

КАТАЛОГ КВАЗАРОВ, СОЗДАННЫЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРЕДНЕПОЛОСНОГО ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО ОБЗОРА НА 1-М ТЕЛЕСКОПЕ ШМИДТА

© 2022 г. С. С. Котов^{1,2,3*}, С. Н. Додонов^{1,2,3}, Т. А. Мовсесян⁴, А. А. Гроховская^{1,2,5}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Россия

⁴Бюраканская астрофизическая обсерватория НАН Армении, Армения

⁵Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.04.2022 г.

После доработки 18.05.2022 г.; принята к публикации 20.06.2022 г.

По данным среднеполосного фотометрического обзора на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории нами создана полная до 22.5 звездной величины выборка квазаров в поле HS47.5-22 площадью 2.38 квадратных градуса. Мы классифицировали объекты и создали выборку квазаров, используя широкополосные фотометрические данные и морфологическую классификацию из обзора DECaLS (Дей и др., 2019), инфракрасную фотометрию из обзора WISE (Мейснер и др., 2018), спектроскопию из обзора SDSS (Пэрис и др., 2018), рентгеновские данные ROSAT (Мольтхаген и др., 1997), радиоданные FIRST (Беккер и др., 1995) и данные о собственном движении объектов из обзора GAIA (Коллаборация Гайа и др., 2018). Выборка содержит 682 квазара, для которых мы определили среднеполосные фотометрические красные смещения, вычислили абсолютные звездные величины, а также исследовали распределение пространственной плотности квазаров и функцию светимости. В результате мы получили указания на отсутствие значимого снижения пространственной плотности квазаров до $z = 4$.

Ключевые слова: активные ядра галактик, оптические обзоры, среднеполосная фотометрия.

DOI: 10.31857/S0320010822080046

ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ) — одни из самых ярких объектов во Вселенной. Их источник энергии — аккреция вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД): когда газ приближается к СМЧД, его температура повышается, и он начинает излучать в широком диапазоне длин волн, от гамма-квантов до радиоизлучения. При этом в своем спектре АЯГ не только показывают непрерывное излучение аккреционного диска, но и демонстрируют эмиссионные линии от рентгеновского до инфракрасного спектральных диапазонов. В свою очередь, эмиссионные линии могут быть широкими или узкими, в зависимости от ориентации АЯГ относительно наблюдателя и распределения поглощающего излучение вещества вокруг активного ядра (Антонуччи, 1993; Уррю, Падовани, 1995).

Для многочисленных задач в различных областях астрофизики, от физики высоких энергий до космологии, проблема определения полного числа активных ядер галактик является фундаментальной. АЯГ изучаются в контексте моделей эволюции галактик (Хекман, Бест, 2014), поскольку есть свидетельства тесной корреляции между СМЧД и свойствами галактик (Корменди, Ричстон, 1995; Гебхарт и др., 2000), хотя причинное происхождение этих зависимостей не является общепринятым (Пенг, 2007; Янке, Маччио, 2011). Кроме того, благодаря большой светимости, оптически самые яркие АЯГ I типа (квазары) позволяют нам проследить распределение материи с ранних времен (в настоящее время самый далекий квазар, подтвержденный спектроскопией, находится на $z = 7.1$, Мортлок и др., 2011). Квазары также могут использоваться для расчета ограничений на космологические модели: Буска и др. (2013)

*Электронный адрес: sss.kotov@mail.ru

обнаружили барионные акустические осцилляции (БАО) в $Ly\alpha$ лесу в спектре квазаров, и в перспективе планируют измерить функцию БАО через кластеризацию квазаров. Также рассматриваются возможности использования квазаров в качестве стандартных свечей (Ду и др., 2015; Уотсон и др., 2011; Рисалити, Луссо, 2017).

Исследование эволюции пространственной плотности и функции светимости квазаров с красным смещением является одним из важнейших методов изучения эволюции АЯГ. С их помощью мы можем получить ограничения на физические модели роста сверхмассивных черных дыр в галактиках (Хаехнелт и др., 1993; Хайман, Лоэб, 1998; Кауфман, Хаенхельг, 2000). Также функция светимости позволяет оценить вклад АЯГ во внегалактический ультрафиолетовый фон (Мейксин, Мадау, 1993; Бойль и др., 1998).

