не проводилась. Наилучшее значение  $z_{\text{фот}}$  искалось на сетке красных смещений  $[0.01, 7]$  с шагом 0.01 подбором наиболее подходящего по критерию  $\chi^2$  шаблона из библиотеки квазаров.

При этом также учитывалось межгалактическое поглощение на нейтральном водороде (Мадау, 1995). Межгалактическое поглощение учитывает влияние леса Ly $\alpha$  линий поглощения на спектральное распределение энергии квазара. На красных смещениях  $z > 3$ , Ly $\alpha$ -лес поглощает довольно заметную долю света с голубой стороны от линии Ly $\alpha$  и эта доля растет с красным смещением. При этом на таких красных смещениях линия Ly $\alpha$  попадает в фотометрическую полосу  $g'$  и наличие скачка поглощения Ly $\alpha$ -леса уже можно определить по цвету  $u' - g'$ . На красных смещениях выше  $z \approx 3.5$  линия Ly $\alpha$  перемещается в полосу  $r'$  и наличие скачка поглощения определяется по цвету  $g' - r'$ . Именно эта особенность в спектрах квазаров на красных смещениях  $z > 3$  позволяет повысить надежность отождествления таких объектов и получать более надежные фотометрические оценки их красных смещений (см. далее).

#### 3.3.1 Библиотека шаблонов

Цель нашего поиска — квазары первого типа (без значительного внутреннего поглощения излучения) на  $z > 3$ . Мы использовали спектральные шаблоны квазаров из библиотек ПО *EAZY* (Браммер и др., 2008) и *LePHARE* (Ильберт и др., 2006), а также из библиотек (Ассеф и др., 2010; Ричардс и др., 2006; Кравчик и др., 2013). В библиотеку были добавлены видоизмененные нами шаблоны (Кравчик и др., 2013). В них был учтен вклад линий излучения квазара, полученный из шаблона (Ванден Берк и др., 2001). Кроме того, мы продолжили средний спектр квазаров *SDSS* (Ванден Берк и др., 2001) в инфракрасную область ( $\lambda > 8000 \text{ \AA}$ ) с помощью шаблона активного ядра галактики (АЯГ) 1-го типа (Ассеф и др.,

2010), и добавили получившийся шаблон в нашу библиотеку. Также были добавлены шаблон эллиптической галактики (Ассеф и др., 2010) и квазара 2-го типа (Полетта и др., 2007). Как и в работе (Дален и др., 2013), мы применили к шаблонам набор поглощений  $E(B-V) = 0.01, 0.05, 0.5$  и  $1.0$ . по закону (Калцетти и др., 2000), используя табличные данные из пакета ПО *LePHARE* (Ильберт и др., 2006).

Мы опробовали библиотеку шаблонов на спектроскопической выборке *SDSS-DR12* и исключили из библиотеки шаблоны, которые чаще ошибочно классифицировали близкий объект как объект на  $z > 3$ , чем верно классифицировали далекие квазары. После этого у нас осталось 14 шаблонов, которые и использовались в дальнейшем для поиска квазаров на  $z > 3$ . Эти шаблоны представлены на рис. 3.2.

Шаблоны галактики и поглощенного квазара нужны только для отсева близких объектов, точное красное смещение которых нас не интересует. При этом не требуется применять дополнительные шаблоны галактик (звздообразующие, с различным вкладом активного ядра и проч.), так как это повысит число больших выбросов и ухудшит полноту и чистоту итоговой выборки квазаров на  $z > 3$  (Симм и др., 2015; Сальвато и др., 2009).

Для шаблонов звезд использовалась библиотека спектров из работы Пиклза (1998). В нее входят спектры звезд спектральных классов *O, A, B, F, G, K, M*. Для некоторых шаблонов есть разбиение по классам светимости: i — сверхгиганты, ii — яркие гиганты, iii — гиганты, iv — субгиганты, v — звезды главной последовательности. Спектры библиотеки построены только до длин волн 2.5 мкм (Пиклз, 1998). Поскольку фильтры *WISE* более длинноволновые, то каждый спектр из этой библиотеки был экстраполирован законом Планка для чернотельного излучения до длины волны 30 мкм. Такая аппроксимация хорошо работает для одиночных звезд главной последовательности, горячее  $M_0$ .

### 3.3.2 Критерии отбора кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$

Квазары являются звездообразными объектами, поэтому при поиске далеких квазаров мы рассматриваем только точечные источники Слоановского обзора. При этом существенную сложность представляет загрязнение выборки звездами класса *M*. Многие из них регистрируются в рентгеновском обзоре обсерватории *XMM-Newton* благодаря своей корональной активности. Во время вспышек отношение потоков рентгеновского и оптического/близкого ИК-излучения у *M*-карликов может быть таким же, как у квазаров.

Чувствительности обзора *SDSS* в голубых фильтрах недостаточно, чтобы отделить далекие квазары с  $i' \gtrsim 20.5$  от звезд. Отделить *M*-карлики от далеких квазаров можно только по показателю цвета  $i' - z'$  (Ричардс и др., 2002; Ву и др., 2012; Скржибек и др., 2015): звезды имеют  $i' - z' > 0.8$ , а квазары —  $i' - z' < 0.4$ . Показатель цвета для квазаров  $i' - z' < 0.4$  остается примерно постоянным до красного смещения 5.5, пока линия  $\text{Ly}\alpha$  не перейдет из фильтра  $i'$  в фильтр  $z'$ . Тогда показатель цвета квазаров становится  $i' - z' \approx 2$ . При этом квазары на  $z \gtrsim 5.5$  имеют надежную фотометрию только в одном фильтре *SDSS*, а в таком случае метод определения  $z_{\text{фот}}$  аппроксимацией шаблоном работает плохо, поэтому, для повышения чистоты нашей выборки кандидатов в квазары мы использовали ограничение на чувствительность в фильтре  $z'$  *SDSS* и показатель цвета  $i' - z'$ :

$$\delta m_{z'} < 0.2 \ \& \ i' - z' < 0.6 \ , \quad (3.2)$$

где  $\delta m_{z'} < 0.2$  — ошибка на видимую звездную величину точечного источника в фильтре  $z'$  *SDSS*.

Ограничение  $\delta m_{z'} < 0.2$  помогает уменьшить эффекты отбора при поиске квазаров. Спектральное распределение энергии квазаров растет от  $\lambda \approx 1$  мкм до  $\text{Ly}\alpha$ . Соотношения между пороговыми чувствительностями фильтров в обзоре *SDSS* таковы, что, накладывая ограничение (3.2), мы гарантируем полноту обнаружения квазаров 1-го типа не только в фильтре  $z'$ , но и в более голубых фильтрах *SDSS*.

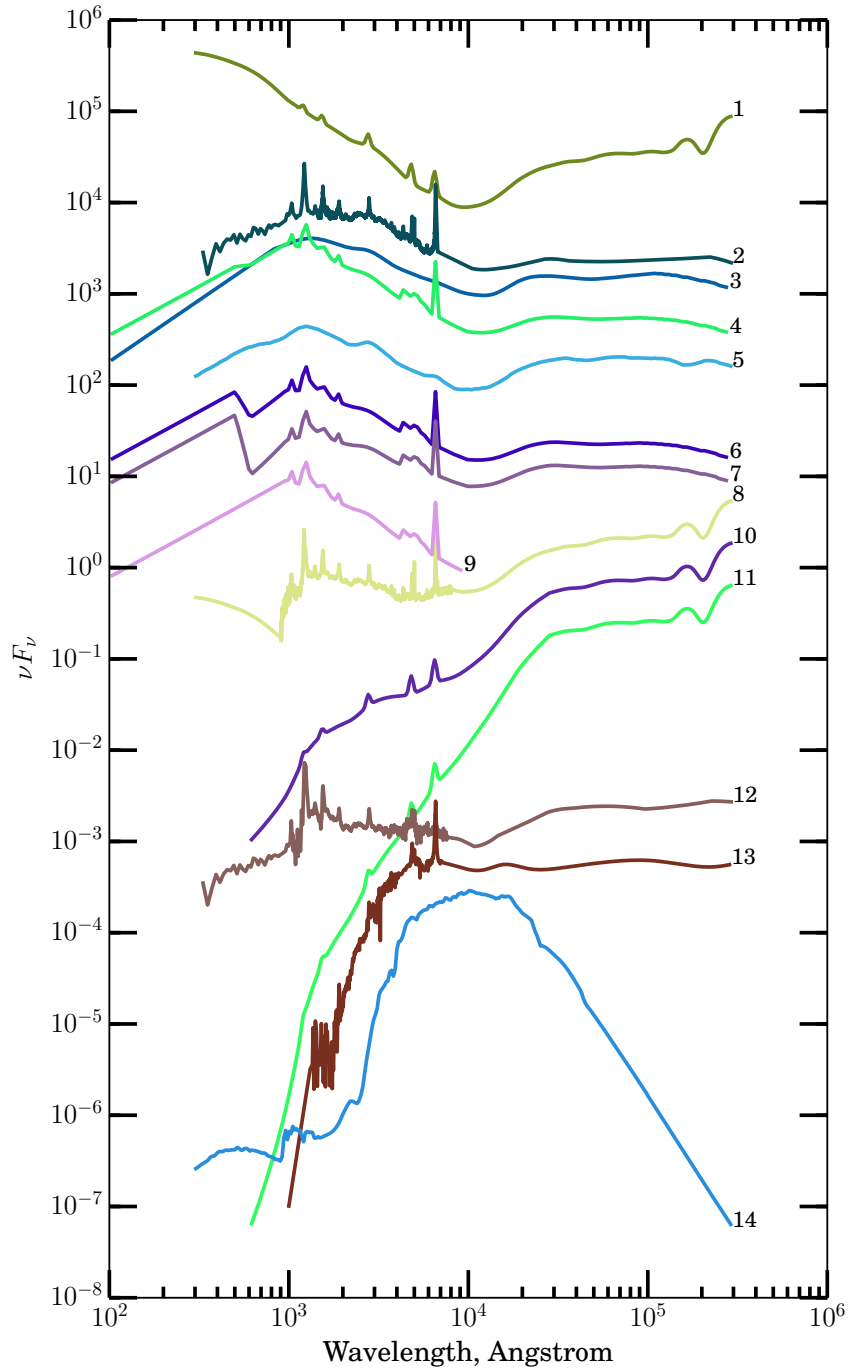


Рис. 3.2: Шаблоны библиотеки квазаров в относительных единицах  $\nu F_\nu$ : 1 — средний спектр квазаров 1-го типа (Ассеф и др., 2010), 2 — средний спектр квазаров *SDSS* (Браммер и др., 2008), 3 — средний спектр квазаров 1-го типа большой светимости (Кравчик и др., 2013), 4 — средний спектр квазаров 1-го типа (Кравчик и др., 2013), дополненный эмиссионными линиями, с поглощением  $E(B - V) = 0.01$ , 5 — средний спектр квазаров 1-го типа (2 вариант) (Ассеф и др., 2010), 6 — средний спектр квазаров 1-го типа (Кравчик и др., 2013), дополненный эмиссионными линиями, с поглощением  $E(B - V) = 0.05$ , 7 — средний спектр квазаров 1-го типа (Кравчик и др., 2013), дополненный эмиссионными линиями, с поглощением  $E(B - V) = 0.1$ , 8 — расширенный в инфракрасную область шаблон квазара 1-го типа Ванден Берк и др. (2001), 9 — средний спектр квазаров 1-го типа (Кравчик и др., 2013), урезанный для аппроксимации только оптической части, 10 — шаблон 1 (Ассеф и др., 2010) с поглощением  $E(B - V) = 0.5$ , 11 — шаблон 1 (Ассеф и др., 2010) с поглощением  $E(B - V) = 1.0$ , 12 — составной шаблон квазара из спектров глубокого обзора *VIMOS-VLT* (Гавиньо и др., 2006; Ильберт и др., 2006), 13 — спектр поглощенного квазара 2-го типа Полетта и др. (2007), 14 — спектр эллиптической галактики E0 (Ассеф и др., 2010).

После применения фотометрических ограничений кандидаты в квазары отбираются согласно условию

$$\chi_{star}^2 > \chi_{qso}^2 \ \& \ z_{\text{фот.}} > 2.75, \quad (3.3)$$

где  $\chi_{star}^2$  — наименьшее значение  $\chi^2$  для шаблона из библиотеки звезд,  $\chi_{qso}^2$  — главный минимум распределения  $\chi^2$  для шаблонов квазаров.

Условия  $\chi_{star}^2 > \chi_{qso}^2$  и  $i' - z' < 0.6$  отсеивают 97% звезд среди рентгеновских источников каталога *3XMM-DR4*. Это было проверено на звездах, для которых имеются спектры, снятые по программам *SDSS* (см. рис. 3.3).

Существует разброс значений  $z_{\text{фот.}}$  относительно  $z_{\text{спек.}}$ , значит часть объектов с  $z_{\text{спек.}} > 3$  будет иметь значения  $z_{\text{фот.}} \lesssim 3$ , поэтому при составлении каталога кандидатов в квазары на  $z > 3$  мы выбрали нижнюю границу  $z_{\text{фот.}} > 2.75$ .

Дополнительно мы провели проверку полученной выборки кандидатов в квазары, чтобы по возможности исключить ошибки неправильного отождествления источников. Из выборки были исключены 20 объектов: 2 звезды со спектрами *SDSS*, несколько слабых источников на фоне близкой яркой галактики, слабые источники рядом с яркой звездой, объекты с ошибочно измеренными.

### 3.3.3 Примеры объектов из каталога

На рис. 3.4 и 3.5 приведено несколько примеров аппроксимации фотометрических данных шаблонами квазаров и звезд для известных квазаров (для которых имеется  $z_{\text{спек.}}$ ) или звезд. На рис. 3.4 представлены случаи, когда какой-то из спектральных шаблонов квазаров хорошо описывает фотометрические точки и дает близкую к правильной оценку  $z_{\text{фот.}}$ , на рис. 3.5 — когда аппроксимация шаблоном квазара приводит к неправильному отождествлению или дает ненадежную оценку  $z_{\text{фот.}}$ . Во вставках показаны соответствующие распределения  $\chi^2(z)$ .

Объекты *3XMM J151147.1+071406* ( $z_{\text{спек.}} = 3.481$ ), *3XMM J001115.2+144601* ( $z_{\text{спек.}} = 4.964$ ), *3XMM J004054.6-091527* ( $z_{\text{спек.}} = 5.020$ ) — примеры, когда метод оценки фотометрического красного смещения работает хорошо. При этом детектирование сигнала в инфракрасных фильтрах позволяет гарантировать, что объект не является звездой.

Объект *3XMM J153322.7+324351* — пример плохого определения красного смещения:  $z_{\text{фот.}} = 3.01$ . Измеренное в *SDSS* истинное значение  $z_{\text{спек.}} = 1.897$ .

Объект *3XMM J080630.4+153241* — звезда М-класса. Он не вошел в наш каталог кандидатов в квазары, так как для него  $i' - z' > 0.6$  и  $\chi_{qso}^2 > \chi_{star}^2$ . Если объект с подобным соотношением цветов будет на 2 видимых звездных величины слабее, т. е. вблизи порога обнаружения *SDSS*, то чувствительности обзоров *WISE* и *2MASS* окажется недостаточно для его обнаружения. В таком случае шаблоны звезды и квазара опишут фотометрические точки *SDSS* со сравнимыми значениями  $\chi^2$ , и можно будет ошибочно принять звезду за квазар на  $z_{\text{фот.}} > 3$ . Тем не менее многие из таких объектов могут быть отсеяны с помощью фотометрических ограничений (3.2).

Объект *3XMM J094109.9+344902* находится на  $z_{\text{спек.}} = 2.643$ . Более чем в 2 угл. сек от источника *SDSS* находится источник *WISE*. Для этого объекта были сделаны две оценки фотометрического красного смещения: с учетом потоков, измеренных в фильтрах *WISE* и *2MASS* и с использованием этих значений лишь в качестве верхних пределов на инфракрасный поток (см. выше). В первом случае  $z_{\text{фот.}} = 2.62$  (при аппроксимации использован шаблон 12) и объект не попадает в каталог кандидатов в квазары, так как  $z_{\text{фот.}} < 2.75$ . Во втором случае  $z_{\text{фот.}} = 3.00$  (использован шаблон 1) и объект в итоге попадает в каталог. Такие случаи ухудшают чистоту каталога.



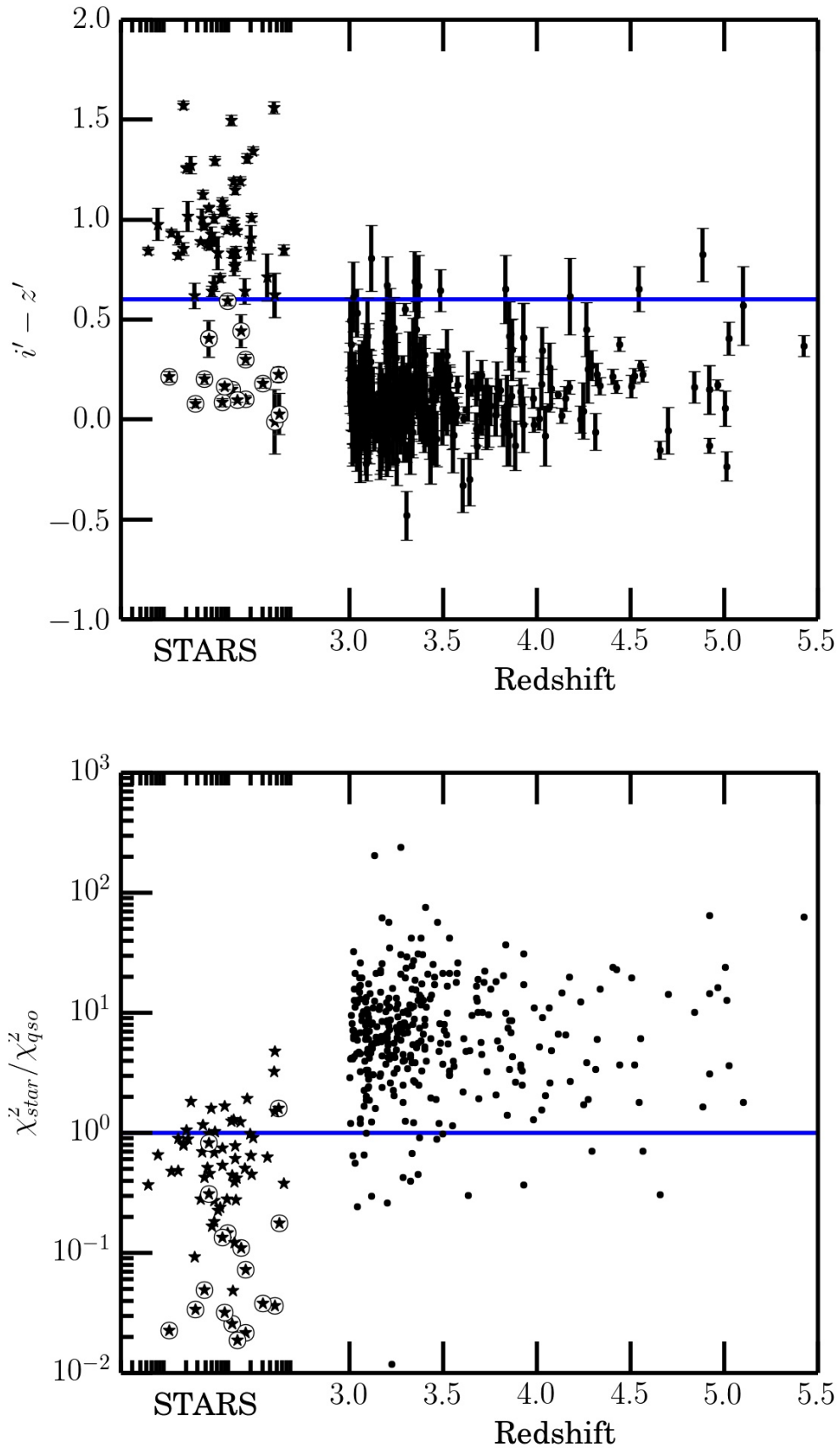


Рис. 3.3: Критерии отбора по показателю цвета  $i' - z'$  SDSS(сверху) и  $\chi_{star}^2 > \chi_{qso}^2$  (снизу) в зависимости от красного смещения. Сплошными горизонтальными линиями показаны границы критериев отбора. Точками показаны 329 квазаров с  $z_{спек.} > 3$ . Символом  $\star$  показаны 66 спектроскопически подтвержденных звезд из SDSS DR12, которые имеют минимум распределения  $\chi^2(z_{фот.})$  на  $z_{фот.} > 3$ . Кружками обведены звезды, у которых показатель цвета  $i' - z' < 0.6$  — такой же как у квазаров. 49

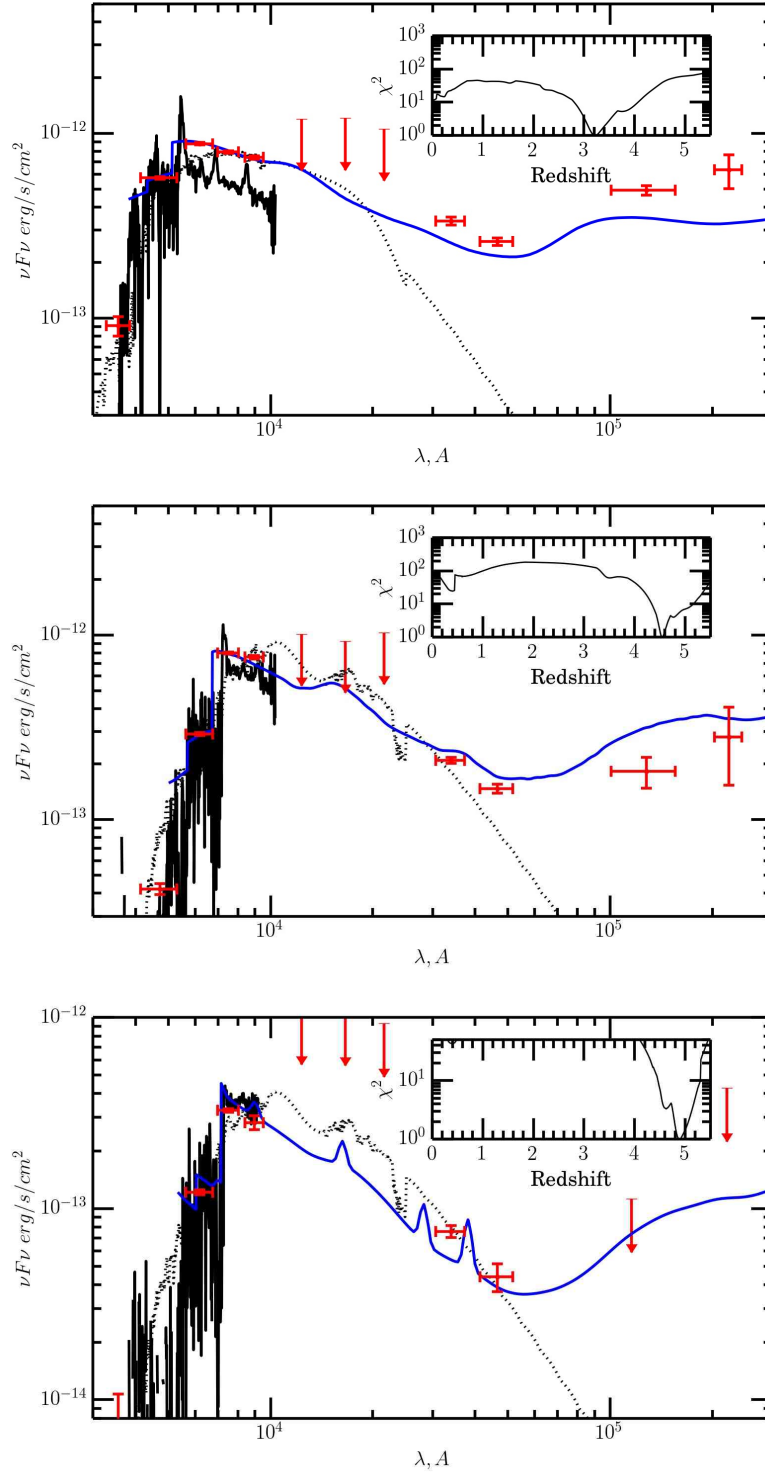


Рис. 3.4: Примеры удовлетворительного определения фотометрического красного смещения. Вверху: *3XMM J151147.1+071406* — квазар,  $z_{\text{спек.}} = 3.481$ ,  $z_{\text{фот.}} = 3.22$ . В центре: *3XMM J001115.2+144601* — квазар,  $z_{\text{спек.}} = 4.964$ ,  $z_{\text{фот.}} = 4.54$ . Внизу: *3XMM J004054.6-091527* — квазар,  $z_{\text{спек.}} = 5.020$ ,  $z_{\text{фот.}} = 4.88$ . Показаны спектр *SDSS* (черная сплошная линия), фотометрические точки и их ошибки (красным), шаблон квазара на  $z_{\text{фот.}}$  (сплошная синяя линия), шаблон звезды (черные точки). Во вставках показано распределение  $\chi^2(z)$  при аппроксимации фотометрических данных шаблонами квазаров.

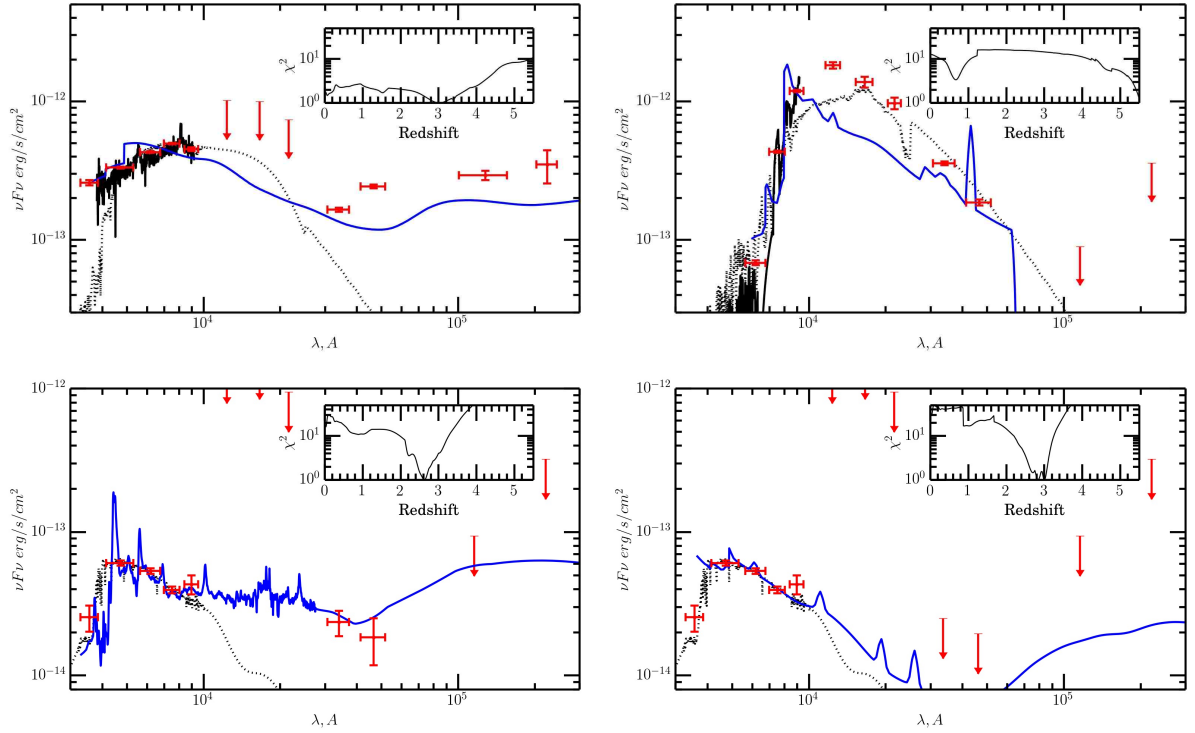


Рис. 3.5: Примеры ненадежной оценки фотометрического красного смещения. Слева сверху: *3XMM J153322.7+324351* — квазар на  $z_{\text{спек.}} = 1.897$ . Его фотометрия наилучшим образом описывается шаблоном квазара 1-го типа с  $z_{\text{фот.}} = 3.01$ . Справа сверху: *3XMM J080630.4+153241* — звезда М-класса, для которой получено  $z_{\text{фот.}} = 5.58 \pm 0.02$ . Объект был правильно классифицирован как звезда и не попал в каталог кандидатов в квазары, так как для него  $i' - z' > 0.6$  и  $\chi_{qso}^2 > \chi_{star}^2$ . Слева и справа внизу: *3XMM J094109.9+344902* — квазар на  $z_{\text{спек.}} = 2.643$ , для которого из-за спорной ассоциации с источником *WISE* получены две фотометрические оценки красного смещения:  $z_{\text{фот.}} = 2.62$  и  $z_{\text{фот.}} = 3.00$ ). Обозначения — как на рис. 3.4.

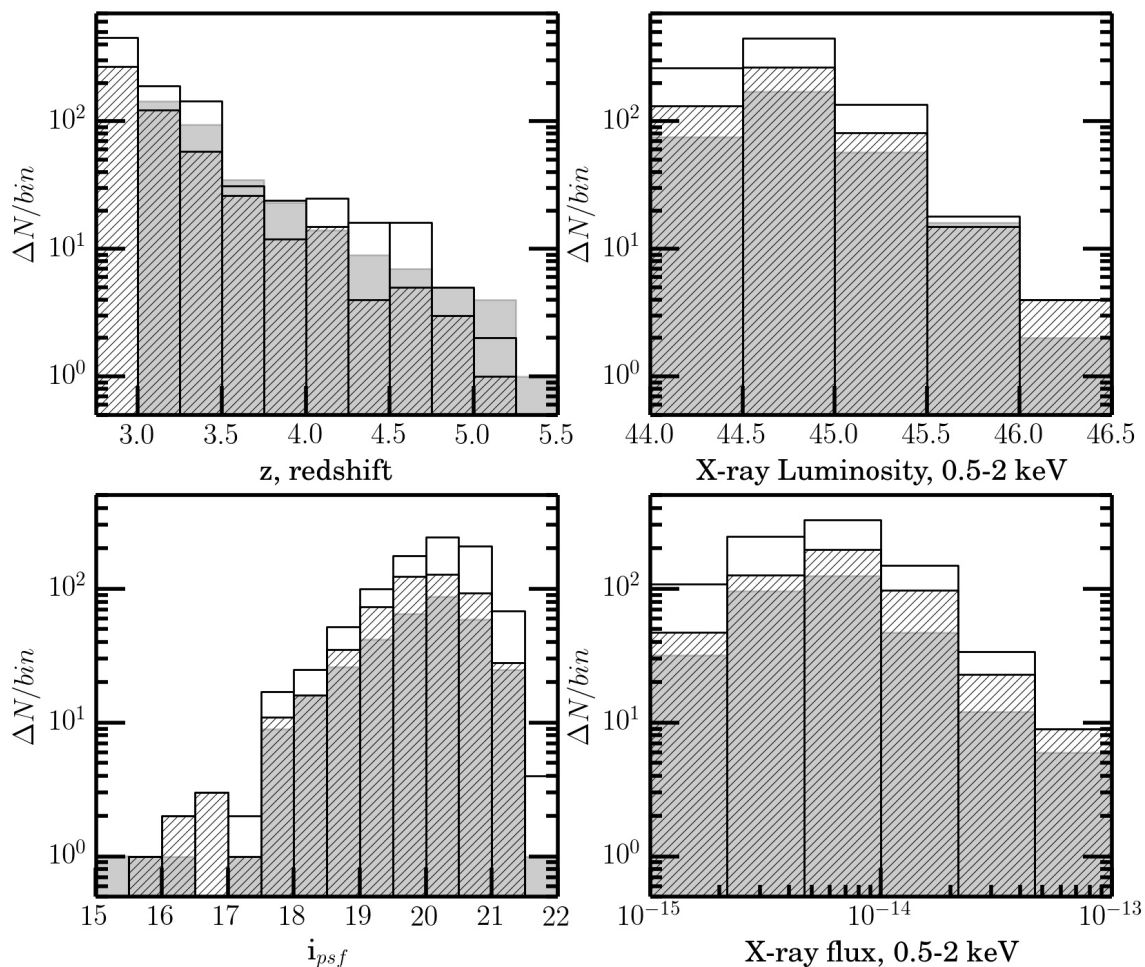


Рис. 3.6: Слева сверху — распределение кандидатов в квазары по фотометрическому красному смещению ( $z_{\text{фот.}}$ ). Справа сверху — по рентгеновской светимости (в диапазоне 0.5–2 кэВ в системе наблюдателя), Слева внизу — по звездной величине в фильтре  $i'$  *SDSS*. Справа внизу — по рентгеновскому потоку в диапазоне 0.5–2 кэВ. Белым показаны распределения для всего каталога кандидатов в квазары. Штриховкой показаны объекты с  $z_{\text{фот.}}$ , которые имеют известное спектроскопическое красное смещение (с любым  $z_{\text{спек.}}$ ). Серым показаны известные квазары с  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Их распределения построены по спектроскопическим красным смещениям ( $z_{\text{спек.}}$ ). Высота каждого столбика — полное число объектов соответствующей подвыборки в заданном интервале значений по оси X.

## 3.4 Каталог и его свойства

Согласно описанным выше правилам отбора был составлен каталог 903 кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . В их число входит 21 мишень наведения *3XMM-DR4*. Каталог приведен в таблице 3.1, где для каждого источника указаны: координаты, рентгеновские потоки, фотометрические и спектроскопические (если есть) красные смещения, значения  $\chi^2_{qso}$  и  $\chi^2_{star}$ . На рис. 3.6 отражены свойства каталога и его спектроскопической подвыборки.

В основном объекты каталога имеют фотометрическое красное смещение  $2.75 \lesssim z_{\text{фот.}} \leq 3.5$ ; у 381 объекта  $3 \lesssim z_{\text{фот.}} \leq 4$ , у 60 объектов  $4 < z_{\text{фот.}} \leq 5$ , у 2 объектов  $z_{\text{фот.}} > 5$ .

В каталог попали 515 известных квазаров с надежно измеренным  $z_{\text{спек.}}$ , из них 266 имеют  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Фотометрия этих 515 объектов описывается шаблоном квазара на  $z_{\text{фот.}} > 2.75$  и «проходит» по критериям отбора (см. выше). Однако критериям отбора не удовлетворили 63 известных квазара с  $z_{\text{спек.}} > 3$  (Флеш, 2015; Алам и др., 2015). Их список приведен в отдельной таблице 3.2.

Чаще всего их фотометрические точки лучше описываются (с меньшим  $\chi^2$ ) звездным шаблоном или шаблоном квазара на меньшем  $z$ . Некоторые объекты с  $z_{\text{спек.}} > 3$  в SDSS классифицируются как протяженные источники. Надежных измерений спектроскопического красного смещения не имеют 388 кандидатов в далекие квазары.

Медианное значение рентгеновского потока для объектов каталога (903 источников) составляет  $5.3 \times 10^{-15}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  в диапазоне энергий 0.5–2 кэВ. Все источники с потоком выше  $4 \times 10^{-14}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$  имеют спектроскопическое красное смещение. Ограничение на погрешность звездной величины в фильтре  $z'$  SDSS и требование  $i' - z' < 0.6$  приводят к тому, что большинство наших объектов оказываются ярче 21.5 величины в фильтре  $i'$  SDSS.

Таким образом, полученный каталог кандидатов в далекие квазары может привести к заметному (до полутора раз) увеличению количества известных рентгеновских квазаров на  $z > 3$  относительно уже существующей спектроскопической выборки (в тех же площадках на небе). В следующей главе 4 обсуждаются результаты спектроскопической проверки новых кандидатов, которая показала, что действительно дополнительный отбор квазаров дает 20%-50% новых источников. Чем слабее источники в оптике, тем выше процент ранее неизвестных квазаров.

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$i'_{PSF}$	$z'_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{\text{ref}}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1	J000335.5-061112	119255	0.8981	-6.1869	2.851	0.205	19.25	19.00	2.856	0(0)	3.05	4	f8i	7	
2	J000303.7+020416	119783	0.7655	2.0714	1.295	0.211	20.76	20.33	2.946	0(0)	3.02	12	g0iii	8	
3	J000444.2+020801	117610	1.1846	2.1337	0.573	0.229	20.95	20.69	2.665	0(0)	2.80	1	a7v	5	
4	J000531.3+000840	117756	1.3806	0.1445	0.963	0.281	20.99	20.58	2.848	0(0)	2.80	7	f5iii	7	
5	J000443.6-084036	117599	1.1820	-8.6767	0.944	0.323	20.30	20.12			3.85	3	k3i	5	

NAME — имя в каталоге 3XMM-DR4 (3XMMJ...), SRCID уникальный номер рентгеновского источника в каталоге 3XMM-DR4, RA — прямое восхождение и DEC — склонение в градусах в каталоге 3XMM-DR4,  $F_{0.5-2}^{-14}$  и  $\Delta F_{0.5-2}^{-14}$  поток и ошибка на поток ( $\times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>) в диапазоне 0.5–2 кэВ,  $i'_{PSF}$  — видимая звездная величина в фильтре  $i'$  SDSS (AB, PSF),  $z'_{PSF}$  — видимая звездная величина в фильтре  $z'$  SDSS (AB, PSF),  $z_{\text{спек.}}$  — спектроскопическое красное смещение,  $z_{\text{ref}}$  — номер ссылки на работу с опубликованным  $z_{\text{спек.}}$  (0 — SDSS DR12, в скобках указано значение флага zWarning; 1 — каталог рентгеновских квазаров Флеш (2015), в скобках указан номер источника данных из Флеш (2015)),  $z_{\text{фот.}}$  — фотометрическое красное смещение, FL — флаг данных (D — в пределах  $2\sigma$  ошибки локализации рентгеновского источника XMM есть другой оптический источник; w — оценки  $z_{\text{фот.}}$  получены только по фотометрии SDSS, хотя рядом есть источник WISE; t — мишень наведения XMM, r — шаблон звезды описывает фотометрию лучше, чем шаблон квазара ( $\chi^2_{star} < \chi^2_{qso}$ ), G — объект считается протяженным источником в SDSS),  $T_Q$  — номер шаблона библиотеки квазаров,  $T_S$  — шаблон звезды (Пиклз, 1998) с наименьшим  $\chi^2$ , NB — число фотометрических полос, используемых при аппроксимации. Эта таблица в электронном виде доступна на сайте <http://vizier.u-strasbg.fr/> (каталог J/PAZh/42/313).

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME	3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$z'_{PSF}$	$z_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{ref}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
6	J000511.6-084201	117868	1.2986	-8.7005	0.498	0.185	19.64	19.64	3.205	0(0)	3.30		1	f8i	7	
7	J000533.7-084825	117722	1.3908	-8.8071	0.577	0.232	19.24	19.46			2.82		7	f8iv	8	
8	J000618.1-084410	117240	1.5757	-8.7362	0.872	0.433	20.45	20.57	3.323	0(0)	3.15		7	g0i	7	
9	J000942.5+125251	118363	2.4272	12.8811	3.149	0.528	20.21	20.03	2.392	0(0)	2.82		3	g8v	7	
10	J001033.5+105231	118456	2.6398	10.8755	1.171	0.416	20.91	20.48	2.920	0(0)	2.93		3	rk0v	7	
11	J001037.5+105526	118489	2.6565	10.9239	1.463	0.406	20.25	20.04	2.676	0(0)	2.81		1	f2v	5	
12	J001115.2+144601	117909	2.8135	14.7671	10.810	0.299	18.28	18.10	4.964	0(0)	4.54	t	5	m2i	9	
13	J001340.4+054554	121657	3.4183	5.7651	0.927	0.213	19.95	19.85	2.712	0(0)	2.97		1	f2iii	7	
14	J001504.7+171517	121325	3.7700	17.2549	0.160	0.069	20.63	20.70	3.162	0(0)	2.84		7	f6v	5	
15	J001756.7+163007	122306	4.4864	16.5021	0.183	0.070	20.29	20.29	3.548	0(0)	3.83		1	k3iii	6	
16	J001920.9+163209	122068	4.8372	16.5359	0.859	0.167	19.04	19.00			2.96		1	f6v	8	
17	J001754.1+161406	122310	4.4755	16.2350	0.465	0.136	20.81	20.45			2.87		3	wg5iii	8	
18	J002015.9+214914	121995	5.0664	21.8208	0.346	0.120	19.72	19.51			3.03		12	k3iii	9	
19	J002159.9-083503	120127	5.4996	-8.5843	0.236	0.092	20.78	20.72			2.84		12	rf6v	9	
20	J002127.3-020333	120370	5.3640	-2.0593	1.829	0.154	17.00	16.90	2.596	1(824)	2.77	t	1	wf5v	12	
21	J002150.6-150427	119878	5.4611	-15.0742	0.189	0.047	21.31	20.72			2.79		7	f5iii	5	
22	J002208.0-150540	120066	5.5334	-15.0945	1.635	0.103	18.80	18.58	4.52	1(401)	4.40	t	4	m2i	7	
23	J002244.4+013250	121123	5.6854	1.5474	0.915	0.105	19.51	19.38	2.982	0(0)	2.76		2	f8iv	7	
24	J002527.7+105118	120782	6.3648	10.8553	0.337	0.157	19.63	19.33			3.13		3	rk0iii	8	
25	J002630.2+165656	113930	6.6259	16.9490	1.510	0.196	20.23	19.97	2.859	0(0)	2.86		4	f5i	7	
26	J002726.4+170730	113471	6.8602	17.1251	0.377	0.091	20.05	20.17	3.885	0(0)	4.02		1	k2i	5	
27	J002706.9+261559	113871	6.7791	26.2666	0.943	0.376	20.32	19.82			3.29		12	rk4iii	8	
28	J003027.7+261355	19579	7.6157	26.2324	0.239	0.044	19.78	19.93	3.213	0(0)	3.11		7	g0i	8	
29	J003057.9+261744	16416	7.7415	26.2956	0.900	0.076	20.45	20.02			3.01		3	wg5iii	7	
30	J003000.5+044040	55447	7.5030	4.6775	0.996	0.136	20.27	20.41	3.091	1(1411)	3.09		4	f2ii	7	
31	J003020.3+045940	114313	7.5847	4.9946	0.156	0.072	20.48	20.44			3.37		2	wg8iii	8	
32	J003205.2+394158	114090	8.0217	39.6997	0.953	0.310	20.45	20.47			2.80		12	f8i	8	
33	J003927.1+005152	116463	9.8629	0.8645	0.353	0.072	20.81	20.55	2.403	0(4)	3.09		3	wg5iii	8	
34	J003845.4+410802	116341	9.6894	41.1340	0.254	0.126	20.55	20.28			3.37	D	12	rk5ii	8	
35	J004054.6-091527	117128	10.2276	-9.2577	1.107	0.303	19.20	19.13	5.002	0(0)	4.88		1	m2i	7	
36	J004232.3+403156	114754	10.6347	40.5324	0.021	0.031	19.73	19.39			3.35	D	12	m2iii	8	
37	J004305.4+420056	115611	10.7725	42.0158	0.098	0.037	20.98	20.41			4.51		3	m3v	5	
38	J004351.1+005844	115508	10.9631	0.9791	0.317	0.127	20.94	20.70	3.241	0(0)	3.01		7	f8i	6	
39	J004336.4+000536	115345	10.9019	0.0934	0.494	0.219	19.79	19.66	3.123	0(0)	2.89		3	g2v	8	
40	J004425.9+405956	129571	11.1081	40.9991	0.092	0.041	21.04	20.58			4.55	D	3	m4v	5	
41	J004500.3+410347	53758	11.2523	41.0634	0.531	0.074	20.45	19.92			4.44	wD	2	m2v	5	
42	J004505.3-014048	128997	11.2723	-1.6800	1.005	0.106	19.39	19.34	3.282	0(0)	3.05		5	rg5v	8	
43	J004607.4+410149	130244	11.5310	41.0303	0.340	0.106	21.33	20.91			3.25	wD	2	wk2iii	5	
44	J004643.3+201745	129657	11.6804	20.2961	0.496	0.146	20.90	20.72	2.973	0(0)	2.90		1	f02iv	5	
45	J004800.9+315354	128285	12.0040	31.8986	1.398	0.235	20.41	20.27			3.18		12	wg5iii	8	
46	J004813.8+315149	128161	12.0576	31.8637	0.477	0.162	20.14	20.10			2.86		3	g0iii	7	
47	J005324.7+123831	128340	13.3530	12.6421	0.179	0.084	20.77	20.73	2.908	0(0)	2.99		6	f8i	7	
48	J005223.7+394443	128795	13.0988	39.7454	0.833	0.317	18.65	18.73	2.9	1(429)	3.02		6	f8i	8	
49	J005647.4-011740	132351	14.1976	-1.2945	0.321	0.127	20.35	20.52			2.77		5	f5iii	9	
50	J005952.7+314403	130986	14.9697	31.7344	1.839	0.336	20.29	19.74			3.30		12	m0iii	9	
51	J010342.1-062414	123867	15.9257	-6.4039	0.220	0.091	19.39	19.26			3.37	D	2	k3iii	8	
52	J010619.2+004821	124394	16.5802	0.8060	0.441	0.282	18.78	18.40	4.440	0(0)	4.35	t	2	m3ii	8	
53	J010751.0+140334	123076	16.9626	14.0595	2.229	0.280	17.38	17.34			2.96		1	f6v	9	
54	J010641.0+323431	124633	16.6710	32.5754	0.408	0.160	20.41	20.20	3.201	0(0)	2.96		6	f2ii	7	
55	J010737.8+150741	122823	16.9076	15.1283	0.516	0.116	20.72	20.77	3.291	0(0)	3.28		1	g2i	7	
56	J010749.4+151304	123081	16.9562	15.2181	0.289	0.109	20.77	20.60	2.711	0(0)	2.76		1	f0v	5	
57	J010807.1+152524	122555	17.0298	15.4235	0.099	0.091	20.89	20.79	3.406	0(0)	3.15		12	rk0v	7	
58	J011218.8+021526	126662	18.0784	2.2574	0.461	0.265	20.27	20.09	3.272	0(0)	3.07		2	g2iv	7	
59	J011301.0+023555	127323	18.2544	2.5988	0.512	0.135	20.10	19.74	2.664	0(0)	2.86		1	f02iv	7	
60	J011305.0+151830	127383	18.2711	15.3085	0.210	0.205	21.36	21.06	2.671	0(0)	2.77	wD	1	f02iv	5	
61	J011552.6+000602	125614	18.9693	0.1007	0.493	0.102	19.10	19.10	3.167	0(0)	3.19		6	g2i	9	
62	J011852.7+032049	125261	19.7200	3.3471	0.230	0.085	19.71	19.70	4.23	1(510)	3.58		12	k3i	8	
63	J011947.4+033150	126214	19.9479	3.5306	0.479	0.089	20.28	20.20			3.28		12	rk3iii	8	
64	J012050.0+034535	125742	20.2087	3.7599	0.466	0.119	19.47	19.33			3.10		3	wk2iii	8	
65	J012118.3+034808	125977	20.3264	3.8023	1.489	0.138	19.19	19.02	2.875	0(0)	2.88		7	f8i	9	
66	J012126.1+034706	125877	20.3589	3.7851	1.733	0.142	18.63	18.60	4.13	1(1785)	3.74	t	7	rk4iii	9	
67	J012418.1+335021	97973	21.0754	33.8392	0.258	0.120	20.82	20.41			3.25		12	rk4iii	7	
68	J012442.3+040015	97882	21.1764	4.0043	0.266	0.234	20.82	20.46			2.95		3	wg5iii	7	
69	J012537.4+034718	98731	21.4061	3.7886	0.804	0.398	20.81	20.63			2.81		2	f8iv	5	
70	J012617.6+320640	98906	21.5737	32.1111	0.589	0.155	20.39	20.39			2.82		3	g0iii	7	
71	J012555.0-012925	98996	21.4794	-1.4905	0.572	0.127	20.70	20.20			3.26		12	k3iii	8	
72	J012556.5-012731	98971	21.4856	-1.4588	0.597	0.117	19.43	19.35	2.807	0(0)	2.82		6	f5iii	8	
73	J012624.7-012412	98915	21.6031	-1.4033	0.416	0.136	18.78	18.58			3.03		3	rg5iii	8	
74	J013930.8+061300	101300	24.8784	6.2169	0.131	0.075	20.30	20.09			2.84		5	f8v	7	
75	J014010.5-090031	101485	25.0442	-9.0086	2.900	1.422	20.33	19.81			2.76	D	12	f8v	9	
76	J013939.0+060810	8464	24.9131	6.1360	0.489	0.059	20.67	20.84			3.44		2	k3iii	7	
77	J014247.5+132731	101247	25.6980	13.4586	0.492	0.227	20.15	19.88	3.1	1(1538)	2.78		7	f2ii	8	
78	J014251.0+133601	101250	25.7128	13.6003	0.202	0.095	20.93	20.58			3.17		12	rg5iii	7	
79	J014401.4+021519	101164	26.0059	2.2553	0.199	0.105	20.50	20.51			2.85		12	f8iv	8	
80	J014426.0-043318	99415	26.1085	-4.5550	0.648	0.166	19.95	19.80	2.417	0(0)	2.79		1	f02iv	8	
81	J015324.7-033440	92913	28.3530	-3.5780	0.628	0.302	20.08	20.02	3.272	1(1411)	2.94		7	f8i	8	
82	J015314.0+005154	99867	28.3086	0.8652	1.325	0.258	19.81	19.74	2.519	0(0)	2.77		1	a2i	5	
83	J015722.3+322501	92698	29.3433	32.4170	0.429	0.139	20.24	20.14	2.718	0(0)	2.76		2	f8iv	7	

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$z'_{PSF}$	$z'_{PSF}$	$z_{спек.}$	$z_{ref}$	$z_{фот.}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
84	J020216.4-041108	91459	30.5684	-4.1856	1.046	0.233	20.77	20.32			2.85		3	g5v	8
85	J020159.2-070204	91345	30.4967	-7.0347	0.636	0.318	21.43	21.02			2.89		12	f8v	7
86	J020241.0-063208	91408	30.6712	-6.5357	0.067	0.060	19.31	19.29	3.120	0(0)	2.96		2	f8i	9
87	J020229.4-042703	91380	30.6227	-4.4510	2.106	0.310	20.19	20.38			3.23		12	k3iii	8
88	J020247.9-074645	92259	30.6999	-7.7792	0.461	0.221	18.67	18.83	3.305	0(0)	3.21	D	5	k3iii	9
89	J020316.4-074831	92420	30.8187	-7.8088	1.242	0.285	19.65	19.64	3.296	0(0)	3.09		2	rk0v	8
90	J020241.1-060903	92274	30.6713	-6.1510	0.331	0.124	20.24	19.91			2.87		12	f8v	8
91	J020246.3-050223	38370	30.6932	-5.0399	0.559	0.158	20.26	20.19	3.213	0(0)	3.13		6	f8i	7
92	J020403.5-063428	92105	31.0147	-6.5745	0.155	0.098	20.51	20.32	2.605	0(0)	3.31		2	wg5iii	9
93	J020437.7-073726	95456	31.1575	-7.6239	0.183	0.102	20.55	20.29	2.869	0(0)	2.88		6	f2ii	7
94	J020533.1-063425	46821	31.3886	-6.5741	0.987	0.198	20.55	20.17	2.766	0(0)	2.92		9	f0iii	5
95	J020651.4-042855	95750	31.7142	-4.4822	3.955	0.492	20.33	20.31	0.971	0(0)	2.78		1	wf5v	5
96	J020657.0+293304	95910	31.7378	29.5514	1.618	0.099	19.31	18.90	2.376	0(0)	2.76		3	g5v	8
97	J020701.6-073003	96053	31.7567	-7.5010	1.345	0.239	20.73	20.54			2.88	D	12	g0v	7
98	J020702.3-044145	96063	31.7597	-4.6959	0.932	0.285	21.28	20.86			2.85		12	f8i	7
99	J020716.2-041457	94208	31.8175	-4.2493	0.264	0.091	19.08	18.83	2.934	0(0)	3.31		2	wk2iii	8
100	J020816.1-042744	94101	32.0671	-4.4623	0.060	0.099	21.25	20.87			2.79		12	f6v	8
101	J021058.7-051106	44337	32.7451	-5.1852	0.471	0.148	19.90	19.96	3.039	0(0)	2.88		6	f5iii	8
102	J021029.0-054206	108502	32.6209	-5.7019	0.347	0.157	19.86	19.78	3.249	1(1411)	3.04		6	f8i	8
103	J020947.7-034650	94509	32.4488	-3.7806	0.195	0.147	20.70	20.49	3.001	0(0)	3.34		4	g0i	6
104	J021102.7-000910	108150	32.7613	-0.1529	0.268	0.134	20.32	20.16	4.918	0(0)	4.52		12	m5v	8
105	J021153.0-061233	109095	32.9711	-6.2094	0.108	0.123	20.15	19.90	3.477	0(0)	3.77		1	rk0iii	5
106	J021145.3-041343	109224	32.9390	-4.2286	0.284	0.169	19.56	19.50			2.86		2	rg0v	8
107	J021126.4-054022	108280	32.8601	-5.6729	0.988	0.285	20.59	20.41	3.399	0(0)	3.14		3	wg8iii	7
108	J021315.3-040351	108828	33.3138	-4.0643	0.765	0.226	20.02	19.98	3.089	0(0)	2.82		12	f8i	9
109	J021328.8-033751	109090	33.3701	-3.6311	0.264	0.146	19.44	19.19			2.81		3	g5v	8
110	J021427.4-041333	37288	33.6148	-4.2261	0.726	0.159	20.48	20.38	2.756	0(0)	2.77		5	f6v	7
111	J021351.5-004849	53802	33.4651	-0.8132	0.232	0.089	19.37	19.29	3.516	0(0)	3.36		6	g5i	8
112	J021419.5-003700	107352	33.5813	-0.6169	0.144	0.074	20.98	20.63			2.85		3	g5v	7
113	J021429.2-051744	106939	33.6221	-5.2957	1.791	0.092	18.73	18.76	3.985	0(0)	3.78	t	6	rk3iii	8
114	J021438.1-052024	106859	33.6589	-5.3402	0.718	0.065	20.37	20.35	3.197	0(0)	3.18		12	rk4iii	8
115	J021401.9-003941	47331	33.5080	-0.6614	0.635	0.123	20.72	20.63			4.17		7	m2iii	8
116	J021455.5-004431	61364	33.7320	-0.7419	0.435	0.127	19.27	19.19			2.79	D	3	g2v	8
117	J021520.2-060656	107851	33.8346	-6.1156	0.330	0.136	19.92	19.80	2.998	0(0)	3.03		2	g0iii	8
118	J021550.4-050336	108010	33.9601	-5.0601	0.143	0.068	19.72	19.37	2.050	0(0)	3.24		12	k3iii	9
119	J021545.7-041203	48280	33.9408	-4.2008	0.255	0.100	19.78	19.75	2.479	0(0)	2.87	wD	1	f0v	5
120	J021641.2-041450	43744	34.1722	-4.2474	0.169	0.080	18.92	18.56	2.377	0(0)	2.87		12	g0iii	9
121	J021719.4-052304	111253	34.3312	-5.3845	0.980	0.082	19.32	19.30	2.707	0(0)	2.86		7	f8i	9
122	J021734.9-054438	110770	34.3957	-5.7440	0.322	0.083	20.39	20.54			3.36		2	k3iii	7
123	J021709.3-035453	111344	34.2888	-3.9148	0.313	0.101	20.63	20.41			2.79		5	f5iii	7
124	J021730.9-041823	41436	34.3793	-4.3069	0.845	0.150	19.29	19.03	2.310	0(0)	2.81		3	g0iii	8
125	J021754.6-040012	110932	34.4778	-4.0036	0.158	0.139	19.95	19.60	2.565	0(0)	2.82		1	f0v	5
126	J021921.2-044315	38163	34.8389	-4.7208	1.235	0.239	20.00	19.70	2.776	0(0)	2.76		7	f8iv	8
127	J021919.1-060454	34016	34.8298	-6.0816	0.827	0.103	20.66	20.36	2.763	0(0)	2.84		1	f0iii	7
128	J021916.9-061053	37446	34.8209	-6.1814	0.464	0.098	20.65	20.44			2.82		3	g0iv	7
129	J021925.6-054138	109768	34.8567	-5.6940	0.234	0.114	20.53	20.46	3.838	0(0)	4.12		6	rk5iii	6
130	J021943.4-052609	110044	34.9310	-5.4359	0.434	0.160	20.54	20.49	2.788	0(0)	2.81		7	f2iii	7
131	J021941.9-073648	110059	34.9249	-7.6134	0.304	0.201	20.16	19.91	3.019	0(0)	3.26		1	f8i	7
132	J022005.2-054153	109552	35.0221	-5.6981	0.421	0.153	19.16	19.02			3.63		3	rk4iii	8
133	J022037.4-061037	29914	35.1563	-6.1771	1.014	0.145	19.42	19.18			3.03		3	wk2iii	8
134	J022059.8-060537	110677	35.2496	-6.0937	0.502	0.186	19.97	19.79			2.83		6	f5i	7
135	J022131.7+200549	110070	35.3824	20.0969	0.743	0.243	20.09	20.01			2.81		1	f6v	7
136	J022113.5-030539	110625	35.3065	-3.0944	0.132	0.058	18.15	17.99			2.88		3	k3iii	9
137	J022100.4-042327	110643	35.2520	-4.3909	0.485	0.146	19.78	19.68	3.714	0(0)	3.60		6	rk3iii	8
138	J022141.9-042714	110324	35.4248	-4.4540	0.477	0.126	20.74	20.39	2.840	0(0)	2.83		2	f8iv	7
139	J022137.1-055630	38342	35.4049	-5.9419	0.362	0.121	20.01	19.96	3.089	0(0)	2.91		12	f8i	8
140	J022156.7-055150	103314	35.4863	-5.8640	0.498	0.178	20.96	21.01	3.845	0(0)	3.37		12	rk3iii	8
141	J022112.5-034251	110572	35.3025	-3.7143	0.617	0.073	19.30	19.53	5.011	0(0)	4.74		6	m3v	7
142	J022220.7-024825	103428	35.5864	-2.8072	0.368	0.117	19.31	19.30			2.78		4	f0iii	8
143	J022225.1-030813	103442	35.6047	-3.1370	0.548	0.139	19.30	19.02	2.749	0(0)	2.79		3	rg0v	9
144	J022307.9-030840	104149	35.7833	-3.1446	0.768	0.213	19.66	19.51	3.675	0(0)	3.57		6	k3iii	8
145	J022306.0-054015	40267	35.7753	-5.6710	0.333	0.100	19.77	19.76	2.821	0(0)	2.81		6	f5i	7
146	J022225.8+061004	103455	35.6075	6.1680	0.516	0.179	19.29	19.12			2.76		3	wg5v	8
147	J022231.3+062400	103036	35.6305	6.4001	0.844	0.227	19.73	19.34			2.96		12	g5v	8
148	J022255.4-044409	104004	35.7311	-4.7360	0.521	0.126	20.14	20.17	2.876	0(0)	2.90		6	f5iii	7
149	J022302.2-044437	103893	35.7595	-4.7437	0.071	0.055	20.08	19.83	2.058	0(0)	2.79		1	wf5v	5
150	J022339.3-045341	103813	35.9140	-4.8949	0.158	0.076	20.28	20.23	4.246	1(559)	4.23		7	m2iii	8
151	J022257.1-025600	103984	35.7380	-2.9336	0.505	0.176	21.22	20.80	3.205	0(0)	3.13		9	f8i	5
152	J022236.4-033838	102922	35.6517	-3.6440	0.501	0.248	19.40	19.18	3.533	0(0)	3.54		3	rk4iii	8
153	J022320.7-031823	18065	35.8367	-3.3063	2.195	0.247	19.35	19.23	3.865	0(0)	3.57		2	rk3iii	8
154	J022352.6-041821	21561	35.9694	-4.3063	0.246	0.033	20.50	20.19	2.05	1(1758)	3.18		12	wg5iii	9
155	J022451.9-041210	59314	36.2167	-4.2030	0.556	0.067	19.37	19.05	2.301	0(0)	2.84		3	wg5iii	9
156	J022428.0-053706	101687	36.1168	-5.6184	0.508	0.224	18.57	18.52			2.78	D	3	g2v	8
157	J022455.2-055504	101917	36.2300	-5.9178	0.316	0.143	19.56	19.50	2.826	0(0)	2.79		6	f2v	7
158	J022523.5-024407	102587	36.3483	-2.7354	0.139	0.094	19.57	19.32			3.39		2	k3iii	8
159	J022745.8-051912	49527	36.9412	-5.3201	0.506	0.126	20.74	20.48	2.812	0(0)	2.96		9	f5v	6
160	J022751.5-044253	23972	36.9654	-4.7139	1.160	0.131	20.57	20.33			4.48	wD	1	m2v	5
161	J022754.7-044535	106607	36.9781	-4.7600	0.072	0.062	20.46	2							

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sup>-14</sup> <sub>0.5-2</sub>	ΔF <sup>-14</sup> <sub>0.5-2</sub>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
162	J022647.7-041429	105944	36.6989	-4.2416	0.263	0.075	20.42	20.13	2.33	1(1758)	2.94		12	m1iii	8
163	J022826.5-085501	106247	37.1105	-8.9170	1.167	0.539	20.08	19.70			3.24		3	wk2iii	8
164	J022734.6-054743	105529	36.8944	-5.7953	0.275	0.108	19.79	19.71	2.870	0(0)	2.76		6	f5i	8
165	J022827.3-055610	106310	37.1141	-5.9362	0.338	0.174	20.90	20.40	2.504	0(0)	2.86		3	g5v	7
166	J022752.5-050129	39120	36.9691	-5.0248	0.331	0.099	20.18	20.09	2.221	0(0)	2.80		1	wf5v	7
167	J022906.0-051428	104659	37.2753	-5.2414	1.929	0.279	20.63	20.53	3.173	0(0)	2.86		7	f2ii	7
168	J022925.8-050952	104858	37.3578	-5.1646	0.228	0.113	20.06	20.11			3.41		2	k3iii	8
169	J022920.8+002951	104817	37.3367	0.4977	0.231	0.105	20.93	21.00	3.553	0(0)	3.59		2	rk4iii	7
170	J022931.3-044712	104736	37.3808	-4.7867	0.421	0.177	19.09	19.15			3.38		2	k3iii	8
171	J023026.7-044354	33914	37.6115	-4.7317	0.873	0.184	19.85	19.69	3.198	0(0)	3.23		2	g0i	8
172	J023036.8-040936	16244	37.6535	-4.1603	5.016	0.321	18.81	18.79	2.764	0(0)	2.79		4	f5iv	8
173	J023112.9-041935	105018	37.8040	-4.3265	0.280	0.151	20.73	20.22	2.222	1(1411)	3.18		12	wg5iii	7
174	J023137.5-072854	105038	37.9066	-7.4817	0.571	0.068	19.48	19.11	5.422	0(0)	5.15	t	2	m4v	7
175	J023157.0-041937	43322	37.9878	-4.3271	0.460	0.143	21.20	20.75			3.37	D	12	rk4iii	7
176	J023254.9-045957	58943	38.2294	-5.0004	0.599	0.148	20.60	20.59			2.84	D	12	f8iv	8
177	J023313.7-050116	39688	38.3074	-5.0215	0.383	0.130	20.52	20.43	2.906	0(0)	2.82		5	f6v	5
178	J023232.5+200657	37056	38.1358	20.1160	0.507	0.119	20.03	19.79			3.82		3	rk5iii	8
179	J023311.2+002446	160378	38.2967	0.4130	0.479	0.194	20.45	20.20	2.977	0(0)	2.97		2	f8i	7
180	J023441.1-040711	34671	38.6717	-4.1200	0.947	0.184	18.97	18.89	3.334	0(0)	2.81		12	f8i	9
181	J023421.0-044931	161369	38.5877	-4.8255	1.082	0.206	20.79	20.43	2.335	0(0)	3.14		2	g5v	5
182	J023435.8-083722	160955	38.6496	-8.6230	0.681	0.197	19.79	19.63			2.89		3	g8v	9
183	J023442.7-043019	160998	38.6782	-4.5055	0.276	0.125	21.10	20.98			2.94		3	g0iii	5
184	J024210.3+000611	40982	40.5432	0.1033	0.576	0.136	20.13	20.03	2.306	0(0)	2.76		1	a2i	5
185	J024310.0+284231	162831	40.7920	28.7088	0.843	0.380	21.10	20.54			2.91		12	g0iii	9
186	J025541.1+190926	54663	43.9220	19.1574	0.166	0.051	21.01	20.56			2.80		6	m2iii	7
187	J025659.5+191633	60022	44.2484	19.2753	0.643	0.101	19.85	19.52			2.84		6	m2iii	8
188	J025702.2+191926	49635	44.2594	19.3240	0.343	0.081	21.32	20.81			2.85		9	wk2iii	5
189	J025711.7+060200	162334	44.2990	6.0334	0.354	0.114	21.18	20.77			3.10		12	rk0v	7
190	J025751.7+054844	155433	44.4658	5.8125	0.667	0.171	20.43	20.03			3.00		4	f8i	7
191	J025905.6+001121	155500	44.7734	0.1894	4.992	0.522	17.78	17.61	3.372	0(0)	3.12	t	2	rk0iii	12
192	J030449.8-000814	156208	46.2078	-0.1372	4.806	0.744	17.54	17.47	3.287	0(0)	2.83		6	f8iv	12
193	J030707.3-001601	155839	46.7807	-0.2672	0.486	0.120	20.02	20.01	3.707	0(0)	3.48		7	rk3iii	7
194	J032007.4+031701	158669	50.0311	3.2836	0.583	0.276	20.85	20.72			2.79		1	wf5v	5
195	J033654.2+004015	3310	54.2263	0.6710	2.098	0.095	19.79	19.70	2.625	0(0)	2.89	wD	1	f2v	5
196	J033833.9+002349	173315	54.6413	0.3971	0.164	0.078	21.09	20.59			4.53		3	m3v	6
197	J034054.3+151820	173988	55.2267	15.3056	0.468	0.099	20.80	20.55			2.76		1	f8v	5
198	J041406.7+141304	168169	63.5283	14.2179	0.866	0.196	19.80	19.52			2.90		1	wk3iii	8
199	J041938.7+154425	167059	64.9115	15.7405	0.053	0.035	20.66	20.43			4.00		7	m5v	7
200	J043159.8-045730	47200	67.9993	-4.9589	0.127	0.047	19.27	19.08			2.86		4	f8v	7
201	J044736.4-064156	143003	71.9019	-6.6991	1.408	0.251	16.49	16.27	1.7	1(611)	3.96	D	1	wk3iii	12
202	J044749.8-064200	143213	71.9576	-6.7003	1.117	0.210	18.32	18.23	2.3	1(611)	2.82		1	wf5v	8
203	J044753.9-063107	48685	71.9746	-6.5185	0.303	0.049	20.48	20.45			3.42		3	k3iii	8
204	J044851.6-061646	142731	72.2152	-6.2795	0.349	0.166	20.37	20.15			3.73		1	k3iii	6
205	J051620.1+000146	135513	79.0841	0.0297	0.113	0.068	18.90	18.81			3.79		7	rk5iii	9
206	J062923.4+634935	70782	97.3476	63.8265	0.724	0.221	19.37	19.24			3.16		3	wk2iii	9
207	J071715.0+373230	22890	109.3132	37.5419	0.300	0.063	19.78	19.77			2.97		3	wg5iii	8
208	J072412.7+665024	86760	111.0530	66.8402	2.032	0.343	20.57	20.40			2.76	wD	1	f0v	5
209	J073459.7+265638	85676	113.7491	26.9441	0.252	0.169	20.39	20.29			3.08		12	g0iii	8
210	J073433.0+313855	58361	113.6386	31.6483	0.636	0.106	20.72	20.33			3.84	D	3	rk4iii	8
211	J074047.4+310856	80691	115.1977	31.1491	0.687	0.186	19.36	19.34			2.88		3	g0iii	9
212	J074405.8+284354	79076	116.0244	28.7318	2.213	0.548	20.30	19.92			3.46		2	m1iii	7
213	J074827.6+435354	84172	117.1153	43.8984	0.751	0.353	19.70	19.57	2.702	0(0)	2.89		1	f02iv	8
214	J075037.7+173510	83826	117.6571	17.5861	0.149	0.052	19.73	19.74			2.79		3	g2v	8
215	J075502.9+390609	81939	118.7624	39.1026	0.189	0.067	21.13	20.76			2.76		1	f0v	5
216	J075643.5+411403	82653	119.1816	41.2343	0.833	0.410	19.19	18.99	2.516	0(0)	2.80		1	f2v	9
217	J075820.3+351920	83992	119.5848	35.3224	0.343	0.187	20.11	19.75			2.87		3	g0iii	8
218	J080000.0+232440	79062	120.0003	23.4112	0.328	0.100	20.55	20.47			4.51	wD	1	m2v	5
219	J080451.7+234120	88456	121.2156	23.6890	0.473	0.234	20.38	20.48			2.77	D	6	f2ii	7
220	J080549.7+250017	90545	121.4573	25.0049	0.500	0.152	21.25	20.75	2.3	1(1538)	3.29		12	m1iii	7
221	J080541.9+153634	49170	121.4248	15.6096	0.617	0.175	20.73	20.20	2.075	0(4)	3.32		12	m0iii	8
222	J081021.5+281026	87607	122.5899	28.1740	0.697	0.167	20.07	19.78			3.31		2	rk0v	7
223	J081049.1+281133	86347	122.7046	28.1926	0.191	0.079	20.66	20.52			3.48		2	rk4iii	7
224	J081103.3+281621	86843	122.7639	28.2725	0.674	0.148	18.93	18.74	3.384	0(0)	3.14		3	rk0iii	8
225	J081428.0+514517	68081	123.6167	51.7548	0.154	0.109	19.24	19.03	3.689	1(1411)	3.99		1	rk3iii	8
226	J081619.0+482328	70473	124.0792	48.3912	1.021	0.069	18.89	18.71	3.576	0(0)	3.53	t	2	rk5iii	8
227	J082334.3+300009	72251	125.8933	30.0027	0.497	0.241	20.64	20.46	2.886	0(0)	2.80		7	f5i	8
228	J082520.4+300851	72616	126.3354	30.1478	0.520	0.147	20.51	20.19			3.26		12	k3iii	8
229	J082649.4+262104	71318	126.7060	26.3512	0.586	0.176	20.84	20.35			2.86		12	f8i	9
230	J082859.9+500450	71692	127.2499	50.0807	0.583	0.197	19.45	19.12	2.465	0(0)	2.81		3	g2v	8
231	J082857.5+375634	71687	127.2400	37.9430	0.345	0.149	20.44	20.13			2.85		3	g5v	9
232	J083016.4+375410	74288	127.5684	37.9031	0.213	0.052	20.25	19.96			2.80	wD	5	rf6v	5
233	J083052.8+380907	73110	127.7203	38.1522	0.689	0.105	19.03	18.96	3.155	0(0)	3.05		6	f8i	8
234	J083102.9+523533	20198	127.7626	52.5927	0.287	0.043	19.36	19.19	4.505	0(0)	4.18		3	m2v	9
235	J083141.7+524517	10254	127.9238	52.7549	24.018	0.162	14.92	14.61	3.911	1(524)	3.48	t	12	m2iii	12
236	J083630.5+062043	307009	129.1272	6.3455	0.246	0.097	19.85	19.89	3.400	0(0)	3.18		3	k0iii	8
237	J083718.6+061728	306583	129.3279	6.2912	1.691	0.131	20.59	20.04	2.303	0(0)	2.77		12	g0v	8
238	J083739.8+060123	304618	129.4159	6.0232	0.994	0.124	18.95	18.65	2.098	0(0)	2.97		3	wk3iii	8
239	J083805.1+484737	304746	129.5217	48.7938	0.611	0.235	19.93	19.87	3.285	0(0)	2.80		7	f2ii	



Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>PSF</sub> '	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
240	J083942.0+512220	54263	129.9262	51.3722	0.767	0.152	20.31	20.32	3.133	0(0)	2.89		7	f8i	7
241	J083946.2+511203	28362	129.9426	51.2008	4.638	0.224	18.98	18.76	4.402	0(0)	4.33	t	2	m2iii	8
242	J084039.2+132411	305434	130.1637	13.4031	1.144	0.401	20.56	20.69	2.999	1(1411)	3.29	D	7	wk2iii	10
243	J084102.4+131312	304976	130.2602	13.2203	1.458	0.291	18.82	18.68	2.969	0(0)	3.01		6	f8i	8
244	J084519.2+424620	309335	131.3304	42.7724	0.435	0.214	19.88	19.86	2.897	0(0)	2.96		2	f8i	7
245	J084617.8+190342	308984	131.5742	19.0619	0.989	0.788	20.62	20.74			3.42		2	rkl3iii	5
246	J084655.3+345558	34697	131.7306	34.9329	3.166	0.248	18.73	18.67			2.83		4	f6v	7
247	J084824.9+344053	309553	132.1039	34.6815	0.251	0.136	20.90	20.72	2.479	1(1411)	2.78		1	f0v	5
248	J084840.6+445734	46214	132.1695	44.9591	0.475	0.078	20.61	20.61	3.093	1(540)	3.12		3	rg5iii	7
249	J085307.3+175909	308283	133.2807	17.9860	0.631	0.073	20.45	20.25	3.095	0(0)	3.06		12	g0iii	8
250	J085313.2+175503	308368	133.3051	17.9175	0.308	0.060	20.81	20.54	4.068	0(0)	3.65		2	k2i	5
251	J085632.8+584807	300045	134.1368	58.8019	0.247	0.165	20.52	20.59			3.43		2	k3iii	7
252	J085721.8+054609	299796	134.3411	5.7692	0.228	0.113	20.37	20.26	3.125	1(1411)	2.84		3	wg5v	5
253	J085740.6+394740	299657	134.4194	39.7947	1.079	0.158	21.05	20.52	2.796	0(0)	2.79		6	f2ii	6
254	J085812.2+280116	300902	134.5510	28.0213	1.176	0.100	20.41	20.06			3.31		12	k3iii	8
255	J085749.8+140400	300758	134.4579	14.0667	0.223	0.070	21.23	21.02			3.19		12	rk0v	7
256	J085826.9+170406	300781	134.6124	17.0684	0.469	0.220	19.45	19.39	3.215	0(0)	3.17		6	g0iv	7
257	J085822.2+564533	300795	134.5926	56.7593	1.342	0.676	19.80	19.78	3.021	0(0)	3.02		2	rg0v	8
258	J085957.9+570524	298448	134.9914	57.0901	1.041	0.279	20.48	20.59	2.969	0(0)	2.98		12	f8i	7
259	J090119.6+205829	298051	135.3319	20.9749	0.762	0.215	20.44	20.63	3.365	0(64)	3.32		3	g5i	7
260	J090122.6+204446	298055	135.3445	20.7462	5.955	0.868	17.52	17.17	2.093	0(0)	2.80		3	wk3iii	12
261	J090126.9-014553	56666	135.3631	-1.7647	0.541	0.229	20.02	19.84			3.10		12	wk2iii	8
262	J090131.1-015917	298032	135.3800	-1.9883	0.605	0.182	20.49	20.41			3.97		3	k3i	5
263	J090209.2-014852	35370	135.5388	-1.8146	3.701	0.476	18.75	18.47	2.9	1(611)	3.02		6	f5i	8
264	J090252.4-021633	299159	135.7187	-2.2760	1.210	0.544	20.09	19.72			3.30		12	k3iii	8
265	J090238.6+220935	298082	135.6610	22.1598	0.153	0.153	19.68	19.49	2.843	0(0)	2.86		7	f8i	8
266	J090519.5+553308	299259	136.3314	55.5525	2.744	0.662	20.82	20.39			2.79		12	f8iv	7
267	J090408.9+620149	299031	136.0375	62.0304	0.393	0.354	20.79	20.37			3.00		3	wg8iii	8
268	J090921.7+543918	303150	137.3408	54.6552	0.133	0.055	20.35	20.30			3.39		5	g5i	7
269	J091033.4+453417	302549	137.6393	45.5715	0.338	0.115	18.69	18.67	2.787	0(0)	2.85		1	wf5v	9
270	J091141.8+004226	303800	137.9244	0.7072	1.154	0.435	19.89	19.82	2.953	1(1411)	2.84		7	f8iv	8
271	J091153.0+182828	12454	137.9715	18.4747	0.311	0.103	20.24	20.02	3.110	0(64)	3.24		2	k0iii	8
272	J091312.4+181932	303851	138.3018	18.3256	0.028	0.093	20.30	20.42	3.209	0(0)	3.20	D	7	f8i	7
273	J091334.5+410124	303911	138.3938	41.0235	0.109	0.076	21.41	21.10	3.089	1(1411)	2.97		12	f8i	7
274	J091502.4+043102	303607	138.7603	4.5174	0.672	0.190	20.33	20.15	3.248	0(0)	3.22		2	g0iii	7
275	J091432.9+435814	303310	138.6374	43.9708	1.229	0.214	20.55	20.15			3.42		2	k3iii	7
276	J091620.7+293120	301634	139.0866	29.5224	0.686	0.140	20.23	20.15	3.097	0(0)	2.90		6	f5iii	7
277	J091548.9+302543	301454	138.9538	30.4288	0.552	0.155	18.82	18.65	3.166	0(0)	3.40		2	k3iii	9
278	J091740.4+161412	301293	139.4184	16.2369	0.412	0.125	20.27	20.15			3.42		2	wk2iii	7
279	J091807.4+160745	32485	139.5312	16.1293	1.717	0.182	19.63	19.56			2.77		3	wg5v	8
280	J091852.7+211517	302115	139.7198	21.2548	0.143	0.054	19.62	19.51	1.034	0(0)	2.77		3	g2v	8
281	J091959.7+301551	51614	139.9992	30.2641	0.336	0.147	20.75	20.78			3.02		3	g5iv	7
282	J091959.5+370550	302398	139.9982	37.0974	0.803	0.088	20.14	20.11	3.379	0(0)	3.06		5	g0i	7
283	J092104.3+302030	21005	140.2689	30.3422	0.766	0.107	18.61	18.43	3.339	1(1411)	3.32	D	2	k3iii	11
284	J092136.0+300307	52440	140.4005	30.0518	0.539	0.117	19.03	18.94			2.96		5	g0iii	9
285	J092131.1+450913	318399	140.3798	45.1537	0.485	0.125	20.35	20.40	2.719	0(0)	2.93		1	f02iv	7
286	J092143.5+063644	318673	140.4313	6.1213	1.005	0.192	19.61	19.55	3.718	0(0)	3.63		5	rk3iii	7
287	J092325.3+453223	319259	140.8555	45.5398	1.488	0.702	17.86	17.74	3.452	0(0)	3.04		3	rk0v	12
288	J092341.0+225017	319157	140.9211	22.8382	0.252	0.137	20.76	20.65			2.93		2	g0iv	5
289	J092803.0+504732	317052	142.0128	50.7924	0.103	0.072	20.33	20.33			2.91		6	f2v	7
290	J093225.8+283428	317704	143.1079	28.5746	2.631	0.335	19.66	19.62			2.78		3	g0v	8
291	J093259.0+472139	317596	143.2460	47.3610	0.420	0.152	19.91	20.11	3.252	0(0)	3.18		6	g0i	9
292	J093404.6+472434	317916	143.5195	47.4095	1.737	0.464	19.73	19.80	3.086	0(0)	2.92		6	f2ii	7
293	J093451.6+353744	317759	143.7153	35.6289	0.956	0.311	20.04	19.96	3.363	0(0)	3.00		3	g0iii	8
294	J093453.1+355758	317762	143.7215	35.9663	0.469	0.208	20.12	20.14	3.392	0(0)	3.62		1	g8i	5
295	J093548.3+611906	317255	143.9516	61.3185	0.620	0.086	20.02	19.83	2.879	0(0)	3.01		6	f8i	7
296	J093709.6+495147	317210	144.2902	49.8633	2.997	1.364	19.80	20.10	3.641	1(1411)	4.02		4	k4iii	7
297	J093746.8+542554	317459	144.4451	54.4318	0.213	0.115	20.43	20.19	2.639	0(0)	3.11		12	k3iii	8
298	J093847.1+365950	317350	144.6963	36.9975	0.351	0.279	20.05	20.05	3.286	1(1411)	3.14		2	f8i	7
299	J094007.1+150545	321550	145.0298	15.0959	0.540	0.140	19.48	19.35			2.76		5	rf6v	9
300	J094109.9+344902	321135	145.2914	34.8174	0.724	0.127	21.41	21.12	2.643	0(0)	3.00	wD	1	f2ii	5
301	J094034.4+385741	321726	145.1434	38.9616	0.761	0.202	19.59	19.50	2.843	0(0)	2.91		3	g0iii	8
302	J094312.1+465210	49005	145.8010	46.8691	0.426	0.068	20.84	20.47			2.97		3	wg5iii	7
303	J094352.0+164614	322316	145.9671	16.7707	0.203	0.087	20.86	20.72	3.164	0(0)	2.99		2	f8i	5
304	J094439.3+034636	322459	146.1638	3.7767	0.487	0.156	20.43	20.29	2.915	0(0)	2.82		7	f5iii	8
305	J094525.3+173215	322422	146.3556	17.5375	1.147	0.426	19.59	19.50	2.422	0(0)	2.76		1	f02iv	7
306	J094741.2+471538	319895	146.9217	47.2606	0.709	0.274	19.24	19.24	3.087	0(0)	3.00		6	f8i	8
307	J094834.9+581925	320044	147.1456	58.3236	0.403	0.124	20.34	20.42	3.853	0(0)	3.67		7	rk4iii	7
308	J095543.7+181634	312455	148.9324	18.2764	0.646	0.225	20.49	20.08			3.16		3	rk0v	8
309	J095318.1+693433	53742	148.3257	69.5760	0.748	0.197	20.27	19.97			2.83		1	f2v	7
310	J095752.6+693227	312941	149.4696	69.5411	0.390	0.094	20.11	19.83			3.12		2	wg8iii	7
311	J095332.8+694023	13125	148.3871	69.6733	0.280	0.052	20.49	20.10			2.83		3	wg5iii	7
312	J095629.4-001631	311796	149.1229	-0.2753	0.460	0.086	20.41	20.34			2.77		6	f02iv	7
313	J095702.7-001534	311992	149.2613	-0.2596	0.542	0.099	20.72	20.67			3.41		2	k2v	7
314	J095727.6+411242	313037	149.3653	41.2119	0.730	0.245	19.97	19.71	2.404	0(0)	2.83		1	f2v	5
315	J095728.5+023142	313038	149.3689	2.5286	0.524	0.241	19.72	19.66			2.79		3	g0v	8
316	J095835.9+015156	49117	149.6500	1.8661	0.181										

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>PSF</sub> '	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
318	J095937.0+131212	312824	149.9045	13.2035	1.876	0.578	17.37	17.31	4.064	1(1411)	3.78		7	rk5iii	10
319	J100012.4+014057	11623	150.0519	1.6826	0.608	0.071	20.26	20.21	2.275	0(0)	2.78		3	rg0v	7
320	J095938.2+020449	8215	149.9099	2.0804	0.460	0.057	19.81	19.37	2.802	0(0)	3.04		3	wg5iii	8
321	J100024.3+015053	7486	150.1019	1.8482	0.778	0.068	19.69	19.94	1.660	0(0)	3.41		2	wk2iii	8
322	J100105.2+021348	7533	150.2722	2.2307	0.620	0.052	20.43	20.36	2.610	0(0)	2.87	wD	1	f0v	5
323	J100043.5+685355	310938	150.1815	68.8987	0.322	0.141	20.72	20.37			2.93		3	wg5iii	8
324	J100050.1+022855	12528	150.2094	2.4818	0.239	0.040	19.95	19.81	3.365	0(0)	3.26		2	rk0v	7
325	J100245.4+554646	30971	150.6896	55.7797	1.377	0.155	21.04	20.45	2.424	0(0)	2.77		12	g0v	8
326	J100026.3+553849	51833	150.1106	55.6469	0.174	0.097	21.11	20.54			2.79		3	g2v	8
327	J100256.5+021158	50033	150.7357	2.1994	0.305	0.067	20.19	20.03	3.502	0(0)	3.28		3	rk1iii	9
328	J100321.8+330805	311364	150.8410	33.1349	0.696	0.345	19.96	19.92	2.977	0(0)	2.91		2	rg0v	9
329	J100741.1+125537	314861	151.9216	12.9272	0.555	0.128	20.74	20.38	2.525	0(0)	2.79		1	f0v	5
330	J100751.6+124846	314892	151.9652	12.8130	0.453	0.108	19.91	19.96	3.101	0(0)	2.89		7	f8i	7
331	J100807.1+375640	315142	152.0296	37.9446	0.334	0.075	20.39	20.34			3.08		4	f2ii	7
332	J101208.1+533229	315628	153.0341	53.5416	0.734	0.228	20.01	19.91			2.81		3	g0v	8
333	J101107.8+553407	316276	152.7827	55.5688	0.637	0.125	19.78	19.61	3.306	0(0)	3.37		2	rk3iii	8
334	J101144.2+554102	315760	152.9346	55.6840	0.492	0.087	20.10	19.75	2.806	0(0)	2.97		2	f8i	7
335	J101411.3+492804	313841	153.5474	49.4679	0.150	0.080	20.29	20.31	3.929	0(0)	3.43		3	k3iii	7
336	J101356.2+061647	313855	153.4843	6.2798	1.409	0.285	19.82	19.61	2.179	0(0)	2.79		1	wf5v	5
337	J101500.0-000025	314011	153.7504	-0.0070	1.373	1.148	20.83	20.56			4.47	D	3	m2i	5
338	J101515.2+085456	313991	153.8137	8.9158	1.455	0.649	20.34	20.24	3.235	0(0)	3.20		4	f8i	6
339	J101621.3+385300	313417	154.0890	38.8836	1.297	0.293	20.24	20.17	2.657	0(0)	2.81		1	f0v	5
340	J101705.5+385817	313356	154.2732	38.9715	0.377	0.122	19.95	19.51	2.691	0(0)	2.79		3	rg0v	9
341	J101732.2+385848	313511	154.3843	38.9802	0.349	0.120	20.13	20.00	3.161	0(0)	3.18		7	rk0v	7
342	J101659.4+592517	313371	154.2477	59.4215	0.451	0.297	19.70	19.60	3.341	0(0)	3.03		5	g2iv	8
343	J101703.4+593933	313352	154.2644	59.6592	0.611	0.261	19.72	19.60	3.444	0(0)	3.10		3	rk0v	8
344	J101728.6+214936	313635	154.3693	21.8267	0.459	0.177	20.18	20.10			3.23		2	rg5v	7
345	J101821.2+000153	34173	154.5885	0.0316	0.525	0.084	18.93	18.71	3.477	0(0)	3.55		3	rk3iii	8
346	J101954.6+082514	314233	154.9776	8.4208	1.940	0.474	17.85	17.73	2.967	0(0)	2.99		2	rk0v	9
347	J102107.5+220922	314380	155.2813	22.1562	1.736	0.535	21.03	20.58	4.262	0(0)	3.99		2	k3i	5
348	J102123.0+220122	40027	155.3461	22.0229	0.336	0.087	21.00	20.66	2.989	0(0)	2.92		1	f02iv	5
349	J102126.1+215906	40477	155.3589	21.9851	0.262	0.072	19.90	19.90			2.82		5	f8iv	9
350	J102220.4+213019	281486	155.5850	21.5055	0.215	0.074	21.11	21.02			3.51		2	k3iii	6
351	J102300.0+212540	281614	155.7503	21.4279	0.231	0.104	19.73	19.58	3.802	0(0)	3.55		3	rk3iii	8
352	J102238.4+195845	33297	155.6606	19.9793	2.037	0.120	20.97	20.57			2.76		3	wg5v	5
353	J102338.7+200029	47217	155.9122	20.0083	0.369	0.071	19.94	20.04			3.02		1	f5iii	8
354	J102323.7+002754	281498	155.8489	0.4652	0.578	0.220	18.58	18.58			2.96	D	9	f8v	8
355	J102932.8+291945	280069	157.3870	29.3294	0.721	0.238	20.77	20.79	3.022	0(0)	3.11		9	f8i	5
356	J103017.3-025656	279561	157.5721	-2.9490	0.267	0.086	19.85	19.92	2.612	0(0)	2.78		1	f02iv	5
357	J103100.8-030856	279619	157.7537	-3.1491	0.712	0.160	20.42	20.25	2.972	0(0)	2.96		2	g0iv	7
358	J103043.8+053509	279754	157.6828	5.5861	1.179	0.117	20.76	20.54	2.639	0(0)	2.80		3	g0v	7
359	J103107.1+052410	280651	157.7797	5.4029	0.434	0.075	19.93	19.82			2.84		3	g2v	8
360	J103052.5+375759	279599	157.7189	37.9665	0.681	0.210	20.33	20.08			2.88		1	f02iv	7
361	J102954.2+505708	61634	157.4765	50.9527	0.154	0.085	20.28	20.33	2.829	1(1411)	2.85		7	f5iii	7
362	J103112.4+505140	16072	157.8020	50.8611	0.679	0.074	20.73	20.49			3.09		12	g0iii	8
363	J103221.2+510226	50478	158.0890	51.0405	0.286	0.083	19.70	19.32	2.751	0(0)	2.77		2	f8v	8
364	J103309.4+645434	37959	158.2895	64.9098	0.343	0.082	20.95	20.41	2.706	0(0)	2.88		7	f5iii	5
365	J103240.3+501210	280250	158.1680	50.2029	0.448	0.170	18.72	18.51	3.872	0(64)	3.62		3	rk4iii	9
366	J103404.0+004010	280352	158.5169	0.6695	0.577	0.200	20.09	19.86			2.92		3	k0v	8
367	J103148.9+584418	280862	157.9541	58.7385	0.492	0.376	19.60	19.77			3.33	D	12	rk4iii	8
368	J103200.9+584421	280864	158.0040	58.7394	1.956	0.850	20.26	20.09			2.89		5	f8i	8
369	J103359.8+583456	280373	158.4993	58.5822	0.185	0.204	19.50	19.53	3.098	0(0)	3.20		1	f8i	8
370	J103428.8+393343	60916	158.6219	39.5616	1.376	0.079	19.28	19.11	4.334	1(1411)	4.18	D	7	k4i	7
371	J103942.8+394824	285503	159.9285	39.8068	0.808	0.190	20.58	20.73			3.06		3	g8v	7
372	J103727.5+642928	284289	159.3650	64.4911	0.482	0.357	19.85	19.71			2.91	D	2	rg0v	7
373	J103901.4+643335	285199	159.7560	64.5600	0.332	0.208	20.55	20.34			4.01		7	rk5iii	8
374	J104053.2+092114	284999	160.2219	9.3541	0.476	0.142	20.37	20.36	3.085	0(0)	2.87		7	f8i	7
375	J104033.0+395919	284851	160.1379	39.9886	0.785	0.165	21.38	20.92			2.76		12	f5iii	7
376	J104037.4+061005	285086	160.1559	6.1683	0.403	0.075	21.11	20.95	2.873	0(0)	2.87		1	f0v	7
377	J104051.9+061035	285003	160.2163	6.1765	0.383	0.060	19.68	19.52	2.443	0(0)	2.80		1	f2v	8
378	J104349.6+583203	282746	160.9570	58.5343	0.209	0.136	20.78	20.56	2.987	0(0)	2.85		7	f2ii	7
379	J104500.2+214148	19548	161.2513	21.6967	0.597	0.059	20.40	20.28	2.957	0(0)	3.16		2	g0i	7
380	J104527.5+063829	275152	161.3648	6.6415	0.666	0.126	20.86	20.67	2.509	0(0)	2.81		1	f0v	5
381	J104544.6+064153	275474	161.4360	6.6981	0.639	0.223	19.85	19.50	2.971	0(0)	3.00		2	g0iii	7
382	J104612.9+584719	11135	161.5541	58.7887	1.535	0.139	19.51	19.61	3.054	0(0)	3.01		7	f8i	8
383	J104559.5+042029	275407	161.4983	4.3415	0.263	0.084	19.89	19.90			2.99		3	k0v	7
384	J104624.1+574156	274750	161.6007	57.6990	1.164	0.390	20.45	20.40	2.983	0(0)	3.04		7	f8i	8
385	J104909.8+373758	275539	162.2912	37.6329	6.951	0.377	17.84	17.70	3.005	0(0)	3.02		3	rk4iii	12
386	J104924.4+373212	275843	162.3519	37.5368	0.256	0.104	20.18	19.96	2.350	0(0)	2.79		1	f0v	8
387	J104809.0+570244	275944	162.0377	57.0458	0.326	0.225	18.28	18.31	3.25	1(1411)	3.24		6	rk1iii	9
388	J105010.0+565651	273600	162.5420	56.9476	0.468	0.226	20.12	19.78			2.76		3	f8iv	8
389	J105015.7+570256	273657	162.5654	57.0490	0.607	0.347	20.16	20.09	3.272	0(0)	3.04		7	f8i	7
390	J105002.8+495741	273749	162.5120	49.9614	1.108	0.158	21.01	20.71	2.585	0(0)	2.82		4	f0iii	5
391	J104829.9+510950	43873	162.1250	51.1638	0.238	0.076	20.82	20.57	3.175	0(0)	3.26		7	rk0iii	8
392	J105042.6+510957	273796	162.6777	51.1659	0.496	0.371	20.39	20.38	2.940	0(0)	2.90		6	f2ii	7
393	J105029.2+325954	273931	162.6217	32.9985	0.486	0.138	20.00	19.74			3.75		3	rk4iii	7
394	J105053.0+573030	273333	162.7210	57.5084	0.080										