Имеются значительные различия в оценках эволюции пространственной плотности квазаров по оптическим и рентгеновским данным (Мияши и др., 2000). Существуют также большие различия в оценках эволюции пространственной плотности квазаров и их функции светимости в диапазоне $3 < z < 5$ по данным оптических обзоров (SDSS — Sloan Digital Sky Survey, Пэрис и др., 2018; COMBO-17 — Classifying Objects by Medium-Band Observations, Вольф и др., 2003; ALHAMBRA — Advanced Large, Homogenous Area Medium Band Redshift Astronomical Survey, Мэтьют и др., 2012; COSMOS — Cosmological Evolution Survey, Мастерс и др., 2012), в которых применялись разные методы создания выборки квазаров. Эти различия, по нашему мнению, обусловлены эффектами селекции разных методов отбора квазаров.

В данной работе все оптические и инфракрасные звездные величины представлены в AB-системе. Для расчета космологических эффектов была использована λ -CDM модель с параметрами $\Omega_m = 0.3$ и $\Omega_\lambda = 0.7$ (Хогг, 1999).

ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ РЕПРЕЗЕНТАТИВНОЙ ВЫБОРКИ КВАЗАРОВ

Поиск и изучение свойств АЯГ — непростая задача. Связано это с малочисленностью объектов (порядка 300 объектов на 1 кв. град до $R = 22.5^m$), разнообразием спектров, большим диапазоном наблюдаемых красных смещений. Методы поиска АЯГ можно условно разделить по длинам волн: поиск в рентгеновском диапазоне, оптическом (включая инфракрасные и ультрафиолетовые данные) и радиодиапазонах. Здесь следует отметить, что не все АЯГ детектируются в рентгеновском и радиодиапазонах (Сильверман и др., 2008).

Среди оптических методов исторически наиболее успешными являются: широкополосная фотометрия (Гаро, Лейтен, 1962) и бесщелевая спектроскопия (Маркарянские обзоры, Маркарян, 1967). Широкополосная фотометрия использовалась в обзорных работах для отбора квазаров по УФ-избытку (Бойль и др., 1990) и позволяет эффективно отбирать объекты на красных смещениях менее 2.2, на больших красных смещениях квазары становятся неотличимы по цветовым избыткам от звезд. Переход от цветовых избытков к бесщелевой спектроскопии существенно расширил наше понимание природы галактик и квазаров. Бесщелевая спектроскопия с применением объективной призмы, гризмы или грензы — эффективная методика получения информации о большом количестве объектов с низким спектральным разрешением. Однако значимы и ограничения метода: при бесщелевой спектроскопии изображение объекта растягивается в спектр над фоном неба, что приводит к снижению отношения сигнал/шум, а спектральное разрешение определяется монохроматическим изображением объекта. Результаты наблюдений бесщелевой спектроскопии отягощены проблемами наложений спектров, переменной комой по полю зрения, а полезный спектральный диапазон для объективных призм, гризм и гренз ограничен (около 2500 Å).

Дальнейшим развитием оптических методов отбора активных ядер стало комбинирование широкополосной фотометрии с данными ИК- и УФ-телескопов, а также последующее подтверждение природы отобранных объектов и определение их красных смещений с помощью мультиобъектной спектроскопии. Данная методика успешно реализована в SDSS (Ричардс и др., 2002, 2015; Ди Помпео и др., 2015). С ее помощью полнота выборки квазаров до красных смещений меньше 2.2 достигла почти 80%. Она также позволила находить квазары на больших красных смещениях ($z > 2.2$), но при этом результаты поиска оказались малопродуктивными для статистических исследований: большинство квазаров по-прежнему оставались неотличимы от звезд по цветовым избыткам, и полнота выборки квазаров не превышала 30%, несмотря на дополнение широкополосными данными ИК и УФ (Котов, 2016).

Развитием фотометрических методов поиска стало увеличение числа фильтров при уменьшении их ширины (Баум, 1962). Хиксон и Чен (Хиксон и др., 1994; Чен, 1994) были первыми, кто использовал среднеполосные фильтры, покрывающие большой спектральный диапазон, и рассматривали полученные фотометрические данные как низкодисперсионный спектр каждого наблюдаемого объекта. Данный метод в настоящее время является единственным, позволяющим получать глубокие

спектрофотометрические данные для сотен тысяч объектов за несколько наблюдательных ночей на телескопах метрового класса. Разные варианты этого метода применялись в обзорах BATC (Гаотон и др., 2004), CADIS (Вольф и др., 2001), COMBO-17 (Вольф и др., 2003), MUSYC (Гавайзер и др., 2006), ALHAMBRA (Мэтьют и др., 2012), COSMOS (Мастерс и др., 2012).

Для изучения эволюции квазаров в разных диапазонах светимости и красных смещений в исследуемом поле необходимо получить как можно более однородную выборку с максимальной полнотой. При создании выборки следует учитывать следующие моменты:

- Большое разнообразие наблюдаемых характеристик квазаров определяется многими факторами, такими как темп аккреции вещества на черную дыру, структура центральной области АЯГ, ориентация АЯГ к наблюдателю, поглощение и излучение подстилающей галактики и др.
- Поиск квазаров с разными спектральными характеристиками требует разных методов отбора с разными критериями поиска. Для создания наиболее полной выборки квазаров отбор по разным критериям следует проводить параллельно.
- Из-за разных спектральных характеристик квазаров на разных красных смещениях возникают эффекты селекции, влияние которых можно ошибочно интерпретировать как эволюцию самих квазаров. Поэтому при формировании выборки для изучения эволюции квазаров требуется минимизировать зависимость эффектов селекции от красного смещения.

ДАННЫЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОТБОРА КВАЗАРОВ

Для отбора квазаров мы использовали следующие данные.

Оптическая широкополосная фотометрия. Оптическая широкополосная фотометрия не требует использования больших телескопов и позволяет получать данные о слабых объектах за минимальное телескопное время. Данные широкополосной фотометрии позволяют эффективно отбирать квазары на красных смещениях до $z = 2.2$ по критерию ультрафиолетового избытка (Ричардс и др., 2002), однако на больших красных смещениях квазары становятся практически неотличимы от звезд в широкополосных фильтрах (Котов, 2016). Также по этим данным невозможно с достаточной

точностью определить фотометрические красные смещения квазаров.

Инфракрасная широкополосная фотометрия. Инфракрасные цветовые критерии позволяют отобрать большинство квазаров с красными смещениями до $z = 3$; при больших красных смещениях инфракрасные цвета значительной части квазаров становятся неотличимыми от звезд и галактик (Ян и др., 2013). Кроме того, имеющиеся в настоящее время инфракрасные данные (обзор WISE, Мейснер и др., 2018) недостаточно глубоки, чтобы отбирать квазары слабее 22-й величины.

Оптическая среднеполосная фотометрия. Оптическая среднеполосная фотометрия требует гораздо большего телескопного времени по сравнению с широкополосной фотометрией, но позволяет регистрировать широкие эмиссионные линии в спектрах квазаров (Вольф и др., 2003), что можно использовать для практически однородного отбора в диапазоне красных смещений до $z = 5$ и более. Также можно с высокой точностью определять фотометрические красные смещения квазаров по эмиссионным линиям (Чавес-Монтеро и др., 2017). С другой стороны, разработать алгоритм автоматической классификации объектов по среднеполосным фотометрическим данным является сложной задачей, поскольку использовать цветовые критерии для такого числа фильтров становится неэффективно, и требуются алгоритмы машинного обучения для классификации объектов. Это, в свою очередь, сильно затруднено малыми размерами и неоднородностью доступной обучающей выборки квазаров, для которых имеются данные среднеполосной фотометрии. Использование шаблонных спектров, свернутых с кривыми пропускания среднеполосных фильтров, позволяет частично решить эту проблему. Но шаблонные спектры не могут покрыть все разнообразие квазаров, поскольку для этого требуется учесть все вариации таких параметров, как наклон континуума, эквивалентная ширина эмиссионных линий, соотношение яркости эмиссионных линий, красное смещение и вариации поглощения на луче зрения.

Наличие рентгеновского или радиоизлучения. Наличие рентгеновского и радиоизлучения можно использовать как критерий отбора, но достаточное для регистрации рентгеновское и радиоизлучение наблюдается лишь у небольшой части квазаров (Сильверман и др., 2008), а для определения красных смещений требуется оптическое отождествление объектов с последующей спектроскопией. Оптическое отождествление рентгеновских источников часто неоднозначно из-за низкого углового разрешения рентгеновских телескопов: одному рентгеновскому источнику может соответствовать несколько объектов в оптическом диапазоне.

Морфологическая классификация. Морфологические данные могут быть использованы для разделения квазаров и далеких галактик.

Астрометрические данные: параллакс и собственные движения. Данные о параллаксе и собственном движении можно использовать для выделения звезд из выборки. Самые глубокие и точные данные на сегодняшний день — из обзора Gaia (Коллаборация Гайа и др., 2016). В нем представлены данные о параллаксах и собственных движениях звездобразных источников до 20.5 зв. величины (Коллаборация Гайа и др., 2018; Лури и др., 2018). Этот предел глубины позволяет отделять от звезд только наиболее яркие квазары на больших красных смещениях.