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>PSF</sub> '	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
396	J105049.2+354517	273830	162.7054	35.7548	0.883	0.640	18.65	18.60	3.326	1(1411)	3.07		7	f8i	8
397	J105114.5+352953	273247	162.8105	35.4982	0.655	0.379	20.44	20.05	3.192	0(0)	2.93		2	f8i	7
398	J105123.0+354535	273285	162.8462	35.7598	1.726	0.467	18.46	18.58	4.921	0(0)	4.90		6	m4v	8
399	J105306.0+573424	1275	163.2761	57.5734	0.350	0.017	20.43	20.19	2.943	0(0)	2.79		6	f5i	7
400	J105125.3+573050	1185	162.8566	57.5143	0.616	0.025	19.29	19.28	3.409	1(1074)	3.02		3	g8v	8
401	J105518.6+572136	34654	163.8279	57.3603	0.631	0.119	20.71	20.38			3.01		7	f8i	7
402	J105422.5+572030	22748	163.5947	57.3419	0.672	0.092	19.82	19.89	2.968	0(0)	3.03		6	f8i	7
403	J105523.8+574719	42256	163.8499	57.7887	0.156	0.056	20.56	20.71	3.163	0(0)	2.91		7	f8i	8
404	J105709.9+065316	27710	164.2922	6.8881	0.321	0.089	20.25	19.75	2.395	0(0)	2.85		3	g0iii	7
405	J105840.4+242910	278525	164.6687	24.4861	0.552	0.127	21.15	20.90	2.714	0(0)	2.79		12	f5iii	7
406	J105841.1+242720	278520	164.6715	24.4558	0.698	0.127	19.72	19.66	2.839	0(0)	3.00		1	f2iii	7
407	J110323.6+405004	279273	165.8483	40.8346	1.123	0.197	19.11	19.02	2.980	0(0)	2.86		7	f8i	9
408	J110500.3+250510	276612	166.2515	25.0864	0.910	0.428	19.29	19.33			2.77	D	3	f8iv	8
409	J110518.4+250027	276646	166.3269	25.0075	0.377	0.223	19.95	19.76			3.21		3	g5i	8
410	J110525.8+251506	38248	166.3577	25.2515	0.661	0.217	20.87	20.54			2.78	D	12	f6v	7
411	J110458.2+250421	30920	166.2426	25.0727	1.802	0.311	18.15	18.03	3.522	0(0)	3.33		3	k3iii	8
412	J110636.1+250848	36386	166.6508	25.1465	1.163	0.369	21.13	20.79	2.980	0(0)	3.03		4	f2ii	5
413	J110618.6-181447	277627	166.5775	-18.2465	0.253	0.130	21.03	20.63			2.76	wD	2	wg0v	5
414	J110706.2+522005	277778	166.7760	52.3349	0.461	0.186	20.67	20.45			2.87		3	wg5v	5
415	J110919.1-033106	277059	167.3296	-3.5185	0.669	0.239	20.04	20.16			3.17		2	g2i	8
416	J111038.6+483116	34623	167.6610	48.5212	2.691	0.129	16.53	16.53	2.959	0(0)	2.87	t	5	g0iii	12
417	J111008.6+483755	277400	167.5360	48.6322	0.482	0.122	20.56	20.43	3.531	0(0)	3.26		12	rk0iii	7
418	J111038.8+481928	293760	167.6620	48.3247	0.189	0.073	20.28	20.11	2.419	0(0)	2.78		1	a2i	5
419	J111054.8+023157	293783	167.7287	2.5327	0.183	0.097	20.11	19.83			3.15		3	rg5iii	8
420	J111146.6+062107	46872	167.9446	6.3522	0.170	0.037	21.34	20.93	2.774	0(0)	2.99		9	f2ii	5
421	J111204.5+132717	293372	168.0188	13.4548	1.504	0.168	19.53	19.37	2.908	0(0)	3.07		7	g0i	8
422	J111233.4+060618	12309	168.1395	6.1058	0.491	0.041	19.87	19.71	3.308	0(0)	3.18		5	rk0v	7
423	J111349.3+092520	294674	168.4558	9.4223	1.192	0.233	20.22	20.08	2.392	0(0)	2.78		1	f0iii	8
424	J111545.2+425225	292230	168.9387	42.8737	0.161	0.070	20.62	20.58			4.32	wD	5	m2v	5
425	J111640.3+175605	292472	169.1681	17.9348	0.596	0.175	19.58	19.54	3.085	0(0)	2.94		3	g5v	8
426	J111858.4+074642	24047	169.7442	7.7780	0.160	0.032	21.08	20.84	2.909	0(0)	2.90		1	f0v	5
427	J111748.8+074226	16196	169.4535	7.7075	0.546	0.040	20.94	20.54	2.200	0(0)	2.85		2	rg0v	5
428	J111849.9+401644	293054	169.7082	40.2791	0.486	0.157	20.26	20.25	3.380	0(0)	3.28		3	rk0iii	8
429	J111938.0+212627	5567	169.9087	21.4413	0.675	0.065	19.13	19.04	3.035	0(64)	2.89		2	g0iv	9
430	J111900.0+152707	292880	169.7503	15.4522	1.115	0.230	17.96	17.95	3.138	0(0)	2.96		5	f8i	9
431	J112020.9+432545	292690	170.0872	43.4293	0.881	0.176	19.55	19.62	3.555	0(0)	3.51		3	k3iii	8
432	J112151.5+242044	296980	170.4647	24.3456	0.635	0.188	19.59	19.49	2.413	0(0)	2.81		1	f0v	7
433	J112209.9+241736	296510	170.5415	24.2936	0.479	0.184	19.98	19.82	3.330	0(0)	3.02		5	f8i	8
434	J112228.3+241357	296342	170.6180	24.2326	0.239	0.123	19.89	19.77	2.793	0(0)	2.82		1	f02iv	5
435	J112235.9+241549	296427	170.6500	24.2637	0.426	0.169	20.32	20.38	2.792	0(0)	2.80		4	f0iii	6
436	J112310.2+052649	296531	170.7928	5.4471	1.679	0.142	19.20	19.21			2.79		6	f5iii	7
437	J112428.0+061239	297859	171.1168	6.2110	0.436	0.243	20.77	20.60			2.77		3	wg5v	5
438	J112432.1+385103	297863	171.1338	38.8511	0.201	0.062	20.00	19.72	3.495	0(0)	3.44		2	rk3iii	7
439	J112719.3+030345	297369	171.8306	3.0627	1.204	0.271	20.45	20.48			2.91		5	f8i	8
440	J112720.4+025946	297388	171.8352	2.9962	0.195	0.097	20.02	19.86			3.26		12	k3iii	8
441	J112730.3+030531	295302	171.8763	3.0922	0.430	0.174	20.25	20.18	2.9	1(1538)	2.98		6	f8i	7
442	J113536.4+490813	295636	173.9018	49.1372	0.507	0.151	19.98	19.99	2.573	0(0)	2.86		1	f02iv	7
443	J113554.6-034424	295942	173.9778	-3.7400	0.433	0.107	20.62	20.36			3.46		2	k3iii	6
444	J113721.0+215407	53565	174.3385	21.9019	0.277	0.080	20.60	20.46			3.33	D	2	wg8iii	7
445	J113904.1+032616	287408	174.7674	3.4379	0.180	0.125	20.48	20.37	3.312	0(0)	3.16		2	f8i	6
446	J114153.3+021924	287993	175.4721	2.3234	2.186	0.198	18.48	18.25	3.48	0(4)	3.28		3	rk1iii	9
447	J114323.7+193447	288133	175.8490	19.5799	1.188	0.211	17.62	17.48	3.348	0(0)	3.23		3	k3iii	12
448	J114429.5+365901	286076	176.1231	36.9836	1.407	0.721	19.72	19.60	2.871	0(0)	2.90		6	f5iii	8
449	J114447.7+370434	285952	176.1989	37.0761	1.766	0.748	19.43	19.42	4.010	0(0)	4.09		7	rk5iii	8
450	J114529.7+024647	286236	176.3739	2.7798	0.569	0.111	19.01	19.07			2.85		1	f02iv	8
451	J114556.9+024323	286174	176.4874	2.7232	0.705	0.147	19.50	19.41	3.341	0(0)	3.13		3	rk0v	8
452	J114651.2+473013	285590	176.7135	47.5038	0.695	0.142	20.57	20.37	2.965	0(0)	2.89		6	f5i	7
453	J114816.0+525900	285819	177.0669	52.9835	6.738	1.212	20.01	20.06	3.173	0(0)	2.86		5	f8i	8
454	J115009.9+015658	286991	177.5416	1.9497	0.475	0.222	20.35	20.03			2.76		6	f2v	6
455	J115411.1+432953	290473	178.5464	43.4981	0.558	0.210	19.93	19.98	3.020	0(0)	2.86		6	f2ii	7
456	J115443.0+522115	290415	178.6796	52.3543	0.386	0.123	21.09	20.67			2.83		3	rg0v	8
457	J115600.1+232157	7388	179.0007	23.3661	0.770	0.052	19.96	19.71	0.279	0(0)	2.81		3	wg5iii	8
458	J115655.4+530146	291558	179.2312	53.0296	0.533	0.167	18.82	18.89	3.135	1(1411)	2.95		5	g0iii	8
459	J115839.8+262510	291161	179.6659	26.4196	0.942	0.164	19.81	19.91	3.428	0(0)	3.43		2	k3iii	8
460	J115933.3+553632	289054	179.8888	55.6090	0.579	0.152	19.21	19.10	3.981	0(0)	4.02		1	rk3iii	8
461	J120042.2+315245	288732	180.1761	31.8794	0.194	0.103	18.77	18.60	2.834	0(0)	2.85		9	f5i	7
462	J120029.3+064638	289288	180.1224	6.7774	0.639	0.153	20.94	20.63	2.686	0(0)	2.88		12	f8v	7
463	J120125.5+064621	288841	180.3563	6.7726	1.235	0.272	21.03	20.92	3.323	0(0)	3.19		12	g0i	7
464	J120254.2+442111	4570	180.7264	44.3531	0.524	0.088	20.30	20.16			2.81		5	f8iv	8
465	J120319.7+201345	289438	180.8321	20.2294	1.135	0.546	20.89	20.44			2.83	D	12	f8v	8
466	J120341.3+015919	289697	180.9224	1.9887	0.386	0.203	19.81	19.64			2.80		5	f8iv	7
467	J120337.2+582135	289689	180.9053	58.3599	1.171	0.268	19.81	19.85	0	0(646)	2.99		1	f2ii	8
468	J120415.8+582501	355487	181.0662	58.4172	0.278	0.150	18.43	18.31			3.77	D	1	wk1iii	8
469	J120445.3+310609	355608	181.1890	31.1025	1.330	0.124	19.22	18.86	2.323	0(0)	2.81		3	g2v	9
470	J120455.3+311641	355666	181.2308	31.2781	0.206	0.075	20.48	20.11			3.47	D	2	rk4iii	7
471	J120502.4+443545	355530	181.2603	44.5959	0.150	0.074	20.97	20.61			3.30		12	wk2iii	7
472	J120609.0+441838	355161	181.5375	44.3107	0.391										

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub> <sup>1</sup>	z <sub>PSF</sub> <sup>2</sup>	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
474	J120734.3+281404	356437	181.8930	28.2345	0.367	0.203	20.64	20.56	3.187	0(0)	2.86		6	f2ii	5
475	J120641.1+651138	356243	181.6713	65.1941	0.178	0.132	19.54	19.46			3.34		3	rk1iii	9
476	J120949.7+453400	355977	182.4572	45.5667	2.725	0.682	18.23	18.22	3.609	0(0)	3.49		7	k3iii	11
477	J121001.7+392150	4637	182.5087	39.3637	1.208	0.073	19.44	19.38	2.97	1(1411)	3.10		6	f8i	8
478	J121138.0+391716	353423	182.9086	39.2879	0.624	0.184	19.24	19.72	3.304	0(0)	3.19		5	rk0iii	9
479	J121411.7+671651	354903	183.5490	67.2811	0.776	0.278	19.33	19.25	2.933	0(0)	2.85		3	rg0v	9
480	J121424.1+671712	354758	183.6005	67.2867	0.192	0.154	20.26	20.07			2.97	D	2	g2v	7
481	J121305.5+025131	354728	183.2733	2.8589	1.513	0.222	20.54	20.17	2.896	0(0)	3.02		2	f8i	6
482	J121252.4+363908	354679	183.2186	36.6524	0.326	0.165	21.08	20.77			2.83	D	7	f5v	7
483	J121601.7+523005	354207	184.0074	52.5015	0.553	0.170	20.22	20.02			3.38		12	m2iii	9
484	J121614.1+522225	354466	184.0591	52.3738	0.642	0.259	20.67	20.29			3.25		12	k3iii	8
485	J121802.5+375747	44253	184.5110	37.9633	0.426	0.085	20.09	20.17			2.84		1	f02iv	7
486	J121631.5+375739	59247	184.1316	37.9618	0.645	0.191	19.59	19.56	2.965	0(68)	3.10		5	g2i	7
487	J121709.0+034621	358566	184.2878	3.7727	0.694	0.148	19.48	19.50			2.87		2	g0iv	8
488	J121807.2+473800	358637	184.5302	47.6334	0.506	0.205	20.51	20.19	3.519	1(1661)	3.23		3	rk0iii	7
489	J121855.4+474319	358061	184.7310	47.7220	2.434	0.586	19.54	19.31	2.505	0(0)	2.77		6	f0ii	8
490	J121702.2+470359	358586	184.2594	47.0664	0.177	0.074	21.02	20.99	3.731	0(0)	3.41		5	g5i	5
491	J121900.7+295703	13386	184.7537	29.9508	0.236	0.041	21.22	20.98			3.45		2	k3iii	6
492	J121901.5+295134	13476	184.7571	29.8592	0.214	0.041	20.16	19.79			4.27	D	3	m2iii	8
493	J121929.2+064101	358264	184.8720	6.6838	0.142	0.099	20.97	20.61	3.208	0(0)	3.17		2	g0i	5
494	J122001.3+063522	359202	185.0057	6.5896	0.285	0.138	20.47	20.15	3.248	0(0)	3.00		2	f8i	6
495	J122004.8+291304	359214	185.0203	29.2178	0.279	0.104	20.73	20.55			3.38	D	2	wk2iii	7
496	J122004.3+293146	48482	185.0187	6.5297	0.289	0.180	21.00	20.60	3.237	0(0)	3.31		12	k2iii	8
497	J122046.7+064243	359496	185.1947	6.7121	0.464	0.271	19.53	19.42	1.594	0(0)	2.81		3	g8v	7
498	J122135.6+280614	7065	185.3986	28.1041	10.049	0.238	19.70	19.80	3.326	0(0)	3.46	t	1	g5i	9
499	J122236.2+144106	357048	185.6511	14.6850	0.285	0.108	18.89	18.80			2.82	D	3	g2v	8
500	J122218.6+042036	359049	185.5778	4.3434	0.478	0.146	20.33	20.06	2.848	0(0)	2.95		9	f5i	5
501	J122244.5+042459	356894	185.6857	4.4164	0.459	0.189	20.53	20.48	3.256	0(0)	3.09		6	f8i	5
502	J122131.0+295425	358890	185.3794	29.9070	1.453	0.393	20.50	20.39	2.591	0(0)	2.83		1	f0v	5
503	J122307.4+103448	357238	185.7812	10.5802	2.773	0.245	18.57	18.47	2.765	0(0)	2.81		6	f5iii	8
504	J122242.8+112201	356883	185.6785	11.3670	0.495	0.152	20.61	20.26	2.689	0(0)	2.99		3	k0v	7
505	J122329.9+112121	357106	185.8749	11.3559	0.403	0.100	20.29	20.13	3.392	0(0)	3.32		12	rk4iii	9
506	J122336.3+024418	39494	185.9018	2.7385	0.220	0.071	20.04	20.15	3.433	0(0)	3.25	D	12	k3iii	7
507	J122251.8+024045	356947	185.7160	2.6792	0.260	0.127	19.84	19.91	3.105	0(0)	3.35		2	m2iii	10
508	J122300.6+023308	31271	185.7529	2.5524	1.604	0.261	20.12	20.20	1.1	1(1538)	2.76		1	wf5v	5
509	J122537.7+051301	357847	186.4073	5.2170	0.800	0.224	20.86	20.69	2.713	0(0)	2.86		1	f02iv	5
510	J122602.0+132114	357402	186.5085	13.3541	1.954	0.593	18.10	17.90	3.530	0(0)	3.38		3	rk5iii	9
511	J122453.8+333247	63702	186.2246	33.5475	0.115	0.038	20.25	20.03			4.43		1	k4i	5
512	J122705.1+310925	349300	186.7714	31.1570	0.460	0.130	20.55	20.56	3.131	0(0)	2.86		7	f2ii	8
513	J122742.9+311711	349369	186.9289	31.2865	0.530	0.282	20.39	20.30			2.92		1	f02iv	5
514	J122736.3+124350	349508	186.9013	12.7308	0.256	0.101	21.20	20.70			4.51	wD	2	m2i	5
515	J122645.2+332800	23158	186.6889	33.4669	0.474	0.052	20.10	20.15	3.335	0(0)	2.98		7	f8i	8
516	J122748.6+333839	54094	186.9527	33.6443	0.813	0.088	20.21	20.12			2.96		4	f2ii	5
517	J122736.7+435935	52121	186.9033	43.9928	0.634	0.138	19.75	19.77	3.145	0(0)	2.94		6	f8i	9
518	J122740.8+440602	349501	186.9203	44.1008	0.104	0.058	19.98	20.00	3.818	0(0)	3.61		6	rk3iii	7
519	J123004.6+075007	349650	187.5194	7.8355	0.141	0.048	20.56	20.28			3.37	D	2	k0iii	6
520	J123022.1+160202	349841	187.5924	16.0339	0.406	0.158	20.67	20.32			3.35	D	12	rk4iii	7
521	J123031.7+121412	63125	187.6326	12.2368	0.447	0.122	20.54	20.32	2.716	0(0)	2.82		1	f0ii	5
522	J123034.0+132838	347745	187.6418	13.4772	0.340	0.202	20.21	20.25			2.94	D	3	g0iii	7
523	J123136.8+131544	348577	187.9035	13.2625	0.992	0.443	19.83	19.84			3.39		2	wk2iii	7
524	J123005.9+142957	349707	187.5248	14.4992	1.561	0.484	18.66	18.47	3.275	0(0)	2.96		6	f8i	8
525	J123011.9+102237	349558	187.5498	10.3771	1.004	0.525	19.20	19.14	3.569	0(0)	3.41		2	rk3iii	8
526	J123140.0+101400	348653	187.9168	10.2334	0.353	0.228	19.18	19.21	3.254	0(0)	2.93		3	g0iii	9
527	J123301.5+641356	50634	188.2572	64.2326	0.288	0.092	20.89	20.58			2.77		3	f8v	5
528	J123119.7+201649	348567	187.8322	20.2803	0.963	0.281	20.28	20.12	2.526	0(0)	2.79	wD	1	a7v	5
529	J123157.3+000933	347994	187.9892	0.1592	0.954	0.112	19.28	19.21	3.226	0(0)	3.06		2	g0iii	8
530	J123334.8+151502	352540	188.3950	15.2508	0.536	0.150	19.52	19.10	2.469	0(0)	2.76		3	rg0v	8
531	J123412.7+373212	351985	188.5531	37.5369	0.819	0.250	19.73	19.73	3.105	0(0)	3.08		4	f8i	7
532	J123459.1+374343	352052	188.7466	37.7288	0.178	0.095	19.85	19.73			2.82		2	rg0v	8
533	J123517.6+374447	353018	188.8235	37.7465	0.847	0.182	20.69	20.56			3.28		12	k3iii	8
534	J123439.2+391821	351916	188.6636	39.3061	0.165	0.066	20.43	20.60			2.89		3	g5v	7
535	J123545.6+211649	15925	188.9403	21.2804	1.412	0.126	19.63	19.30	0.3	1(1538)	2.94		3	wg5iii	8
536	J123546.4+124056	352774	188.9437	12.6823	0.302	0.109	20.93	20.59			3.27		3	g5i	5
537	J123448.5+263502	352206	188.7023	26.5841	0.124	0.069	20.77	20.58			2.78		1	wf5v	6
538	J123503.1-000331	352097	188.7630	-0.0588	2.266	0.870	20.12	20.18	4.701	0(0)	4.57		4	m2i	5
539	J123456.3+275900	352074	188.7347	27.9834	0.393	0.142	20.35	20.38			3.15	D	12	g0iii	7
540	J123543.7+192133	352786	188.9325	19.3594	0.147	0.060	21.58	21.33			3.21		12	rk0v	7
541	J123709.2+255722	350952	189.2886	25.9562	0.117	0.189	20.95	20.63	2.986	0(0)	3.04		9	f2ii	5
542	J123634.3+630138	350881	189.1429	63.0272	0.471	0.231	19.58	19.58	3.050	0(0)	2.77		3	g0v	9
543	J123733.3+113804	350454	189.3890	11.6347	0.801	0.169	20.02	19.72	2.839	0(0)	2.92		3	g0iii	7
544	J123754.7+113744	350316	189.4783	11.6290	0.722	0.192	18.77	18.83	3.280	0(64)	3.06		7	g0i	8
545	J123853.8+091644	350563	189.7245	9.2790	1.255	0.207	19.27	19.28	2.961	0(0)	2.88		6	f5i	7
546	J124109.9+182730	351160	190.2916	18.4586	0.187	0.105	19.57	19.41	3.437	0(0)	3.13		3	rk0v	8
547	J124148.2+183957	351340	190.4512	18.6661	0.309	0.139	21.08	20.80	3.321	0(0)	2.80		12	f8i	7
548	J124058.5+325130	351114	190.2438	32.8585	0.542	0.117	20.00	19.93	2.854	0(0)	2.91		1	f02iv	7
549	J124115.1+322244	351134	190.3132	32.3790	0.538	0.229	20.11	20.07	3.248	0(0)	2.78	D	12	f8i	8
550	J124302.1+332118	367569	190.7591	33.3553											

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub> <sup>1</sup>	z <sub>PSF</sub> <sup>2</sup>	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
552	J124232.3+141729	28719	190.6350	14.2914	0.672	0.045	18.40	18.23			2.82		3	wg5iii	9
553	J124210.7+024049	367729	190.5449	2.6804	3.121	0.178	19.73	19.75	3.175	0(0)	3.21		2	rk0v	9
554	J124641.8+022619	366121	191.6745	2.4387	0.453	0.220	18.51	18.49	3.267	0(0)	3.20		6	g2i	8
555	J124515.5+543321	368364	191.3149	54.5561	0.499	0.248	20.11	20.12			3.43		2	k3iii	8
556	J124821.3+084025	366048	192.0888	8.6737	0.378	0.221	20.66	20.70			2.85	D	3	rg0v	7
557	J124910.6+054140	366968	192.2942	-5.6946	0.066	0.049	20.47	20.20			3.37		2	k0iii	7
558	J124906.8+111725	366901	192.2784	-11.2903	0.500	0.064	20.14	20.16			2.77		1	f0v	8
559	J124936.3+055823	43178	192.4015	-5.9733	0.321	0.055	21.10	21.03			2.95		12	f8i	7
560	J124851.8+060535	29857	192.2162	-6.0933	1.393	0.118	19.61	19.60			2.78		7	f5iii	8
561	J124936.2+051950	367151	192.4011	5.3306	0.140	0.038	19.49	19.13	2.403	0(0)	2.85		3	wg5iii	8
562	J125041.5+263641	370870	192.6729	26.6116	0.656	0.148	18.84	18.75			3.06		5	rk0v	8
563	J125027.2+001622	366693	192.6136	0.2728	0.324	0.186	21.10	20.91	3.110	0(0)	3.07		2	f8i	5
564	J125110.5+411703	48812	192.7942	41.2844	0.252	0.065	20.66	20.41			3.19		3	k0iii	7
565	J125329.4+305539	371613	193.3725	30.9276	0.155	0.100	20.99	20.70			4.64		3	m4v	5
566	J125643.5+474437	19281	194.1814	47.7438	0.742	0.083	19.50	19.59	3.173	0(0)	3.01		7	f8i	8
567	J125728.5+280851	33992	194.3692	28.1477	1.113	0.117	19.75	19.64	2.516	0(0)	2.80		6	f02iv	7
568	J125723.4+280410	369184	194.3476	28.0694	0.418	0.096	20.80	20.20			2.84		3	rg0v	7
569	J125736.2+242040	369067	194.4011	24.3445	0.916	0.432	19.63	19.76	3.681	0(0)	3.57		5	k3iii	8
570	J125807.4+265254	370306	194.5311	26.8818	0.123	0.049	20.67	20.62			3.30		3	k01ii	5
571	J125814.9+272432	22370	194.5625	27.4094	0.169	0.046	20.55	20.53	3.074	0(0)	2.95		5	f8i	5
572	J125711.0+271459	20473	194.2962	27.2502	0.252	0.052	18.62	18.68	3.088	0(0)	3.01		1	rf6v	8
573	J125810.7+014253	370191	194.5448	-1.7148	0.620	0.122	19.67	19.61	2.832	0(0)	2.87		7	f8iv	8
574	J130016.0+274433	5550	195.0672	27.7428	0.846	0.123	21.05	20.52	0.781	0(4)	3.23		12	m1iii	8
575	J130041.3+280646	361256	195.1722	28.1130	0.535	0.189	19.81	19.87	2.979	0(0)	2.89		12	f8i	8
576	J13104.8+585318	361422	195.2701	58.8884	0.520	0.178	20.38	20.27			4.20	D	12	m2iii	9
577	J130532.4+175538	360016	196.3851	17.9273	0.210	0.058	20.98	20.82			3.20		5	g2i	5
578	J130552.3+263259	360314	196.4681	26.5499	0.226	0.183	19.94	19.89	3.053	0(0)	3.36		2	rk3iii	7
579	J130616.9+264335	360185	196.5707	26.7265	1.206	0.570	21.11	20.95	3.208	0(0)	2.88		7	f8i	8
580	J130811.9+292512	360841	197.0498	29.4202	1.105	0.091	18.75	18.75	3.035	0(0)	3.13		1	f8i	8
581	J130804.3+212133	2708	197.0185	21.3593	0.646	0.072	20.32	20.16	2.819	0(0)	2.86		4	f5i	5
582	J130918.2+014406	360431	197.3260	-1.7351	0.325	0.175	20.10	19.68			3.37		2	wk2iii	8
583	J130838.9+572719	360804	197.1622	57.4553	0.529	0.144	20.47	20.36			2.81		3	rg0v	9
584	J130944.2+573821	360632	197.4343	57.6393	0.557	0.097	20.64	20.46	3.025	0(0)	2.98		4	f2ii	6
585	J131024.8+572742	364606	197.6034	57.4619	0.518	0.147	20.84	20.62			3.33		2	rg5iii	8
586	J131015.9+303114	364749	197.5664	30.5206	0.623	0.183	20.64	20.49	2.696	0(0)	2.85		1	f0v	5
587	J131129.4+370923	364398	197.8728	37.1566	0.450	0.144	20.13	20.01			2.88		3	g8v	8
588	J131147.5+271827	365500	197.9480	27.3076	0.858	0.206	19.41	19.39	2.975	0(0)	2.77		7	f2ii	7
589	J131124.3+315343	364561	197.8513	31.8955	0.735	0.124	20.52	20.05	3.237	0(0)	3.36		2	k3iii	7
590	J131138.1+320147	364434	197.9088	32.0298	2.225	0.267	19.20	19.09	2.863	0(0)	2.78		6	f0i	8
591	J131111.6+280016	364227	197.7987	28.0047	0.337	0.091	19.63	19.52	4.150	0(0)	4.03		3	rk5iii	7
592	J131236.2+231629	16808	198.1511	23.2751	0.651	0.066	18.86	18.91	3.684	0(0)	3.43		5	rk1iii	8
593	J131209.8+350421	365556	198.0410	35.0727	0.764	0.220	21.20	20.69	3.216	0(0)	3.06		12	g2i	7
594	J131213.0+352347	365542	198.0544	35.3964	0.029	0.039	20.53	20.16			4.92		2	m5v	5
595	J131134.3+173915	364468	197.8931	17.6543	0.511	0.219	20.55	20.44			2.76		2	f6v	5
596	J131531.9+290806	362838	198.8830	29.1352	1.098	0.625	21.05	20.77			4.64	wD	3	m3v	5
597	J131659.4+290130	363833	199.2478	29.0251	2.152	0.821	20.42	20.33	2.731	0(0)	2.87		1	a7v	5
598	J131833.4+322946	364131	199.6395	32.4963	0.233	0.162	20.77	21.00			3.08		5	g0i	8
599	J131906.9+330359	364029	199.7791	33.0666	2.353	0.347	19.24	19.24	2.473	0(0)	2.78		1	a2i	9
600	J132041.2+330010	363660	200.1721	33.0028	0.178	0.068	19.95	19.89			4.20		3	m2iii	9
601	J132328.6+054125	331533	200.8693	5.6905	0.889	0.725	18.73	18.56			3.08	D	3	k0iii	8
602	J132529.9+073558	329155	201.3746	7.5997	0.913	0.194	20.79	20.24	2.504	0(0)	2.84		3	rg0v	5
603	J132611.8+074358	328744	201.5494	7.7329	2.428	0.145	17.54	17.41	4.112	0(0)	4.04	t	7	rk5iii	12
604	J132846.0+114010	329554	202.1918	11.6695	0.602	0.185	19.49	19.32	3.685	0(0)	3.42		12	rk5iii	8
605	J132945.3+583009	7982	202.4394	58.5025	0.322	0.040	19.54	19.41	2.557	0(0)	2.76		3	g2v	8
606	J132918.0+583627	329715	202.3254	58.6075	0.089	0.088	20.37	20.41	3.273	0(0)	2.85		7	f5iii	8
607	J133024.5+581955	333935	202.6022	58.3320	0.119	0.058	21.22	20.82			3.47		2	k3iii	6
608	J133053.9+582235	11397	202.7252	58.3762	0.539	0.067	20.23	20.19			3.36		2	rg5iii	7
609	J132843.1+471623	14113	202.1802	47.2735	0.917	0.140	20.98	20.74			2.82	D	3	wg5v	5
610	J132958.6+334439	333741	202.4944	33.7443	0.133	0.049	20.73	20.52			2.96		3	g2iv	5
611	J132959.8+335301	333801	202.4995	33.8838	0.674	0.128	20.66	20.58	3.036	0(0)	2.88		7	f2ii	8
612	J133034.7+333801	333447	202.6448	33.6337	0.530	0.108	20.91	20.68			3.02	wD	3	rg5v	5
613	J133054.4+333921	333409	202.7268	33.6560	0.945	0.140	20.85	20.73	2.898	0(0)	2.84		12	f8i	8
614	J133002.7+241118	333778	202.5113	24.1884	0.175	0.095	21.39	20.86			4.74		3	m5v	5
615	J133024.6+014828	334000	202.6029	-1.8080	1.231	0.136	20.56	20.29	2.762	0(0)	2.96		1	f2ii	5
616	J133052.8+110455	333397	202.7203	11.0822	0.141	0.070	21.17	20.81			3.42		7	g5i	7
617	J133223.6+290931	334751	203.0985	29.1587	0.468	0.098	20.40	20.33			2.77		2	f5iii	7
618	J133200.0+503613	334837	203.0002	50.6038	0.776	0.113	19.60	19.43			3.78		3	rk4iii	8
619	J133223.2+503430	334761	203.0968	50.5752	0.944	0.102	18.47	18.44	3.832	0(0)	3.61		5	k34ii	8
620	J133334.4+374912	43125	203.3934	37.8200	0.497	0.132	20.06	19.81	3.461	0(0)	3.67		1	k0iii	8
621	J133549.0+030134	332458	203.9543	3.0263	0.432	0.107	20.36	20.16			3.45		2	k3iii	7
622	J133806.2+515930	332614	204.5259	51.9919	0.380	0.150	19.41	19.18	3.300	0(0)	2.92	D	3	g0iii	8
623	J133728.1+042920	333020	204.3674	4.4890	0.332	0.094	19.59	19.45	3.911	0(0)	3.55		2	rk4iii	8
624	J133831.4+043737	332942	204.6312	4.6272	0.790	0.132	20.35	20.23	2.9	1(1538)	2.89		6	f2ii	7
625	J133858.7+275710	332855	204.7450	27.9530	0.700	0.155	19.74	19.75	3.331	0(0)	3.13		6	f8i	7
626	J134041.4+001726	17941	205.1729	-0.2903	1.742	0.371	20.23	20.22	2.719	0(4)	2.82		1	f02iv	8
627	J134135.6+001321	324268	205.3986	-0.2228	0.665	0.315	20.34	20.26	3.919	0(0)	3.57	D	2	rk4iii	7
628	J134218.8+000601	324389	205.5785	-0.1005	0.414	0.368	21.00	20.56	2.601	0(0)	2.95		1	f02iv	5
629															

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$z'_{PSF}$	$z''_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{ref}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
630	J134501.7-002545	52169	206.2575	-0.4288	0.291	0.133	20.60	20.63			3.37	D	12	rk4iii	7
631	J134603.6+643531	325095	206.5152	64.5922	0.315	0.169	20.45	20.41	2.956	1(1411)	2.86		4	f5i	8
632	J134655.4+073605	322982	206.7311	7.6016	0.366	0.092	20.35	20.22	3.364	0(0)	3.22		2	rk0v	7
633	J134645.8+172846	17896	206.6910	17.4794	0.747	0.084	18.67	18.62			2.78		3	g2v	9
634	J134724.4+263456	322681	206.8517	26.5824	0.208	0.066	20.57	20.62	3.451	0(0)	3.26		6	g2i	7
635	J134734.0+263657	322575	206.8921	26.6159	0.125	0.049	20.99	20.57			2.95		1	f5v	8
636	J134830.6-035103	323858	207.1276	-3.8509	0.246	0.088	20.73	20.39			3.26		2	g0iii	7
637	J134803.9+075139	322781	207.0166	7.8609	1.434	0.369	20.01	19.73	2.2	1(1538)	2.76		1	f2v	5
638	J134850.2+262503	33730	207.2093	26.4176	0.478	0.055	19.05	18.98	2.904	0(0)	2.94		2	g2iv	9
639	J134955.7+263352	323643	207.4823	26.5645	0.557	0.157	20.58	20.63	3.173	0(0)	3.18		7	g2i	7
640	J135057.3+600815	57865	207.7398	60.1380	0.090	0.096	19.28	19.25	3.573	0(0)	3.21		3	rk0iii	9
641	J135024.6+642407	323516	207.6027	64.4022	1.079	0.139	20.55	20.63			3.25		12	k3iii	8
642	J135301.3+633256	327934	208.2558	63.5490	0.188	0.079	19.72	19.80	3.181	0(0)	3.11		6	f8i	9
643	J135407.2+180922	327225	208.5303	18.1561	0.390	0.132	20.01	20.01	3.140	0(0)	2.99		6	f8i	8
644	J135407.9+175958	327240	208.5330	17.9995	1.266	0.390	18.60	18.36	1.2	1(1538)	4.08	D	3	m2iii	8
645	J135438.1+052704	327420	208.6588	5.4513	0.383	0.146	20.47	20.46	3.095	0(0)	2.88		4	f0i	8
646	J135538.5+383210	328656	208.9107	38.5361	0.394	0.164	19.24	19.28			2.90		6	f8iv	8
647	J135602.4+182705	328562	209.0104	18.4515	0.135	0.059	20.21	20.13			2.76	wD	3	f8v	5
648	J135634.9+182938	327978	209.1455	18.4940	0.227	0.086	20.86	20.43			2.95	D	3	g0iii	7
649	J135644.0-093631	327961	209.1835	-9.6089	1.991	0.340	20.19	20.13			2.95		1	f02iv	7
650	J135640.2+652346	54072	209.1684	65.3966	0.607	0.087	19.38	19.23	2.5	1(1538)	2.80		1	f02iv	9
651	J135842.7+652236	33301	209.6783	65.3769	0.650	0.116	18.63	18.54	3.191	0(0)	3.48		1	rg5iii	9
652	J140045.4+025717	10808	210.1896	2.9548	0.444	0.037	20.07	19.87	2.1	1(611)	4.15	D	3	m2iii	8
653	J140146.5+024433	10641	210.4440	2.7427	1.062	0.075	18.60	18.43	4.424	0(0)	4.22		2	m2v	9
654	J140215.3-110042	326938	210.5639	-11.0119	0.491	0.097	20.99	20.44			2.98	wD	2	rg0v	5
655	J140257.5-001724	327091	210.7399	-0.2902	0.233	0.131	20.94	20.55			2.82		3	wg5v	5
656	J140303.2-000942	327171	210.7636	-0.1618	0.474	0.132	19.91	19.78	2.469	0(0)	2.78		1	f02iv	7
657	J140615.7+221701	343008	211.5656	22.2837	0.591	0.191	20.73	20.57	2.9	1(611)	3.09		1	f2ii	5
658	J140555.0+530326	343165	211.4792	53.0573	0.575	0.270	19.83	19.71	2.717	1(1411)	2.89		3	g0iii	8
659	J140924.2+262029	42413	212.3509	26.3413	0.356	0.040	20.86	20.69	3.217	0(0)	2.98		7	f8i	5
660	J140949.0+261346	30036	212.4544	26.2297	0.664	0.059	18.99	18.66	2.948	0(0)	3.20		12	m0iii	9
661	J141404.2+434729	341627	213.5178	43.7917	0.164	0.087	20.80	20.84	3.088	0(0)	2.90		2	f8i	7
662	J141413.3+360909	341598	213.5556	36.1526	0.773	0.193	18.97	18.87			3.26	D	12	k3iii	9
663	J141438.1+362123	341492	213.6588	36.3566	0.475	0.167	20.02	19.91	3.330	0(0)	3.18		12	rk0v	8
664	J141617.2+360755	341096	214.0720	36.1320	0.695	0.251	17.78	17.68	3.386	0(0)	2.89		3	g0iii	12
665	J141625.4+361901	341071	214.1059	36.3172	1.573	0.455	19.86	19.75			3.33	D	2	wg5iii	7
666	J141550.3+112452	31762	213.9597	11.4147	0.377	0.059	20.52	20.34	3.029	0(0)	2.87		6	f2ii	7
667	J141709.8+521850	11816	214.2920	52.3139	0.701	0.059	17.73	17.70			2.97	D	1	rf6v	11
668	J141551.3+522742	50651	213.9643	52.4617	0.370	0.112	19.74	19.43	2.578	0(0)	2.76		1	f02iv	8
669	J141617.2+264903	341098	214.0719	26.8178	1.378	0.358	18.06	17.67	2.296	0(0)	2.95	D	3	rk4iii	12
670	J142340.2+382350	346116	215.9177	38.3974	0.265	0.108	20.11	19.76	3.380	0(0)	3.33		2	rk0iii	8
671	J142428.4+263333	33690	216.1186	26.5593	0.334	0.052	20.26	19.73	2.592	0(0)	2.86		3	rg0v	8
672	J142656.2+602550	345703	216.7342	60.4308	4.651	0.294	16.23	16.19	3.186	0(0)	3.08	t	7	wk1iii	12
673	J142814.4+424055	346036	217.0600	42.6821	0.328	0.136	20.78	20.62	3.788	0(0)	3.53		2	rk3iii	7
674	J142847.5+423023	23557	217.1984	42.5064	0.235	0.057	20.60	20.41			2.79		3	f8v	8
675	J142926.4+011951	346836	217.3600	1.3309	0.515	0.226	19.79	19.62	4.84	1(1297)	4.60		2	m3v	8
676	J143056.6+475010	346634	217.7361	47.8362	0.605	0.217	19.72	19.69	3.699	0(0)	3.55		2	rk3iii	7
677	J142941.0+421711	346886	217.4210	42.2865	0.668	0.316	19.84	19.65			3.37		2	wk1iii	8
678	J143031.5+282832	347114	217.6314	28.4757	0.408	0.195	19.42	19.19	4.319	0(0)	3.83		12	rk5iii	8
679	J143455.4+035030	33437	218.7311	3.8417	1.761	0.205	18.14	18.12	2.841	0(0)	2.80		6	f5iii	9
680	J143507.3+584444	344826	218.7807	58.7458	0.824	0.310	19.70	19.32	2.479	0(0)	2.78		1	a2i	5
681	J143755.1+363916	344496	219.4797	36.6546	0.919	0.290	19.87	19.70			3.44	D	2	rk4iii	8
682	J143846.1+340549	345421	219.6924	34.0971	0.407	0.208	20.46	20.63	2.683	0(0)	2.82		1	f0v	5
683	J143924.6+001249	345332	219.8528	0.2137	0.595	0.132	20.71	20.63			2.95		3	rg5v	5
684	J144004.2+023444	345585	220.0176	2.5791	2.859	0.740	19.75	19.77	2.910	0(0)	3.14		6	f8i	7
685	J144014.7+032944	345630	220.0615	3.4958	0.290	0.118	21.00	20.85	3.062	0(0)	3.08		6	f8i	7
686	J144103.5+534042	28673	220.2650	53.6785	10.255	0.609	20.53	20.39	2.454	0(0)	2.96		12	g0iii	8
687	J144234.2-004737	51672	220.6429	-0.7935	0.608	0.109	21.43	20.97	0.887	1(448)	2.77	D	1	f02iv	5
688	J144334.9+063123	337186	220.8955	6.5232	0.237	0.147	20.11	20.26			2.83	D	3	g0iii	7
689	J144410.1+064200	337058	221.0421	6.7001	0.595	0.202	19.80	19.59	2.747	0(0)	2.90		1	f0iii	7
690	J144915.1+090045	51498	222.3137	9.0127	0.106	0.033	20.14	19.96	2.737	0(0)	2.81		1	f0v	5
691	J145230.7+165811	335353	223.1281	16.9699	2.712	0.450	19.89	19.69	2.875	0(0)	3.09		6	f8i	8
692	J145308.4+164719	335653	223.2851	16.7889	0.079	0.061	20.28	20.15	3.055	0(0)	2.84		2	f8iv	8
693	J145753.0-011358	336211	224.4709	-1.2328	1.326	0.294	20.08	20.04	3.503	0(0)	3.38		2	wk2iii	8
694	J150020.3+493512	335784	225.0847	49.5868	0.316	0.177	19.93	19.82	1.2	1(611)	3.34	D	2	k3iii	8
695	J150043.0+014042	335801	225.1792	1.6784	0.429	0.093	20.83	20.72			3.77		3	rk4iii	7
696	J150016.1+422614	336300	225.0672	42.4375	0.199	0.154	20.37	20.39			2.82		7	f5iii	8
697	J150153.1+421227	340031	225.4716	42.2076	0.279	0.106	20.33	19.95			3.39		2	wk2iii	7
698	J150355.4+101546	340769	225.9809	10.2629	0.810	0.228	20.56	20.34	2.735	0(0)	2.79		12	rf6v	8
699	J150908.7+072224	340481	227.2864	7.3735	0.323	0.105	21.05	20.85			2.87		12	f8iv	7
700	J151002.9+570243	40806	227.5132	57.0451	14.617	0.582	20.01	20.07	4.313	0(0)	4.12	t	7	m2iii	8
701	J151021.2+334024	34355	227.5885	33.6734	1.139	0.209	20.69	20.48			2.76		7	f5iii	8
702	J151117.7+071926	338136	227.8242	7.3241	0.618	0.079	21.07	20.99	3.016	0(0)	3.01		9	f2ii	5
703	J151138.7+072030	337981	227.9113	7.3419	0.160	0.056	21.07	20.84			3.23		3	g5i	5
704	J151147.1+071406	338026	227.9464	7.2350	2.577	0.195	18.27	18.12	3.481	0(0)	3.22		3	rk0iii	9
705	J151433.1+364627	339128	228.6381	36.7742	0.421	0.129	20.81	20.67	2.986	1(1880)	2.77	D	3	g0iv	8
706	J151403.5+420120	339315	228.5146												

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	F <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	ΔF <sub>0.5-2</sub> <sup>-14</sup>	z <sub>PSF</sub>	z <sub>PSF</sub> '	z <sub>спек.</sub>	z <sub>ref</sub>	z <sub>фот.</sub>	FL	T <sub>Q</sub>	T <sub>S</sub>	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
708	J151456.7+042203	339426	228.7366	4.3676	0.955	0.223	19.33	19.37	2.919	0(0)	3.01		1	f5iii	8
709	J151731.8+561801	207571	229.3827	56.3005	1.551	0.494	21.66	21.06			2.89		12	rg0v	7
710	J151534.3-000000	338834	228.8932	-0.0002	1.384	0.198	18.76	18.56			3.06		3	rg5iii	9
711	J151705.1-004906	207308	229.2715	-0.8185	2.974	0.314	20.42	20.49			2.79		3	g2v	8
712	J151707.7-004936	207287	229.2822	-0.8269	0.702	0.160	21.16	20.86	2.983	0(0)	3.05		7	f8i	7
713	J151633.3+071039	338931	229.1390	7.1776	0.375	0.238	20.00	19.73			3.75		3	rk4iii	9
714	J151959.7+673223	206955	229.9988	67.5399	0.972	0.348	19.74	19.68			3.58		1	rk0v	7
715	J152006.8+202018	207226	230.0284	20.3385	0.282	0.116	19.57	19.47	3.4	1(1538)	3.25		2	wg8iii	8
716	J152553.8+513649	15993	231.4748	51.6137	8.836	0.262	16.58	16.36	2.886	0(0)	2.95	t	3	wg5iii	12
717	J152644.1+512747	208300	231.6839	51.4631	0.510	0.116	20.29	20.22	3.521	0(0)	3.33		3	k3iii	7
718	J153131.5+240330	207704	232.8813	24.0586	2.603	0.809	19.55	19.02	2.525	0(0)	2.79		3	rg0v	9
719	J153200.0+043552	207735	233.0001	4.5980	0.312	0.091	20.71	20.91			3.77		3	rk4iii	8
720	J153212.5+043059	207974	233.0521	4.5166	0.741	0.138	19.80	19.64			2.78	D	3	g2v	7
721	J153218.2+324334	34061	233.0760	32.7262	0.198	0.068	20.05	20.06	2.948	0(0)	2.95		5	g0iii	8
722	J153322.7+324351	17510	233.3451	32.7309	1.550	0.181	18.71	18.60	1.897	0(0)	3.01		3	wk2iii	9
723	J153518.0+554427	205485	233.8250	55.7409	1.043	0.249	19.22	19.28	2.893	0(0)	2.80		4	f02iv	8
724	J153633.7+575241	11062	234.1410	57.8784	0.839	0.130	19.09	18.98	2.714	0(0)	2.91		1	f2v	9
725	J153654.6+543936	11208	234.2281	54.6604	0.534	0.079	20.01	19.99			2.95		7	f8i	8
726	J153700.3+542848	10823	234.2515	54.4800	0.525	0.064	20.59	20.18	2.903	0(4)	2.85		12	g0iii	8
727	J153744.6+543539	18883	234.4361	54.5946	0.453	0.094	19.15	19.01	3.467	0(0)	3.38		2	rk5iii	9
728	J153904.5+592706	206604	234.7688	59.4518	0.903	0.183	20.74	20.92			3.14		3	k0iii	7
729	J154316.5+535015	206175	235.8188	53.8375	0.196	0.115	20.09	20.02	3.167	1(1411)	3.38		2	k3iii	9
730	J154612.9+023916	210505	236.5538	2.6547	0.891	0.338	20.32	20.04			3.35	wD	2	wk2iii	5
731	J154905.8+352020	61389	237.2744	35.3389	2.598	0.272	19.21	19.16	3.038	0(0)	3.04		4	f8i	7
732	J154907.7+212015	210087	237.2822	21.3375	0.878	0.211	19.52	19.29	2.451	0(0)	2.77	D	3	m4iii	11
733	J155000.3+211803	210316	237.5016	21.3010	0.322	0.101	19.72	19.32	2.181	0(4)	3.22		12	wk2iii	9
734	J155438.2+551801	29712	238.6593	55.3003	2.150	0.372	19.37	19.32	2.853	0(0)	2.87		3	g0iii	9
735	J155501.3+335828	211106	238.7555	33.9745	0.467	0.112	19.62	19.41	3.383	0(0)	3.21		5	wg8iii	8
736	J155653.1+221312	208557	239.2214	22.2201	1.046	0.522	20.55	20.52			2.93		4	f0i	7
737	J155810.7+024534	208727	239.5446	2.7596	0.769	0.255	20.46	20.72			3.20		2	wk2iii	7
738	J155814.1+024351	208739	239.5588	2.7309	1.291	0.289	17.97	17.95			3.33		1	rk3iii	9
739	J155855.6+025540	209696	239.7321	2.9278	0.671	0.186	19.45	19.23	3.381	0(0)	3.20		6	wk2iii	9
740	J155857.3+024914	209689	239.7389	2.8207	0.454	0.119	20.77	20.58	3.1	1(1538)	2.94		7	g5v	5
741	J155851.9+350516	209713	239.7163	35.0878	0.538	0.249	19.42	19.29	2.844	1(1411)	2.79		5	f8iv	9
742	J160250.4+160332	21076	240.7108	16.0597	1.624	0.302	20.43	20.25			2.79	wD	3	wg5v	5
743	J160501.4+174517	201460	241.2559	17.7548	0.494	0.185	19.39	19.22	2.992	0(0)	2.90		7	f8i	8
744	J160548.6+254434	49239	241.4528	25.7427	0.205	0.085	19.76	19.74			3.05	D	3	rg5iii	7
745	J160528.3+272852	201396	241.3679	27.4813	0.771	0.410	20.85	20.66	4.023	0(0)	3.73		3	k2i	5
746	J160620.1+082116	200879	241.5840	8.3547	0.586	0.179	21.54	21.05			2.80		3	rg0v	5
747	J160733.8+110549	201069	241.8912	11.0971	0.592	0.146	20.44	19.81			3.17		3	k0iii	8
748	J161133.5+542732	202241	242.8891	54.4589	1.980	0.991	19.43	18.95			4.49	D	2	m3iii	8
749	J161129.4+523633	202224	242.8728	52.6093	1.019	0.367	19.76	19.57	2.628	0(0)	2.89		1	f02iv	8
750	J161350.7+335112	201814	243.4615	33.8534	0.505	0.324	20.35	20.10	2.425	1(1411)	2.85	wD	1	f02iv	5
751	J161659.5+122031	54285	244.2486	12.3420	0.324	0.086	19.62	19.42			3.07		3	wg8iii	8
752	J161624.1+122652	199488	244.1008	12.4478	0.485	0.195	19.56	19.44	3.347	0(0)	3.61		1	rk1iii	8
753	J161736.1+060520	200377	244.4006	6.0891	0.642	0.779	20.27	19.97			2.85	D	3	g2v	5
754	J161815.1+060856	19525	244.5639	6.1493	1.553	0.498	19.99	19.91			3.35	D	2	k3iii	7
755	J162114.9-021130	200145	245.3125	-2.1917	0.665	0.279	20.98	20.44			4.10		12	m2iii	8
756	J162351.7+262230	204196	245.9655	26.3751	0.463	0.508	20.60	20.36			3.01	D	3	g0i	7
757	J162839.3+495708	204055	247.1641	49.9525	0.801	0.379	20.74	20.60			4.47	wD	1	m1iii	5
758	J162909.7+242725	11416	247.2909	24.4571	0.454	0.081	19.84	19.76	2.630	0(0)	2.87		1	f2v	8
759	J163042.5+243113	205315	247.6773	24.5205	0.618	0.156	19.07	19.07	3.116	0(0)	3.08		2	g0iii	10
760	J163138.2+244343	204666	247.9092	24.7288	0.244	0.108	20.53	20.60	3.196	0(0)	3.11		6	f8i	7
761	J163305.4+411216	202323	248.2728	41.2045	0.411	0.242	20.78	20.33			3.36		12	rk4iii	7
762	J163207.9+571108	55939	248.0337	57.1860	1.044	0.212	20.38	20.40			3.25		5	wk2iii	7
763	J163144.8+570606	30895	247.9370	57.1017	1.480	0.232	20.27	19.70			5.10	D	3	m4v	8
764	J163241.0+570524	9068	248.1722	57.0890	0.929	0.124	20.65	20.28			2.98		6	f8v	7
765	J163502.5+370356	203205	248.7604	37.0656	0.714	0.734	20.30	20.10			3.45	D	2	k3iii	7
766	J163459.2+332510	203224	248.7467	33.4195	1.360	0.540	19.64	19.67	3.237	0(0)	2.92		2	g0iv	7
767	J163725.1+184314	7475	249.3558	18.7205	3.316	0.473	19.51	19.35			3.05	D	3	wk2iii	8
768	J164156.4+390834	220376	250.4852	39.1428	0.436	0.192	20.75	20.31			3.09	wD	1	f2ii	5
769	J164159.9+391104	220226	250.4997	39.1845	0.624	0.259	20.55	20.21			2.87		3	g0iii	7
770	J164213.5+385057	218192	250.5564	38.8492	1.176	0.262	20.23	20.16	2.199	0(0)	2.78		1	f0v	5
771	J164232.4+393451	218415	250.6352	39.5811	0.226	0.081	19.93	19.70	3.702	0(0)	3.44		3	k3iii	8
772	J164827.0+350018	34031	252.1126	35.0049	2.045	0.140	19.08	18.98	2.937	0(0)	3.34	D	2	m3iii	12
773	J165141.8+344646	46215	252.9243	34.7793	0.546	0.106	18.39	18.42			3.07		3	wk1iii	9
774	J165042.3+044931	21350	252.6769	4.8254	0.204	0.050	20.21	19.91			2.77		2	rg0v	5
775	J165858.8+785712	213588	254.7452	78.9536	0.214	0.077	20.00	19.87			2.87		3	g0iii	9
776	J165928.4+324443	32125	254.8687	32.7453	2.548	0.404	18.18	18.20	2.959	0(0)	2.78		6	f6v	9
777	J165905.3+323244	213557	254.7722	32.5458	0.798	0.329	19.66	19.65	3.101	0(0)	3.08		1	f5iii	7
778	J170612.4-014208	211952	256.5517	-1.7024	0.776	0.349	20.76	20.27			4.91	D	1	m4v	5
779	J170643.7+782830	34184	256.6827	78.4752	0.645	0.160	20.77	20.18			2.88		3	rk4iii	9
780	J171138.4+590013	16046	257.9107	59.0038	1.383	0.177	20.29	20.07			2.91		12	g0iii	8
781	J171320.2+594448	217669	258.3344	59.7467	0.824	0.442	19.01	18.98	2.831	1(1406)	2.78		6	f5i	9
782	J171337.2+585306	38376	258.4056	58.8853	0.757	0.138	20.47	20.15			4.37		12	m3ii	8
783	J172027.3+264528	27980	260.1148	26.7579	0.254	0.076	20.78	20.54			4.49		3	m2i	5
784	J172045.0+263838	18015	260.1878	26.6441	0.901	0.126	20.97	20.59	2.887	0(0)	2.90		7	f8i	5
785	J172017.4+263346	20161	260.0730												

Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$z'_{PSF}$	$z''_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{ref}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
786	J172014.1+264712	20159	260.0592	26.7869	0.420	0.075	20.96	20.70			4.21		5	k4i	5
787	J172221.8+595551	16960	260.5912	59.9313	0.716	0.168	19.37	19.26	2.9	1(1538)	2.92		6	f8i	9
788	J173619.9+680736	185735	264.0833	68.1267	1.243	0.146	19.15	18.95			2.81		3	rk0v	9
789	J173735.1+601106	186586	264.3963	60.1853	0.513	0.124	20.07	19.90			3.33		12	rk5iii	9
790	J173817.1+595730	186497	264.5714	59.9585	0.105	0.093	19.64	19.51			2.76	D	2	g0iii	8
791	J182110.7+640818	188186	275.2947	64.1385	1.769	0.824	19.73	19.70			3.29	D	12	m2iii	9
792	J193249.4+782304	250733	293.2059	78.3847	0.639	0.265	20.72	20.18			3.30	D	2	m1iii	7
793	J194454.8+770552	251082	296.2285	77.0980	7.585	0.606	15.85	15.59	3.051	1(581)	2.93	t	2	rg5iii	12
794	J200807.3-111235	253353	302.0308	-11.2097	0.121	0.082	19.64	19.50			3.15	D	2	k0v	7
795	J202251.3-205611	269330	305.7139	-20.9364	0.491	0.154	17.52	17.48			3.33	D	2	k3iii	12
796	J203958.0-004337	268528	309.9919	-0.7271	0.441	0.175	21.18	20.73			4.63		3	m4v	5
797	J204602.6-023849	272067	311.5109	-2.6470	0.191	0.155	18.57	18.40			3.36		2	rk3iii	9
798	J204801.3+004058	271756	312.0056	0.6829	1.440	0.554	20.21	20.01			2.87		3	k0v	7
799	J205001.1-054352	271928	312.5046	-5.7312	0.080	0.086	18.48	18.33	1.6	1(1538)	3.41	D	2	rk4iii	8
800	J205747.7+051716	31735	314.4490	5.2881	0.770	0.112	19.53	19.28			2.96		3	wg8iii	9
801	J205752.8+050522	39246	314.4703	5.0893	0.463	0.094	20.50	20.47			2.86		12	rg0v	7
802	J205808.8+050846	36773	314.5370	5.1461	0.200	0.053	19.81	19.75			3.04		3	rg5iii	7
803	J210325.2-112011	262595	315.8554	-11.3365	4.335	0.314	20.30	19.99		1(311)	2.80		1	wf5v	5
804	J210810.5+040314	45781	317.0445	4.0536	1.114	0.356	18.46	18.47			2.95	D	1	rf6v	8
805	J210810.5+040314	45781	317.0445	4.0536	1.114	0.356	19.04	18.84			3.20	D	3	rk4iii	8
806	J210745.5+040243	34530	316.9401	4.0454	1.754	0.457	20.71	20.47			2.81	D	3	g0iii	7
807	J210805.4-050352	263812	317.0226	-5.0646	0.894	0.338	20.24	19.94			2.88		12	g5v	7
808	J210817.0+062720	263827	317.0709	6.4556	0.275	0.156	20.29	20.24	3.047	0(0)	3.04	D	6	f8i	7
809	J211517.7+062007	261389	318.8240	6.3354	0.003	0.033	21.22	20.84			4.56		2	m3ii	5
810	J211507.6+061801	23044	318.7820	6.3006	0.285	0.049	19.86	19.75	2.749	0(0)	2.82		1	wf5v	7
811	J212150.8+170712	261627	320.4617	17.1202	1.261	0.459	20.29	20.10			4.28	wD	3	m1v	5
812	J212233.6-054431	261474	320.6401	-5.7421	1.749	0.191	19.40	18.92	2.5	1(611)	2.79		12	rg0v	9
813	J213011.6+120126	266235	322.5484	12.0240	0.331	0.187	20.58	20.36			3.19		6	g0iii	6
814	J212912.2+120751	11234	322.3013	12.1311	2.053	0.214	18.33	17.84			4.22	D	3	m3iii	12
815	J212946.4+115748	54319	322.4439	11.9640	0.193	0.131	18.73	18.58			3.44	D	5	k3iii	9
816	J212959.5+051005	266171	322.4982	5.1683	1.015	0.270	20.82	20.58			3.02		9	f2ii	5
817	J213029.1+050449	266141	322.6215	5.0804	0.333	0.102	21.03	20.67			3.41		2	k3iii	7
818	J213304.6-005219	266686	323.2693	-0.8720	0.192	0.100	21.19	20.76			3.17	wD	2	g5iv	5
819	J213754.0+003346	264718	324.4754	0.5628	0.299	0.093	21.01	20.50			4.39		2	k4i	5
820	J214545.1+042911	232121	326.4382	4.4864	0.125	0.111	20.73	20.47	3.075	1(1411)	4.23	D	3	m1v	5
821	J215004.3-054325	231683	327.5180	-5.7236	0.211	0.057	20.92	20.90			3.40		12	rk4iii	7
822	J215014.8-054826	54291	327.5623	-5.8078	0.279	0.056	19.03	18.83			4.05		3	k4i	8
823	J215044.9-052601	29309	327.6873	-5.4337	1.074	0.074	18.36	18.35			2.80		6	f5iii	8
824	J215210.2+141756	232906	328.0426	14.2991	0.665	0.168	19.69	19.28			2.92		3	wg5iii	8
825	J215240.0+140206	233056	328.1669	14.0350	2.155	0.319	19.45	19.01			3.15		3	wk2iii	8
826	J215139.1+021628	231790	327.9131	2.2747	0.969	0.546	19.81	19.77	3.256	0(0)	2.90		7	f8i	7
827	J220338.5+024720	231188	330.9107	2.7891	2.905	1.367	17.71	17.71			2.76		6	rf6v	9
828	J220503.1-015136	231418	331.2632	-1.8603	0.017	0.020	20.32	19.79			3.17		12	k3iii	10
829	J220955.6+021318	235102	332.4820	2.2217	1.367	0.899	17.96	17.81			2.97	D	3	k3iii	10
830	J221429.7+001056	235937	333.6241	0.1825	0.218	0.160	21.11	20.57			2.96		3	g8v	5
831	J221636.0+004559	235796	334.1502	0.7665	0.790	0.247	20.78	20.28	3.002	0(0)	3.08		5	g0i	5
832	J221638.8+004032	235760	334.1620	0.6758	0.175	0.107	20.97	20.74	3.372	0(0)	3.24		12	g8iii	7
833	J221643.9+001346	46995	334.1831	0.2299	0.221	0.065	20.27	19.86	5.025	0(0)	4.91		4	m3v	7
834	J221736.6+001623	233835	334.4025	0.2731	0.063	0.022	21.14	20.84	3.098	0(0)	2.97		12	g0iii	7
835	J221756.4+003545	233246	334.4853	0.5959	1.205	0.304	19.44	19.50	2.934	0(0)	2.94		7	g0iii	8
836	J221759.4+003057	233224	334.4978	0.5161	0.586	0.311	20.75	20.72	3.095	0(0)	2.90		7	f8iv	7
837	J221753.2-003257	233237	334.4720	-0.5494	1.686	1.143	19.96	19.81	3.106	1(1411)	2.79		7	f8i	7
838	J221847.2-001326	233459	334.6967	-0.2241	0.614	0.239	19.90	19.53	2.560	0(0)	2.89		3	wg5iii	9
839	J222028.4+000533	234502	335.1187	0.0927	1.308	0.552	20.61	20.16	2.747	0(0)	2.88		3	wg5iii	7
840	J222008.9-002343	234566	335.0374	-0.3955	0.889	0.363	19.57	19.42	3.344	0(0)	3.13		12	rk0v	8
841	J221943.3+004119	234290	334.9305	0.6887	0.103	0.122	19.17	19.07	3.132	0(0)	3.06		2	g0i	8
842	J221945.2+003707	234311	334.9384	0.6188	0.303	0.167	18.94	18.91	3.531	0(0)	3.80		1	k3iii	8
843	J221958.2+003708	234334	334.9929	0.6189	0.319	0.222	18.92	19.13	3.089	0(0)	3.02		1	f8iv	9
844	J222818.5+202549	225834	337.0773	20.4303	0.311	0.093	19.71	19.46			2.81		3	g0iii	8
845	J223720.5+340010	226433	339.3356	34.0030	0.454	0.169	20.97	20.66			2.77		1	f02iv	5
846	J223953.6-055220	224459	339.9736	-5.8724	1.564	0.145	17.79	17.52	4.55	1(401)	4.31	t	7	m3ii	12
847	J224031.4-060015	223992	340.1310	-6.0043	0.431	0.154	20.60	20.05			2.93		6	f2iii	7
848	J224005.0+031155	224513	340.0209	3.1987	0.441	0.185	20.20	20.14	3.211	1(1411)	3.23		4	g0i	6
849	J224240.7-092623	224209	340.6700	-9.4399	0.155	0.059	20.63	20.27			3.32		12	rk4iii	7
850	J224317.6-094653	225175	340.8234	-9.7817	0.086	0.033	20.06	19.91			3.45	D	2	k3iii	7
851	J225116.3+185213	228849	342.8181	18.8705	0.648	0.154	20.32	19.96	2.750	0(0)	3.00		6	f5iii	5
852	J225418.6+155610	33570	343.5779	15.9360	0.371	0.185	21.06	20.56			2.88		3	rg5v	5
853	J225535.0-025809	229333	343.8959	-2.9694	0.432	0.172	18.79	18.63			3.81		5	k34ii	8
854	J225536.1-025735	229337	343.9006	-2.9598	0.464	0.186	17.66	17.51			3.05		2	rg5iii	12
855	J230306.9+083917	13869	345.7798	8.6555	0.426	0.093	20.18	19.97			4.58	D	1	m2i	5
856	J230252.1+085522	35720	345.7176	8.9229	0.645	0.142	20.13	20.05	3.750	0(0)	3.75		3	rk4iii	7
857	J230759.9-020434	228309	347.0000	-2.0762	0.338	0.181	20.32	20.04			4.00		1	k4iii	6
858	J231010.3+214125	228023	347.5433	21.6903	0.084	0.053	20.80	20.69	3.252	0(0)	2.94		6	f8i	8
859	J231619.4+254552	245352	349.0810	25.7646	1.012	0.437	19.53	19.38	3.207	0(0)	2.86		7	f8i	8
860	J231627.0+253748	46320	349.1127	25.6296	0.394	0.121	20.14	20.04	2.908	0(0)	2.83		6	f5iii	7
861	J231602.8+040348	245078	349.0117	4.0636	0.644	0.162	20.45	20.36	2.408	0(0)	2.80		1	f02iv	5
862	J231719.6+040439	244702	349.3317	4.0776	0.556	0.187	20.13	20.06	2.867	0(0)	2.86		12	f8i	8
863	J231839.7+002032	242922	349.6655	0.3424	1.112	0.468	20.09	20.07			3.23		12		



Таблица 3.1: Каталог кандидатов в квазары на  $3 < z < 5.5$ . Таблица красных смещений.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$i'_{PSF}$	$z'_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{ref}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
864	J231923.1+081251	242978	349.8463	8.2143	0.417	0.092	19.47	19.46	3.147	0(0)	2.81		2	g0iv	8
865	J232004.3+075845	242410	350.0182	7.9793	0.362	0.092	20.54	20.09	2.103	0(0)	2.78		3	g8v	7
866	J232137.4+283025	243808	350.4060	28.5071	1.670	0.290	19.15	19.02	3.062	0(0)	2.90		7	g0iii	8
867	J232217.3+283410	243305	350.5722	28.5695	0.181	0.094	21.67	21.16			3.32	D	2	wk2iii	6
868	J232207.1+194423	243771	350.5298	19.7398	0.864	0.098	18.43	18.26	4.17	1(510)	3.89	t	3	rk5iii	9
869	J232215.4+194439	243244	350.5646	19.7443	0.244	0.077	20.31	19.90	2.475	0(0)	2.90		12	f8i	8
870	J232242.7+195221	243447	350.6782	19.8726	1.447	0.235	20.43	20.28			2.78		3	wg5v	8
871	J232346.0+165228	247446	350.9417	16.8745	1.218	0.162	19.96	20.28	3.602	0(0)	3.90		1	k3iii	7
872	J232419.4+165620	247655	351.0809	16.9390	1.505	0.189	18.47	18.33	3.323	0(64)	3.42		2	k3iii	10
873	J232447.3+283206	247045	351.1971	28.5352	0.574	0.076	20.96	20.77	2.816	0(0)	3.02		9	f8i	5
874	J232616.7+283144	248376	351.5700	28.5291	0.622	0.113	20.66	20.26			2.92		5	g5v	5
875	J232620.0+282858	248352	351.5835	28.4829	1.122	0.144	20.43	20.43			2.90		3	wg8iii	7
876	J232746.3-020222	247965	351.9430	-2.0397	0.433	0.165	20.79	20.45			2.77		3	g2v	7
877	J232713.6+000408	247814	351.8069	0.0690	0.211	0.078	20.89	20.69	2.950	0(0)	2.83		7	f5iii	5
878	J232715.6+001414	247825	351.8152	0.2375	0.371	0.098	19.78	19.52	2.544	0(0)	2.85		3	g0iii	8
879	J232717.8+000546	248081	351.8245	0.0963	0.440	0.096	19.84	19.89	3.676	0(0)	3.43		7	g8i	7
880	J232827.7+223143	246138	352.1154	22.5287	0.386	0.166	20.18	20.25	3.233	0(0)	3.18		4	f8i	6
881	J232833.6+150305	47320	352.1404	15.0515	0.301	0.050	20.63	20.46			2.93		2	g2iv	7
882	J232840.0+150714	246035	352.1668	15.1207	0.331	0.071	20.89	20.93			3.44		2	k3iii	7
883	J232905.9+145114	245457	352.2748	14.8542	0.056	0.021	20.63	20.41	3.353	0(0)	3.26		2	wk2iii	7
884	J232910.1+001339	245502	352.2922	0.2275	0.372	0.068	20.49	20.16	3.398	0(0)	3.26		2	g5v	7
885	J233132.3+200506	246297	352.8848	20.0852	0.560	0.218	19.98	19.80			3.00		3	wk2iii	7
886	J233146.7+194505	18287	352.9453	19.7514	0.618	0.101	19.99	19.89			2.79		5	f8iv	8
887	J233329.9+152539	237875	353.3750	15.4276	0.426	0.155	19.00	18.84	3.650	0(0)	3.56		5	rk3iii	8
888	J233633.9+210442	238644	354.1413	21.0784	0.220	0.063	21.05	20.50			2.98		3	g8v	8
889	J233641.2+211955	238680	354.1717	21.3322	0.365	0.095	20.17	20.14			2.92		3	g8v	8
890	J234214.1+303606	237645	355.5590	30.6017	0.799	0.203	19.92	19.79			3.20	wD	2	wk2iii	5
891	J234309.6+001325	237594	355.7901	0.2239	0.470	0.110	20.59	20.83	2.824	0(0)	2.96		9	f5i	5
892	J234448.7-042651	241540	356.2031	-4.4475	0.197	0.132	18.59	18.44			2.88	D	3	rg5iii	9
893	J234455.3+092444	241510	356.2304	9.4125	0.163	0.143	20.79	20.85			3.18	D	12	rg5iii	7
894	J234752.5+010306	242170	356.9688	1.0518	0.446	0.164	20.62	20.46	2.411	0(0)	2.86		12	g0v	8
895	J234916.0+020722	241813	357.3167	2.1230	0.732	0.208	20.87	20.59	2.655	0(0)	2.77		4	f0iii	5
896	J234956.8+363237	239836	357.4871	36.5437	0.548	0.203	19.55	19.40			2.92		3	wg8iii	8
897	J235054.6+200939	239972	357.7276	20.1609	1.000	0.121	18.49	18.47	3.162	0(0)	2.88		6	f8i	12
898	J235201.3+200901	239304	358.0055	20.1506	1.163	0.151	18.37	18.33	3.079	0(0)	3.09		1	g0iii	11
899	J235101.0+203504	240044	357.7544	20.5847	0.530	0.137	19.99	19.95			2.80		5	g0iv	8
900	J235111.2+202016	239889	357.7970	20.3378	0.996	0.358	20.11	19.86	2.329	0(0)	2.76		1	f02iv	7
901	J235435.5-101513	239560	358.6481	-10.2537	1.159	0.232	19.30	19.19	3.120	0(0)	2.97		1	f5v	7
902	J235502.9+060825	240542	358.7623	6.1405	1.497	0.408	19.04	18.80	2.707	0(0)	2.79		7	f8i	8
903	J235555.9+055933	240529	358.9831	5.9926	0.344	0.121	20.22	20.14			3.35		2	wk2iii	8

Таблица 3.2: Известные квазары с  $z_{\text{спек.}} > 3$  каталога 3XMM-DR4, пропущенные при отборе кандидатов.

N	NAME 3XMM	SRCID	RA	DEC	$F_{0.5-2}^{-14}$	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$	$i'_{PSF}$	$z'_{PSF}$	$z_{\text{спек.}}$	$z_{ref}$	$z_{\text{фот.}}$	FL	$T_Q$	$T_S$	NB
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1	J001049.0+290139	118405	2.7046	29.0277	0.275	0.192	20.23	20.18	3.370	0(0)	3.18	r	5	g2i	5
2	J002654.9+171944	113822	6.7289	17.3289	1.125	0.132	21.21	20.79	3.095	0(0)	2.72		12	f8i	7
3	J005156.6+272847	128940	12.9862	27.4799	0.289	0.183	19.73	19.57	3.331	0(0)	3.46	r	1	g5iv	7
4	J011117.7+325832	44045	17.8243	32.9758	0.245	0.099	19.59	19.39	3.205	1(1411)	0.69		13	m5iii	9
5	J011544.8+001513	125421	18.9371	0.2538	0.194	0.064	21.53	20.96	5.1	1(1245)	0.61		14	m4v	7
6	J020231.1-042246	43456	30.6301	-4.3794	1.285	0.279	20.68	20.43	4.270	0(0)	0.94	G	14	m7iii	9

NAME — имя в каталоге 3XMM-DR4 (3XMMJ...), SRCID — уникальный номер рентгеновского источника в каталоге 3XMM-DR4, RA — прямое восхождение и DEC — склонение в градусах в каталоге 3XMM-DR4,  $F_{0.5-2}^{-14}$  и  $\Delta F_{0.5-2}^{-14}$  — поток и ошибка на поток ( $\times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>) в диапазоне 0.5–2 кэВ,  $i'_{PSF}$  — видимая звездная величина в фильтре  $i'$  SDSS (AB, PSF),  $z'_{PSF}$  — видимая звездная величина в фильтре  $z'$  SDSS (AB, PSF),  $z_{\text{спек.}}$  — спектроскопическое красное смещение,  $z_{ref}$  — номер ссылки на работу с опубликованным  $z_{\text{спек.}}$  (0 — SDSS DR12, в скобках указано значение флага zWarning; 1 — каталог рентгеновских квазаров Флеш (2015), в скобках указан номер источника данных из Флеш (2015)),  $z_{\text{фот.}}$  — фотометрическое красное смещение, FL — флаг данных (D — в пределах  $2\sigma$  ошибки локализации рентгеновского источника XMM есть другой оптический источник; w — оценки  $z_{\text{фот.}}$  получены только по фотометрии SDSS, хотя рядом есть источник WISE; t — мишень наведения XMM, r — шаблон звезды описывает фотометрию лучше, чем шаблон квазара ( $\chi^2_{star} < \chi^2_{qso}$ ), G — объект считается протяженным источником в SDSS),  $T_Q$  — номер шаблона библиотеки квазаров,  $T_S$  — шаблон звезды (Пиклз, 1998) с наименьшим  $\chi^2$ , NB — число фотометрических полос, используемых при аппроксимации. Эта таблица в электронном виде доступна на сайте <http://vizier.u-strasbg.fr/> (каталог J/PAZh/42/313).

Таблица 3.2: Известные квазары с  $z_{\text{спек.}} > 3$  каталога *3XMM-DR4*, пропущенные при отборе кандидатов.

N (1)	NAME 3XMM (2)	SRCID (3)	RA (4)	DEC (5)	$F_{0.5-2}^{-14}$ (6)	$\Delta F_{0.5-2}^{-14}$ (7)	$i'_{PSF}$ (8)	$z'_{PSF}$ (9)	$z_{\text{спек.}}$ (10)	$z_{\text{ref}}$ (11)	$z_{\text{фот.}}$ (12)	FL (13)	$T_Q$ (14)	$T_S$ (15)	NB (16)
7	J020253.7-065043	92295	30.7240	-6.8453	0.155	0.083	20.69	20.34	3.866	0(0)	0.79	G	13	m5iii	8
8	J020702.2-065233	96071	31.7593	-6.8759	0.366	0.111	20.51	20.45	3.065	0(0)	2.66		6	f0iii	7
9	J021338.6-051615	20962	33.4110	-5.2712	0.929	0.096	20.88	20.22	4.544	0(0)	0.55		14	m4iii	7
10	J021343.2-042042	107259	33.4301	-4.3450	0.347	0.163	20.45	20.38	3.074	0(0)	0.06		7	m5iii	7
11	J021504.1-040704	107902	33.7671	-4.1178	0.636	0.208	20.53	20.34	3.283	0(0)	0.03		6	f8i	7
12	J022048.5-033711	110418	35.2025	-3.6197	0.564	0.180	21.42	20.61	3.116	0(0)	2.71		12	f8i	7
13	J022251.7-050713	103134	35.7157	-5.1203	0.880	0.122	20.01	19.57	3.86	1(1758)	0.67		13	m3iii	8
14	J022645.4-043616	102470	36.6893	-4.6046	0.726	0.152	18.45	17.89	3.295	1(559)	0.49		14	m3ii	12
15	J022706.4-041924	105904	36.7769	-4.3235	0.392	0.100	20.65	20.60	3.285	1(650)	2.90	r	3	rg0v	5
16	J022849.6-043946	106357	37.2069	-4.6630	0.241	0.187	21.04	20.60	3.211	0(0)	2.62		7	f5i	7
17	J023226.0-053729	160738	38.1086	-5.6248	0.532	0.258	18.83	18.60	4.564	0(0)	0.28	r	14	m2iii	8
18	J024923.6-040206	163652	42.3484	-4.0351	0.391	0.195	20.81	20.62	3.029	0(0)	2.94	r	3	g5v	5
19	J030222.0+000630	155293	45.5921	0.1085	0.708	0.072	20.65	20.50	3.306	0(0)	0.03		13	k0iii	8
20	J030435.4-000250	156232	46.1476	-0.0474	0.605	0.241	20.41	20.16	3.055	0(0)	0.03		13	f8i	7
21	J080334.9+391923	79784	120.8954	39.3232	0.348	0.151	20.37	20.29	3.011	0(0)	2.67		7	f5i	7
22	J085026.7+630020	307591	132.6113	63.0057	0.647	0.195	18.36	18.23	3.363	0(0)	3.08	r	1	k3iii	11
23	J085809.3+274228	300636	134.5391	27.7080	0.246	0.052	20.39	20.48	3.464	0(0)	3.10	r	3	g8iv	5
24	J093521.2+612339	317819	143.8387	61.3943	0.693	0.101	20.04	20.12	4.042	0(0)	0.30		14	m2iii	7
25	J094013.9+344628	321396	145.0579	34.7747	2.295	0.257	21.35	20.90	3.355	0(0)	0.38		13	rk4iii	7
26	J094404.1+165056	322206	146.0174	16.8489	0.516	0.147	20.27	20.28	3.017	0(0)	3.05	r	1	f5iii	5
27	J095752.0+015119	313069	149.4669	1.8555	0.254	0.107	21.02	20.40	4.174	1(1886)	0.90	DG	14	m7iii	7
28	J100055.3+250907	310877	150.2306	25.1521	0.124	0.040	21.17	20.49	3.2	1(1538)	0.41	G	13	m3iii	8
29	J100226.1+024611	23727	150.6090	2.7687	0.428	0.057	20.06	20.19	3.038	1(271)	3.13	Gr	6	g2iv	5
30	J100655.8+050325	315437	151.7327	5.0571	1.454	0.644	19.46	19.39	3.086	0(0)	3.60	r	1	rk0v	8
31	J104445.6-011756	283334	161.1901	-1.2990	0.248	0.071	20.35	20.29	3.496	0(0)	3.73	r	1	g5i	5
32	J104920.9+510041	16951	162.3372	51.0114	0.171	0.034	20.87	20.77	3.057	0(0)	0.04		7	f5i	7
33	J104808.3+583718	275930	162.0347	58.6217	1.136	0.348	20.31	20.13	3.285	0(0)	0.05		13	wk2iii	8
34	J111151.3+061321	44028	167.9642	6.2227	0.146	0.031	20.18	20.33	3.200	0(0)	3.13	r	6	g0iv	5
35	J115659.3+551309	27772	179.2477	55.2190	0.933	0.234	18.39	18.09	3.110	0(0)	0.23		13	m1iii	12
36	J120613.4+443527	355201	181.5561	44.5908	0.564	0.114	20.93	20.28	3.483	0(0)	0.80		13	m5v	9
37	J120735.5+251140	356435	181.8982	25.1947	0.538	0.165	20.21	20.14	3.008	0(0)	2.73		7	f5i	7
38	J122652.2+013632	349269	186.7178	1.6090	0.687	0.201	19.61	19.74	3.015	0(0)	2.70		6	f02iv	8
39	J123142.1+110308	23419	187.9259	11.0522	0.382	0.045	20.06	20.00	3.024	0(0)	2.60		5	f02iv	7
40	J123231.0+121846	348272	188.1293	12.3131	0.302	0.153	20.57	20.69	3.055	0(0)	2.75		7	f5iv	7
41	J123613.4+275151	350816	189.0561	27.8643	0.424	0.106	20.10	20.07	3.780	0(0)	0.70		13	m3iii	11
42	J123752.6+092934	350323	189.4692	9.4930	0.925	0.216	19.60	19.54	3.027	0(0)	2.67		7	f02iv	7
43	J124405.1+125757	368647	191.0214	12.9659	1.101	0.200	21.15	20.86	3.1	1(611)	0.43	D	13	m2iii	7
44	J124825.2+673135	366095	192.1052	67.5266	0.519	0.101	19.15	19.10	3.224	0(0)	2.73	r	9	f8i	5
45	J130200.0+281213	362403	195.5002	28.2038	0.163	0.080	20.74	20.45	3.084	0(0)	2.68		2	f5iii	8
46	J130206.5+281117	362291	195.5272	28.1882	0.249	0.098	21.16	20.34	4.884	0(0)	5.55		12	m5v	8
47	J131047.8+322518	364785	197.6995	32.4219	0.090	0.048	20.34	19.96	3.009	0(0)	0.70		8	f0i	9
48	J132451.8+032722	331382	201.2159	3.4563	0.641	0.172	20.81	20.19	3.019	0(0)	3.22		12	wk2iii	7
49	J133002.2+241634	53129	202.5096	24.2766	0.192	0.055	20.75	20.21	3.038	0(0)	2.73		12	f2ii	7
50	J135613.7+182358	328590	209.0575	18.3996	0.482	0.087	21.10	20.68	3.927	0(0)	0.68	G	13	m3ii	8
51	J140149.8+024835	11017	210.4580	2.8100	0.982	0.073	21.19	20.53	3.83	1(643)	0.26	G	7	m2iii	7
52	J142437.8+225601	346440	216.1579	22.9338	41.066	10.834	15.39	15.34	3.62	1(1417)	3.57	G	7	rk3iii	12
53	J143023.7+420436	15580	217.5989	42.0768	54.979	0.640	19.16	19.31	4.656	0(0)	4.15	tr	1	m4v	5
54	J150603.5+012757	41624	226.5147	1.4664	0.787	0.136	20.78	20.36	3.852	0(0)	3.41	G	12	m2iii	7
55	J161618.1+122351	199481	244.0757	12.3976	0.223	0.137	20.00	19.73	4.292	0(0)	4.07	r	1	k3i	5
56	J164829.7+350159	29462	252.1238	35.0330	3.526	0.203	20.32	20.16	4.075	1(1347)	1.56	D	2	rf8v	7
57	J171456.2+593700	215090	258.7343	59.6168	1.198	0.398	20.52	20.17	4.028	1(1406)	0.24		6	g2v	8
58	J213621.4+003028	266573	324.0893	0.5079	0.602	0.082	20.54	20.09	3.2	1(1538)	0.18	G	12	wk2iii	7
59	J213729.8+003151	264414	324.3742	0.5310	0.263	0.043	20.97	20.80	3.630	0(0)	3.48	r	2	k01ii	5
60	J220814.9+015856	231039	332.0624	1.9824	0.713	0.375	19.71	19.52	3.084	0(0)	2.75	D	7	f5i	8
61	J220845.5+020252	235145	332.1896	2.0479	1.004	0.339	19.34	19.37	3.405	1(646)	1.38		3	wf5v	8
62	J221722.2+001640	47709	334.3429	0.2780	0.088	0.019	21.28	20.61	3.366	0(0)	3.18		2	g2i	5
63	J224041.7+032326	223971	340.1738	3.3906	0.262	0.091	21.15	20.45	3.348	1(1880)	3.26		12	k3iii	6

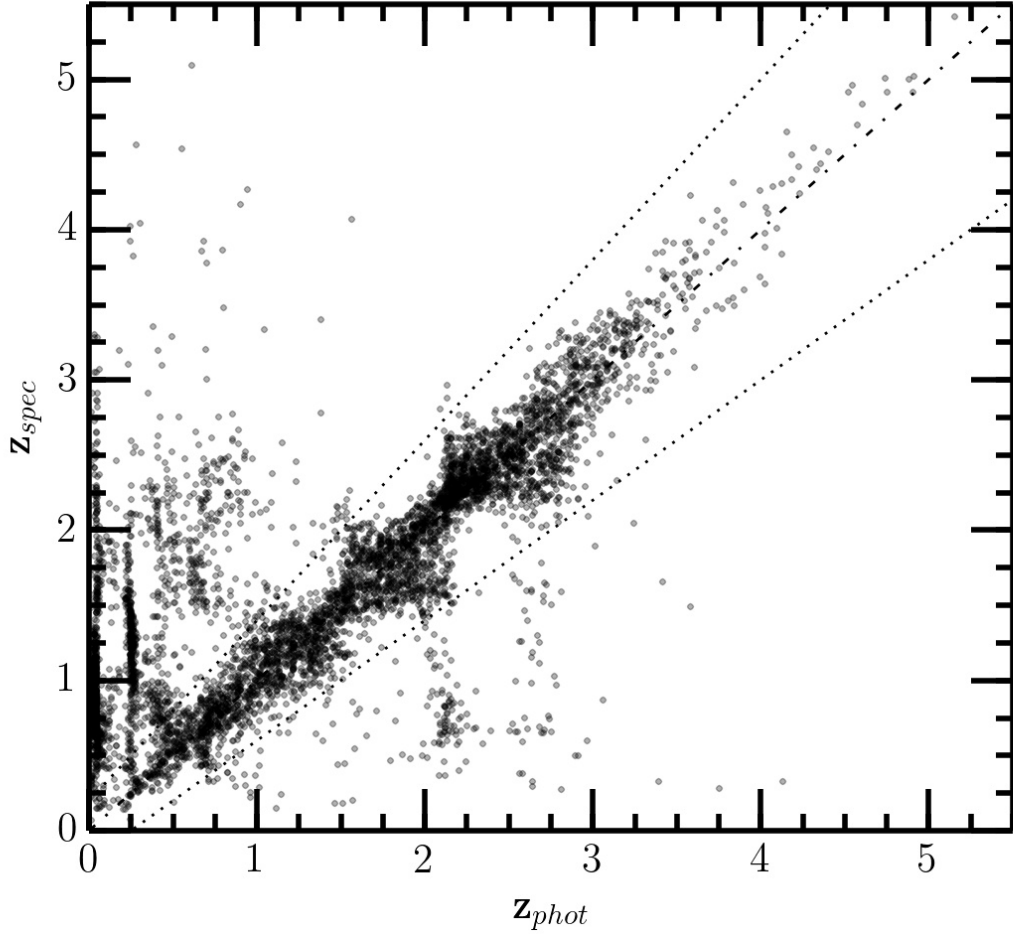


Рис. 3.7: Разброс значений  $z_{\text{спек.}}$  относительно  $z_{\text{фот.}}$  для 6162 точечных объектов спектроскопического каталога *SDSS* с  $z_{\text{спек.}} < 5.5$  (имеющих погрешность  $\delta z' < 0.2$  в фильтре  $z'$  *SDSS*). Для 329 объектов с  $z_{\text{спек.}} > 3$  разброс значений  $\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})} = 0.07$ , процент выбросов  $\eta = 9\%$  (см. определения в тексте). Линиями из точек ограничена область  $|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|/(1 + z_{\text{спек.}}) < 0.2$ . Штрих-пунктиром показана прямая  $z_{\text{фот.}} = z_{\text{спек.}}$ .

### 3.5 Точность определения фотометрического красного смещения, полнота и чистота каталога

Точность полученных фотометрических оценок  $z_{\text{фот.}}$  для кандидатов в далекие квазары может быть исследована на основе выборки из 329 квазаров с известным спектроскопическим красным смещением  $z_{\text{спек.}} > 3$  (рис. 3.7). Разброс значений  $z_{\text{фот.}}$  относительно  $z_{\text{спек.}}$  удобно оценивать (см., например, Хоаглин и др. 1983, Сальвато и др. 2009) через нормированную медиану абсолютного отклонения величины  $\Delta z = |z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|$ :

$$\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})} = 1.48 \times Me \left( \frac{|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|}{1 + z_{\text{спек.}}} \right). \quad (3.4)$$

В нашем случае (для квазаров с известным  $z_{\text{спек.}} > 3$ )  $\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})} = 0.07$ . При этом процент больших выбросов — доля объектов с  $|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|/(1 + z_{\text{спек.}}) > 0.2 \approx 3\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})}$ , оказывается равным  $\eta = 9\%$ .

Отметим, что стандартные доверительные интервалы для фотометрического красного смещения ПО *EAZY* недооценены (Дален и др., 2013; Хильдебрандт и др., 2008). Только у

примерно 30% объектов нашей выборки спектроскопические красные смещения находятся в пределах  $2\sigma$  погрешности  $z_{\text{фот.}}$  (определенной стандартным образом по изменению значения  $\chi^2$  вблизи его минимума), поэтому будем ориентироваться только на величину  $\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})}$  при обсуждении точности фотометрических красных смещений.

Что касается полноты полученного каталога кандидатов в далекие квазары, то ее в первом приближении также можно оценить на основе спектроскопической выборки из 329 известных квазаров на  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Для этого рассмотрим отношение количества объектов из этой выборки, для которых была получена хорошая фотометрическая оценка красного смещения,  $\Delta z/(1+z_{\text{спек.}}) < 0.2$ , к полному числу объектов спектроскопической выборки на данном  $z$ . Оцененная таким образом полнота каталога составляет около 80% (синяя сплошная линия на рис. 3.8).

Однако ясно, что эта оценка не может считаться вполне достоверной, поскольку используемая спектроскопическая выборка была составлена только по оптическим данным и может существенно отличаться по своим свойствам от рентгеновской выборки квазаров. Действительно, в нашем каталоге, который составлен на основе рентгеновского обзора, имеется гораздо больше объектов на единицу площади неба, некоторые из которых могут быть квазарами на  $z > 3$ . Более того, в оценке полноты по отношению ко всем рентгеновским квазарам (на заданном рентгеновском потоке) следует также учитывать объекты, которые видны в качестве рентгеновских источников в обзоре *3XMM-DR4*, но являются слишком слабыми в оптическом диапазоне и поэтому не попадают ни в наш каталог, ни в спектроскопическую выборку.

Настоящая чистота каталога, т. е. отношение числа настоящих квазаров на  $z > 3$  к числу всех объектов каталога, исследуется в главе 4 путем проведения спектроскопических наблюдений представительной подвыборки объектов нашего каталога. Здесь мы приводим только нижний предел на чистоту нашего каталога, который показан на рис. 3.8 штриховой красной линией. Он получается как отношение квазаров спектроскопической выборки, вошедших в наш каталог, к числу всех объектов каталога, отобранных по  $z_{\text{фот.}}$ .

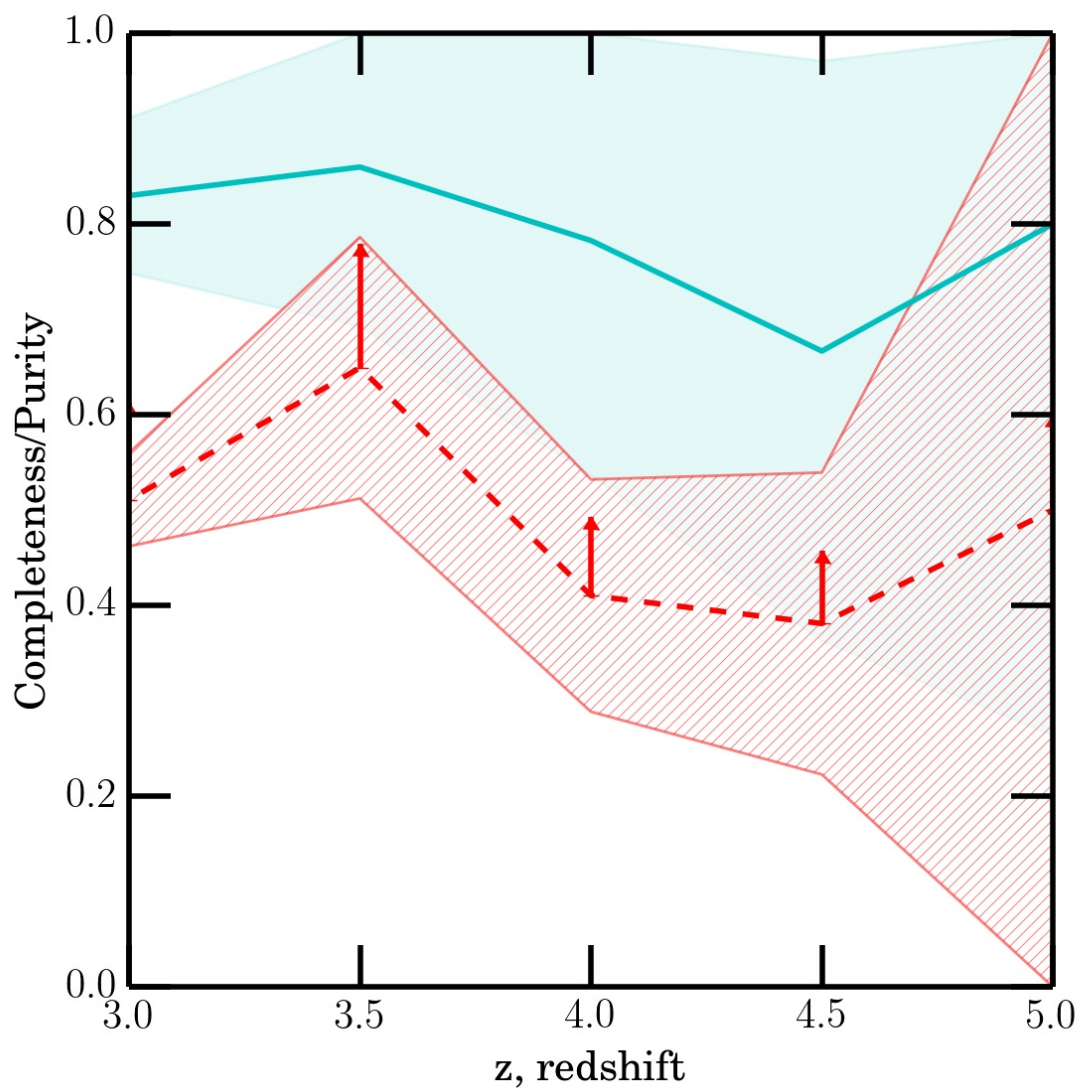


Рис. 3.8: Полнота (синяя сплошная линия и соответствующая область неопределенности, связанная с  $1\sigma$  пуассоновской ошибкой) и чистота (красный пунктир и соответствующая область неопределенности) отбора кандидатов в зависимости от красного смещения в интервалах шириной 0.5. График построен относительно спектроскопической выборки (329 объектов с  $3 < z_{\text{спек.}} < 5.5$ ) Данная зависимость построена в интервалах шириной 0.5 по красному смещению. Стрелки означают, что чистоту относительно спектроскопической выборки надо рассматривать как нижний предел настоящей чистоты, которая на данный момент неизвестна.

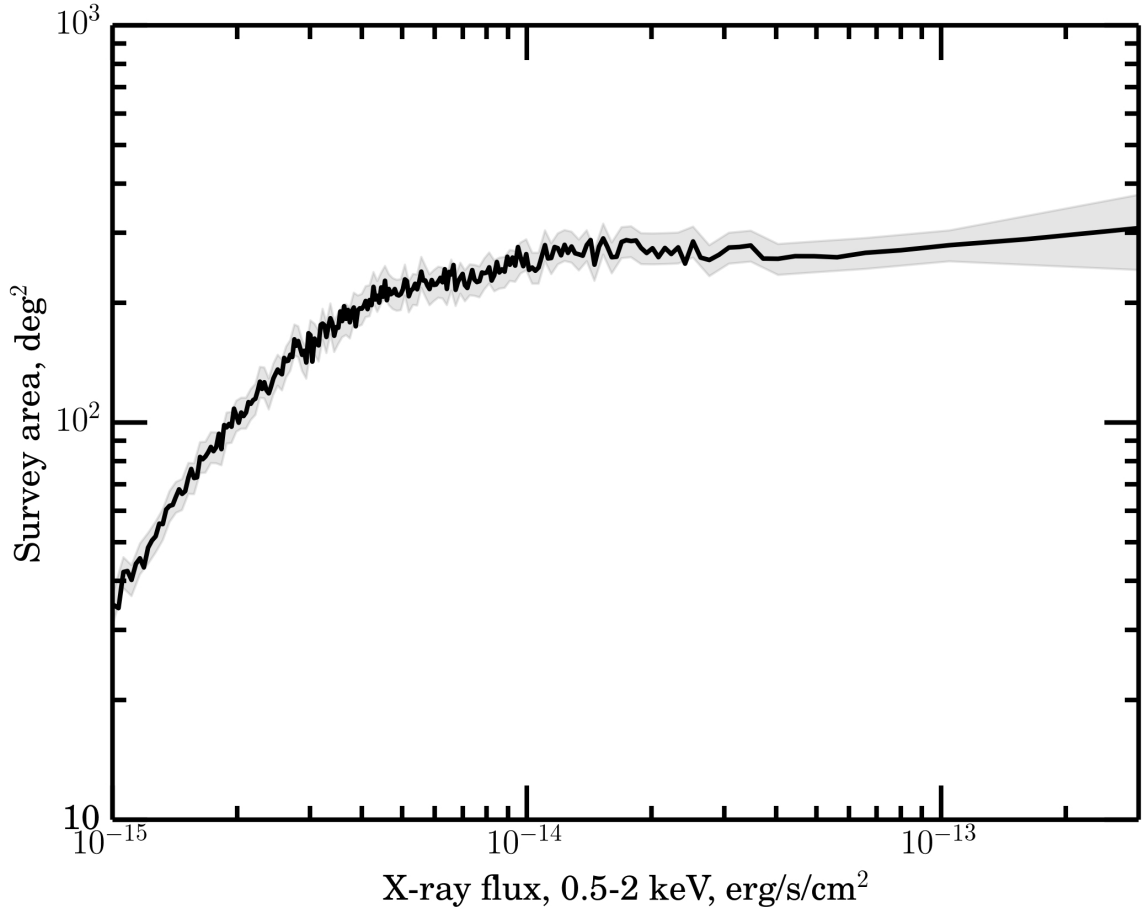


Рис. 3.9: Площадь обзора (*3XMM-DR4*) в зависимости от рентгеновского потока (0.5–2 кэВ) в областях с покрытием *SDSS* на галактических широтах  $|b| > 20^\circ$ . Серая область —  $2\sigma$  пуассоновские ошибки.

### 3.6 Площадь рентгеновского обзора и кривая подсчетов

Полная геометрическая площадь перекрытия рентгеновского обзора *3XMM-DR4* и фотометрического обзора *SDSS* составляет около 300 кв. град на галактических широтах  $|b| > 20^\circ$ . Оценку площади обзора в зависимости от рентгеновского потока можно получить как отношение полного числа рентгеновских источников *3XMM-DR4* в площадках *SDSS* к ожидаемой плотности таких источников на небе в соответствующих интервалах по рентгеновскому потоку. Ожидаемая плотность источников на заданном потоке рассчитывалась, используя приближение из работы Матеос и др. (2008), в которой было проведено подробное исследование статистики источников *XMM-Ньютон* на общей площади 132 кв. град на высоких галактических широтах,  $|b| > 20^\circ$ . Полученная таким образом оценка площади представлена на рис. 3.9.

С помощью этой оценки площади обзора в зависимости от рентгеновского потока можно построить кривую подсчетов ( $\log N - \log S$ ) кандидатов в квазары на  $z > 3$ . Чтобы учесть то обстоятельство, что не все квазары на  $z > 3$  среди рентгеновских источников обзора *3XMM-DR4* видны также на оптических изображениях Слоановского обзора, кривую подсчетов можно соответствующим образом исправить. Для этого можно использовать оценку доли рентгеновских квазаров на  $z > 3$ , имеющих фотометрию *SDSS* на заданном рентгеновском потоке, которая обсуждалась выше (см. рис. 3.1). Кривая подсчетов квазаров на  $z > 3$

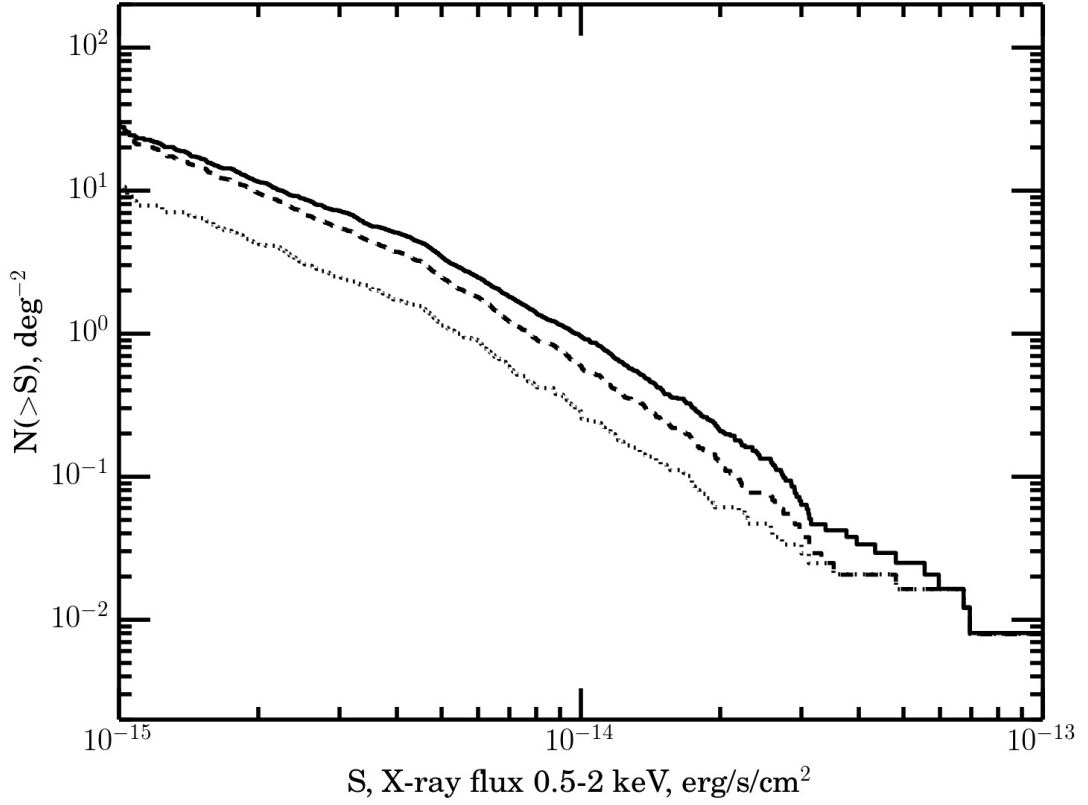


Рис. 3.10: Черной сплошной линией показано  $\log N$ – $\log S$  распределение кандидатов в квазары на  $z > 3$  (т.е. с  $z_{\text{фот.}} > 2.75$ ). Точками показано  $\log N$ – $\log S$  распределение только для тех объектов этой выборки, у которых известно спектроскопическое красное смещение  $z_{\text{спек.}} > 3$ , пунктиром — для объектов, у которых  $z_{\text{спек.}} > 3$  или отсутствует  $z_{\text{спек.}}$ . Истинная кривая подсчетов квазаров на  $z > 3$  должна лежать между этими двумя кривыми.

построена следующим образом:

$$N(> S) = \sum_{i=1}^{N_S} \frac{1}{\Omega_i \alpha_i}, \quad (3.5)$$

где  $\Omega_i \equiv \Omega(S_i)$  — площадь обзора на потоке  $S_i$ ;  $\alpha_i \equiv \alpha(S_i)$  — доля рентгеновских квазаров на  $z > 3$ , которые имеют фотометрию Слоановского обзора, а суммирование происходит по  $N_S$ - источникам с потоками  $S_i \geq S$ . Кривая подсчетов, полученная по всем объектам нашего каталога, представлена на рис. 3.10 черной сплошной линией. Эта кривая, однако, на самом деле не отражает настоящего распределения квазаров на  $z > 3$  по рентгеновскому потоку, поскольку известно, что в наш каталог попало заметное число объектов с красным смещением  $z_{\text{спек.}} < 3$  и пропущено 63 квазара с  $z_{\text{спек.}} > 3$ , поэтому на рис. 3.10 показаны еще две кривые подсчетов: только для источников с  $z_{\text{спек.}} > 3$  (пунктирная линия) и для источников, у которых либо нет спектра, либо  $z_{\text{спек.}} > 3$  (штриховая линия). Истинная кривая подсчетов должна лежать между этими двумя кривыми.

### 3.7 Заключение к главе 3

Мы провели поиск кандидатов в квазары на  $z > 3$  в каталоге рентгеновских источников *3XMM-DR4*, используя фотометрические данные обзоров *SDSS*, *2MASS* и *WISE*. Составлен каталог 903 кандидатов в квазары с фотометрическими красными смещениями  $z_{\text{фот.}} > 2.75$ .

Предварительные оценки качества отбора с помощью каталога спектроскопических красных смещений *SDSS DR12* (дополненного квазарами из недавно опубликованного каталога Флеш 2015) для рентгеновских источников *XMM-Ньютон (3XMM-DR4)* показывают, что полнота нашей выборки составляет около 80%, а ее чистота — не менее 50%. Чистота будет уточнена в главе 4 с помощью оптических наблюдений новых кандидатов в квазары. Полнота зависит от рентгеновского потока и фотометрического порога. Эта зависимость будет обсуждаться в главе 5 и использоваться для построения рентгеновской функции светимости.

Точность фотометрических оценок красных смещений составила:  $\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{спек.}})} = 0.07$  при  $\approx 9\%$  выбросов. Эта точность сравнима с другими подобными измерениями, выполненными по фотометрическим данным Слоановского обзора (см., например, Китсионас и др., 2005). Такой точности достаточно, чтобы проводить измерения функции светимости (см. главу 5).

Примерно половина ярких объектов в нашей выборке имеет измеренное красное смещение. Остальные объекты — это новые кандидаты в квазары. Объекты нашей выборки имеют видимую звездную величину  $i' \lesssim 21.5$ . Это позволило провести спектроскопические наблюдения новых кандидатов на 6-м телескопе САО РАН, а также на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. На телескопе АЗТ-ЗЗИК недавно был установлен новый спектрограф среднего и низкого разрешения, который хорошо подходит для отождествления далеких квазаров (Буренин и др., 2016). Результаты проведенных наблюдений обсуждаются в главе 4. С помощью наблюдений удалось оценить качество выборки и подтвердить большое число квазаров на  $z > 3$  большой светимости. Это позволило получить выборку, состоящую на 90% из спектроскопически подтвержденных квазаров, и провести более точные измерения их рентгеновской функции светимости (см. главу 5).

Отметим, что на основе данных фотометрического каталога *SDSS* ранее уже было создано несколько каталогов кандидатов в квазары с фотометрическими оценками красного смещения (например, Ричардс и др. 2009; Бови и др. 2012), а в недавней работе ДиПомпео и др. 2015 использовались также и данные обзора *WISE*. Принципиальное отличие нашего метода отбора квазаров состоит в том, что результаты этого отбора (плотность квазаров на небе) могут быть представлены в виде зависимости от рентгеновского потока, что важно для последующего построения рентгеновской функции светимости. Предварительное сравнение показало, что наша выборка кандидатов в квазары на  $z \sim 3$  практически идентична (в исследуемых нами площадках на небе) выборке ДиПомпео и др. (2015). Однако на  $z \gtrsim 4$  есть существенные расхождения между выборками. Спектроскопические наблюдения новых кандидатов с  $z_{\text{фот.}} \gtrsim 4$ , обсуждаемые в главе 4, подтвердили, что действительно в нашем каталоге есть настоящие квазары на  $z > 4$ , которые не обнаружены другими авторами. Следовательно, наш алгоритм позволяет повысить полноту отбора редких квазаров на больших красных смещениях и расширить выборку известных квазаров.

Алгоритмы отбора квазаров на высоких красных смещениях, опробованные в нашей работе, в будущем можно будет применить для отбора таких объектов среди рентгеновских источников обзора всего неба обсерватории СРГ. Как это видно, в частности, из результатов нашей работы, в обзоре СРГ можно будет обнаружить порядка нескольких десятков тысяч квазаров на  $3 < z < 6$ . Этот уникальный наблюдательный материал позволит в подробностях исследовать историю роста сверхмассивных черных дыр в эпоху активного формирования галактик.



# Литература

- Аирд и др. (J. Aird, A. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, P. Perez-Gonzalez) MNRAS **451**, 1892 (2015)
- Аихара и др. (H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, S. F. Anderson, E. Aubourg, E. Balbinot, et al.) Astrophys. J. Suppl. Ser. **193**, 29 (2011)
- Алам и др. (S. Alam, F. Albareti, C. Prieto, F. Anders, S. Anderson, B. Andrews, et al.) Astrophys. J. Suppl. Ser. **219**, 12 (2015)
- Ан и др. (C. Ahn, R. Alexandroff, P. Allende, S. Anderson, T. Anderton, B. Andrews, et al.) Astrophys. J. Suppl. Ser. **203**, 21 (2012)
- Ассеф и др. (R.J. Assef, C.S. Kochanek, M. Brodwin, R. Cool, W. Forman, A. Gonzalez, et al.) Astrophys. J. **713**, 970 (2010)
- Ассеф и др. (R.J. Assef, C.S. Kochanek, M. Ashby, M. Brodwin, M. Brown, R. Cool, et al.) Astrophys. J. **713**, 970 (2010)
- Бови и др. (J. Vovv, J. Hennawi, D. Hogg, A. Myers, J. Kirkpatrick, D. Schlegel, et al.) Astrophys. J. **729**, 141 (2011)
- Бови и др. (J. Vovv, A. Myers, J. Hennawi, D. Hogg, R. McMahon, D. Schiminovich, et al.) Astrophys. J. **749**, 41 (2012)
- Браммер и др. (G Brammer, P. van Dokkum, P. Coppi) Astrophys. J. **686**, 1503 (2008)
- Буренин (P. A. Буренин и др.) Письма в Астрон. журн., в печати
- Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk, G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, T. Heckman) Astron. J. **122**, 549 (2001)
- Ватсон и др. (M. Watson, A. Schroder, D. Fyfe, C. Page, G. Lamer, S. Mateos, et al.) Astron. Astrophys. **493**, 339 (2009)
- Ву и др. (X. Wu, G. Hao, Z. Jia, Y. Zhang, N. Peng) Astron. J. **144**, 49 (2012)
- Гавигнауд и др. (I. Gavignaud, A. Bongiorno, S. Paltani, G. Mathe, G. Zamorani, P. Moller, et al.) Astron. Astrophys. **457**, 79 (2006)
- Дален и др. (T. Dahlen, B. Mobasher, S. Faber, H. Ferguson, G. Barro, S. Finkelstein, et al.) Astrophys. J. **775**, 93 (2013)
- Дипомпео и др. (M.A. DiPompeo, J. Vovv, A. Myers, D. Lang) MNRAS **452**, 312 (2015)
- Ильберт и др. (O. Ilbert, S. Arnouts, H. McCracken, M. Bolzonella, E. Bertin, E. Bertin, et al.) Astron. Astrophys. **457**, 841 (2006)

- Калфунцоу и др. (E. Kalfountzou, F. Civano, M. Elvis, M. Trichas, P. Green) *MNRAS* **445**, 1430 (2014)
- Калцетти и др. (D. Calzetti, L. Armus, R. Bohlin, A. Kinney, J. Koornneef, T. Storchi-Bergmann) *Astrophys. J.* **533**, 682 (2000)
- Катри и др. (R. Cutri, M. Skrutskie, S. van Dyk, C. Beichman, J. Carpenter, T. Chester, et al.) *The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive.* **06**, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003tmc..book.....C> (2003)
- Кентер и др. (A. Kenter, S. Murray, W. Forman, C. Jones, P. Green, C. Kochanek, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **161**, 9 (2005)
- Ким и др. (M. Kim, B. Wilkes, D. Kim, P. Green, W. Barkhouse, M. Lee, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **169**, 401 (2007)
- Китсионас и др. (S. Kitsionas, E. Hatziminaoglou, A. Georgakakis, I. Georgantopoulos) *Astron. Astrophys.* **434**, 475 (2005)
- Кравчик, Ричардс, Мехтаи др. (C. Krawczyk, G. Richards, S. Mehta, M. Vogeley, S. Gallagher, K. Leghly, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **206**, 4 (2013)
- Ласкер и др. (B. Lasker, C. Sruoch, B. McLean, J. Russel, H. Jenkner, M. Shara) *Astron. J.* **99**, 2019 (1990)
- Лемер и др. (B. Lehmer, Y. Xue, W. Brandt, D. Alexander, F. Bauer, M. Brusa, et al.) *Astrophys. J.* **752**, 46 (2012)
- Матеос и др. (S. Mateos, R. Warwick, F. Carrera, G. Stewart, J. Ebrero, R. Della, et al.) *Astron. Astrophys.* **492**, 51 (2008)
- А. Мещеряков, В. Глазкова, С. Герасимов., Р. Буренин. () *Письма в Астрон. журн.* **41**, 339 (2015)
- Мадау (P. Madau) *Astrophys. J.* **441**, 18 (1995)
- Пиклз (A. Pickles) *PASP* **110**, 863 (1998)
- Полетта и др. (M. Polletta, M. Tajer, L. Maraschi, G. Trinchieri, C. Lonsdale, L. Chiappetti, et al.) *Astrophys. J.* **663**, 81 (2007)
- Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.) *Astron. J.* **140**, 1868 (2010)
- Ричардс и др. (G. Richards, X. Fan, H. Newberg, M. Strauss, D. Vanden Berk, D. Schneider, et al.) *Astron. J.* **123**, 2945 (2002)
- Ричардс и др. (G. Richards, M. Lacy, L. Storrie-Lombardi, P. B. Hall, S. Gallagher, D. Hines, X. Fan) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **166**, 470 (2006)
- Ричардс и др. (G. Richards, A. Myers, A. Gray, R. Riegel, R. Nichol, R. Brunner, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **180**, 67 (2009)
- Росс и др. (N. Ross, A. Myers, E. Sheldon, C. Yeche, M. Strauss, B. Jo, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, 3 (2012)

- Росс и др. (N. Ross, I. McGreer, M. White, G. Richards, A. Myers, N. Palanque-Delabrouille, et al.) *Astrophys. J.* **773**, 14 (2013)
- Сальвато и др. (M. Salvato, G. Hasinger, O. Ilbert, G. Zamorani, M. Brusa, N. Scoville, et al.) *Astrophys. J.* **690**, 1250 (2009)
- Симм и др. (T. Simm, R. Saglia, M. Salvato, R. Bender, W. Burgett, K. Chambers, et al.) *Astron. Astrophys.* **584**, 106 (2015)
- Скржишек и др. (N. Skrzypek, S. Warran, J. Faherty, D. Mortlock, A. Burgasser, P. Hewett) *Astron. Astrophys.* **574**, 78 (2015)
- Флеш (E. W. Fleisch) *Publications of the Astronomical Society of Australia* **32**, 010 (2015); arXiv:1502.06303
- Хильдебрандт и др. (H. Hildebrandt, C. Wolf, N. Benitez) *Astron. Astrophys.* **480**, 703 (2008)
- Хоаглин и др. (D.C. Hoaglin, F. Mosteller, J. W. Tukey) *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis* (Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics), New York, 1983
- Цивано и др. (F. Civano, M. Brusa, A. Comastri, M. Elvis, M. Salvato, G. Zamorani, et al.) *Astrophys. J.* **741**, 91 (2011)
- Цивано и др. (F. Civano, M. Elvis, M. Brusa, A. Comastri, M. Salvato, G. Zamorani, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **201**, 30 (2012)
- Эйзенштейн и др. (D. Eisenstein, D. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, C. Allende Prieto, S. F. Anderson, et al.) *Astron. J.* **142**, 72 (2011)
- Элвис и др. (M. Elvis, F. Civano, C. Vignali, S. Puccetti, F. Fiore, N. Cappelluti, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **184**, 158 (2009)

## Глава 4

# Оптическая спектроскопия кандидатов в квазары на $3 < z < 5$

Эта глава основана на результатах статей:

Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич, Письма в астрономический журнал, 2017, 43, 159

Khorunzhev G., Sazonov S., Burenin R., Eselevich M., Front. Astron. Space Sci., 2017, 4, 37  
<https://doi.org/10.3389/fspas.2017.00037>

### 4.1 Введение

Поиск квазаров на  $z \gtrsim 3$  является одним из важнейших элементов исследования истории роста сверхмассивных черных дыр и эволюции массивных галактик во Вселенной. Для построения функции рентгеновской светимости квазаров на  $z \gtrsim 3$  требуется набрать большую и хорошо определенную рентгеновскую выборку таких объектов на потоках  $\sim 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> (0.5–2 кэВ).

Числа найденных источников со светимостями  $> 10^{44}$  эрг/с в глубоких рентгеновских обзорах спутников *XMM*-Ньютон и *Чандра* (характерные потоки  $10^{-16} - 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 0.5–2 кэВ и площади порядка одного квадратного градуса) оказываются недостаточно, чтобы детально проследить эволюцию активных ядер галактик больших светимостей (Цивано и др., 2012; Вито и др., 2014). Исследование выборок более ярких квазаров ведется за счет добавления данных из менее глубоких рентгеновских обзоров *XBootes*, *XMM-XXL*, *Champ* (характерные потоки  $\sim 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ). За счет этих обзоров площадь покрытия неба вырастает в  $\sim 10$  раз (Уеда, 2014; Аирд и др., 2015; Георгакакис и др., 2015). Но выясняется (Калфоунцоу и др., 2014), что для исследования свойств популяции квазаров на  $z > 3.5$  и со светимостями  $> 5 \times 10^{44}$  эрг/с даже площадей покрытия в 10–30 кв. град оказывается недостаточно.

В предыдущей главе 3 предпринята попытка найти новые источники и получить более полную выборку рентгеновских квазаров на  $z > 3$  в площадках «случайного» обзора обсерватории *XMM*-Ньютон. В совокупности с фотометрическими данными оптического Слоановского обзора (*SDSS*, Алам и др., 2015) и инфракрасных обзоров *2MASS* (Катри и др., 2003) и *WISE* (Райт и др., 2010) обзор *3XMM-DR4* имеет общую площадь покрытия неба  $\approx 300$  кв. град. Эта площадь на порядок превышает области покрытия перечисленных выше рентгеновских обзоров, что позволяет заняться поиском самых ярких и далеких квазаров в плохо исследованном диапазоне светимостей  $5 \times 10^{44} - 5 \times 10^{45}$  эрг/с.

В главе 3 были получены фотометрические оценки красных смещений ( $z_{\text{фот.}}$ ), и был составлен каталог 903 кандидатов в далекие квазары, отобранных по фотометрическому красному смещению (*K16*). В каталог попали как уже известные квазары (со спектроскопиче-

скими красными смещениями  $z_{\text{спек.}} > 3$ ), так и новые неисследованные объекты (с фотометрическими оценками красного смещения  $z_{\text{фот.}} > 2.75$ ).

В каталоге *K16* около 40% кандидатов не имеют спектроскопического красного смещения. Это новые кандидаты в квазары. Если среди них большинство действительно окажется квазарами на  $z > 3$ , то существующая выборка далеких квазаров *3XMM-DR4* может быть расширена в  $\sim 1.5$  раза (Хорунжев и др., 2016). Чтобы понять точность оценки  $z_{\text{фот.}}$  и оценить чистоту отбора кандидатов в квазары, надо проводить их спектроскопическую проверку. Получение спектров нескольких сотен объектов, «разбросанных» по небесной сфере, — трудоемкая задача. Однако можно снять спектры небольшой «случайной» выборки и на их основе сделать предварительные выводы о качестве оценок  $z_{\text{фот.}}$  новых источников.

Для решения данной задачи была подготовлена программа наблюдений кандидатов в далекие квазары на  $3 < z < 5.5$  из каталога *K16*. С помощью 1.6-м телескопа АЗТ-ЗЗИК и 6-м телескопа БТА удалось получить спектры для 18 квазислучайно выбранных источников. В этой главе обсуждаются результаты проведенных наблюдений и делается вывод о чистоте отобранных кандидатов в квазары.

## 4.2 Наблюдения на телескопе АЗТ-ЗЗИК со спектрографом низкого и среднего разрешения АДАМ

На телескопе АЗТ-ЗЗИК (Камус и др., 2002), оборудованном спектрографом низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016), проведен «квазислучайный» спектроскопический обзор 18 кандидатов в квазары каталога *K16*, которые ранее не имели спектроскопического красного смещения.

Телескоп АЗТ-ЗЗИК расположен в Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской Академии наук (ССО ИСЗФ СО РАН) и имеет диаметр главного зеркала 1.6 м. Спектрограф АДАМ изготовлен в Специальной астрофизической обсерватории (САО) и в 2015 году установлен на АЗТ-ЗЗИК. Основные конструктивные элементы спектрографа: ПЗС-матрица *Andor Newton 920* с эффективностью около 90% в диапазоне от 4000 до 8500Å и набор диспергирующих элементов (объемно-голографических решеток). Квантовая эффективность всей системы (зеркала телескопа, спектрограф, решетки и ПЗС-матрица) достигает 50% (Буренин и др., 2016).

Целевые объекты выборки *K16* — это квазары с широкими эмиссионными линиями. Типичная видимая звездная величина объектов  $i' \sim 20.5$ . Время экспозиции выбиралось достаточным, чтобы проявились яркие линии эмиссии, по которым можно определить красное смещение квазара. Это позволяет при помощи небольшого телескопа получить спектры для значительного числа источников. Для определения красного смещения и типа источников без ярких линий требуются спектры с более высоким отношением сигнал-шум в континууме. Для этого нужно проводить повторные наблюдения с более длительной экспозицией или на телескопах большего размера.

Свойства выборки *K16* существенно меняются с ростом красного смещения: экспоненциально падает число объектов, рентгеновские и оптические потоки становятся слабее. В среднем объекты каталога *K16* находятся на  $z_{\text{спек.}} \sim 3$  и имеют звездные величины  $i' \sim 20.5$ . Кандидатов на  $z_{\text{фот.}} > 4$  в каталоге *K16* всего несколько десятков со звездными величинами  $i' > 20.5$ . Мы выбирали источники для наблюдения практически случайно внутри двух интервалов:  $2.75 < z_{\text{фот.}} < 4$  и  $z_{\text{фот.}} \geq 4$ , однако в диапазоне  $2.75 < z_{\text{фот.}} < 4$  в первую очередь наблюдались яркие кандидаты с  $i' < 20$ . Эти особенности выбора объектов для спектроскопической программы необходимо учитывать при формулировании выводов о чистоте всего каталога квазаров *K16*.

Наблюдения кандидатов в квазары проводились в темное время (фаза Луны меньше 0.3)

и при средних величинах дрожания атмосферы лучше 2 угловых секунд. При таких условиях часовой экспозиции достаточно для детектирования эмиссионных линий в спектре квазаров с величинами  $i' = 20.5$ . Для наблюдений использовалась щель шириной 2 угловых секунды. Объекты на  $z_{\text{фот.}} < 3.5$  снимались решеткой VPHG600G (диапазон 3700–7340 Å, разрешение 8.8 Å); объекты на  $3.5 < z_{\text{фот.}} < 4.5$  — решеткой VPHG300 (диапазон 3900–10500 Å, разрешение 13.8 Å); объекты на  $4.5 < z_{\text{фот.}}$  — решеткой VPHG600R (диапазон 6520–10100 Å, разрешение 7.3 Å). Указанные выше разрешения получены для щели шириной 2". Подбиралась такая решетка, чтобы предполагаемое положение линии  $\text{Ly}\alpha$  оказывалось вблизи пика ее дифракционной эффективности. Обработка данных проводилась при помощи стандартного математического обеспечения IRAF<sup>1</sup>.

## 4.3 Результаты

Список объектов приведен в табл. 4.2 (их спектры показаны ниже на рис. 4.4). Форма спектров исправлена с использованием наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка Масси (1998). Из 18 объектов 14 оказались квазарами, из них 10 источников — это квазары на  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Их красное смещение определено по положению пиков широких линий в спектре. Тип остальных объектов определить затруднительно, так как в их спектрах отсутствуют яркие эмиссионные линии.

Точность определения красного смещения далеких объектов зависит от разрешения спектрографа как  $(1+z)\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  — и приблизительно равна 0.01 для спектров низкого разрешения. Поэтому значения спектроскопического красного смещения для объектов приведены с точностью до второго знака после запятой. Известно, что форма и положение широких линий тесно связаны с процессами, протекающими вблизи черной дыры. Красное смещение, определенное по широким линиям, может немного отличаться от значения  $z_{\text{спек.}}$  родительской галактики. С осторожностью нужно относиться к значениям красных смещений в спектрах, где видна только линия  $\text{Ly}\alpha$ . Ее форма может быть сильно искажена поглощением, следовательно, положение ее пика может быть определено неверно. Такие объекты отмечены в табл. 1 флагом «QF=1».

Спектроскопическая выборка 18 «случайно» выбранных объектов имеет медианный рентгеновский поток  $\approx 5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ. Это значение совпадает с медианным рентгеновским потоком источников каталога *K16*. Среди выбранных объектов не оказалось ярких квазаров с сильными эмиссионными линиями на  $z_{\text{спек.}} > 3$  на потоках  $> 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ. Медианное значение видимой звездной величины  $i' = 19.9$ , что на 0.5 величины ярче среднего значения для каталога *K16*. Таким образом, выборку 18 источников можно считать репрезентативной по рентгеновскому потоку для каталога *K16*, но не по оптическому.

### 4.3.1 Квазар 3ХММ J125329.4+305539 на $z = 5.08$

На телескопах АЗТ-33ИК и БТА был открыт и подтвержден далекий рентгеновский квазар 3ХММ J125329.4+305539 на  $z_{\text{спек.}} = 5.08$  и видимой звездной величиной  $i' = 21$ . Спектры с АЗТ-33ИК и БТА показаны на рис. 4.1.

Первый спектр этого объекта получен на телескопе АЗТ-33ИК с помощью спектрографа АДАМ за полтора часа экспозиции. По спектру удалось определить, что источник является далеким квазаром, и измерить его красное смещение  $z_{\text{спек.}} = 5.1$ . Обычно для получения спектров подобных источников требуются телескопы большего диаметра. Но, как видно из полученных результатов (см. рис. 4.1), с помощью нового спектрографа с высоким квантовым

<sup>1</sup><http://iraf.noao.edu>

выходом в близком инфракрасном диапазоне на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК можно получать спектры слабых объектов (до  $i' \approx 21$ ), определять их тип и красное смещение.

Для уточнения спектроскопического красного смещения за получасовую экспозицию был получен спектр с более высоким отношением сигнал-шум и разрешением  $18\text{\AA}$  на 6-м телескопе БТА с помощью спектрографа SCORPIO (Афанасьев и Моисеев, 2005). Красное смещение  $z_{\text{спек.}} = 5.08 \pm 0.01$  было определено аппроксимацией полученного спектра шаблоном квазара первого типа (Ванден Берк и др., 2001), в который внесено межгалактическое поглощение на нейтральном водороде (Мадау, 1995). Ошибка положения шаблона является заниженной, поскольку шаблон является усредненной моделью спектра, которая не учитывает индивидуальных отклонений в спектре отдельного источника. Поэтому, приведенная ошибка оценена через спектральное разрешение прибора.

Источник *3XMM J125329.4+305539* был впервые объявлен как вероятный квазар на  $z_{\text{фот.}} = 4.64$  в каталоге *K16*, и сведений о нем не было в других фотометрических каталогах кандидатов в квазары<sup>2</sup>. Он не являлся целевым объектом наведения телескопа *XMM-Newton* (т.е. попал случайно в его поле зрения). Его видимая звездная величина в фильтре SDSS  $i' \approx 21.0$ . Рентгеновский поток равен  $1.5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ, светимость —  $4 \times 10^{44}$  эрг/с в 0.5–2 кэВ в системе наблюдателя.

Кроме данного источника в каталоге *3XMM-DR4* известно всего лишь три оптически ярких (есть достоверная фотометрия SDSS) рентгеновских квазара на  $z_{\text{спек.}} > 5.0$ , которые не являлись целевыми объектами наведения *XMM-Newton*: *3XMM J221643.9+001346* ( $z_{\text{спек.}} = 5.01$ ,  $i' \approx 20.3$ ) Андерсон и др. (2001); Гавиньо и др. (2006), *3XMM J011544.8+001513* ( $z_{\text{спек.}} = 5.10$ ,  $i' \approx 21.4$ ) МакГрир (2013), *3XMM J022112.5-034251* ( $z_{\text{спек.}} = 5.01$ ,  $i' \approx 19.3$ ) Пэрис (2016). Первые два были найдены в полосе 82 SDSS, где чувствительность Слоановского обзора гораздо лучше, чем в среднем по небу, следовательно полнота отбора выше.

Отметим, что в каталоге *K16* есть еще один источник *3XMM J004054.6-091527* с опубликованным спектроскопическим красным смещением  $z_{\text{спек.}} = 5.002$  по данным 12 выпуска Слоановского обзора. Однако в статье (Ворсек и др., 2014) приведены более свежие результаты спектроскопии ( $z_{\text{спек.}} = 4.980 \pm 0.010$ ) этого источника, полученные на телескопе большего диаметра. Поэтому объект *3XMM J004054.6-091527* больше не рассматривается как квазар на  $z_{\text{спек.}} > 5.0$ .

Таким образом, исследованный нами объект *3XMM J125329.4+305539* является одним из наиболее ярких и далеких рентгеновских квазаров на  $z_{\text{спек.}} > 5.0$ , подходящих для построения функции рентгеновской светимости на таких красных смещениях. Красные смещения, звездные величины, рентгеновские потоки источника *3XMM J125329.4+305539* и трех других перечисленных выше далеких квазаров приведены в табл. 2. Отметим, что в каталоге *3XMM-DR4* есть и еще более далекие квазары, но они являлись целевыми источниками наведения рентгеновского телескопа (после их открытия в оптике) и поэтому не могут использоваться при построении функции рентгеновской светимости.

### 4.3.2 Замечания по отдельным источникам

**3XMM J025459.8+192343.** Источник ( $z_{\text{спек.}} = 2.81$ ) не входит в опубликованный каталог *K16*, но тем не менее включен в табл. 4.2. Его спектр был получен в первые ночи работы АДАМ, когда он был кандидатом в промежуточной версии *K16*. Мы считали, что источник имеет фотометрическое красное смещение  $z_{\text{фот.}} = 2.6$ , и теоретически он мог бы оказаться на  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Этот источник входит в каталог кандидатов в квазары (Ричардс и др., 2015), где его наилучшая оценка фотометрического красного смещения 3.295.

**3XMM J062923.4+634935.** В спектре этого квазара ( $z_{\text{спек.}} = 2.88$ ) есть набор узких линий поглощения. Мы предполагаем, что наиболее четкие линии из них это:  $\lambda_{H\beta 4861} = 5696\text{\AA}$ ,

<sup>2</sup><http://vizier.u-strasbg.fr>

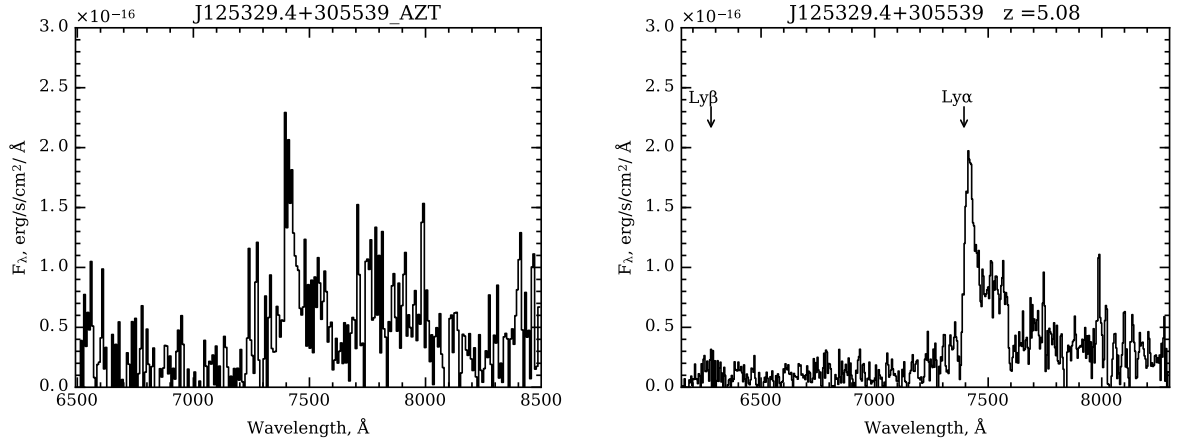


Рис. 4.1: Спектры далекого квазара *3ХММ J125329.4+305539* ( $z_{\text{спек.}} = 5.08$ ), полученные на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК (слева) и 6-метровом телескопе БТА (справа). Соседние спектральные каналы сгруппированы по 2 вдоль оси длин волн.

Таблица 4.1: Свойства отобранных в рентгене квазаров на  $z_{\text{спек.}} > 5$

Название (ХММ)	$z_{\text{фот.}}$	$z_{\text{спек.}}$	$i'$	$F^{-14}$	$L_{0.5-2}$
J011544.8+001513	0.61	5.10	21.4	0.19	44.7
J022112.5-034251	4.74	5.01	19.3	0.61	45.2
<b>J125329.4+305539</b>	4.64	5.08	20.9	0.15	44.6
J221643.9+001346	4.91	5.01	20.3	0.22	44.8

**Примечание.**  $z_{\text{фот.}}$  — фотометрическое красное смещение объекта в каталогке К16;  $z_{\text{спек.}}$  — спектроскопическое красное смещение;  $i'$  — видимая звездная величина в фильтре  $i'$  SDSS;  $F^{-14}$  — рентгеновский поток (эрг/с/см<sup>2</sup>) в диапазоне 0.5–2 кэВ, нормированный на  $10^{-14}$ ;  $L_{0.5-2}$  — десятичный логарифм рентгеновской светимости (эрг/с в 0.5–2 кэВ в системе наблюдателя).



$\lambda_{MgI5175} = 6077\text{\AA}$ ,  $\lambda_{NaI5891} = 6895\text{\AA}$ . Вероятно, на луче зрения между нами и объектом (на красном смещении  $z_{\text{спек.}} \simeq 0.17$ ) находится облако межгалактического газа, которое дает такую структуру линий.

**3ХММ J103901.4+643335.** Это далекий квазар на  $z_{\text{спек.}} = 4.08$ . Он находится в области перекрытия обзоров телескопов *ХММ-Ньютон* и *Чандра*. Оба телескопа обнаружили рентгеновский поток от этого источника. Источник был впервые объявлен как кандидат в квазары в каталоге *K16* с  $z_{\text{фот.}} = 4.01$ . Известных рентгеновских квазаров на  $z_{\text{спек.}} \sim 4$  всего несколько десятков. Поэтому подтверждение данного источника имеет высокую значимость для изучения популяции квазаров на таких красных смещениях.

**3ХММ J131213.0+352347.** Этот источник имеет  $z_{\text{фот.}} = 4.92$ . На фоне больших шумов в спектре видны особенности, характерные для звезд М-класса.

### 4.3.3 Дополнительные замечания к каталогу K16

После публикации каталога K16, в результате дополнительного просмотра литературы, мы обнаружили, что источники *3ХММ J122004.8+291304* и *3ХММ J172014.1+264712* были ошибочно включены в каталог K16 как кандидаты в квазары. Эти рентгеновские источники оказались объектами близкой Вселенной.

**3ХММ J122004.8+291304.** Это шаровое скопление в гало близкой галактики NGC 4278 (*NGC 4278-X30* или *CXO J122005.011+291304.73* (Лиу, 2011; Ушер, 2012)).

**3ХММ J172014.1+264712.** Источник является галактикой скопления *RX J1720.1+2638* на  $z = 0.338$  (Оверс и др., 2011).

Эта информация включена в таблицу 4.2

Таблица 4.2: Красные смещения квазислучайной спектральной выборки.

Name 3XMM	Дата	RA	DEC	OBJID SDSS	$F_{0.5-2}^{-14}$	$i'_{PSF}$	$z_{\text{фот.}}$	$z_{\text{спек.}}$	QF	$z_{\text{фот.}, D15}$	$z_{\text{фот.}, R15}$	$L_{0.5-2}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
J025459.8+192343	2015/10/13	43.7490	19.3957	1237673283585769514	1.448	19.17	2.60	2.81	*1			44.98
J062923.4+634935	2015/11/16	97.3468	63.8263	1237666462651646831	0.724	19.37	3.16	2.88	0	2.89	3.30	44.71
J074047.4+310856	2016/03/04	115.1979	31.1490	1237654627323216286	0.687	19.36	2.88	3.04	1	2.98	2.92	44.74
J074405.8+284354	2016/03/07	116.0246	28.7321	1237657119477924495	2.213	20.29	3.46		1			
J091740.4+161412	2016/03/09	139.4182	16.2366	1237667782815777585	0.412	20.27	3.42	3.51	1	3.46	3.45	44.67
J103148.9+584418	2015/11/16	157.9533	58.7395	1237655368745222588	0.492	19.60	3.33	3.62	0	3.60		44.78
J103901.4+643335	2016/03/05	159.7552	64.5593	1237651271895941447	0.332	20.55	4.01	4.08	1			44.73
J110518.4+250027	2016/02/04	166.3267	25.0085	1237667551956435181	0.377	19.95	3.21	3.56	1	3.51		44.64
J114529.7+024647	2016/03/04	176.3740	2.7799	1237654030330691765	0.569	19.01	2.85	2.68	0	2.72		44.52
J120641.1+651138	2016/02/05	181.6706	65.1941	1237651066815709744	0.178	19.53	3.34	3.47	0		3.45	44.29
J124232.3+141729	2016/03/10	190.6350	14.2914	1237662524694528017	0.517	18.39	2.82		1	1.91		
J125329.4+305539	2016/03/09	193.3721	30.9277	1237667255629579190	0.155	20.99	4.64	5.08	0			44.62
J131213.0+352347	2016/03/07	198.0539	35.3966	1237665026520318032	0.029	20.52	4.92		1	5.15		
J133200.0+503613	2016/02/05	202.9998	50.6037	1237662301357736036	0.776	19.59	3.78	3.83	1	3.93		45.03
J135538.5+383210	2016/03/08	208.9105	38.5361	1237662226223071466	0.395	19.23	2.90	2.86	1		2.97	44.43
J141625.4+361901	2016/04/07	214.1057	36.3162	1237662225151361223	1.573	19.86	3.33		1			
J151633.3+071039	2016/03/05	229.1385	7.1777	1237662237485564867	0.375	20.00	3.75	3.81	1	3.90		44.71
J215240.0+140206	2015/10/13	328.1669	14.0351	1237678601291760405	2.155	19.45	3.15	2.17	0	2.38		44.88
J234214.1+303606	2015/09/18	355.5590	30.6017	1237666183498039666	0.799	19.92	3.20	3.37	0	3.42		44.91
J122004.8+291304		185.0209	29.2179	1237665440975159694	0.279	20.73	3.38	0.002	*2			
J172014.1+264712		260.0592	26.7864	1237655501891110649	0.436	20.96	4.21	0.338	*3			

**Примечание.** Name — имя в каталоге 3XMM-DR4 (3XMMJ...), Дата — год/месяц/день, когда был получен первый спектр объекта, RA — прямое восхождение, DEC — склонение, OBJID SDSS — уникальный номер в фотометрическом каталоге SDSS,  $F_{0.5-2}^{-14}$  — рентгеновский поток (эрг/с/см<sup>2</sup>) в диапазоне 0.5-2 кэВ, нормированный на  $10^{-14}$ ,  $i'$  — видимая звездная величина в фильтре  $i'$  SDSS (AB, PSF),  $z_{\text{фот.}}$  — фотометрическое красное смещение в каталоге *K16*,  $z_{\text{спек.}}$  — спектроскопическое красное смещение, QF — флаг качества для  $z_{\text{спек.}}$  (0 - красное смещение измерено по нескольким линиям, 1 - красное смещение определено по единственной линии  $Lu\alpha$ , \*1 Объект *J025459.8+192343* не входит в каталог *K16* (его спектр был получен ещё до формирования каталога), \*2 Объект является шаровым скоплением в близкой галактике Лиу (2011); Ушер (2012), \*3 Объект является галактикой (Оверс и др., 2011)),  $z_{\text{фот.}, D15}$  — фотометрическое красное смещение (PEAKZ) в каталоге (ДиПомпео и др., 2015),  $z_{\text{фот.}, R15}$  — фотометрическое красное смещение (ZPHOTBEST) в каталоге (Ричардс и др., 2015).  $L_{0.5-2}$  — десятичный логарифм рентгеновской светимости в диапазоне 0.5–2 кэВ.

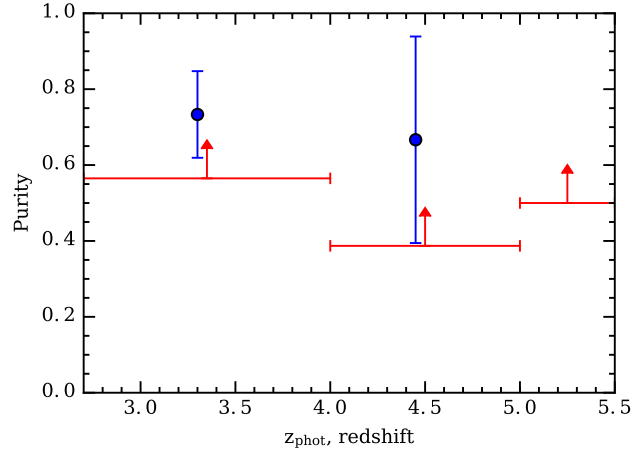


Рис. 4.2: Кружками с пуассоновскими ошибками показана чистота 18 кандидатов в квазары, спектры которых получены на АЗТ-ЗЗИК. Стрелками показана оценка нижнего предела чистоты каталога *K16* относительно объектов с известными (из литературы или Слоановского обзора) спектроскопическими красными смещениями.

#### 4.3.4 Чистота квазислучайной спектроскопической выборки и каталога *K16*

Мы получили спектроскопические красные смещения 18 кандидатов в квазары, отобранных квазислучайным образом из каталога *K16*. Оценим чистоту этой выборки в широких интервалах по фотометрическому красному смещению:  $2.75 \leq z_{\text{фот.}} < 4$ ,  $4 \leq z_{\text{фот.}} < 5$ ,  $5 \leq z_{\text{фот.}} < 5.5$ . Под чистотой подразумевается отношение числа настоящих квазаров ( $|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|/(1 + z_{\text{спек.}}) < 0.2$ ) к числу всех объектов со снятыми спектрами. Условие  $|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|/(1 + z_{\text{спек.}}) < 0.2$  введено, чтобы учесть разброс значений  $z_{\text{фот.}}$  относительно  $z_{\text{спек.}}$ . Величина 0.2 примерно соответствует трем стандартным отклонениям  $z_{\text{фот.}}$  относительно  $z_{\text{спек.}}$  для всех известных и спектроскопически подтвержденных квазаров из полного каталога *K16* (см. Хорунжев и др. (2016)). Рассчитанная таким образом чистота спектроскопической выборки из 18 объектов показана на рис. 4.2 (кружками).

Для сравнения на рис. 4.2 стрелками показан нижний предел чистоты всего каталога *K16* (без учета наблюдений на АЗТ-ЗЗИК). Этот предел был выведен как отношение числа настоящих квазаров с известным спектроскопическим красным смещением и  $|z_{\text{фот.}} - z_{\text{спек.}}|/(1 + z_{\text{спек.}}) < 0.2$  к полному числу объектов каталога. Напомним, что источники-кандидаты, у которых отсутствует спектроскопическое красное смещение, составляли около 40% объектов *K16*.

Так как чистота каталога *K16* изначально была выше 50%, а среди 18 объектов оптической спектроскопии АЗТ-ЗЗИК более половины оказались квазарами на  $z_{\text{спек.}} > 3$ , то можно сделать предварительный вывод, что истинная чистота каталога кандидатов в далекие квазары *K16* составляет 70–80%. Этот вывод еще предстоит уточнить, так как выборка для наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК не была абсолютно случайной и состояла из относительно ярких (для каталога *K16*) объектов.

#### 4.3.5 Систематические наблюдения далеких квазаров

После получения спектров для квазислучайной выборки мы стали использовать систематический подход для выбора объектов наблюдений. Было решено разбить все источники на 3 группы по приоритету: яркие в рентгене квазары, которые нужны для построения рентгеновской функции светимости; наиболее далекие квазары с  $z_{\text{фот.}} > 4$ ; остальные объекты.

Конечная цель наблюдений — получить максимально возможное число спектров кандидатов в квазары из соответствующих подвыборок. В результате планомерной работы удалось снять спектры ещё 30 кандидатов в квазары, что составляет  $\approx 10\%$  от всех кандидатов совместно с квазислучайной выборкой.

В первую очередь нас интересовали яркие в рентгене квазары, чья светимость будет выше  $10^{45}$  эрг/с. Именно такие источники нужны для построения модели рентгеновской функции светимости (см. главу 5). Они в среднем ярче в оптике, и среди них большой процент уже известных квазаров. Всего 20% таких кандидатов не имели спектра. Удалось получить спектры для половины источников (проверены все кандидаты на «весенней» части неба). Таким образом,  $\approx 90\%$  источников, используемых для построения рентгеновской функции светимости, теперь имеют спектроскопическое подтвержденное красное смещение.

Самых далеких квазаров на  $z > 4$  известно немного, и каждый найденный квазар представляет отдельный интерес. Удалось проверить все кандидаты в далекие квазары с  $z_{\text{фот.}} > 5$ . Среди них не оказалось ни одного настоящего квазара — все они являются звездами М-класса. Подтверждены ещё 3 квазара на  $z_{\text{спек.}} > 4$ , один из которых 3ХММ J133002.7+241118 имеет  $z_{\text{спек.}} = 4.90$ , при этом его фотометрическое красное смещение  $z_{\text{фот.}} = 4.74$ .

Остальные источники — это кандидаты на  $z_{\text{фот.}} \gtrsim 2.7$ . Среди объектов этой группы, много оптически ярких источников, которые снимались в случае плохой погоды.