Переменность. Данные о переменности можно использовать в качестве критерия отбора, поскольку характер переменности квазаров и переменных звезд существенно различается (Паланк-Делабуриль и др., 2016). Но получение таких данных подразумевает множество наблюдений в разное время. Кроме того, все процессы на красном смещении z для наблюдателя происходят в $z + 1$ раз медленнее (Хогг, 1999), и переменность далеких квазаров становится менее заметной. Это приводит к эффектам селекции, зависящим от красного смещения.

Спектроскопические данные. Спектроскопические данные в большинстве случаев являются исчерпывающими для классификации объектов и определения красных смещений. Но спектроскопия требует длительного телескопного времени и может быть получена только для заранее выбранных объектов с точно известными координатами в поле (Пэрис и др., 2018).

Поскольку все критерии по отдельности имеют либо эффекты селекции в зависимости от красного смещения, либо страдают от неполноты, то для получения наиболее полной однородной выборки оптимально разделить отбор на два этапа. В первых, сделать максимально полную, но сильно загрязненную выборку кандидатов в квазары, параллельно используя различные комбинации критериев отбора. Затем удалить из нее ложно отобранные объекты с помощью более сложных методов, таких как среднелосная фотометрия и спектроскопия. Также для определения красных смещений с точностью, достаточной для изучения эволюции, можно использовать как данные среднелосной фотометрии, так и данные спектроскопии.

В настоящее время существует множество глубоких широкополосных фотометрических обзоров, покрывающих большую часть неба (SDSS, Пэрис и др., 2018; DECaLS, Дей и др., 2019; PanSTARRS, Джуитт, 2003), их данные находятся в открытом

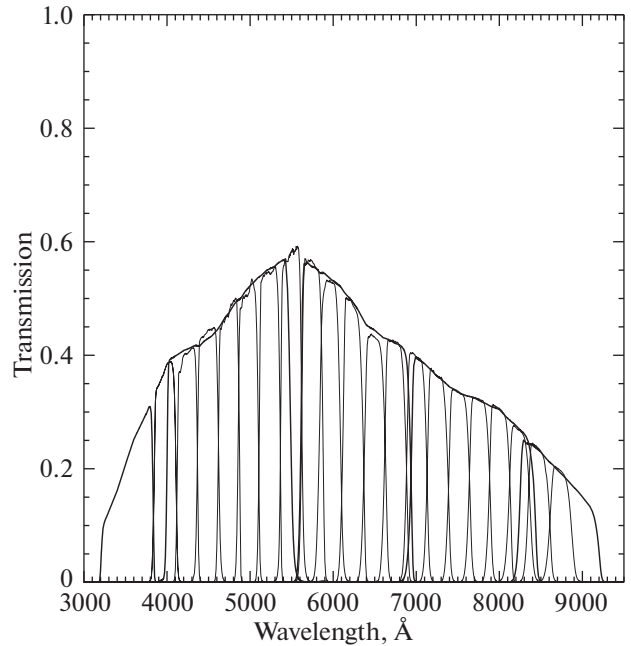


Рис. 1. Набор фильтров 1-м телескопа Шмидта. Пропускание фильтров измерено в сходящемся пучке со светосилой $F/2$. Кривые пропускания фильтров приведены с учетом чувствительности детектора.

доступе. Также в открытом доступе находится инфракрасный обзор WISE, данные рентгеновского телескопа ROSAT, радиобзор FIRST, астрометрический обзор Gaia и спектроскопия SDSS.

Для создания полной выборки квазаров мы выбрали поле HS47.5-22, для которого имеются данные всех описанных выше обзоров. Также в этом поле очень низкое поглощение в Галактике на луче зрения, сравнимое с поглощением в поле дыры Локмана. Таким образом, имеется возможность разработать и применить комбинированный метод отбора квазаров. Для максимального качества отбора и определения красных смещений был проведен среднелосный фотометрический обзор в этом поле.

НАБЛЮДЕНИЯ

Для наблюдений мы использовали 1-м телескоп системы Шмидта (100/125/213) Бюраканской астрофизической обсерватории Национальной академии наук Армении. Телескоп входит в пятерку крупнейших телескопов системы Шмидта в мире по размеру зеркала и в тройку тАФ по размеру объективных призм, и является одним из самых светосильных ($F/2.1$) среди инструментов своего класса.