На рисунке 4.3 показана уточненная чистота кандидатов в квазары, пересчитанная относительно квазислучайной выборки с учетом дополнительных спектров. Видно, что предсказания чистоты, полученные по квазислучайной выборке (см. рис. 4.2) согласуются с результатами систематических наблюдений. В интервале  $4 \leq z_{\text{фот.}} < 5$  чистота оказалась ниже ожидаемой. Двойные объекты, помеченные флагом «D» в таблице 3.1 главы 3, портят чистоту выборки в соответствующем интервале красных смещений. Оценки  $z_{\text{фот.}}$  таких кандидатов оказываются ошибочными по следующей причине. Как правило, рентгеновским источником является соседний объект, он же дает сильный инфракрасный поток. Обычно это квазар на  $0.5 < z < 2.5$ . А фотометрический кандидат на  $z_{\text{фот.}} > 4$  оказывается звездой М-класса, случайно попавшей в область локализации рентгеновского источника. Для таких звезд классификация звезда-квазар работает плохо, особенно, в случае неправильного отождествления в инфракрасном диапазоне из-за близости источников и недостаточного углового разрешения *WISE*. Ошибочно приписанный или неправильно измеренный поток *WISE* «превращает» звезду М-класса в квазар с  $z_{\text{фот.}} > 4$ . Примерно 25% кандидатов в интервале  $4 \leq z_{\text{фот.}} < 5$  оказываются двойными источниками. С ростом глубины оптических обзоров эта доля будет увеличиваться. Данный эффект нужно учитывать в будущем, при поиске квазаров на  $z_{\text{фот.}} > 4$ .

## 4.4 Заключение к главе 4

В данной работе показано, что чистота квазислучайной выборки 18 кандидатов в квазары из каталога *K16* превышает 50%. Строго говоря, это справедливо только для ярких в оптике источников,  $i' \lesssim 20$ . Спектроскопия отобранных в рентгене кандидатов в далекие квазары, обнаруженных с помощью улучшенного метода отбора по общедоступным фотометрическим данным Слоановского обзора и инфракрасного обзора *WISE*, подтвердила, что можно найти больше квазаров по сравнению с имеющимися каталогами (Ричардс и др., 2015; ДиПомпео и др., 2015). Открытие одного из самых далеких отобранных в рентгене квазаров (3ХММ J125329.4+305539 на  $z_{\text{спек.}} = 5.08$ ) убедительно доказывает это.

Помимо нового квазара 3ХММ J125329.4+305539 в каталоге *K16* присутствуют еще три оптически ярких ( $i' < 21$ ) квазара на  $z_{\text{спек.}} > 5$ . Рентгеновские потоки этих четырех объектов превышают  $1.5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 0.5–2 кэВ, а светимости —  $4 \times 10^{44}$  эрг/с. С такой или лучшей чувствительностью покрыто около 50 кв. град. в областях перекрытия обзора *3ХММ-DR4* и Слоановского обзора (см. рис. 3.9 в главе 3). В этой связи интересно от-

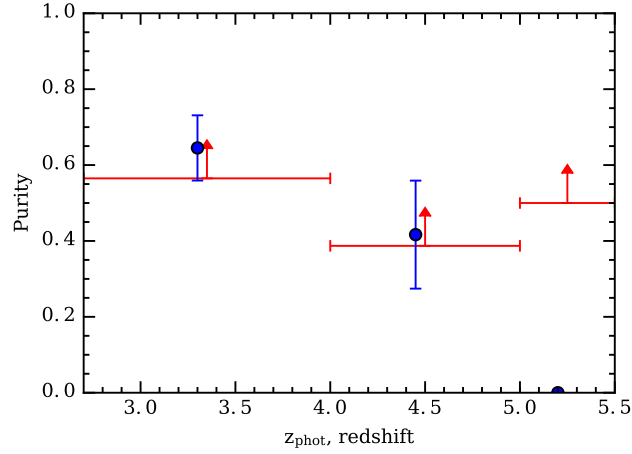


Рис. 4.3: Кружками с пуассоновскими ошибками показана чистота для 48 кандидатов в квазары. Стрелками показана оценка нижнего предела чистоты каталога *K16* относительно объектов с известными (из литературы или Слоановского обзора) спектроскопическими красными смещениями. Видно, что в интервале  $5 \leq z_{\text{фот.}} < 5.5$  ни один из кандидатов в квазары не подтвердился.

метить, что примерно такая же ( $\sim 3 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup>) предельная чувствительность должна быть достигнута в планируемом четырехлетнем обзоре неба телескопом еРОЗИТА обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (СРГ) в районе полюсов эклиптики на площади около 150 кв. град (Мерлони, 2012). Следовательно, в этих площадках можно будет обнаружить несколько новых оптически ярких квазаров на  $z > 5$  с рентгеновской светимостью выше  $\sim 10^{45}$  эрг/с. Полное же число квазаров на  $z > 5$ , открытых телескопом еРОЗИТА в районе полюсов эклиптики, может оказаться гораздо большим (десятки или даже сотни, Колодзиг и др. 2013), но большинство из них, по всей видимости, окажутся слабее порога чувствительности Слоановского обзора. Для их отождествления в оптике потребуются более глубокие оптические обзоры, например: *PanSTARRS* Ходапп и др. (2004), обзоры участков неба, проведенные прибором *Hyper Suprime-Cam* (Миядзаки, 2012) на 8-м телескопе Subaru.

Для проверки основной массы объектов каталога *K16* ( $i' \sim 20.5$ ,  $z_{\text{фот.}} \sim 3$ ) нужен телескоп с большим диаметром зеркала чем АЗТ-33ИК. Значительная часть далеких квазаров *Спектр-РГ* будет ещё слабее в оптике, что потребует ещё больших усилий для спектроскопической поддержки. Самые далекие ( $z_{\text{фот.}} > 4$ ) объекты наблюдались на 6-м телескопе БТА.

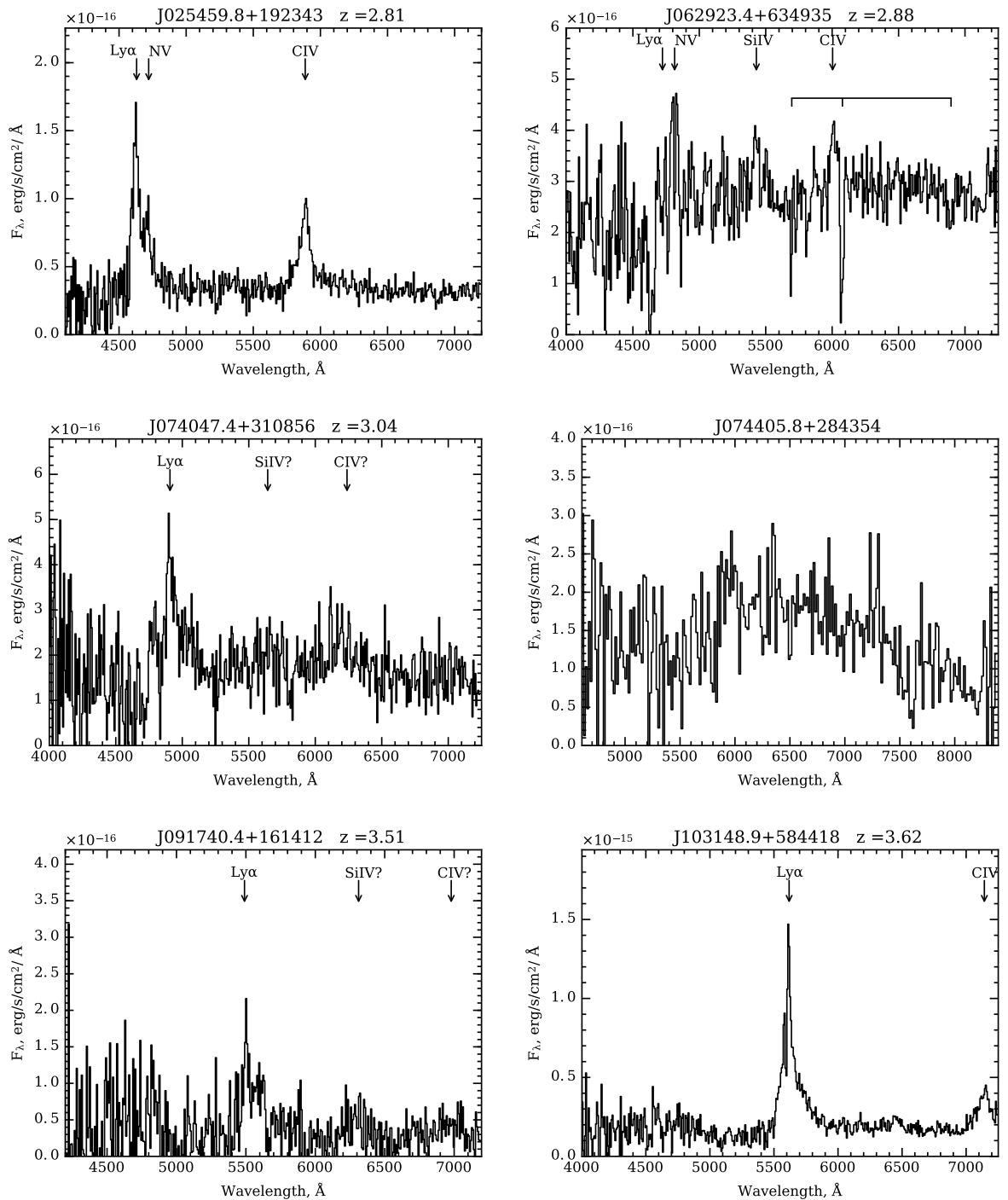
Отметим также, что в каталоге *K16* не оказалось рентгеновских квазаров или кандидатов в квазары на  $z > 5$  с потоками выше  $10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> (соответствует средней чувствительности по всему небу четырехлетнего обзора еРОЗИТА), т.е. светимостью выше  $\sim 3 \times 10^{45}$  эрг/с в 0.5–2 кэВ, на площади  $\approx 250$  кв. град. Это согласуется с предсказаниями Георгакакис и др. (2015), сделанными на основе модели рентгеновской функции светимости квазаров на  $3 < z < 5$ . Следовательно, можно ожидать, что в обзоре еРОЗИТА будет найдено не более  $\sim 500$  оптически ярких квазаров на  $z > 5$  со светимостью выше  $3 \times 10^{45}$  эрг/с (0.5–2 кэВ).

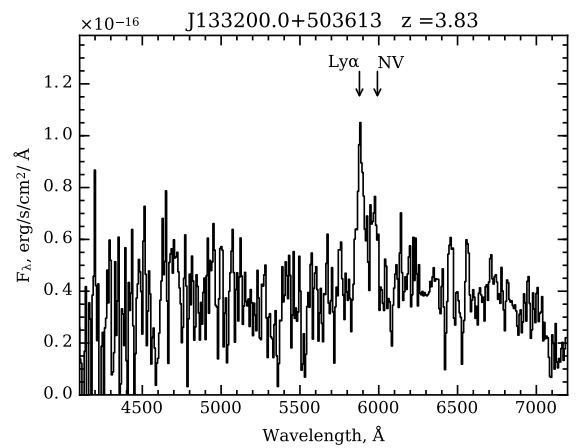
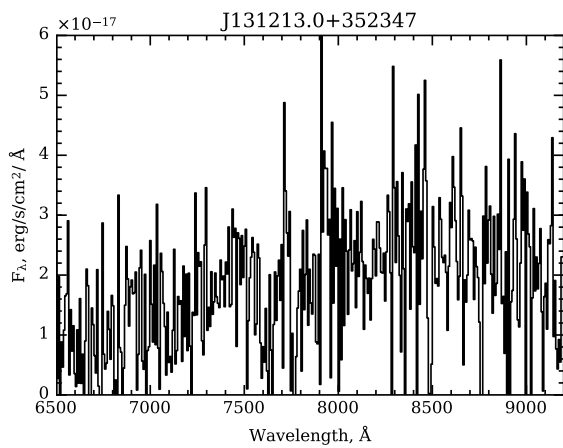
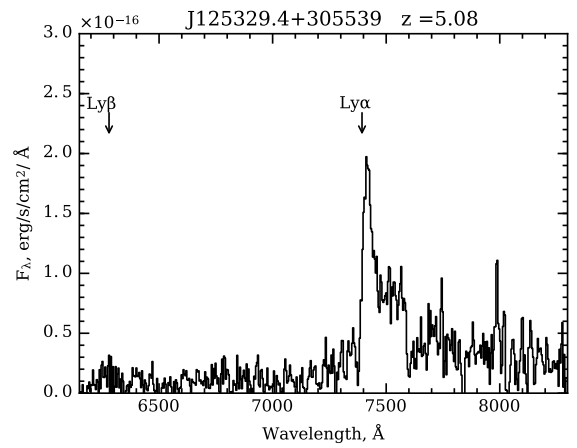
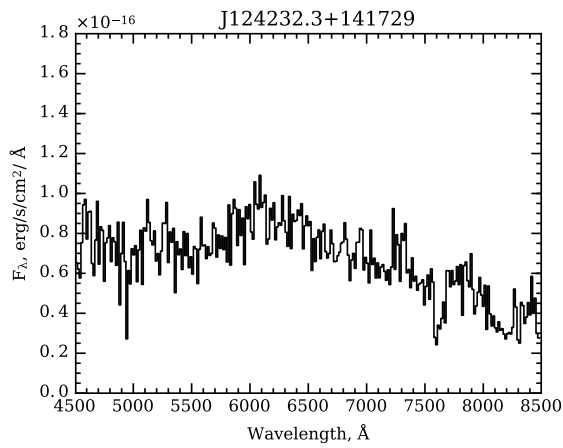
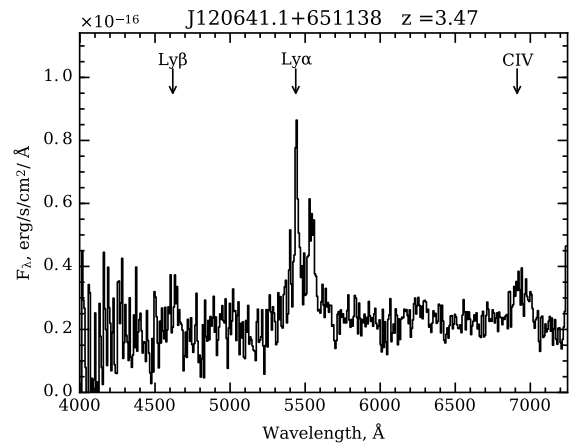
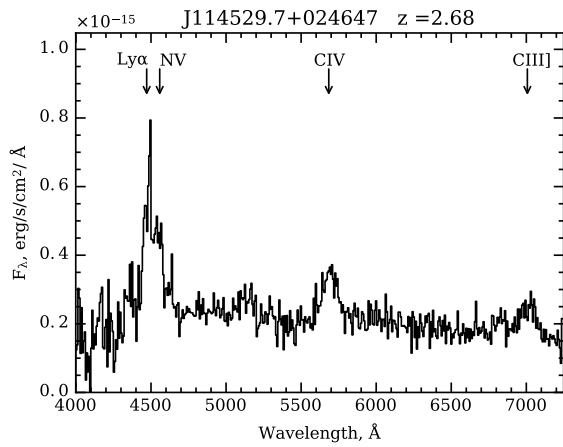
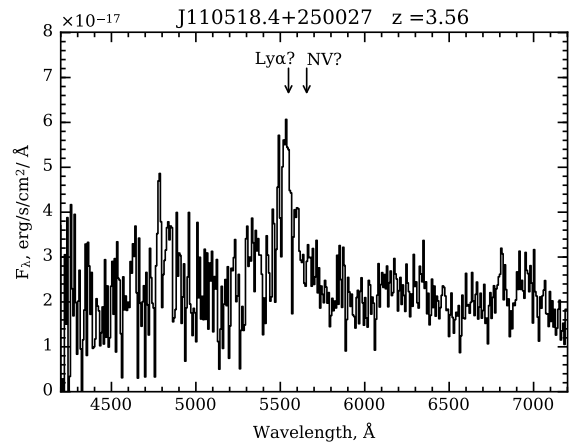
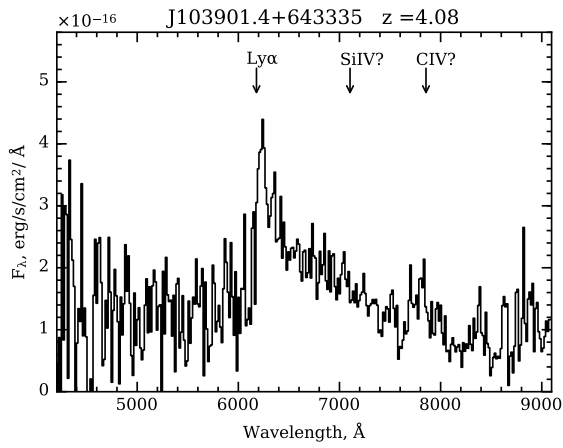
Нам удалось проверить значительную долю кандидатов в яркие рентгеновские квазары. Это позволит в следующей главе 5 уточнить параметры моделей рентгеновской функции светимости далеких квазаров. Это, например, поможет сделать более точные оценки числа далеких квазаров в обзоре *Спектр-РГ*, когда после прилета спутника в точку лагранжа L2 будут точно известны характеристики фона.

Полученные в данной работе спектры квазаров демонстрируют уникальные возможности нового спектрографа АДАМ, установленного на телескопе АЗТ-33ИК в Саянской солнечной обсерватории. Спектрограф АДАМ позволяет за экспозицию в 30 мин получать спектры объ-

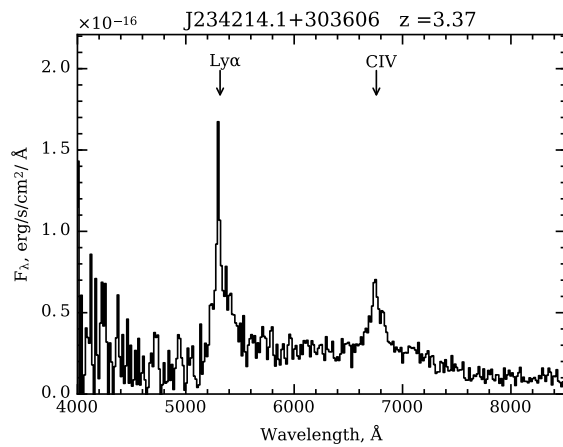
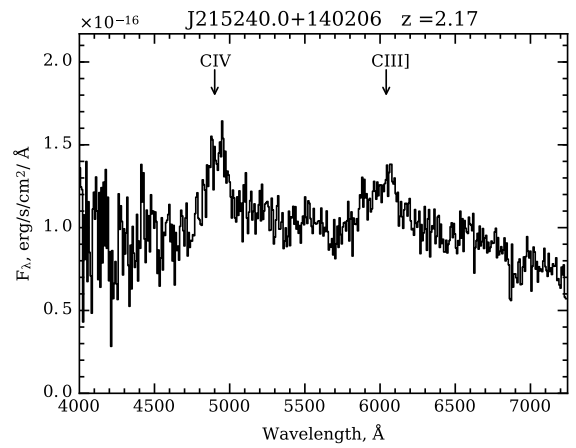
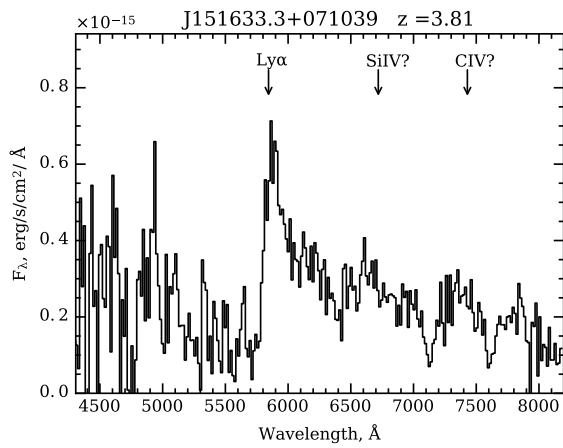
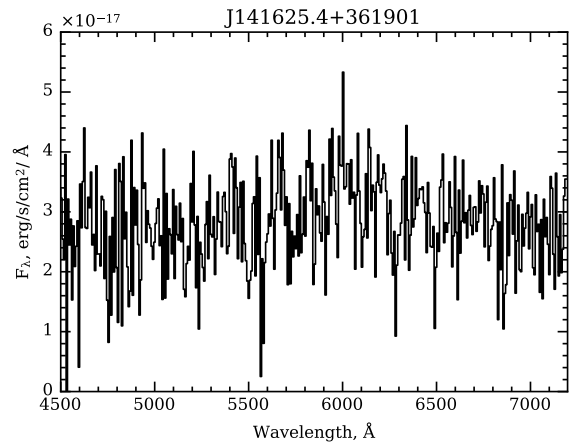
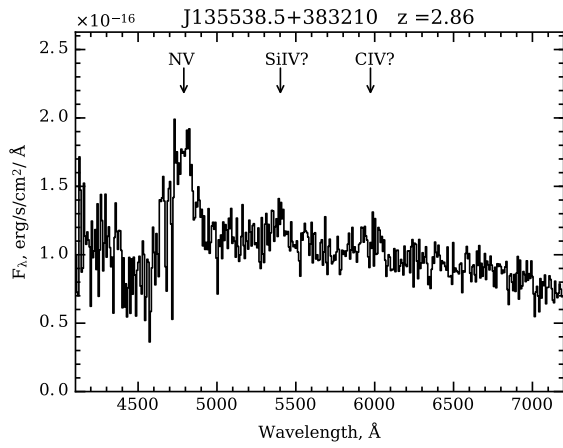
ектов  $R \sim 19.5$  видимой звездной величины. При необходимости и хороших погодных условиях за два часа экспозиции можно достичь  $I \sim 21$  звездной величины. Планируется, что спектрограф АДАМ будет одним из инструментов оптической поддержки проекта СРГ (Мерлони, 2012; Павлинский и др., 2011).

Рис. 4.4: Спектры 19 кандидатов в квазары (включая объект ЗХММ J025459.8+192343, не попавший в окончательную версию каталога *K16*), полученные спектрографом АДАМ на телескопе АЗТ-33ИК или (только ЗХММ J125329.4+305539) спектрографом SCORPIO на телескопе БТА. Для объекта ЗХММ J062923.4+634935 горизонтальной линией с метками показан комплекс линий поглощения облака межгалактического газа на красном смещении  $z_{\text{спек.}} \approx 0.17$ :  $\lambda_{H\beta 4861} = 5696\text{\AA}$ ,  $\lambda_{MgI 5175} = 6077\text{\AA}$ ,  $\lambda_{NaI 5891} = 6895\text{\AA}$ . Соседние спектральные каналы сгруппированы по 2 вдоль оси длин волн.









# Литература

- Аирд и др. (J. Aird, A. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, and P. Perez-Gonzalez) MNRAS **451**, 1892 (2015)
- Алам и др. (S. Alam, F. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, S. Anderson, T. Anderton, B. Andrews, E. Armengaudet et al.) Astrophys. J. Suppl. Ser. **219**, 12 (2015)
- Андерсон и др. (S. Anderson, X. Fan, G. Richards, D. Schneider, M. Strauss, D. Vanden Berk, E. Gunn, G. Knapp et al.) Astron. J. **122**, 503 (2001)
- Афанасьев В.Л. и Моисеев А.В. () Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005)
- Афанасьев В., Додонов С., Амирхонян В., Моисеев А. () Астрофиз. Бюлл. **71(4)**, (2016)
- Браммер и др. (G Brammer, P. van Dokkum, and P. Coppi) Astrophys. J. **686**, 1503 (2008)
- Буренин и др. (Буренин. Р.А., Амвросов А. Л., Еселевич М.В., Григорьев М.В., Арефьев В.А., Воробьев В.С., Лутовинов А.А, Ревнивцев М.Г., и др.) Письма в Астрон. журн. **42**, 333 (2016) (R. Burenin, A. Amvrosov, M. Eselevich, V. Grigorev, V. Arefiev, V. Vorobyev, A. Lutovinov, M. Revnivitsev, et al.) Astron. Letters **42**, 295 (2016)
- Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk., G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, T. Heckman, D. York, P. Hall, et al.) Astron. J. **122**, 549 (2001)
- Ватсон и др. (M. Watson, A. Shroder, D. Fyfe, C. Page, G. Lamer, S. Mateos, J. Pye, M. Sakano, et al.) Astron. Astrophys. **493**, 339 (2009)
- Вито и др. (F. Vito, R. Gilli, C. Vignali, A. Comastri, M. Brusa, N. Cappelluti, K. Iwasawa) MNRAS **445**, 3557 (2014)
- Ворсек и др. (G. Worseck, X. Prochaska, J. O'Meara, G. Becker, S. Ellison, S. Lopez, A. Meiksin, M. Avery, M. Brice, et al.) MNRAS **445**, 1745 (2014)
- 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)
- Гавиньо и др. ( I. Gavignaud, A. Bongiorno, S. Paltani, G. Mathez, G. Zamorani, P. Moller, J. Picat, V. Le Brun, et al.) Astron. Astrophys. **457**, 79 (2006)
- ДиПомпео и др. (M.A. DiPompeo, J. Vovv, A. Myers, D. Lang) MNRAS **452**, 312 (2015)
- Калфоунцоу и др. (E. Kalfountzou, F. Civano, M. Elvis, M. Trichas, P. Green) MNRAS **445**, 1430 (2014)
- Камус С.Ф., Тергоев В.И., Папушев П.Г., Дружинин С.А., Караваев Ю.С., Палачев Ю.М., Денисенко С.А., Липин Н.А. () Оптич. журн. **69**, 84 (2002)

- Катри и др. (R. Cutri, M. Skrutskie, S. van Dyk, C. Beichman, J. Carpenter, T. Chester, L. Cambresy, T. Evans, et al.) The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive. **06**, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003tmc..book.....C> (2003)
- Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, M. Brusa) *Astron. Astrophys.* **558**, 89 (2013)
- Лиу и др. (J. Liu) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 10 (2011)
- Мадау (P. Madau) *Astrophys. J.* **441**, 18 (1995)
- МакГрир и др. (I. McGreer, L. Jiang, X. Fan, G. Richards, M. Strauss, and N. Ross) *Astrophys. J.* **768**, 105 (2013)
- Масси и др. (P. Massey, K. Strobel, J. Barnes, E. Anderson) *Astrophys. J.* **328**, 315 (1998)
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, M. Brusa, K. Dennerl, et al.) eROSITA Science Book , (2012) <http://arxiv.org/pdf/1209.3114v2.pdf>
- Миядзаки и др. (S. Miyazaki, Y. Komiyama, H. Nakaya, Y. Kamata, Y. Doi, T. Hamana) *Proceedings of the SPIE* **8446**, 0Z (2012)
- Оверс и др. (M. Owers, S. Randall, P. Nulsen, W. Couch, L. David, J. Kempner) *Astrophys. J.* **728**, 27 (2011)
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, V. Arefiev, A. Glushenko, et al.) *Proceedings of the SPIE* **8147**, 5 (2011)
- Пэрис и др. (I. Paris, P. Petitjean, N. Ross, A. Myers, E. Aubourg, A. Streblyanska, S. Bailey, E. Armengaud, et al.) <http://arxiv.org/pdf/1608.06483v1.pdf>
- Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, D. Kirkpatrick, D. Padgett, et al.) *Astron. J.* **140**, 1868 (2010)
- Ричардс и др. (G. Richards, A. Myers, C. Peters, C. Krawczyk, G. Chase, N. Ross, X. Fan, J. Linhua, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 39 (2015)
- Уида и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, and M. Watson) *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014)
- Ушер и др. (C. Usher, D. Forbes, J. Brodie, C. Foster, L. Spitler, J. Arnold, A. Romanowsky, et al.) *MNRAS* **426**, 1475 (2012)
- Флеш (E.W. Flesch) *Publ. Astron. Soc. of Australia* **32**, 010 (2015); arXiv:1502.06303
- Ходапп и др. (K. Hodapp, N. Kaiser, H. Aussel, W. Burgett, K. Chambers, M. Chun, T. Dombeck, A. Douglas, et al.) *Astron. Nachr.* **325**, 636 (2004)
- Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю. () *Письма в Астрон. журн.* **42**, 313 (2016)
- Цивано и др. (F. Civano, M. Elvis, M. Brusa, A. Comastri, M. Salvato, G. Zamorani, T. Aldcroft, A. Bongiorno, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **201**, 30 (2012)

# Глава 5

## Рентгеновская функция светимости $3 < z < 5$

Эта глава основана на результатах статьи Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, Письма в астрономический журнал, 2018, т. 44, №8-9, 546-568

### 5.1 Введение

Надежное измерение рентгеновской функции светимости активных ядер галактик (АЯГ) большой светимости (далее — «квазаров») и ее поведение на  $z \gtrsim 3$  является одной из важнейших составляющих исследования истории роста сверхмассивных черных дыр и эволюции массивных галактик во Вселенной. Выборки источников глубоких внегалактических рентгеновских обзоров спутников *XMM-Newton* и *Chandra* (характерные потоки  $F_{X,0.5-2} \lesssim 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 0.5–2 кэВ и площади порядка одного квадратного градуса) оказываются недостаточно большими для изучения эволюции квазаров (Цивано и др., 2012; Вито и др., 2014). Улучшить ситуацию позволяет добавление источников из менее глубоких внегалактических обзоров ( $F_{X,0.5-2} \sim 10^{-14}$ – $10^{-13}$  эрг/с/см<sup>2</sup>), покрывающих значительно большие площади (десятки кв. град, Уеда 2014; Аирд и др. 2015; Георгакакис и др. 2015).

В работе Вито и др. (2014) была построена и подробно исследована функция светимости квазаров на  $z > 3$  в диапазоне светимостей  $L_{X,2-10} < 10^{45}$  эрг/с (2–10 кэВ) по совокупным данным нескольких глубоких рентгеновских обзоров общей площадью  $\approx 3.3$  кв. град Георгакакис и др. (2015), используя данные обзора *XMM-XXL* площадью 18 кв. град (характерные потоки источников  $F_{X,0.5-2} \approx 5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup>, Менцель и др. 2016), получили статистически значимые оценки пространственной плотности квазаров на  $z > 3$  для еще больших светимостей ( $L_{X,2-10} \gtrsim 10^{45}$  эрг/с).

В работе Уеда (2014) была изучена эволюция рентгеновской функции светимости АЯГ по совокупности данных большого набора рентгеновских обзоров, в том числе обзора всего неба обсерватории *ROSAT*. При этом выборка источников *ROSAT* включает несколько квазаров очень высокой светимости ( $L_{X,2-10} > 10^{46}$  эрг/с) на  $z > 3$ , что позволило оценить пространственную плотность таких ярчайших и далеких квазаров. Эта оценка оказалась в согласии с предсказаниями эмпирической модели функции светимости, полученной по выборкам источников гораздо меньшей светимости ( $L_{X,2-10} < 10^{45}$  эрг/с).

Калфоунцоу и др. (2014) составили каталог квазаров на  $z > 3$  на площади  $\approx 33$  кв. град по архивным данным отдельных неперекрывающихся наведений спутника *Chandra* за все время его работы. Используя этот каталог, удалось оценить пространственную плотность далеких квазаров со светимостью  $L_{X,2-10} > 5 \times 10^{44}$  эрг/с и исключить некоторые эмпирические модели функции светимости (Калфоунцоу и др., 2014). Однако объема этой выборки все равно оказывается недостаточно для детального исследования свойств популяции самых

ярких ( $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с) и далеких ( $z > 3.5$ ) квазаров.

Накопленные за 15 лет данные космического рентгеновского телескопа ХММ-Ньютон представляют собой «Случайный обзор» неба (Ватсон и др., 2009) общей площадью около 800 кв. град с чувствительностью  $F_{X,0.5-2} \sim 5 \times 10^{-15}$  эрг с<sup>-1</sup> см<sup>-2</sup> (каталог источников версии 3ХММ-DR4<sup>1</sup>, Ватсон и др., 2009). По данным этого обзора можно составить рентгеновскую выборку квазаров на  $z > 3$ , в разы превышающую существующие выборки (Калфоунцоу и др., 2014; Георгакакис и др., 2015), и получить более строгие ограничения на параметры моделей функции светимости. Это и является целью настоящей работы.

В работах (Хорунжев и др., 2016, 2017а) была предпринята попытка поиска новых кандидатов в далекие квазары среди рентгеновских источников каталога 3ХММ-DR4. Её результаты описаны в главах 3, 4 данной диссертации. Был составлен каталог кандидатов в квазары и ранее известных квазаров на  $3 < z < 5.5$  (*K16*). При создании каталога, мы стремились получить как можно более полную выборку рентгеновских квазаров на  $z > 3$  в площадках «Случайного обзора» обсерватории ХММ-Ньютон, чтобы далее использовать её для построения рентгеновской функции светимости. В главах 3, 4 показано, что дополнительный отбор обеспечивает прирост новых источников на  $z > 3$  относительно существующей спектроскопической выборки квазаров: на  $\sim 20\%$  для ярких в оптике ( $z' < 20$ ) и рентгене ( $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с) и на  $\sim 50\%$  для более слабых источников. Следовательно, необходимо использовать новые источники из каталога *K16* для построения рентгеновской функции светимости.

В настоящей работе мы отбираем объекты большой светимости из *K16*, чтобы измерить пространственную плотность ярких ( $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с) квазаров на  $z > 3$  и получить строгие ограничения на наклон функции светимости  $\gamma_2$  в ее яркой части. В своих расчетах мы использовали следующие значения (такие же, как в работе Вито и др., 2014, результаты которой активно используются ниже) космологических постоянных:  $H_0 = 70$  км/с/Мпк,  $\Omega_m = 0.27$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.73$ .

## 5.2 Выборка

Для построения рентгеновской функции светимости использовалась выборка 205 источников, составленная из частей двух каталогов: 101 источник со светимостью  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с из каталога Хорунжев и др. (2016) и 104 непоглощенных источника с  $L_{X,2-10} < 1.1 \times 10^{45}$  эрг/с из каталога Вито и др. (2014).

### 5.2.1 Подвыборка ярких квазаров из каталога *K16*

Для исследования квазаров большой светимости ( $\geq 10^{45}$  эрг/с) был использован каталог квазаров и кандидатов в далекие квазары *K16* (Хорунжев и др., 2016). Рассматривались как объекты из основного каталога, так и источники из дополнительной таблицы известных квазаров с  $z_{\text{спек.}} > 3$ , не прошедших фотометрический отбор. При этом были исключены источники, которые являлись целями наведения телескопа ХММ-Ньютон, и блазар 3ХММ J142437.8+225601. В итоге был отобран 101 источник с рентгеновской светимостью  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с в диапазоне энергий 2–10 кэВ в системе отсчета источника. Светимость рассчитывалась через измеренный поток в диапазоне 0.5–2 кэВ в предположении степенного спектра с наклоном  $\Gamma=1.8$  без поглощения (так же, как в работе Вито и др. 2014 для непоглощенных источников). В случае, когда объект не имел спектроскопического красного смещения, расчет светимости проводился по  $z_{\text{фот.}}$  — оценке фотометрического красного смещения. В результате отбора по светимости получилось, что все источники подвыборки *K16*

<sup>1</sup><http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/xmm-newton/xmssc.html>

имеют рентгеновский поток выше  $4 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup>. Распределение источников по рентгеновскому потоку, светимости и красному смещению показано на рис. 5.1. Список источников приведен в табл. 5.1.

Для 82 из 101 источника было известно  $z_{\text{спек.}} \geq 3$  на момент публикации каталога *K16*. В выборку также попали 8 спектроскопически подтвержденных кандидатов с  $z_{\text{спек.}} \geq 3$ , спектры которых были получены на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН и 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в ходе проводимой нами программы поиска далеких квазаров (Хорунжев и др., 2017а,б, 2018). Остальные 11 объектов — это кандидаты в квазары с фотометрическими оценками красного смещения  $z_{\text{фот.}} \geq 3$ , однозначно отождествленные в оптике (без флага «D» в каталоге *K16*). Источник 3ХММ J114816.0+525900 ( $z_{\text{спек.}} = 3.173$ ) имеет самую большую светимость ( $L_{\text{X},2-10} = 7.4 \times 10^{45}$  эрг/с). Источник 3ХММ J022112.5-034251 является самым далеким ( $z_{\text{спек.}} = 5.011$ ,  $L_{\text{X},2-10} = 1.9 \times 10^{45}$  эрг/с). Полученная выборка содержит в несколько раз больше рентгеновски ярких квазаров, чем ранее использовавшиеся данные рентгеновских обзоров меньшей площади (Калфоунцоу и др., 2014; Вито и др., 2014; Аирд и др., 2015; Георгакакис и др., 2015).

Наша выборка состоит из непоглощенных или слабопоглощенных в рентгене квазаров с внутренней колонкой поглощения  $N_{\text{H}} < 10^{23}$  см<sup>-2</sup>. Об этом свидетельствует представленное на рис. 5.2 распределение источников по жесткости рентгеновского спектра (данные каталога 3ХММ-DR4) и красному смещению. Жесткость ( $SC_{\text{HR2}} = (H - S)/(H + S)$ ) определена через темпы счета фотонов в диапазонах 1–2 кэВ ( $H$ ) и 0.5–1 кэВ ( $S$ ). Для сравнения на рис. 5.2 показаны зависимости жесткости от красного смещения, ожидаемые для степенного спектра с наклоном  $\Gamma = 1.8$  и разных значений колонки поглощения. Видно, что только несколько источников выборки могут иметь  $N_{\text{H}} \approx 10^{23}$  см<sup>-2</sup>. Остальные должны иметь меньшее внутреннее поглощение.

Отсутствие в выборке сильно поглощенных в рентгене источников связано с методом отбора далеких квазаров в оптике. При составлении каталога *K16* по данным неглубокой широкополосной фотометрии отбирались квазары 1-го типа с ультрафиолетовым избытком (в системе отсчета квазара) и скачком поглощения в районе линии Ly $\alpha$ . Такой же эффект селекции описан, например, в работах Калфоунцоу и др. (2014), где из-за аналогичного способа отбора доля ярких квазаров с поглощением  $N_{\text{H}} > 10^{23}$  см<sup>-2</sup> составила около 10%, и Вито и др. (2014), из табл. 1 которой видно, как с уменьшением чувствительности рентгеновских и оптических обзоров падает доля поглощенных квазаров.

## 5.2.2 Подвыборка более слабых квазаров из работы Вито и др.

Функция светимости квазаров имеет вид степенной функции с изломом (Бойл и др. 1988; Мияджи и др. 2000, см. уравнение (5.2) ниже). Для определения всех параметров модели функции светимости нужна выборка, покрывающая широкий диапазон светимостей. Особенно важна область в районе слома функции светимости, где происходит изменение степенного наклона. Все объекты каталога *K16* имеют светимости выше светимости слома ( $L_{\text{X},2-10} \approx 4 \times 10^{44}$  эрг/с, Вито и др. 2014). Поэтому список ярких квазаров *K16* было решено дополнить выборкой из работы Вито и др. (2014), которая содержит много объектов в районе светимости слома.

В статье Вито и др. (2014) представлен каталог рентгеновских квазаров на  $z > 3$ , на основе которого была построена функция светимости. Почти все источники имеют спектроскопические измерения или надежные оценки красного смещения, полученные по данным глубоких фотометрических обзоров в среднеполосных фильтрах. Поэтому выборку Вито и др. (2014) удобно использовать для расширения *K16* в область меньших светимостей. Из каталога Вито и др. (2014) легко выделить подвыборку непоглощенных источников *V14U* (колонка погло-

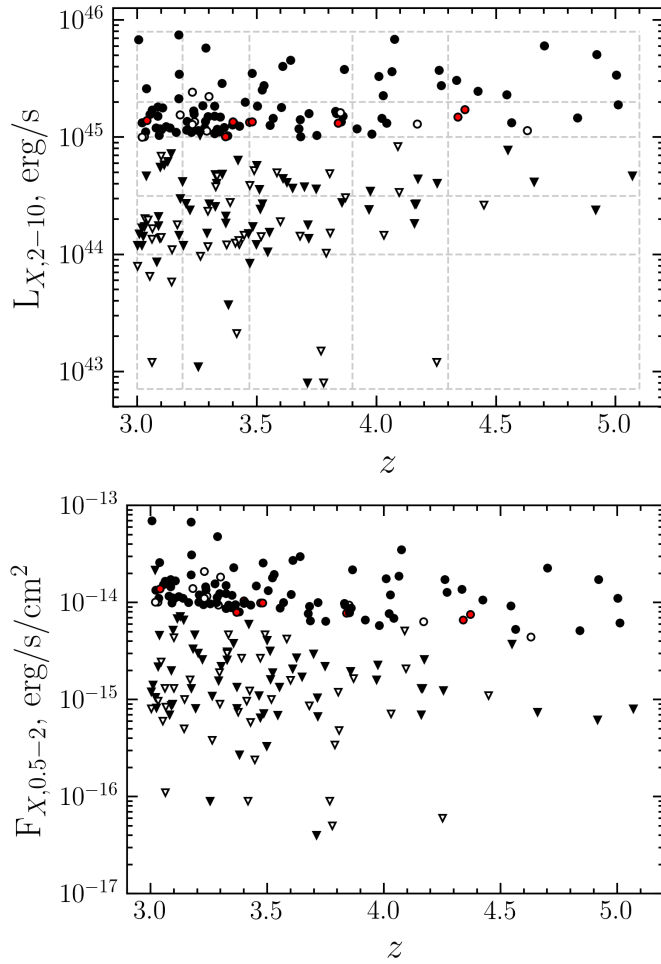


Рис. 5.1: Вверху: Рентгеновские светимости (2–10 кэВ в системе отсчета объекта) и красные смещения квазаров из подвыборок *K16* (кружки) и *V14U* (треугольники). Вертикальные и горизонтальные пунктирные линии показывают границы интервалов  $\Delta \log L - \Delta z$  для построения непараметрической функции светимости методом  $1/V_{\max}$ . Внизу: Рентгеновские потоки (0.5–2 кэВ) и красные смещения источников из тех же подвыборок. Заполненными символами показаны объекты со спектроскопическими красными смещениями ( $z_{\text{спек.}}$ ), при этом красным цветом выделены объекты из каталога *K16*, спектроскопическое красное смещение которых было измерено уже после публикации каталога (Хорунжев и др., 2017а,б, 2018). Пустыми символами показаны объекты, для которых существуют только фотометрические оценки красного смещения ( $z_{\text{фот.}}$ ).

щения  $N_{\text{H}} \leq 10^{23} \text{ см}^{-2}$ ) для лучшего соответствия выборке *K16*.

Оригинальная выборка Вито и др. (2014) состоит из 141 рентгеновского источника на красных смещениях  $3 < z < 5.1$  и получена по данным четырех глубоких рентгеновских обзоров: Chandra Deep Field South (CDFS, Ксю и др. 2011), Chandra Cosmos Survey (C-COSMOS, Элвис и др. 2009), XMM-Newton Cosmos Survey (XMM-Cosmos, Хазингер и др. 2007), Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS, Уеда и др. 2008). В этих обзорах полнота оптической идентификации рентгеновских источников составляет выше 95%. Общая площадь равна 3.3 кв. град. Всего 3 источника имеют светимости  $\geq 10^{45}$  эрг/с в 2–10 кэВ. Из них только один является непоглощенным.

Подвыборка 104 непоглощенных источников (*V14U*), используемая в нашей работе, состоит из квазаров со светимостями  $8 \times 10^{42} < L_{X,2-10} < 1.04 \times 10^{45}$  эрг/с. Из обзора XMM-COSMOS исключен источник ID 5120, потому что он является звездой (Лилли и др., 2007). Самый далекий источник ID 2220 ( $z_{\text{спек.}} = 5.07$ ,  $L_{X,2-10} = 4.7 \times 10^{44}$  эрг/с) найден в обзоре C-COSMOS

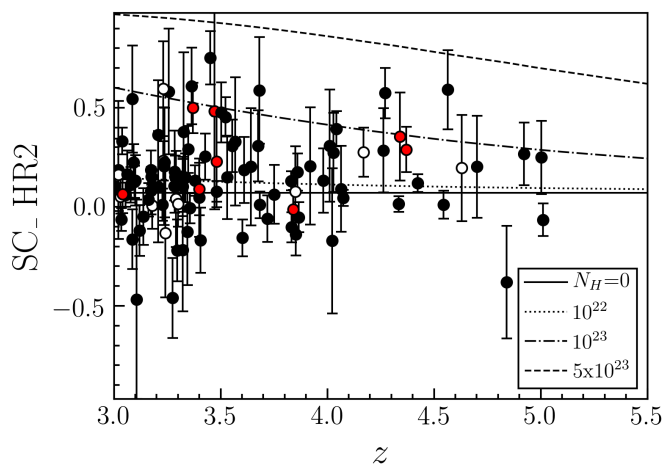


Рис. 5.2: Распределение источников *K16* по рентгеновской жесткости (определенной через потоки в диапазонах 1–2 и 0.5–1 кэВ, см. текст) и красному смещению. Квазары с известным  $z_{\text{спек.}}$  показаны черными символами; красным цветом выделены объекты из каталога *K16*, спектроскопическое красное смещение которых измерено уже после публикации каталога (Хорунжев и др., 2017а,б, 2018); объекты, для которых известны только  $z_{\text{фот.}}$ , обозначены пустыми символами. Линиями показана зависимость жесткости от красного смещения и внутренней колонки поглощения для степенного спектра с  $\Gamma = 1.8$ .

(Элвис и др., 2009). Самый яркий источник ID 926 ( $L_{\text{X},2-10} = 1.04 \times 10^{45}$  эрг/с,  $z_{\text{спек.}} = 3.264$ ) найден в обзоре SXDS (Уеда и др., 2008). На рис. 5.1 рентгеновские потоки, светимости и красные смещения источников подвыборки *V14U* сравниваются с соответствующими характеристиками источников подвыборки *K16*.

### 5.3 Площадь обзора

Для расчета пространственной плотности источников нужно знать, как меняется площадь покрытия неба рентгеновского обзора в зависимости от чувствительности. Для подвыборки непоглощенных источников низкой светимости *V14U* была взята соответствующая площадь для непоглощенных источников из статьи Вито и др. (2014) (см. рис. 5.3).

Для расчета площади обзора «случайного обзора» телескопа *XMM*-Ньютон были отобраны наведения (OBSID), которые использовались для построения каталога рентгеновских источников *3XMM-DR4*<sup>2</sup> (Ватсон и др., 2009) и ранее использовались нами (Хорунжев и др., 2016) для приблизительной оценки площади обзора: источники должны находиться на галактических широтах  $|b| > 20^\circ$  и попадать в область обзора *SDSS*. С помощью программы *esensmap* были построены карты чувствительности отдельных наведений (в единицах отсчетов/с/PSF) для порога детектирования  $det_{\text{ML}} > 6$  в диапазоне 0.2–12 кэВ для суммарной экспозиции всех задействованных в этом наведении детекторов. Исходный каталог рентгеновских источников *3XMM-DR4* составлялся именно с таким ( $det_{\text{ML}} > 6$ ) значением порога детектирования. В случае, когда рядом расположенные наведения перекрывались, образуя мозаику, для построения карты чувствительности в области пересечения выбирались участки из наведения с наилучшей чувствительностью.

При составлении каталога источников *3XMM-DR4* учитывались отсчеты со всех рабочих детекторов для отдельного наведения. Каждый режим работы детекторов *XMM*-Ньютон характеризуется своим множителем перевода темпа счета в поток<sup>3</sup>. Поэтому для пересчета

<sup>2</sup>[xmmssc-www.star.le.ac.uk/Catalogue/3XMM-DR4/](http://xmmssc-www.star.le.ac.uk/Catalogue/3XMM-DR4/)

<sup>3</sup>[heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/xmmssc.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/xmmssc.html)



карты чувствительности из отсчетов/с в эрг/с/см<sup>2</sup> (диапазон 0.2–12 кэВ) рассчитывался эффективный множитель перевода по следующей формуле:

$$\langle ECF \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} EXP_i \times ECF_i}{\langle EXP \rangle}, \quad (5.1)$$

$$\langle EXP \rangle = \frac{1}{N_{\text{det}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{det}}} EXP_i,$$

где  $N_{\text{det}}$  — число рабочих детекторов в данном наведении,  $EXP_i$  — карта экспозиции  $i$ -го детектора,  $ECF_i$  — множитель перевода темпа счета (диапазон 0.2–12 кэВ) в поток для режима работы  $i$ -го детектора,  $\langle EXP \rangle$  — среднее время экспозиции. Затем карта чувствительности делилась на карту эффективного множителя перевода темпа счета в поток  $\langle ECF \rangle$ . Был произведен пересчет потоков из диапазона 0.2–12 кэВ в интересующий нас диапазон 0.5–2 кэВ: при этом предполагались степенной спектр источников с наклоном  $\Gamma = 1.7$  и поглощение  $N_H = 10^{20}$  см<sup>-2</sup> (примерно соответствующее поглощению в межзвездной среде Галактики). Использовалось именно значение  $\Gamma = 1.7$ , потому что табличные коэффициенты перевода отсчетов в потоки для диапазонов XMM-Ньютон приведены для данного наклона. Затем для всех выбранных площадок было получено кумулятивное распределение числа пикселей (с потоком меньше заданного) и построена зависимость площади обзора от рентгеновского потока (см. рис. 5.3).

Общая площадь перекрытия обзора *3XMM-DR4* с *SDSS* составляет 320 квадратных градусов, что почти в 100 раз больше общей площади обзора *V14U* из статьи Вито и др. (2014).

## 5.4 Полнота отождествления рентгеновских источников

Для получения достоверных оценок  $z_{\text{фот.}}$  при построении каталога *K16* (Хорунжев и др., 2016) использовались только надежные оптические источники — с погрешностью видимой звездной величины  $\Delta z' < 0.2$  в фильтре  $z'$  обзора *SDSS*, что соответствует эффективному порогу отбора в оптике  $z' \approx 20.5$ . Более слабые источники не попали в каталог *K16*. Это могло привести к перекосу выборки в сторону оптически ярких квазаров (см. рис. 5.4). На данном рисунке показано распределение квазаров 1-го типа из выборки *K16* по рентгеновскому потоку и видимой звездной величине в фильтре  $z'$  *SDSS*.

Для сравнения на рис. 5.4 показаны непоглощенные источники подвыборки *V14U*, которая обладает почти 100% полнотой идентификации в оптике. Видимые звездные величины рентгеновских источников в фильтре  $z'$  взяты из статей Цивано и др. (2012); Капак и др. (2007) для C-COSMOS и XMM-COSMOS, Акияма и др. (2015) для SXDS. Для обзора CDFS (Ксю и др., 2011) использовались звездные величины фотометрических обзоров GOODS (Джиавалиско и др., 2004) и GEMS (Калдвелл и др., 2008) в фильтре  $z850$ , диапазон которого примерно совпадает с фильтром  $z'$  *SDSS*.

На рис. 5.4 видно, что у большинства источников *K16* отношение рентгеновского потока к оптическому меньше единицы ( $f_x/f_o < 1$ ), тогда как большинство объектов выборки *V14U* имеют  $f_x/f_o > 1$ . Частично это может быть связано с известной нелинейной корреляцией между светимостями квазаров в оптическом и рентгеновском диапазонах: чем больше болометрическая светимость объекта, тем меньше отношение  $f_x/f_o$  (см., например, Люссо и др. 2010, 2017)<sup>4</sup>. Более важным, по-видимому, является то, что использованный при построении каталога *K16* порог  $z' \approx 20.5$  оказывается недостаточным для обнаружения всех рентгеновских квазаров большой светимости на  $z > 3$ .

<sup>4</sup>Хотя в ряде работ получены указания на то, что зависимость  $f_x/f_o$  может быть примерно линейной (Сазонов и др., 2012; Марчезе и др., 2012).

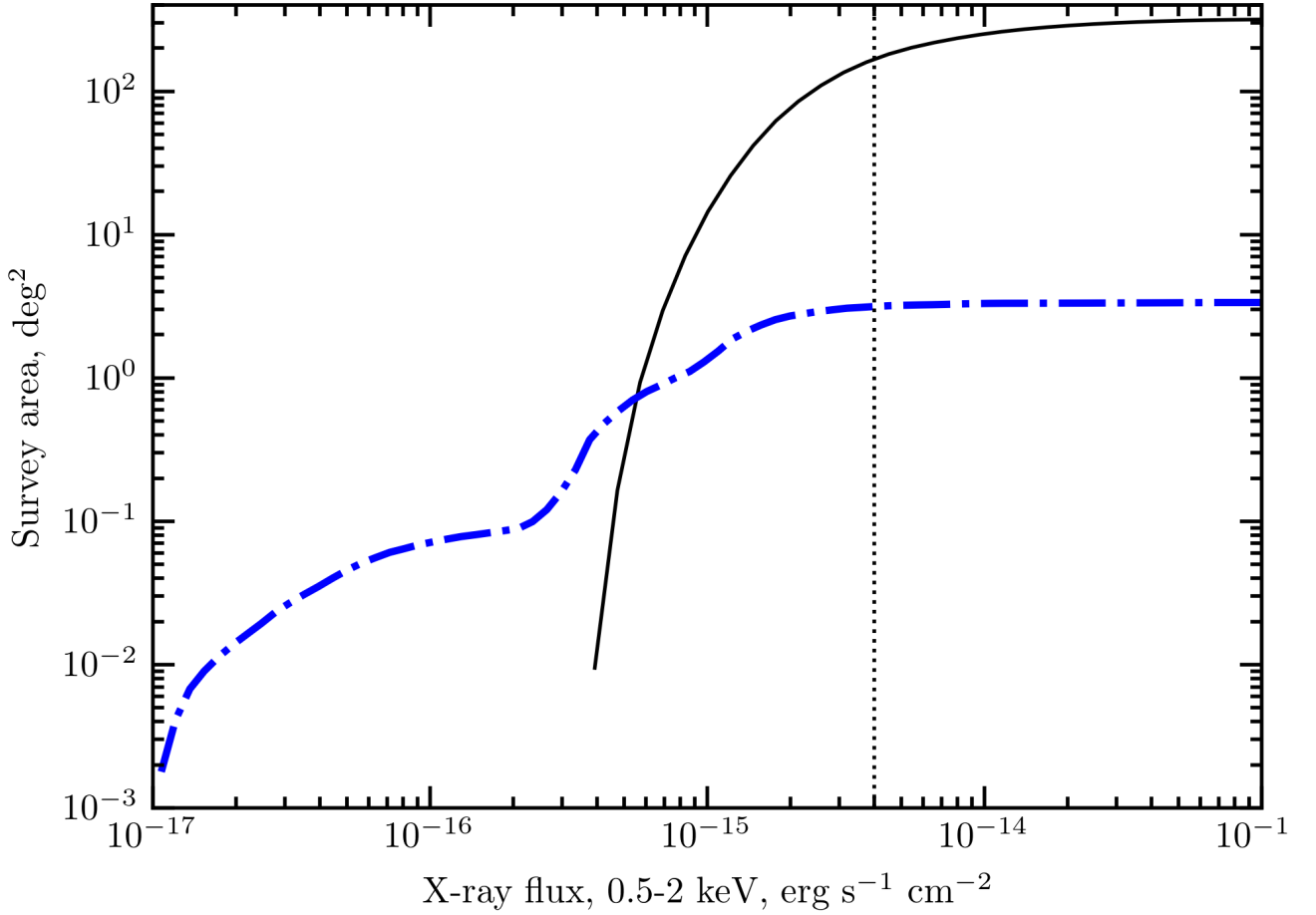


Рис. 5.3: Площадь обзора *XMM-DR4* (черная сплошная линия) и суммарная площадь глубоких обзоров для непоглощенных источников (Вито и др. 2014, синий штрихпунктир). Вертикальным пунктиром обозначена нижняя граница по рентгеновскому потоку  $4 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ для подвыборки объектов *K16* с  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с.

#### 5.4.1 Метод расчета поправки на неполноту

Полноту квазаров подвыборки *K16* невозможно оценить, используя наблюдательные данные рентгеновских обзоров с площадью  $\sim 20$  кв. град, например XMM-XXL. Размер таких обзоров слишком мал, чтобы обнаружить достаточное количество далеких квазаров со светимостями  $\geq 10^{45}$  эрг/с. Поэтому мы воспользовались соотношением между рентгеновской  $L_{2\text{keV}}$  и оптической  $L_{2500\text{\AA}}$  монохроматическими светимостями квазаров 1-го типа (Люссо и др., 2010; Марчезе и др., 2012), чтобы определить пропущенную долю рентгеновских квазаров с видимой звездной величиной  $z' > 20.5$ .

В статье Люссо и др. (2010) для исследования зависимости  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$  использовалась подвыборка квазаров 1-го типа глубокого обзора XMM-COSMOS. В этой выборке 60% источников имеют спектроскопически подтвержденные красные смещения. Большинство квазаров на  $z > 3$  из выборки (Люссо и др., 2010) есть в выборке *V14U*. Позже Марчезе и др. (2012) получили аналогичные результаты для спектроскопически полной выборки оптически ярких квазаров, отобранных в рентгене и ультрафиолете.

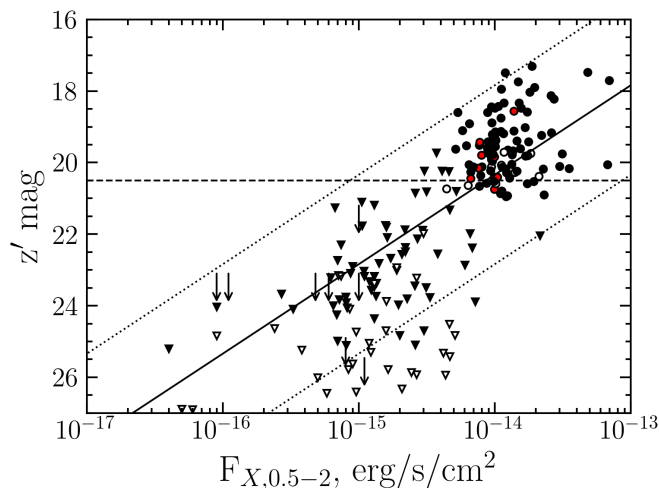


Рис. 5.4: Видимые звездные величины в фильтре  $z'$  и рентгеновские потоки (0.5–2 кэВ) источников из подвыборок  $K16$  (кружки) и  $V14U$  (треугольники). Заполненными символами показаны объекты со спектроскопическими красными смещениями ( $z_{\text{спек.}}$ ), при этом красным цветом выделены объекты из каталога  $K16$ , для которых спектроскопическое красное смещение было измерено уже после публикации каталога (Хорунжев и др., 2017а,б, 2018). Пустыми символами показаны объекты, для которых существуют только фотометрические оценки красного смещения ( $z_{\text{фот.}}$ ). Стрелки — нижние пределы на  $z'$ . Сплошная линия показывает отношение рентгеновского и оптического потоков  $f_X/f_0 = 1$ , пунктирные линии —  $f_X/f_0 = 0.1$  и  $f_X/f_0 = 10$ . Горизонтальная штриховая линия показывает эффективный порог каталога  $K16$   $z' = 20.5$ .

Мы рассмотрели три варианта зависимости  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$ :

$$\begin{aligned} \text{I} : \log L_{2500\text{\AA}} &= 1.669 \log L_{2\text{keV}} - 13.815, \\ \text{II} : \log L_{2500\text{\AA}} &= 1.316 \log L_{2\text{keV}} - 4.616, \\ \text{III} : \log L_{2500\text{\AA}} &= 1.050 \log L_{2\text{keV}} + 2.246. \end{aligned}$$

Указанные соотношения взяты из статьи (Люссо и др., 2010): I — когда  $L_{2500\text{\AA}}$  использовалась как независимая переменная, III — когда  $L_{2\text{keV}}$  использовалась как независимая переменная (см. также (Марчезе и др., 2012), зависимость II — биссектриса между соотношениями I и III. Разброс отдельных измерений около зависимости II характеризуется дисперсией 0.37 (Люссо и др., 2010). В статье (Георгакакис и др., 2015) на примере выборки квазаров 1-го типа из обзора XMM-XXL показано, что  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$  согласуется с зависимостью II с дисперсией 0.4.

Мы применили следующий алгоритм для расчета поправки на неполноту подвыборки  $K16$ . Предполагая рентгеновский степенной спектр с фотонным индексом  $\Gamma=1.8$ , мы вычисляли монохроматическую светимость  $L_{2\text{keV}}$  на энергии 2 кэВ через рентгеновскую светимость  $L_{X,2-10}$  в диапазоне 2-10 кэВ в системе отсчета квазара. Далее через соотношения I–III определяли его оптическую монохроматическую светимость  $L_{2500\text{\AA}}$  на длине волны 2500  $\text{\AA}$ . Затем монохроматическая светимость  $L_{2500\text{\AA}}$  пересчитывалась в видимую звездную величину в фильтре  $z'$   $SDSS$  в системе отсчета наблюдателя с помощью шаблона среднего спектра квазара (Ванден Берк и др., 2001). В результате получается среднее ожидаемое значение величины  $z'$  для квазара с рентгеновской светимостью  $L_{X,2-10}$ . Наконец, предполагая, что распределение  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$  гауссово и имеет дисперсию  $\sigma=0.4$ , рассчитывалась вероятность того, что квазар окажется ярче  $z'=20.5$ . Это и есть поправка на неполноту  $\Theta(L, z)$ , описывающая долю квазаров со светимостью  $L_{X,2-10}$ , которые оказываются в оптике ярче  $z' \leq 20.5$ . Для подвыборки  $V14U$  предполагалось, что  $\Theta(L, z) = 1$ .

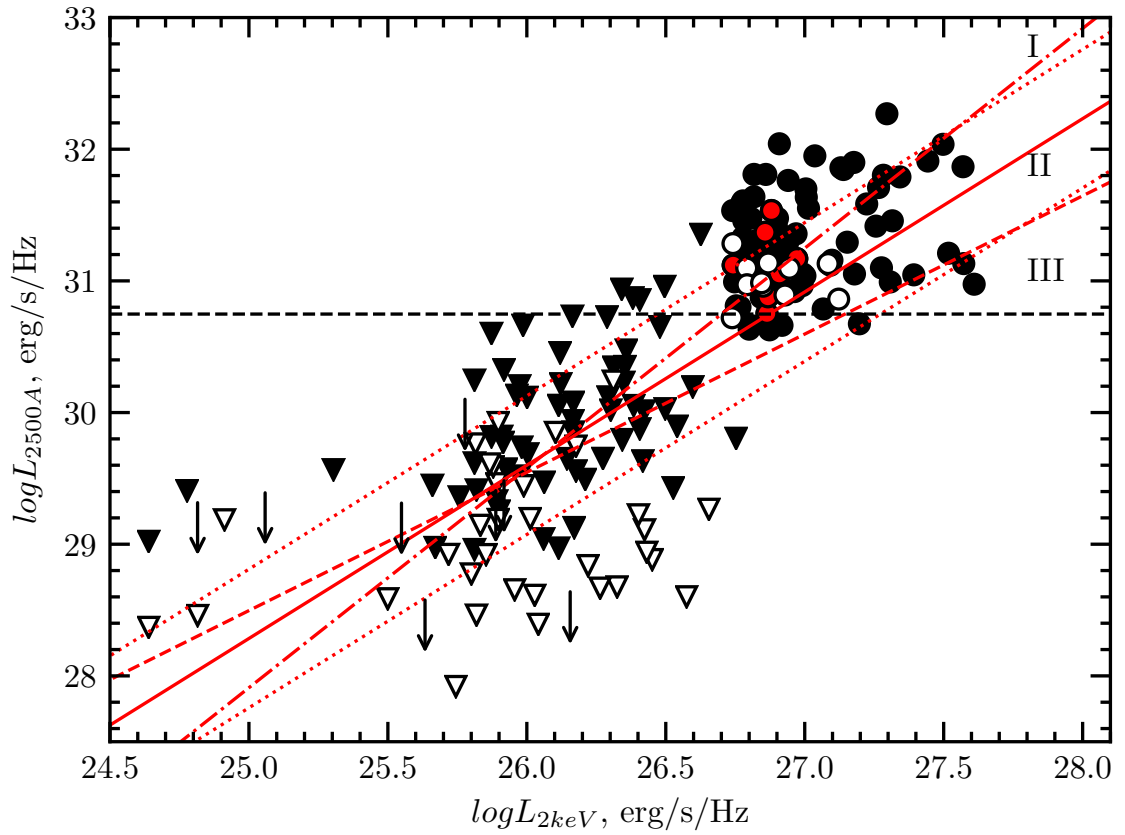


Рис. 5.5: Соотношение между монохроматической оптической светимостью  $L_{2500\text{\AA}}$  на длине волны  $2500\text{\AA}$  и монохроматической рентгеновской светимостью  $L_{2\text{keV}}$  на энергии  $2\text{кэВ}$  для подвыборок *K16* и *V14U*. Обозначения точек те же, что на рис. 5.4. Красная сплошная линия, обозначенная римской цифрой II, показывает зависимость  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$  из работы Люссо и др. (2010), которая принята за основу при расчете поправки на неполноту. Красные штрихпунктирная и штриховая линии, обозначенные римскими цифрами I и III, — другие зависимости  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$  из работы Люссо и др. (2010), которые используются в качестве минимальной и максимальной поправок на неполноту. Пунктирными линиями показан разброс  $\pm 0.4$  для соотношения II  $L_{2\text{keV}}-L_{2500\text{\AA}}$ . Горизонтальной штриховой линией показана пороговая светимость  $L_{2500\text{\AA}}$ , которую будет иметь источник с видимой звездной величиной  $z' = 20.5$  на красном смещении  $z = 3$ , оптический спектр которого описывается шаблоном (Ванден Берк и др., 2001).

Зависимость II использовалась для расчета основной поправки на неполноту, а зависимости I и III — в качестве минимальной и максимальной поправок соответственно. Таким образом, предполагается, что зависимости I и III ограничивают возможный систематический разброс поправки на неполноту. На рис. 5.5 показаны зависимости I, II, III. Там же для источников из подвыборок *K16* и *V14U* показано соотношение между светимостью  $L_{2\text{keV}}$ , посчитанной через  $L_{\text{X},2-10}$  для  $\Gamma=1.8$ , и светимостью  $L_{2500\text{\AA}}$ , полученной через измеренное значение  $z'$  с помощью шаблона (Ванден Берк и др., 2001). Полученные поправки на неполноту используются далее при расчете функции светимости квазаров.

## 5.5 Функция светимости

Ниже под рентгеновской функцией светимости  $\phi(L_{X,2-10}, z)$  подразумевается объемная плотность квазаров в единичном интервале десятичного логарифма рентгеновской светимости (в диапазоне 2–10 кэВ в собственной системе отсчета квазара) в зависимости от светимости и красного смещения. Мы исследовали функцию светимости как параметрическим, так и непараметрическим способом.

### 5.5.1 Аналитические оценки функции светимости

Мы рассмотрели несколько популярных эмпирических моделей рентгеновской функции светимости АЯГ. За их основу взята двухстепенная функция с изломом (Пиккинотти и др., 1982; Бойл и др., 1988; Мияджи и др., 2000) вида

$$\phi = \frac{A}{\left(\frac{L_X}{L_*}\right)^{\gamma_1} + \left(\frac{L_X}{L_*}\right)^{\gamma_2}}, \quad (5.2)$$

где  $A$  — нормировочный множитель,  $L_*$  — светимость излома,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — наклоны функции ниже и выше светимости излома,  $L_X$  — рентгеновская светимость. Во всех перечисленных ниже моделях предполагается опорное красное смещение  $z_{\min} = 3.0$ , см. также Вито и др. (2014).

Чтобы получить модель «чистой эволюции светимости» (Pure Luminosity Evolution, PLE, Лонгейр 1970), надо светимость слома  $L_*$  в формуле (5.2) умножить на

$$e_{\text{lum}}(z) = [(1+z)/(1+z_{\min})]^{p_{\text{lum}}},$$

где  $p_{\text{lum}}$  — показатель эволюции светимости. В модели предполагается, что общая плотность квазаров не меняется со временем, зато меняется форма зависимости плотности — соотношение ярких и слабых источников. В работе Вито и др. (2014) было показано, что модель PLE плохо подходит для описания распределения квазаров на больших красных смещениях.

Чтобы получить модель «чистой эволюции плотности» (Pure Density Evolution, PDE, Шмидт 1968), надо нормировочный множитель  $A$  в формуле (5.2) домножить на

$$e_{\text{den}}(z) = [(1+z)/(1+z_{\min})]^{p_{\text{den}}},$$

где  $p_{\text{den}}$  — показатель эволюции плотности. В модели PDE предполагается, что со временем меняется плотность источников, а отношение плотностей ярких и слабых квазаров сохраняется.

Более сложная модель «независимой эволюции плотности и светимости» (Independent Luminosity and Density Evolution, ILDE, Енчо и др. 2009) получается из модели PDE домножением светимости излома  $L_*$  на:

$$e_{\text{lum}}(z) = [(1+z)/(1+z_{\min})]^{p_{\text{lum}}}.$$

Также рассматривается модель «эволюции светимости и плотности» (Luminosity and Density Evolution, LADE, Аирд и др. 2010). Эта модель получается из формулы (5.2) домножением  $L_*$  на:

$$e_{\text{lum}}(z) = [(1+z)/(1+z_{\min})]^{p_{\text{lum}}},$$

и домножением нормировки  $A$  на

$$e_{\text{den}}(z) = 10^{p_{\text{den}}(z-z_{\min})}.$$

В данной модели предполагается показательная зависимость плотности объектов от времени, в отличие от степенной зависимости в PDE и ILDE. Последняя рассматриваемая модель «эволюции плотности, зависящей от светимости» (Luminosity Dependent Density Evolution, LDDE, Шмидт, Грин 1983) получается домножением  $A$  в формуле (5.2) на:

$$e_{\text{den}}(z) = [(1+z)/(1+z_{\text{min}})]^{p_{\text{den}}+\beta(\log L-44)},$$

где  $\beta$  — дополнительный параметр. Оригинальные модели LADE и LDDE содержат гораздо больше параметров, т.к. были созданы для описания больших наборов данных в широком диапазоне красных смещений (0.001–5) и светимостей. На больших красных смещениях  $z > 3$  происходит вырождение параметров, поэтому модели LADE и LDDE были упрощены (Вито и др., 2014).

Для определения всех параметров перечисленных моделей нужны выборки, охватывающие широкий диапазон светимостей  $10^{43} \lesssim L_{X,2-10} \lesssim 10^{46}$  эрг/с. Светимости объектов подвыборки *K16* превышают светимость излома  $L_* \simeq 5 \times 10^{44}$  эрг/с (Вито и др., 2014). Следовательно, добавляя новые точки на светимостях  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с, мы можем существенно улучшить ограничения только для некоторых параметров (нормировка и наклон спектра после излома  $\gamma_2$ ).

Для поиска наилучшей модели использовался метод максимального правдоподобия. А именно, с помощью библиотеки *scipy*<sup>5</sup> *optimize* определялся минимум следующей функции:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\theta) = & \mathcal{L}(\theta, \Omega_{K16}, N_{K16}) + \\ & + \mathcal{L}(\theta, \Omega_{V14U}, N_{V14U}), \end{aligned} \quad (5.3)$$

где  $\theta$  — параметры модели ( $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k]$ ),  $\mathcal{L}(\theta, \Omega_{K16}, N_{K16})$  и  $\mathcal{L}(\theta, \Omega_{V14U}, N_{V14U})$  — функции максимального правдоподобия для подвыборок *K16* и *V14U*, определяемые приведенным ниже выражением 5.4,  $\Omega_{K16}$  и  $\Omega_{V14U}$  — зависимости площади обзоров от чувствительности (Хорунжев и др., 2016; Вито и др., 2014), приведенные на рис. 5.3,  $N_{K16}$  и  $N_{V14U}$  — число объектов в соответствующих подвыборках. Согласно рис. 5.3, площадь покрытия  $\Omega = \Omega(F_{X,0.5-2}(L, z)) = \Omega(L, z)$  находится в соответствии с потоком  $F_{X,0.5-2}$ , который ожидается от источника с фотонным индексом рентгеновского спектра  $\Gamma = 1.8$ , светимостью  $L_{X,2-10}$  и красным смещением  $z$ . В зависимость площади  $\Omega_{K16}$  для выборки *K16* входит поправка на неполноту  $\Omega_{K16} = \Omega_{K16}(z, L) \times \Theta(L, z)$ .

Функция максимального правдоподобия для каждой подвыборки в уравнении (5.3) записывается как

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\theta, \Omega, N) = & -2 \sum_{i=1}^N \ln \left[ \int \phi(L, z_i, \theta) p(d_i|L) d \log L \right] + \\ & + 2 \iint \phi(L, z, \theta) \Omega(L, z) \frac{dV}{dz} d \log L dz, \end{aligned} \quad (5.4)$$

где  $\phi(L, z, \theta)$  — модель рентгеновской функции светимости,  $z_i$  — красное смещение  $i$ -ого источника,  $N$  — полное число источников подвыборки,  $dV/dz$  — дифференциальный сопутствующий объем на единицу площади неба,  $p(d_i|L)$  — плотность вероятности обнаружить источник с набором данных  $d_i$  при условии, что светимость источника равна  $L$ .

Двойной интеграл в выражении (5.4) берется в интервале красных смещений  $3 < z < 5.1$  и диапазонах светимостей:  $42.85 < \log L < 45.3$  для подвыборки *V14U* и  $45.0 < \log L < 45.9$  для подвыборки *K16*.

Для объектов из *K16* в набор данных  $d_i$  функции  $p(d_i|L)$  входят: ожидаемое число отсчетов  $s = s(L)$ , которое зависит от светимости; число зарегистрированных отсчетов источника

<sup>5</sup><http://www.scipy.org/>

$s_0$  и фона  $b_0$  в диапазоне 0.2–12 кэВ. Сама величина  $p(d_i|L)$  выражает вероятность зарегистрировать полное количество отсчетов ( $s_0 + b_0$ ) от  $i$ -источника:

$$p(d_i|L) = \frac{(s + b_0)^{(s_0+b_0)}}{(s_0 + b_0)!} e^{-(s+b_0)}. \quad (5.5)$$

Данный подход учитывает пуассоновскую природу регистрации фотонов и связанный с ней эддингтоновский сдвиг рентгеновской функции светимости (Георгакакис и др., 2008; Аирд и др., 2010).

При расчете ожидаемого числа отсчетов  $s$  в диапазоне 0.2–12 кэВ от источника со светимостью  $L_{X,2-10}$  на красном смещении  $z_i$  предполагался степенной рентгеновский спектр с фотонным индексом  $\Gamma=1.8$ . Для каждого источника использовался множитель перевода отсчетов в потоки, посчитанный как отношение темпа счета в 0.2–12 кэВ EP\_8\_Rate к соответствующему значению рентгеновского потока EP\_8\_Flux. Значения  $s_0$ , EP\_8\_Rate и EP\_8\_Flux берутся из каталога *3XMM-DR4*.

В каталоге *3XMM-DR4* приводится только усредненная плотность отсчетов фона на пиксел карты фона в наборе диапазонов энергий, а значения отсчетов от источника и темпов счета даны за вычетом фона. Следовательно, по данным каталога *3XMM-DR4* точно восстановить число отсчетов фона  $b_0$  не представляется возможным. Мы проверили, что фон для большинства источников из *K16* дает незначительный вклад в общее число отсчетов, т.е.  $b_0$  составляет несколько процентов от  $s_0$ . Поэтому в формуле (5.5) мы пренебрегаем отсчетами фона и полагаем  $b_0 = 0$ .

Для подвыборки *V14U* поправка на эддингтоновский сдвиг не производится. Поэтому, для  $i$ -го источника из подвыборки *V14U* величина  $p(d_i|L)$  равна дельта-функции от наблюдаемой светимости  $L_i$ .

Границы  $1\sigma$  доверительных интервалов параметров считались следующим образом: для каждого параметра  $\theta_i$  в окрестности его наилучшего значения искались крайние значения  $\theta_{i,\min}$ ,  $\theta_{i,\max}$ , для которых значение функции максимального правдоподобия отличается от своего значения в минимуме на единицу ( $\Delta\mathcal{L} = 1$ ). При этом остальные параметры свободно варьировались.

Указанным способом проведена аппроксимация данных совместной выборки непоглощенных квазаров *V14U*, *K16* моделями PDE, PLE, ILDE, LADE и LDDE. Полученные оценки параметров и их статистические погрешности для поправки на неполноту II приведены в табл. 5.2. Там же в скобках приводятся оценки параметров для поправок I и III.

Все модели функции светимости точно воспроизводят наблюдаемое число источников (205) при интегрировании по пространству  $\log L-z$ . Однако происходит завышение расчетного числа источников в выборке *V14U* относительно их настоящего количества и, соответственно, занижение расчетного числа источников в выборке *K16*. Причем чем выше степень поправки на неполноту, тем больше разница между расчетным числом источников из *V14U* и *K16*. Тем не менее эти отклонения остаются в пределах  $1\sigma$  по Пуассону для поправок I и II и  $2\sigma$  — для поправки III. Увеличение расчетного числа источников в характеризующейся высокой полнотой подвыборке *V14U* свидетельствует в пользу того, что поправка III может быть избыточна.

Мы воспользовались информационным критерием Акаике (AIC, Акаике, 1974) и байесовским информационным критерием (BIC, Шварц 1978), чтобы определить наилучшую модель функции светимости из исследуемого набора (см., например, Фотопоулоу и др., 2016; Сазонов, Хабибуллин, 2017). Для логарифмической формы записи функции максимального правдоподобия (см. уравнение (5.4)) формула для критерия AIC выглядит как  $AIC = 2k + \mathcal{L}$ , где  $k$  — число параметров модели,  $\mathcal{L}$  — значение в минимуме функции максимального правдоподобия. Расчет критерия BIC проводился по формуле  $BIC = k \ln n + \mathcal{L}$ , где  $n$  — число объектов в наблюдательной выборке. Критерий BIC является модификацией AIC и лучше подходит

для сравнения моделей с разным количеством параметров. Наилучшая модель будет иметь наименьшие значения AIC и BIC.

Для каждой модели получены разности  $\Delta AIC = AIC - AIC_0$  и  $\Delta BIC = BIC - BIC_0$ , где  $AIC_0$  и  $BIC_0$  — значения критериев для наилучшей модели. Чем больше значение  $\Delta AIC$  и  $\Delta BIC$ , тем ниже вероятность того, что данная модель подходит для описания данных.

Полученные значения  $\Delta AIC$  и  $\Delta BIC$  для поправки на неполноту II приведены в табл. 5.2. Наилучшей моделью оказывается LADE. Отклонения  $|\Delta BIC| < 6$  можно считать статистически незначимыми. Следовательно модели LADE, ILDE, LDDE, PDE равнозначно подходят для описания данных. Только модель PLE имеет  $|\Delta BIC| \gg 6$  и хуже остальных воспроизводит наблюдательные данные, поэтому ее можно исключить как несостоятельную.

Таким образом, набор допустимых моделей рентгеновской функции светимости далеких квазаров 1-го типа получился таким же, как в ряде предыдущих работ, где использовались выборки квазаров, включающие поглощенные объекты (Вито и др., 2014; Георгакакис и др., 2015; Раналли и др., 2016).

### 5.5.2 Непараметрическая оценка функции светимости ( $1/V_{\max}$ )

Непараметрическая оценка рентгеновской функции светимости — это оценка объемной плотности квазаров, рассчитываемая отдельно для каждого из заданных интервалов  $\Delta \log L - \Delta z$  по объектам выборки, попадающим в эти интервалы. Мы провели такой расчет методом, описанным в статье (Георгакакис и др., 2015). Пространство  $42.85 < \log L < 45.9$ ,  $3 < z < 5.1$  было разбито на интервалы  $\Delta \log L - \Delta z$ , близкие к используемым в статье Вито и др. (2014). Схема разбиения и количество источников в соответствующих интервалах показаны в табл. 5.3 и на рис. 5.1.

Считая, что внутри каждого интервала  $\Delta \log L - \Delta z$  (в который попадает  $N$  источников) функция светимости постоянна, т.е.  $\phi(L, z, \theta) = C$ , можно осуществить поиск значения  $C$  методом максимального правдоподобия по формулам (5.3), (5.4), где в выражении (5.4) постоянная  $C$  становится единственным параметром:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(C, \Omega, N) = & -2 \sum_{i=1}^N \ln[C p(d_i|L) d \log L] + \\ & + 2 \iint C \Omega(L, z) \frac{dV}{dz} d \log L dz. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Легко показать, что эта функция имеет минимум при

$$C = \frac{N}{\iint \Omega(L, z) \frac{dV}{dz} d \log L dz}, \quad (5.7)$$

что в точности соответствует выражению Маршал и др. (1983); Пэйдж, Каррера (2000) для расчета функции светимости методом  $1/V_{\max}$ .

Полученная таким образом непараметрическая оценка функции светимости с учетом поправки на неполноту II для подвыборки *K16* представлена на рис. 6. Видно, что аналитические модели функции светимости хорошо проходят через точки, полученные методом  $1/V_{\max}$ , причем точки, полученные по выборке *K16*, лежат на продолжении закона степенного спада плотности квазаров на светимости  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с. Только благодаря использованию чувствительного рентгеновского обзора *XMM*-Ньютон большой площади ( $\sim 170$  кв. град на потоке  $\sim 4 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> для выборки *K16*), стало возможным получение значимых оценок плотности для далеких квазаров таких больших светимостей.

Надо отметить, что непараметрическая оценка функции светимости не учитывает эддингтоновский сдвиг, в отличие от параметрической оценки. Хорошее взаимное согласие обоих



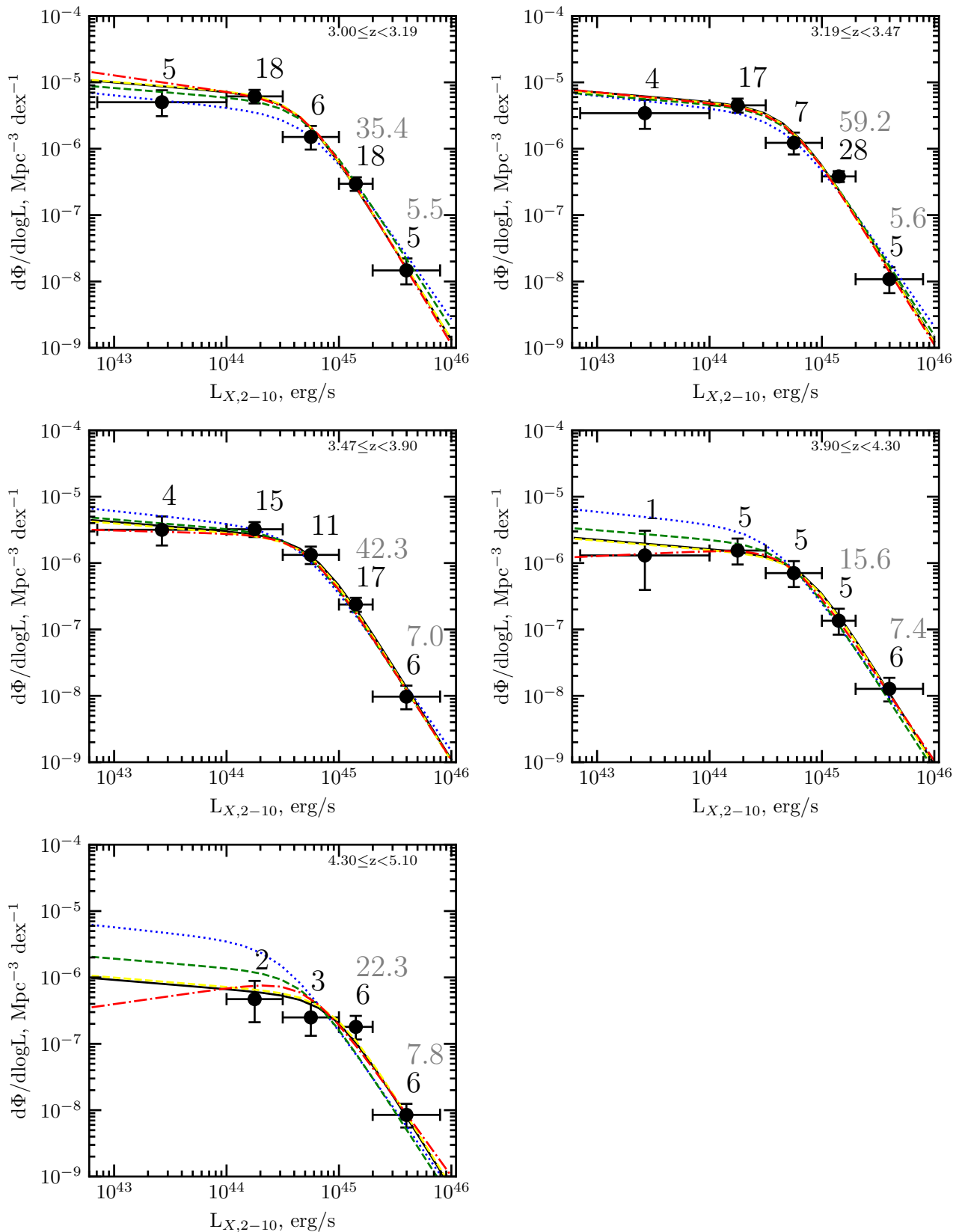


Рис. 5.6: Дифференциальная функция светимости квазаров 1-го типа в зависимости от красного смещения, полученная на основе подвыборок *K16* и *V14U*. Точками с ошибками показана непараметрическая оценка функции светимости, полученная методом  $1/V_{\max}$  с использованием поправки на неполноту II. Черным 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.

результатов свидетельствует о том, что эддингтоновский сдвиг в данном случае оказывается несущественным по сравнению с неопределенностями, связанными с относительно небольшим размером выборки и поправкой выборки на неполноту.

## 5.6 Эволюция пространственной плотности далеких квазаров

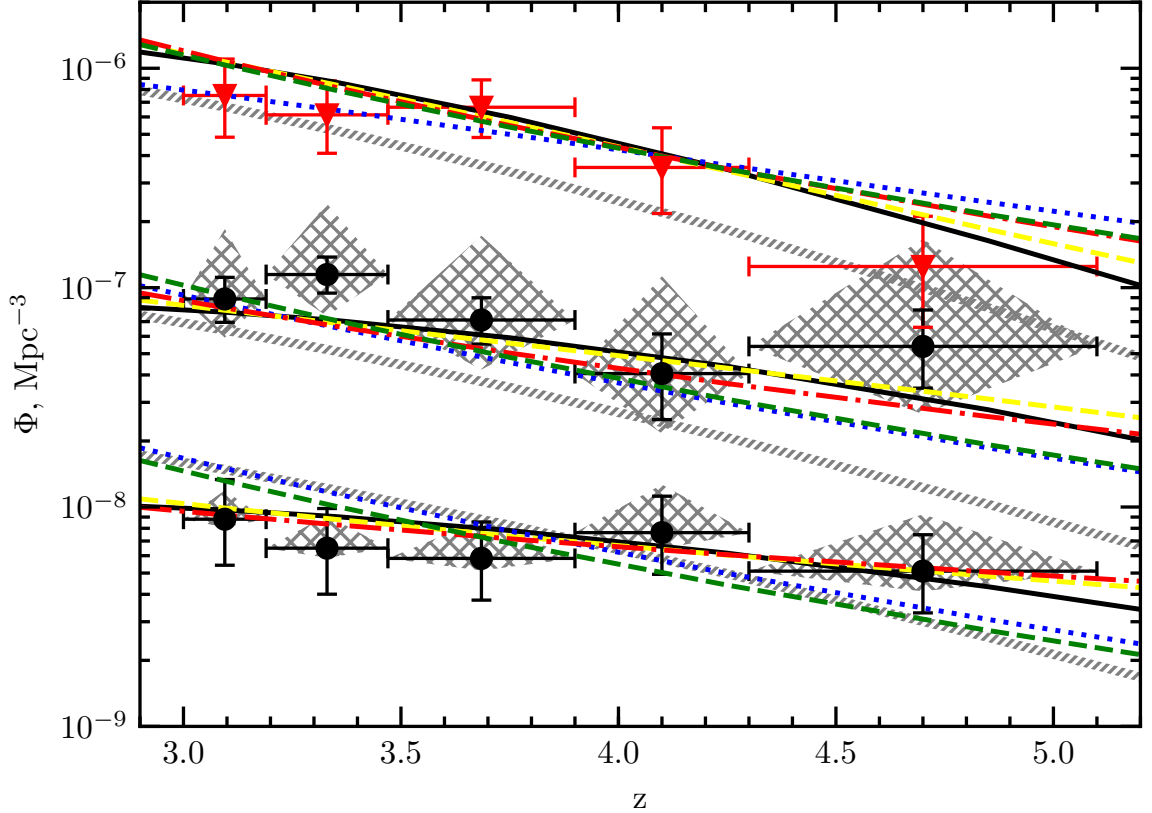


Рис. 5.7: Эволюция пространственной плотности (в сопутствующих координатах) далеких ярких квазаров 1-го типа. Треугольники — плотность квазаров с  $44.5 \leq L_{X,2-10} < 45.0$ , полученная по подвыборке *V14U*, кружки — плотность квазаров с  $45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.3$  и  $45.3 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$ , 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).

Используя полученную выше непараметрическую оценку функции светимости, рассмотрим более детально эволюцию с красным смещением пространственной плотности квазаров большой светимости:  $44.5 \leq \log L_{X,2-10} < 45.0$  (на основе подвыборки *V14U*) и  $45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.3$ ,  $45.3 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$  (по подвыборке *K16* с добавлением одного источника из *V14U*) — см. рис. 5.7. Как и ожидалось, обзор *K16* позволил впервые получить надежные оценки пространственной плотности ярких квазаров ( $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с) на больших

красных смещениях. На рисунке также показаны различные модели функции светимости, обсуждаемые в этой статье.

На рис. 5.7 видно, что сопутствующая плотность ярких квазаров ( $45.0 \leq \log L_{X,2-10} < 45.9$ ) изменяется не более чем в 2 раза между  $z = 3$  и  $z = 5$ , в то время как плотность квазаров меньшей светимости ( $44.5 \leq \log L_{X,2-10} < 45.0$ ) уменьшается на порядок (см. также Вито и др., 2014; Калфоунцоу и др., 2014). В предыдущих работах уже имелись указания на более медленную эволюцию более мощных квазаров, теперь же эта тенденция стала совершенно очевидной благодаря добавлению подвыборки ярких квазаров *K16*. Отметим, что неточное знание полноты выборки *K16* вносит основную неопределенность в полученные оценки плотности ярких квазаров на светимостях  $\log L_{X,2-10} \approx 45$ . Однако при увеличении светимости в 2 раза ( $\log L_{X,2-10} \geq 45.3$ ) плотность источников падает почти в 10 раз, источников в выборке становится меньше, и пуассоновские ошибки становятся больше разброса оценок, связанного с неполнотой.

В целом, полученная зависимость пространственной плотности квазаров от красного смещения согласуется с оценками плотности Калфоунцоу и др. (2014) для непоглощенных квазаров на  $z > 3$ . В работе Калфоунцоу и др. (2014) был проведен дополнительный отбор (по фотометрическому красному смещению на звездных величинах  $i' < 21$ ) далеких квазаров на  $z > 3$  и впервые получены оценки их пространственной плотности на светимостях  $\log L_{X,2-10} > 44.7$  для обзора площадью  $\approx 33$  кв. град. Половина выборки Калфоунцоу и др. (2014) — это кандидаты в квазары, отобранные по  $z_{\text{фот}}$ . Нам удалось существенно улучшить ограничения на плотность ярчайших ( $\log L_{X,2-10} > 45.0$ ) квазаров за счет почти десятикратного увеличения площади покрытия неба по сравнению с (Калфоунцоу и др., 2014). Причем в подвыборке *K16* спектроскопические красные смещения получены для 90% объектов.

В другой недавней работе (Георгакакис и др., 2015), по данным обзора ХММ-XXL были также сделаны оценки пространственной плотности далеких квазаров. Площадь покрытия неба ХММ-XXL и число обнаруженных квазаров на  $z > 3$  сравнимы с выборкой Калфоунцоу и др. (2014). В работе Георгакакис и др. (2015) при составлении каталога были получены спектроскопические красные смещения для большинства рентгеновских кандидатов в квазары с видимой величиной  $r' < 22.5$  (Менцель и др., 2016). На рис. 5.7 показаны (без погрешностей) оценки пространственной плотности ярких квазаров, полученные по аналитической модели рентгеновской функции светимости из работы Георгакакис и др. (2015) в трех рассматриваемых интервалах светимости. Оценки плотности в диапазоне светимостей  $44.5 \leq \log L_{X,2-10} < 45.3$  по данным Георгакакис и др. (2015) оказываются несколько ниже полученных в этой работе. Возможные причины расхождения обсуждаются в следующем разделе.

## 5.7 Обсуждение результатов

Нам удалось получить большую выборку (*K16*) источников на  $z > 3$  и светимостях  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с, т.е. выше положения слома ( $L_* \sim 5 \times 10^{44}$ ) рентгеновской функции светимости квазаров, и определить наклон  $\gamma_2$  яркой части функции светимости (см. уравнение (5.2)). Так как все источники подвыборки *K16* имеют светимость выше  $L_*$ , то именно они ограничивают параметр наклона  $\gamma_2$ . При этом надо иметь в виду, что светимости многих объектов *K16* всего лишь в  $\approx 2$  раза выше предполагаемой светимости слома, т.е. затрагивается область, в которой наклон функции светимости постепенно меняется от  $\gamma_1$  к  $\gamma_2$ .

Для надежного определения всех параметров функции светимости, включая  $\gamma_2$ , мы дополнили выборку *K16* другой выборкой (*V14U*), которая включает квазары со светимостью  $L_{X,2-10} \lesssim L_*$ . Подвыборки *V14U* ( $L_{X,2-10} \lesssim 10^{45}$  эрг/с) и *K16* ( $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с) дополняют друг друга, охватывая практически непересекающиеся диапазоны светимостей, но при этом имея различную полноту.

Из табл. 5.2 следует, что параметры  $A$ ,  $\gamma_2$ ,  $L_*$  сильнее остальных зависят от поправки на неполноту. Для перечисленных параметров сдвиг значений из-за вариаций поправки на неполноту оказывается больше или сравним с величиной их статистических ошибок.

Начало яркой части функции светимости определяется объектами с  $L > L_*$  из  $V14U$ , а конец — яркими объектами с  $L > 2 \times 10^{45}$  эрг/с из подвыборки  $K16$ , для которых поправка на неполноту близка к единице. Это уменьшает неопределенность в наклоне  $\gamma_2$ , связанную с источниками подвыборки  $K16$  в диапазоне светимостей  $10^{45} < L < 2 \times 10^{45}$  эрг/с, для которых неопределенность поправки на неполноту велика. Если бы величина  $\gamma_2$  определялась только с помощью подвыборки  $K16$ , то ее погрешность и разброс других параметров функции светимости из-за незнания настоящей полноты были бы сильнее.

Наклон яркой части модели LADE функции светимости и его статистическая погрешность равны  $\gamma_2 = 2.72 \pm 0.21$  для неполноты II. Неопределенность в полноте обнаружения квазаров приводит к появлению дополнительной систематической ошибки наклона:  $\gamma_2 = 2.72^{+0.19}_{-0.12}$ .

### 5.7.1 Сравнение $\gamma_2$ с предыдущими оценками

Строго говоря, измеренное нами значение наклона  $\gamma_2$  рентгеновской функции светимости квазаров 1-го типа нельзя сравнивать напрямую с результатами предыдущих работ (Вито и др., 2014; Уеда, 2014; Георгакакис и др., 2015), так как в них параметры моделей функции светимости были получены с учетом поглощенных квазаров. Однако статистика далеких квазаров большой светимости ( $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с) обычно опирается на рентгеновские обзоры большой площади с неглубоким покрытием в рентгене и оптике. В таких обзорах доля найденных поглощенных источников, как правило, мала (см., например, Калфоунцоу и др., 2014). При этом надо иметь в виду, что при малом количестве рентгеновских отсчетов отличить далекий квазар с  $N_H \approx 10^{23}$  см<sup>-2</sup> от квазара с меньшим поглощением практически невозможно (Фотопоулоу и др., 2016). Поэтому, можно предположить, что опубликованные значения наклона  $\gamma_2$  в основном определяются непоглощенными и слабопоглощенными источниками с  $N_H \lesssim 10^{23}$  см<sup>-2</sup>, т.е. в основном АЯГ 1-го типа (согласно стандартной оптической классификации). Это позволяет осуществить примерное сравнение нашей оценки параметра  $\gamma_2$  с результатами других работ.

Значения  $\gamma_2$  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 LADE.

В выбранных для сравнения работах использовались выборки квазаров, характеризующиеся более высокой полнотой оптического отождествления по сравнению с  $K16$ . Выборка Вито и др. (2014) состоит из квазаров на  $z > 3$ , отобранных в диапазоне 0.5–2 кэВ, и была частично использована нами, чтобы дополнить каталог  $K16$  объектами с меньшей светимостью. В работе Георгакакис и др. (2015) изучались квазары на  $z_{\text{спек.}} > 3$ , отобранные в диапазоне 0.5–10 кэВ в области обзора XMM-XXL площадью 18 кв. град. За счет глубокой спектроскопической поддержки (Менцель и др., 2016; Георгакакис и др., 2015) этой области (на 2 величины глубже, чем в среднем для SDSS) удалось получить выборку из 59 квазаров на  $z_{\text{спек.}} > 3$ . Обзор XMM-XXL был дополнен данными глубоких рентгеновских обзоров спутника Chandra (CDFs, CDFN, AEGIS, ECDFS и C-COSMOS), охватывающими диапазон светимостей  $10^{43}$ – $10^{45}$  эрг/с, и позволил получить значимые оценки плотности квазаров на светимостях  $> 10^{45}$  эрг/с. Поэтому результаты Георгакакис и др. (2015) оказываются наиболее интересными для сравнения.

Полученное в нашей работе значение наклона яркой части функции светимости  $\gamma_2 = 2.72 \pm 0.21$  для модели LADE и поправки на неполноту II попадает в  $1\sigma$  доверительный интервал оценок Вито и др. (2014) для модели LADE,  $\gamma_2 = 3.17^{+1.22}_{-0.71}$ . При этом точность измерения  $\gamma_2$  существенно улучшилась по сравнению с глубокими обзорами малой площади

(Вито и др., 2014). Однако наблюдается расхождение с результатами Георгакакис и др. (2015), где для модели LADE была получена значительно меньшая величина наклона,  $\gamma_2 = 2.10 \pm 0.24$  (см. сравнение функций светимости, полученных в нашей работе и Георгакакис и др. 2015, на рис. 5.8). Величина светимости слова  $L_* = 44.27 \pm 0.14^6$  Георгакакис и др. (2015) тоже ниже наших оценок (см. табл. 5.2).

Оценка плотности квазаров в диапазоне  $44.5 < \log L_{X,2-10} < 45.3$  по подвыборке *K16* оказывается выше, чем следует из модели (Георгакакис и др., 2015) (см. рис. 5.7). Однако из рис. 5.8 следует, что разница между моделями оказывается не столь значимой, и они в пределах статистических ошибок согласуются между собой на светимостях  $L_{X,2-10} > 2 \times 10^{45}$  эрг/с, где поправки на неполноту *K16* несущественны, а в выборке (Георгакакис и др., 2015) присутствуют только непоглощенные источники.

Обсуждаемая разница в оценках  $\gamma_2$  и  $L_*$  может быть вызвана следующими причинами. Во-первых, на светимостях  $L_{X,2-10} \lesssim 5 \times 10^{44}$  эрг/с в выборке (Георгакакис и др., 2015) появляются поглощенные источники из глубоких обзоров, и их вклад существенно меняет распределение плотности по отношению к непоглощенным квазарам. Именно по этому на рис. 5.8 точки *V14U* лежат существенно ниже модели (Георгакакис и др., 2015).

Во-вторых, площадь глубоких обзоров, использованных в работе Георгакакис и др. (2015), в два раза меньше, чем площадь глубоких обзоров из Вито и др. (2014), использованных в нашей работе. Следовательно, в выборке Вито и др. (2014) находится больше объектов со светимостью в районе светимости слова  $L_* \approx 5 \times 10^{44}$  эрг/с (Вито и др., 2014), чем в глубоких обзорах выборки Георгакакис и др. (2015), и поэтому выборка Вито и др. (2014) позволяет точнее определить положение  $L_*$ .

В-третьих, в отличие от нашей работы и работы Вито и др. (2014), в которых объектам приписаны конкретные фотометрические красные смещения  $z_{\text{фот.}}$ , в работе Георгакакис и др. (2015) использован вероятностный подход: каждому объекту из глубоких обзоров было приписано распределение возможных значений  $z_{\text{фот.}}$ . Авторами работы Георгакакис и др. (2015) показано, что использование фиксированных значений  $z_{\text{фот.}}$  при анализе данных глубоких обзоров, таких как COSMOS, может приводить к переоценке (в 1.8–3 раза) плотности квазаров на светимостях  $\lesssim 5 \times 10^{44}$  эрг/с. Поэтому часть фотометрических кандидатов из подвыборки *V14U* может оказаться квазарами на меньших  $z$ , и тогда наклон  $\gamma_2$  будет более пологим. Оценка наклона  $\gamma_2$  может быть завышена, если среди фотометрических кандидатов в квазары с  $N_{\text{H}} \leq 10^{23}$  см<sup>-2</sup> из подвыборки *V14U* присутствуют квазары 2-го типа — без широких линий в оптическом спектре (см. рис. 5.5). В диапазоне  $44.5 < \log L_{X,2-10} < 45.0$ , который определяет начало наклона  $\gamma_2$ , доля фотометрических кандидатов в подвыборке *V14U* около 20%. Поэтому если среди кандидатов в квазары окажутся объекты второго типа или квазары на  $z < 3$ , то на оценку наклона  $\gamma_2$  это сильно не повлияет.

В-четвертых, спектроскопическая выборка Менцель и др. (2016), использованная в работе Георгакакис и др. (2015), может быть подвержена неполноте отождествления в оптике на рентгеновских потоках  $\lesssim 5 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ, соответствующих светимостям  $\sim 5 \times 10^{44}$  эрг/с для квазаров на  $z > 3$ . В таком случае измерения покажут более пологий наклон  $\gamma_2$ , чем есть на самом деле.

Все перечисленные причины могут приводить к рассогласованию значений светимости слова и наклона  $\gamma_2$ , которые получены в данной статье и работе Георгакакис и др. (2015).

На рис. 5.9 значения наклона  $\gamma_2$ , полученные в нашей работе, сравниваются с результатами Вито и др. (2014); Георгакакис и др. (2015). Хорошо видно, что с помощью объектов *K16*, отобранных по данным рентгеновского обзора большой площади, нам удалось ограничить значение наклона яркой части рентгеновской функции светимости далеких квазаров гораздо лучше, чем это можно сделать, опираясь только на данные глубоких обзоров малой

<sup>6</sup>Космологические параметры  $\Omega_m$  и  $\Omega_\Lambda$  в нашей работе и статье (Георгакакис и др., 2015) немного отличаются.

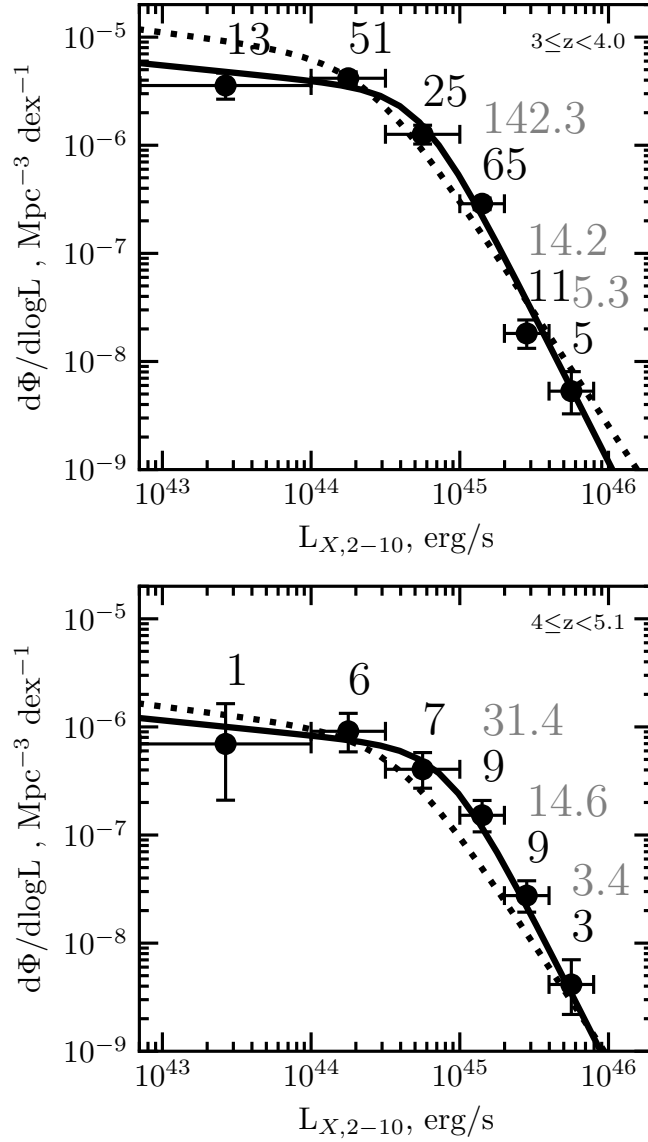


Рис. 5.8: Функция светимости квазаров в двух широких интервалах по красному смещению. Точками с ошибками показана непараметрическая функция светимости, полученная методом  $1/V_{\text{max}}$  для поправки на неполноту II. Черным шрифтом показано наблюдаемое число объектов в соответствующих интервалах  $\Delta \log L - \Delta z$ , а серым шрифтом — ожидаемое полное число объектов для поправки на неполноту II. Сплошная линия — модель LADE для неполноты II при подгонке с общей нормировкой. Прерывистой линией показана модель LADE из работы Георгакакис и др. (2015).

площади (Вито и др., 2014). На том же рисунке показаны значения  $\gamma_2$  из статей Уеда (2014); Аирд и др. (2015); Раналли и др. (2016), где модели рентгеновской функции светимости построены на выборках квазаров, охватывающих широкий диапазон светимостей и красных смещений. В этих работах квазары на  $z > 3$  составляют всего несколько процентов от общего размера выборок, которые состоят из поглощенных и непоглощенных квазаров; кроме того, использовались более сложные модели функции светимости, зависящие от большего числа параметров эволюции. Поэтому полученные в этих работах значения  $\gamma_2$  в основном характеризуют распределение более близких квазаров.

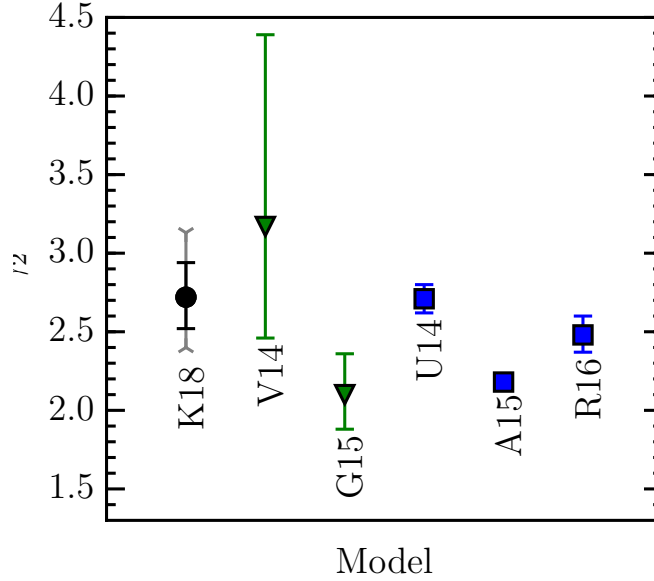


Рис. 5.9: Сравнение полученных в этой работе (K18) значений наклона яркой части функции светимости  $\gamma_2$  модели LADE с предыдущими оценками. Кругок с ошибкой — наклон  $\gamma_2 = 2.72 \pm 0.21$  и его статистическая погрешность для модели LADE и поправки на неполноту II. Серым показан диапазон значений  $\gamma_2$  для поправок на неполноту I и III с учетом статистических погрешностей. Треугольниками показаны оценки  $\gamma_2$  модели LADE для квазаров на  $z > 3$  из статей: V14 (Вито и др., 2014); G15 (Георгакакис и др., 2015). Квадратами показаны значения  $\gamma_2$  модели LADE, полученные по выборкам квазаров в широких диапазонах светимостей и красных смещений, где объекты на  $z > 3$  составляют всего несколько процентов: U14 (Уеда, 2014); A15 (Аирд и др., 2015) для источников, обнаруженных в диапазоне 0.5–2 кэВ; R16 (Раналли и др., 2016).

## 5.8 Заключение к главе 5

В этой работе были получены оценки функции светимости для квазаров 1-го типа для выборки 101 источника со светимостями  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с из каталога (Хорунжев и др., 2016). Модели функции светимости LADE, ILDE, PDE, LADE одинаково хорошо описывают распределение плотности квазаров 1-го типа.

Улучшены ограничения на наклон яркой части функции светимости ( $\gamma_2 = 2.72 \pm 0.21$  для модели LADE). Значения  $\gamma_2$  и других параметров модели зависят от выбора варианта поправки на неполноту отбора квазаров для каталога K16. С увеличением величины поправки наклон  $\gamma_2$  становится круче, и растет светимость слома.

Необходимость учета такой поправки связана с тем, что только для источников с  $z' < 20.5$  можно делать фотометрические оценки красного смещения, используя весь набор фильтров SDSS, что улучшает надежность и точность  $z_{\text{фот}}$ . При этом, часть ярких в рентгене квазаров на  $z > 3$  оказываются слабее выбранного оптического порога и будут пропущены при отборе.

Большинство источников K16, отобранных по  $z_{\text{фот}}$ , являются спектроскопически подтвержденными квазарами SDSS. Методом поиска новых кандидатов в далекие квазары, описанным в статье (Хорунжев и др., 2016), можно расширить на 20% выборку далеких рентгеновских квазаров на светимостях  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с. Эти кандидаты подтверждаются спектроскопическими наблюдениями, проведенными на телескопах: АЗТ-3ЗИК (Камус и др., 2002) спектрографом низкого разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016) и БТА спектрографами SCORPIO-I (Афанасьев и Моисеев, 2005) и SCORPIO-II (Афанасьев,

Моисеев, 2011; Афанасьев, Амирханян, 2012), см. Хорунжев и др. (2017а,б, 2018).

Полученная рентгеновская выборка ярких квазаров на  $z > 3$  является одной из самых обширных по площади покрытия неба и числу ярких источников. Ее можно использовать в качестве опорной для оценки полноты и чистоты методов отбора далеких квазаров, проверки алгоритмов отождествления в оптике рентгеновских источников планируемого обзора всего неба обсерватории СРГ (Павлинский и др., 2011; Мерлони и др., 2014).

Рентгеновский квазар на  $z = 3$  с потоком  $\simeq 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в 0.5–2 кэВ имеет светимость  $L_{X,2-10} \simeq 10^{45}$  эрг/с в 2–10 кэВ. Это означает, что  $z_{\text{фот.}}$  в площадках *SDSS* могут быть получены для  $\gtrsim 50\%$  рентгеновских квазаров на  $z \sim 3$  найденных в обзоре СРГ/eROSITA (Мерлони, 2014) с потоками  $\gtrsim 10^{14}$  эрг/с/см<sup>2</sup>, что соответствует средней чувствительности по небу четырехлетнего обзора. Значение светимости слома ( $L_* \simeq 4 \times 10^{44}$  эрг/с) можно будет уточнить с помощью данных глубоких площадок обзора СРГ вблизи полюсов эклиптики, где будет достигнута чувствительность  $F_{X,0.5-2} \simeq 2 \times 10^{-15}$  эрг/с/см<sup>2</sup>.

Используя полученный опыт и описанные результаты, можно расширить существующую выборку далеких рентгеновских квазаров за счет постоянно обновляемых рентгеновских (*XMM*-Ньютон) и оптических данных (*SDSS*, *Pan-STARRS*). Важно продолжать развитие программ спектроскопического отождествления квазаров с помощью телескопов АЗТЗЗ-ИК и БТА. Данная деятельность очень важна для рентгеновского обзора всего неба *Спектр-РГ*, объем данных которого будет на порядки больше, чем выборки *XMM*-Ньютон и других рентгеновских обсерваторий.



Таблица 5.1: Выборка источников каталога *K16* с  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с

N	No	Name	OBJID	RA	DEC	z	z <sub>ref</sub>	$F_{X,0.5-2}$	$L_{X,2-10}$
1	5	J000443.6-084036	1237680240914071885	1.1820	-8.6761	3.85		0.94	45.21
2	8	J000618.1-084410	1237672793424200167	1.5758	-8.7359	3.323	1	0.87	45.03
3	27	J002706.9+261559	1237680275262538220	6.7800	26.2667	3.29		0.94	45.06
4	30	J003000.5+044040	1237678661427266242	7.5034	4.6784	3.091	1411	1.00	45.02
5	35	J004054.6-091527	1237652948530037577	10.2277	-9.2575	5.002	1	1.11	45.53
6	42	J004505.3-014048	1237678881562427510	11.2721	-1.6800	3.282	1	1.00	45.08
7	45	J004800.9+315354	1237680310696804736	12.0039	31.8986	3.18		1.40	45.19
8	50	J005952.7+314403	1237680310697919062	14.9693	31.7343	3.30		1.84	45.35
9	87	J020229.4-042703	1237679323396309357	30.6225	-4.4509	3.23		2.11	45.39
10	89	J020316.4-074831	1237679338956325563	30.8182	-7.8090	3.296	1	1.24	45.18
11	107	J021126.4-054022	1237679321786614354	32.8598	-5.6731	3.399	1	0.99	45.11
12	115	J021401.9-003941	1237663783138296681	33.5082	-0.6617	4.17		0.63	45.11
13	133	J022037.4-061037	1237679340568903780	35.1561	-6.1769	3.03		1.01	45.01
14	141	J022112.5-034251	1237679323935212347	35.3026	-3.7145	5.011	1	0.62	45.28
15	144	J022307.9-030840	1237679255745790580	35.7832	-3.1445	3.675	1	0.77	45.07
16	153	J022320.7-031823	1237678887988429287	35.8363	-3.3068	3.865	1	2.19	45.58
17	163	J022826.5-085501	1237652900227252760	37.1099	-8.9175	3.24		1.17	45.13
18	167	J022906.0-051428	1237679253062091149	37.2752	-5.2414	3.173	1	1.93	45.33
19	180	J023441.1-040711	1237679323399782556	38.6713	-4.1197	3.334	1	0.95	45.07
20	192	J030449.8-000814	1237666300553789504	46.2077	-0.1371	3.287	1	4.81	45.76
21	245	J084617.8+190342	1237667211581522773	131.5738	19.0620	3.47	2	0.99	45.13
22	257	J085822.2+564533	1237660936091796090	134.5925	56.7590	3.021	1	1.34	45.12
23	282	J091959.5+370550	1237660634915406290	139.9984	37.0974	3.379	1	0.80	45.01
24	286	J092143.5+063644	1237658425155977396	140.4313	6.6121	3.718	1	1.00	45.20
25	287	J092325.3+453223	1237657401346424982	140.8552	45.5395	3.452	1	1.49	45.30
26	292	J093404.6+472434	1237657590848618536	143.5195	47.4095	3.086	1	1.74	45.26
27	293	J093451.6+353744	1237661384382480820	143.7148	35.6290	3.363	1	0.96	45.08
28	296	J093709.6+495147	1237657770707976723	144.2908	49.8642	3.641	1411	3.00	45.66
29	318	J095937.0+131212	1237664106852384915	149.9046	13.2043	4.064	1411	1.88	45.56
30	338	J101515.2+085456	1237660584444953274	153.8140	8.9159	3.235	1	1.46	45.23
31	347	J102107.5+220922	1237667538009588107	155.2816	22.1560	4.262	1	1.74	45.57
32	370	J103428.8+393343	1237661383314178468	158.6203	39.5621	4.334	1411	1.38	45.49
33	382	J104612.9+584719	1237655109446467756	161.5541	58.7886	3.054	1	1.53	45.19
34	385	J104909.8+373758	1237664668437774491	162.2909	37.6331	3.005	1	6.95	45.83
35	396	J105049.2+354517	1237664819280347214	162.7057	35.7557	3.326	1411	0.88	45.04
36	398	J105123.0+354535	1237664819280412861	162.8460	35.7595	4.921	1	1.73	45.71
37	411	J110458.2+250421	1237667551956369534	166.2428	25.0728	3.522	1	1.80	45.40

Таблица 5.1: Выборка источников каталога *K16* с  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с

N	No	Name	OBJID	RA	DEC	$z$	$z_{\text{ref}}$	$F_{X,0.5-2}$	$L_{X,2-10}$
38	430	J111900.0+152707	1237661070867431568	169.7508	15.4520	3.138	1	1.12	45.08
39	431	J112020.9+432545	1237661850390954212	170.0874	43.4292	3.555	1	0.88	45.10
40	447	J114323.7+193447	1237667915416600770	175.8488	19.5800	3.348	1	1.19	45.17
41	449	J114447.7+370434	1237664818748260677	176.1986	37.0763	4.010	1	1.77	45.52
42	453	J114816.0+525900	1237657857682899337	177.0670	52.9831	3.173	1	6.74	45.87
43	459	J115839.8+262510	1237667429035869276	179.6659	26.4197	3.428	1	0.94	45.09
44	460	J115933.3+553632	1237657591395844307	179.8888	55.6091	3.981	1	0.58	45.03
45	463	J120125.5+064621	1237671140947592014	180.3563	6.7729	3.323	1	1.24	45.18
46	476	J120949.7+453400	1237661873476534381	182.4573	45.5668	3.609	1	2.72	45.61
47	510	J122602.0+132114	1237661813886091391	186.5088	13.3540	3.530	1	1.95	45.44
48	523	J123136.8+131544	1237661950792696231	187.9030	13.2617	3.48	2	0.99	45.13
49	524	J123005.9+142957	1237664289929494661	187.5244	14.4989	3.275	1	1.56	45.27
50	525	J123011.9+102237	1237662238004412598	187.5500	10.3771	3.569	1	1.00	45.16
51	529	J123157.3+000933	1237648704579108962	187.9891	0.1590	3.226	1	0.95	45.04
52	538	J123503.1-000331	1237648721234559206	188.7627	-0.0588	4.701	1	2.27	45.78
53	553	J124210.7+024049	1237671765324595744	190.5448	2.6804	3.175	1	3.12	45.54
54	569	J125736.2+242040	1237667911133888887	194.4003	24.3444	3.681	1	0.92	45.15
55	579	J130616.9+264335	1237667322724680051	196.5703	26.7264	3.208	1	1.21	45.14
56	580	J130811.9+292512	1237665428627456150	197.0497	29.4202	3.035	1	1.11	45.04
57	592	J131236.2+231629	1237667910061654088	198.1511	23.2751	3.684	1	0.65	45.00
58	618	J133200.0+503613	1237662301357736036	202.9998	50.6037	3.84	2	0.78	45.12
59	619	J133223.2+503430	1237662301357736105	203.0969	50.5754	3.832	1	0.94	45.20
60	627	J134135.6-001321	1237648704049840848	205.3980	-0.2230	3.919	1	0.67	45.07
61	653	J140146.5+024433	1237651754560520506	210.4439	2.7430	4.424	1	1.06	45.39
62	675	J142926.4+011951	1237651752952923130	217.3601	1.3316	4.840	1297	0.51	45.17
63	693	J145753.0-011358	1237648702984422397	224.4710	-1.2330	3.503	1	1.33	45.26
64	704	J151147.1+071406	1237662237485039775	227.9465	7.2350	3.481	1	2.58	45.55
65	710	J151534.3-000000	1237648721252122996	228.8933	-0.0002	3.04	2	1.38	45.14
66	731	J154905.8+352020	1237662503219364016	237.2744	35.3390	3.038	1	2.60	45.42
67	745	J160528.3+272852	1237662307273999256	241.3675	27.4818	4.023	1	0.77	45.16
68	755	J162114.9-021130	1237668651464918353	245.3125	-2.1918	4.34	2	0.67	45.17
69	762	J163207.9+571108	1237668505439503219	248.0339	57.1863	3.40	2	1.04	45.13
70	766	J163459.2+332510	1237661386008298072	248.7476	33.4194	3.237	1	1.36	45.20
71	782	J171337.2+585306	1237651225708921950	258.4049	58.8853	4.37	2	0.76	45.24
72	796	J203958.0-004337	1237656567574104067	309.9923	-0.7273	4.63		0.44	45.06
73	816	J212959.5+051005	1237669762254439608	322.4981	5.1683	3.02		1.01	45.00
74	826	J215139.1+021628	1237678597539561948	327.9136	2.2740	3.256	1	0.97	45.06

Таблица 5.1: Выборка источников каталога *K16* с  $L_{X,2-10} > 10^{45}$  эрг/с

N	No	Name	OBJID	RA	DEC	z	z <sub>ref</sub>	$F_{X,0.5-2}$	$L_{X,2-10}$
75	837	J221753.2-003257	1237663542611083691	334.4730	-0.5486	3.106	1411	1.69	45.25
76	840	J222008.9-002343	1237663478722658939	335.0375	-0.3955	3.344	1	0.89	45.05
77	856	J230252.1+085522	1237679034548486973	345.7172	8.9225	3.750	1	0.64	45.02
78	859	J231619.4+254552	1237666184031633742	349.0811	25.7647	3.207	1	1.01	45.06
79	863	J231839.7+002032	1237666408437907970	349.6655	0.3421	3.23		1.11	45.11
80	866	J232137.4+283025	1237680331636474144	350.4056	28.5072	3.062	1	1.67	45.23
81	871	J232346.0+165228	1237678601301459610	350.9415	16.8744	3.602	1	1.22	45.25
82	872	J232419.4+165620	1237678601301524724	351.0810	16.9389	3.323	1	1.50	45.27
83	890	J234214.1+303606	1237666183498039666	355.5590	30.6017	3.37	2	0.80	45.01
84	897	J235054.6+200939	1237680246813491428	357.7276	20.1607	3.162	1	1.00	45.04
85	898	J235201.3+200901	1237680246813556916	358.0054	20.1507	3.079	1	1.16	45.08
86	901	J235435.5-101513	1237652900210671714	358.6483	-10.2537	3.120	1	1.16	45.09
87	*2	J002654.9+171944	1237678601308078496	6.7290	17.3290	3.095	1	1.12	45.07
88	*6	J020231.1-042246	1237679323396309664	30.6298	-4.3797	4.270	1	1.28	45.44
89	*9	J021338.6-051615	1237679253060387565	33.4110	-5.2711	4.544	1	0.93	45.36
90	*13	J022251.7-050713	1237679322324795732	35.7157	-5.1202	3.860	1758	0.88	45.18
91	*17	J023226.0-053729	1237679341107085527	38.1089	-5.6249	4.564	1	0.53	45.12
92	*24	J093521.2+612339	1237651272966275457	143.8391	61.3942	4.042	1	0.69	45.12
93	*25	J094013.9+344628	1237661382772130308	145.0579	34.7747	3.355	1	2.30	45.46
94	*30	J100655.8+050325	1237658297920454886	151.7325	5.0569	3.086	1	1.45	45.18
95	*33	J104808.3+583718	1237658304353272305	162.0354	58.6210	3.285	1	1.14	45.13
96	*43	J124405.1+125757	1237661817633374639	191.0211	12.9658	3.100	611	1.10	45.06
97	*51	J140149.8+024835	1237651754560520571	210.4579	2.8102	3.830	643	0.98	45.22
98	*54	J150603.5+012757	1237651753493791548	226.5146	1.4662	3.852	1	0.79	45.13
99	*56	J164829.7+350159	1237659326568858151	252.1238	35.0330	4.075	1347	3.53	45.84
100	*57	J171456.2+593700	1237651226245530116	258.7344	59.6169	4.028	1406	1.20	45.36
101	*61	J220845.5+020252	1237678597004591287	332.1895	2.0479	3.405	646	1.00	45.12

**Примечание.** N — номер источника, No — порядковый номер источника в каталоге (*K16*) Хорунжев и др. (2016), знак «\*» означает, что источник взят из дополнительной таблицы статьи Хорунжев и др. (2016) квазаров с  $z_{\text{спек.}} > 3$ , которые не вошли в каталог кандидатов, Name — имя в каталоге *3XMM-DR4* (3XMMJ...), OBJID — идентификатор в фотометрическом каталоге *SDSS-DR12*, RA и DEC — прямое восхождение и склонение (*SDSS-DR12*) в градусах, z — красное смещение источника, z<sub>ref</sub> — ссылка на значение красного смещения: пустое поле — фотометрическое красное смещение (Хорунжев и др., 2016), 1 — спектроскопия *SDSS-DR12* (Алам и др., 2015), 2 — данные спектроскопии AZT-33ИК и БТА (Хорунжев и др., 2017а,б, 2018); остальные значения красных смещений взяты из каталога Флеш 2015 (номера ссылок соответствуют Флеш (2015): 611 — Флеш (2015), 643 — (Гандхи и др., 2002), 646 — Гарилли и др. (2014), 1297 — Моньер и др. (2002), 1347 — Ньюман и др. (2013), 1406 — Папович и др. (2006), 1411 — Пэрис и др. (2017), 1758 — Сталин и др. (2010)),  $F_{X,0.5-2}$  — рентгеновский поток  $\times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне 0.5–2 кэВ,  $L_{X,2-10}$  — десятичный логарифм светимости источника в диапазоне 2–10 кэВ (эрг/с) в его системе отсчета.

Таблица 5.2: Параметры моделей рентгеновской функции светимости для подвыборок *V14U* и *K16*.

Модель	$\log A$	$\log L_*$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$p_{\text{lum}}$	$p_{\text{den}}$	$\beta$	$\Delta AIC$	$\Delta BIC$
PDE	$-5.28^{+0.11(-0.11)}_{-0.12(0.08)}$	$44.71^{+0.07(0.17)}_{-0.08(-0.11)}$	$0.14^{+0.14(0.08)}_{-0.15(-0.06)}$	$2.62^{+0.20(0.08)}_{-0.18(-0.08)}$	—	$-4.40^{+0.68(0.00)}_{-0.70(-0.07)}$	—	6.3	3.0
ILDE	$-5.15^{+0.12(-0.12)}_{-0.13(0.08)}$	$44.64^{+0.08(0.17)}_{-0.09(-0.11)}$	$0.14^{+0.14(0.09)}_{-0.15(-0.08)}$	$2.72^{+0.22(0.19)}_{-0.20(-0.12)}$	$1.97^{+0.69(0.47)}_{-0.68(-0.23)}$	$-7.31^{+1.23(-0.27)}_{-1.26(0.12)}$	—	0.3	0.3
LADE	$-5.17^{+0.12(-0.12)}_{-0.12(0.09)}$	$44.64^{+0.08(0.17)}_{-0.09(-0.11)}$	$0.14^{+0.14(0.09)}_{-0.15(-0.08)}$	$2.72^{+0.22(0.19)}_{-0.20(-0.12)}$	$1.98^{+0.70(0.45)}_{-0.69(-0.23)}$	$-0.67^{+0.11(-0.02)}_{-0.11(0.01)}$	—	0.0	0.0
LDDE	$-5.27^{+0.12(-0.13)}_{-0.13(0.09)}$	$44.72^{+0.07(0.16)}_{-0.07(-0.10)}$	$0.28^{+0.14(0.09)}_{-0.15(-0.07)}$	$2.87^{+0.22(0.10)}_{-0.21(-0.10)}$	—	$-7.10^{+1.26(-0.31)}_{-1.31(0.16)}$	$3.39^{+1.28(0.41)}_{-1.26(-0.30)}$	0.9	0.9
PLE	$-5.51^{+0.12(-0.12)}_{-0.13(0.08)}$	$44.76^{+0.09(0.16)}_{-0.09(-0.10)}$	$0.18^{+0.14(0.08)}_{-0.15(-0.06)}$	$2.43^{+0.19(0.01)}_{-0.18(-0.05)}$	$-1.84^{+0.43(-0.01)}_{-0.44(-0.07)}$	—	—	31.5	28.2

**Примечание.** LDDE, ILDE, LADE, PDE, PLE — рассматриваемые модели,  $\log A$  — десятичный логарифм нормировки функции светимости,  $\log L_*$  — десятичный логарифм светимости слома (эрг/с),  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — показатели степени для слабой и яркой частей функции светимости,  $p_{\text{lum}}$  — параметр эволюции светимости,  $p_{\text{den}}$  — параметр эволюции плотности,  $\beta$  — параметр зависимости эволюции плотности от светимости,  $\Delta AIC$  и  $\Delta BIC$  — разность значений информационных критериев AIC и BIC данной модели и модели с наименьшими значениями AIC и BIC (LADE). Значения параметров и их статистические погрешности ( $1\sigma$ ) 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 иверху, соответственно.

Таблица 5.3: Количество источников в интервалах  $\Delta \log L - \Delta z$

$\Delta \log L / \Delta z$	3.00–3.19	3.19–3.47	3.47–3.90	3.90–4.30	4.30–5.10
42.9–44.0	5/-	4/-	4/-	1/-	-/-
44.0–44.5	18/-	17/-	15/-	5/-	2/-
44.5–45.0	6/-	7/-	11/-	5/-	3/-
45.0–45.3	-/18	1/27	-/17	-/5	-/6
45.3–45.9	-/5	-/5	-/6	-/6	-/6

**Примечание.** Строки таблицы показывают разбиение на интервалы по логарифму рентгеновской светимости  $L_{X,2-10}$ . Столбцы — разбиение на интервалы по красному смещению  $z$ . В ячейках таблицы слева указано число объектов в данном интервале из выборки *V14U*, справа — из выборки *K16*.

# Литература

- Аирд и др. (J. Aird, K. Nandra, E. Laird, A. Georgakakis, M. Ashby, P. Barmby, A. Coil, J. Huang, et al.) *MNRAS* **401**, 2531 (2010)
- Аирд и др. (J. Aird, A. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, and P. Perez-Gonzalez) *MNRAS* **451**, 1892 (2015)
- Акаике (H. Akaike) *IEEE Transaction on Automatic Control* **19**, 716 (1974)
- Акияма и др. (M. Akiyama, Y. Ueda, M. Watson, H. Furusawa, T. Takata, C. Simpson, T. Morokuma, T. Yamada, et al.) *Publications of the Astronomical Society of Japan* **67**, 82 (2015)
- Алам и др. (S. Alam, F. Albareti, C. Prieto, F. Anders, S. Anderson, B. Andrews, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 12 (2015)
- В. Афанасьев и А. Моисеев () *Письма в Астрон. журн.* **31**, 214 (2005)
- Афанасьев и Моисеев (V. Afanasiev and A. Moiseev) *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011)
- В. Афанасьев и В. Амирханян () *Астрофизический Бюллетень* **67**, 455 (2012)
- В. Афанасьев, С. Додонов, В. Амирханян, А. Моисеев () *Астрофизический Бюллетень* **71**, 514 (2016)
- Бойл и др. (B. Boyle, T. Shanks, V. Peterson) *MNRAS* **235**, 935 (1988)
- Буренин и др. (Р.А. Буренин, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич, В.М. Григорьев, В.А. Арефьев, В.С. Воробьев, и др.) *Письма в Астрон. журн.* **42**, 333 (2016)
- Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk, G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, and T. Heckman) *Astron. J.* **122**, 549 (2001)
- Ватсон и др. (M. Watson, A. Shroder, D. Fyfe, C. Page, G. Lamer, S. Mateos, et al.) *Astron. Astrophys.* **493**, 339 (2009)
- Вито и др. (F. Vito, R. Gilli, C. Vignali, A. Comastri, M. Brusa, N. Capelluti, and K. Iwasawa) *MNRAS* **445**, 3557 (2014)
- Георгакакис и др. (A. Georgakakis, K. Nandra, E.S. Laird, J. Aird, and M. Trichas) *MNRAS* **388**, 1205 (2008)
- 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)
- Гандхи и др. (P. Gandhi, C. Crawford, A. Fabian) *MNRAS* **337**, 781 (2002)

- Гарилли и др. (B. Garilli, L. Guzzo, M. Scoddeggio, M. Bolzonella, U. Abbas, S. Arnouts, J. Bel, D. Bottini, et al.) *Astron. Astrophys.* **562**, 23 (2014)
- Дживалиско и др. (M. Giavalisco, H. Ferguson, A. Koekemoer, M. Dickinson, D. Alexander, F. Bauer, J. Bergeron, C. Biagetti, et al.) *Astrophys. J.* **600**, 93 (2004)
- Енчо и др. (B. Yencho, A. Barger, L. Trouille, L. Winter) *Astrophys. J.* **698**, 380 (2009)
- Калдвелл и др. (J. Caldwell, D. McIntosh, H. Rix, M. Barden, S. Beckwith, E. Bell, A. Borch, C. Neumans, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **174**, 136 (2008)
- Калфоунцоу и др. (E. Kalfountzou, F. Civano, M. Elvis, M. Trichas, and P. Green) *MNRAS* **445**, 1430 (2014)
- Камус С.Ф., Тергоев В.И., Папушев П.Г., Дружинин С.А., Караваев Ю.С., Палачев Ю.М., Денисенко С.А., Липин Н.А. *Оптический журнал* **69**, 84 (2002) (S.F. Kamus, S.A. Denisenko, N.A. Lipin, V.I. Tergoev, P.G. Papushev, S.A. Druzhinin, Yu.S. Karavaev, Yu.M. Palachev, *J. Optic. Technol.* **69**, 674 (2002))
- Капак и др. (P. Capak, H. Aussel, M. Ajiki, H. McCracken, B. Mobasher, N. Scoville, P. Shopbell, Y. Taniguchi, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 99 (2007)
- Катри и др. (R. Cutri, M. Skrutskie, S. van Dyk, C. Beichman, J. Carpenter, T. Chester, et al.) *The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science Archive.* **06**, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003tmc..book.....C> (2003)
- Ксю и др. (Y. Xue, B. Luo, W. Brandt, F. Bauer, B. Lehmer, P. Broos, D. Schneider, D. Alexander, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **195**, 10 (2011)
- Лилли и др. (S. Lilly, O. Le Fevre, A. Renzini, G. Zamorani, M. Scoddeggio, T. Contini, C. Carollo, G. Hasinger, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 70 (2007)
- Лонгейр и др. (M. Longair, P. Scheuer) *MNRAS* **151**, 45 (1970)
- Люссо и др. (E. Lusso, A. Comastri, C. Vignali, G. Zamorani, M. Brusa, R. Gilli, K. Iwasawa, M. Salvato, et al.) *Astron. Astrophys.* **512**, 34 (2010)
- Люссо и др. (E. Lusso, G. Risaliti) *Astron. Astrophys.* **602**, 79 (2017)
- Марчезе и др. (E. Marchese, R. Della Ceca, A. Caccianiga, P. Severgnini, A. Corral, and R. Fanali) *Astron. Astrophys.* **539**, 48 (2012)
- Маршалл и др. (H. Marshall, H. Tananbaum, Y. Avni, G. Zamorani, et al.) *Astrophys. J.* **269**, 35 (1983)
- Менцель и др. (M. Menzel, A. Merloni, A. Georgakakis, M. Salvato, E. Aubourg, W. Brandt, M. Brusa, J. Buchner, et al.) *MNRAS* **457**, 110 (2016)
- Мещеряков А., Глазкова В., Герасимов С., Буренин П. () *Письма в Астрон. журн.* **41**, 339 (2015)
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, et al.) *eROSITA Science Book*, (2014) <http://arxiv.org/pdf/1209.3114v2.pdf>
- Мияджи и др. (T. Miyaji, G. Hasinger, and M. Schmidt) *Astron. Astrophys.* **353**, 25 (2000)

- Мониер и др. (E. Monier, J. Kennefick, P. Hall, P. Osmer, M. Smith, G. Dalton, and R. Green) *Astron. J.* **124**, 2971 (2002)
- Ньюман и др. (J. Newman, M. Cooper, M. Davis, S. Faber, A. Coil, P. Guhathakurta, D. Koo, A. Phillips, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**, 5 (2013)
- Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, et al.) *Proceedings of the SPIE* **8147**, 5 (2011)
- Папович и др. (C. Papovich, R. Cool, D. Eisenstein, E. Le Floch, X. Fan, R. Kennicutt, J. Smith, G. Rieke, et al.) *Astron. J.* **132**, 231 (2006)
- Пиккиноtti и др. (G. Piccinotti, R. Mushotzky, E. Boldt, S. Holt, F. Marshall, P. Serlemitsos, and R. Shafer) *Astrophys. J.* **253**, 485 (1982)
- Пэрис и др. (I. Paris, P. Petitjean, N. Ross, A. Myers, E. Aubourg, A. streblyanska, S. Bailey, and E. Armengaud) *Astron. Astrophys.* **597**, 25 (2017)
- Пейдж, Каррера (M. Page and F. Garrera) *MNRAS* **311**, 433 (2000)
- Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.) *Astron. J.* **140**, 1868 (2010)
- Раналли и др. (P. Ranalli, E. Koulouridis, I. Georgantopoulos, S. Fotopoulou, L. Hsu, and M. Salvato) *Astron. Astrophys.* **590**, A80 (2016)
- Сазонов и др. (S. Sazonov, S. P. Willner, A. D. Goulding, et al.) *Astrophys. J.* **757**, 181 (2012)
- Сазонов, Хабибуллин (S. Sazonov and I. Khabibullin) *MNRAS* **466**, 1019 (2017)
- Сталин и др. (C. Stalin, P. Petitjean, R. Srianand, A. Fox, F. Coppolani, and A. Schwobe) *MNRAS* **401**, 294 (2010)
- Флеш (E.W. Flesch) *Publications of the Astronomical Society of Australia* **32**, 010 (2015); arXiv:1502.06303
- Фотопулоу и др. (S. Fotopoulou, J. Buchner, I. Georgantopoulos, G. Hasinger, M. Salvato, A. Georgakakis, N. Cappelluti, P. Ranalli, et al.) *Astron. Astrophys.* **587**, 142 (2016)
- Уеда и др. (Y. Ueda, M. Watson, I. Stewart, M. Akiyama, A. Schwobe, G. Lamer, J. Ebrero, F. Carrera, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **179**, 124 (2008)
- Уеда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, M. Watson) *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014)
- Хазингер и др. (G. Hasinger, N. Cappelluti, H. Brunner, M. Brusa, A. Comastri, M. Elvis, A. Finoguenov, F. Fiore, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 29 (2007)
- Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, А.В. Мещеряков, С.Ю. Сазонов) *Письма в Астрон. журн.* **42**, 313 (2016)
- Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич) *Письма в Астрон. журн.* **43**, 159 (2017)
- Хорунжев и др. (G. Khorunzhev, S. Sazonov, R. Burenin, and M. Eiselevich) *Front. Astron. Space Sci. - Milky Way and Galaxies, Quasars at all cosmic epochs*, (2017), doi: 10.3389/fspas.2017.00037

- Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, С.Ю. Сазонов., Р.А. Буренин) Письма в Астрон. журн. **44**, 546 (2018)
- Цивано и др. (F. Civano, M. Elvis, M. Brusa, A. Comastri, M. Salvato, G. Zamorani, et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **201**, 30 (2012)
- Шварц (G. Schwarz) *Annals of Statistics* **6**, 461 (1978)
- Шмидт (M. Shmidt) *Astrophys. J.* **151**, 393 (1968)
- Шмидт, Грин (M. Shmidt and R. Green) *Astrophys. J.* **269**, 352 (1983)
- Элвис и др. (M. Elvis, F. Civano, C. Vignali, S. Puccetti, F. Fiore, N. Cappelluti, T. Aldcroft, A. Fruscione , et al.) *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **184**, 158 (2009)



# Заключение

Описанные в этой работе методы поиска и исследования активных ядер галактик позволяют решить важные научные задачи обзора *Спектр-РГ* и получить результаты мирового уровня. Важно, что все методы прошли экспериментальную проверку, и получен практический опыт работы с существующими рентгеновскими, оптическими и инфракрасными обзорами неба, которые будут использоваться для поддержки обзора *Спектр-РГ*. Результаты, представленные в каждой главе, имеют самостоятельную научную ценность.

В главе 2 проведен сравнительный анализ различных методов оценки масс СМЧД. Массы 68 сверхмассивных чёрных дыр (СМЧД) представительной выборки близких ( $z < 0.15$ ) активных ядер галактик (АЯГ), зарегистрированных обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» в жестком рентгеновском диапазоне (17–60 кэВ), были измерены несколькими методами: по корреляции с инфракрасной светимостью звездного балджа, по характеристикам широких эмиссионных линий. Для ряда объектов проведено сравнение с более точными оценками масс СМЧД, взятыми из литературы.

Массы СМЧД, полученные по корреляции со светимостью балджа, оказываются систематически выше оценок, сделанных другими методами для масс менее  $10^8 M_{\odot}$ . Это надо будет учитывать при использовании данной корреляции в будущем. Опробован метод измерения масс СМЧД по характеристикам широких линий в спектрах, полученных на телескопе РТТ-150. Показано, что данная задача практически решается на телескопе РТТ-150, осуществляющем наземную поддержку обзора *Спектр-РГ*.

Используя полученные значения масс СМЧД, для каждого источника была посчитана критическая эддингтоновская светимость и найдено отношение болометрической светимости к критической эддингтоновской светимости. Для большинства АЯГ это отношение лежит в диапазоне от 0.01-1. Это значит, что в АЯГ близкой Вселенной на  $z < 0.1$  аккреция газа на СМЧД преимущественно идет в высоком темпе и в радиационно эффективном режиме.

В главе 3 описан метод поиска кандидатов в квазары первого типа на красных смещениях  $3 < z < 5.5$ . Показано, что для отбора можно использовать фотометрические оценки красного смещения, сделанные по открытым данным широкополосных фотометрических обзоров. Это значит, что на первом этапе работы с данными *Спектр-РГ* не потребуется проводить дополнительных фотометрических наблюдений. Вероятно, что больше половины далеких рентгеновских квазаров 4-летнего обзора *Спектр-РГ* смогут быть отождествлены с оптическими источниками в областях *Слоановского обзора*, и для них могут быть получены достаточно надежные оценки фотометрических красных смещений  $z_{\text{фот.}}$ . Разработанный метод оценки  $z_{\text{фот.}}$  имеет приемлимую точность и дает низкий процент ошибочных источников. Данным методом проведен отбор и составлен каталог кандидатов в квазары первого типа. Примерно 40% отобранных источников — это новые кандидаты в квазары, которые не имеют снятого спектра.

В главе 4 описываются результаты экспериментальной проверки новых кандидатов на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК и 6-метровом телескопе БТА. Телескоп АЗТ-33ИК участвует в наземной поддержке обзора *Спектр-РГ* и оборудован новым спектрографом АДАМ с высокой квантовой эффективностью в ближнем ИК. Высокая чувствительность спектрографа позволила проверить кандидаты в квазары с красным смещением  $z \approx 5$ . Был подтвержден один из самых далеких ( $z_{\text{спек.}} = 5.08$ ) оптически ярких ( $i' \lesssim 21$ ) квазаров, из когда-либо

обнаруженных в рентгеновских обзорах. Это практически подтверждает высокое качество оборудования и наглядно демонстрирует, что можно решать задачи поиска самых далеких квазаров на телескопах 1.5-метрового класса. Показано, что дополнительный отбор оптически ярких квазаров на  $z > 3$  и спектроскопическая проверка необходимы для получения полной выборки квазаров и исследования их распределения по светимости и красному смещению (функции светимости). Была подтверждена 50% чистота выборки кандидатов. Следовательно, разработанным методом отбора можно увеличить на  $\approx 25\%$  число квазаров относительно спектроскопической выборки *SDSS* на  $z > 3$ .

В главе 5 получена рентгеновская функция светимости самых ярких и далеких квазаров 1-го типа. Удалось составить выборку из 101 квазара со светимостями  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с на  $3 < z < 5$  на площади  $\approx 300$  кв. град. Эти источники имеют очень низкую поверхностную плотность, поэтому набрать такое число объектов с помощью обзоров меньшей площади было невозможно. Выборка составлена из объектов каталога *K16*, обсуждение которого ведется в главах 3,4. С помощью наблюдений на телескопах АЗТ-3ЗИК и БТА новых кандидатов в квазары из *K16*, удалось повысить качество выборки, увеличив до 90% долю спектроскопически подтвержденных квазаров.

Впервые сделаны значимые оценки плотности ярких квазаров на светимости  $L_{X,2-10} \geq 10^{45}$  эрг/с. Существенно улучшены ограничения на степенной наклон  $\gamma_2$  функции светимости, который отвечает за спад плотности ярких квазаров. Уточнены значения других параметров популярных моделей рентгеновской функции светимости. Достоверно показано, что с уменьшением светимости плотность квазаров на  $z \sim 3$  возрастает по отношению к плотности квазаров на  $z \sim 5$ .

Проделанная работа показывает, что освоены все этапы исследования активных ядер галактик: отождествление рентгеновских и оптических каталогов, классификация, создание выборок с заданными свойствами, спектроскопическая проверка, получение научного результата. Освоенные методы применимы как к существующим рентгеновским обзорам, так и к данным планируемых миссий. Получены важные научные результаты по темпам аккреции АЯГ в близкой Вселенной и рентгеновской функции светимости далеких квазаров.