Мы установили в фокусе телескопа CCD-детектор ($4K \times 4K$, с жидкостным охлаждением, RON $11.1e^-$, производитель Apogee, USA) с

элементом разрешения 0.868 угл. сек/пиксель и полем зрения около 1 кв. град. Детектор оснащен турелью с двадцатью среднеполосными фильтрами ($FWHM = 250 \text{ \AA}$), равномерно покрывающими спектральный диапазон 4000–9000 \AA , и пятью широкополосными фильтрами (u, g, r, i, z SDSS). На рис. 1 приведены кривые пропускания фильтров, измеренные в сходящемся пучке F/2.1, соответствующем светосиле телескопа (Додонов и др., 2017).

Для наблюдений нами было выбрано поле HS47.5-22 — одно из полей с глубоким накоплением рентгеновского спутника ROSAT (Мольтхаген и др., 1997). Центральная часть поля с координатами центра $09^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}} + 47^{\text{d}}35^{\text{m}}00^{\text{s}}$ и размером 2.38 кв. градуса была покрыта четырьмя наборами экспозиций в широкополосных и среднеполосных фильтрах (рис. 2). Перекрытия соседних наборов составляли около 10 угловых минут. По наблюдениям на рентгеновском спутнике ROSAT обнаружено 144 рентгеновских источника до уровня $3.5 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (Мольтхаген и др., 1997). По результатам обзора FIRST в поле обнаружено 362 радиоисточника (Уайт и др., 1997; Хельфанд и др., 2015).

Наблюдения проводились на протяжении нескольких сетов в феврале, марте, апреле и ноябре 2017 г., а также в феврале и ноябре 2018 г. в четырех широкополосных фильтрах системы SDSS (u, g, r, i) и 16 среднеполосных фильтрах, равномерно покрывающих спектральный диапазон 4000–8000 \AA . Суммарное время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы достичь глубины $M_{AB} \approx 25^{\text{m}}$ с соотношением сигнал–шум 5 в широкополосных (около 2 ч) и $M_{AB} \approx 23^{\text{m}}$ с соотношением сигнал–шум 3–5 в среднеполосных фильтрах (около 60 мин в пике кривой чувствительности детектора и около 2 ч на краях диапазона, табл. 1).

Первичная редукция изображений

Рассмотрим ключевые моменты редукции наблюдательных данных, опуская стандартные и хорошо описанные в литературе (Лаббе и др., 2003; Гавайзер и др., 2006; Молес и др., 2008; Кардамоне и др., 2010) шаги редукции данных, такие как подготовка и вычитание среднего уровня “электронного ноля”, подготовка и вычитание среднего уровня темного тока, коррекция за плоское поле, учет вклада фринговой составляющей в красных диапазонах, чистка космических частиц, оценка качества изображений и т.д. После предварительной редукции данных все снимки для каждого фильтра приводятся к единой системе координат, делаются

Таблица 1. Набор широкополосных и среднеполосных фильтров 1-м телескопа Шмидта БАО НАН. Эффективная длина волны, FWHM, предельная звездная величина, измеренная на уровне сигнал/шум ~ 5

Фильтр	$\lambda_{\text{cen}}, \text{\AA}$	FWHM, \AA	$m_{\text{lim}, 3\sigma}$
u SDSS	3578	338	24.23
g SDSS	4797	860	25.22
r SDSS	6227	770	24.97
i SDSS	7624	857	24.15
mb 400	3978	250	24.37
mb 425	4246	250	24.31
mb 450	4492	250	24.20
mb 475	4745	250	24.31
mb 500	4978	250	24.30
mb 525	5234	250	24.37
mb 550	5496	250	23.86
mb 575	5746	250	24.29
mb 600	5959	250	23.89
mb 625	6234	250	23.51
mb 650	6499	250	23.41
mb 675	6745	250	23.78
mb 700	7002	250	23.47
mb 725	7253	250	23.20
mb 750	7519	250	23.07
mb 775	7758	250	22.97

оценки качества изображений, снимки с плохим качеством изображений отбрасываются. Остальные снимки приводятся к единому качеству изображений, после чего производится сложение снимков с приведением к экспозиции в одну секунду.

Астрометрия

Суммарные снимки поля в разных фильтрах приводятся к единой системе координат, а по данным USNO-B (Монет и др., 2003) создается астрометрическая структура, с помощью которой можно пересчитать положения объектов в поле зрения телескопа в R.A. и DEC. Точность астрометрии, достигаемая для объектов исследуемого поля, не хуже 0.3 угл. сек (0.1–0.3 канала) (рис. 3).

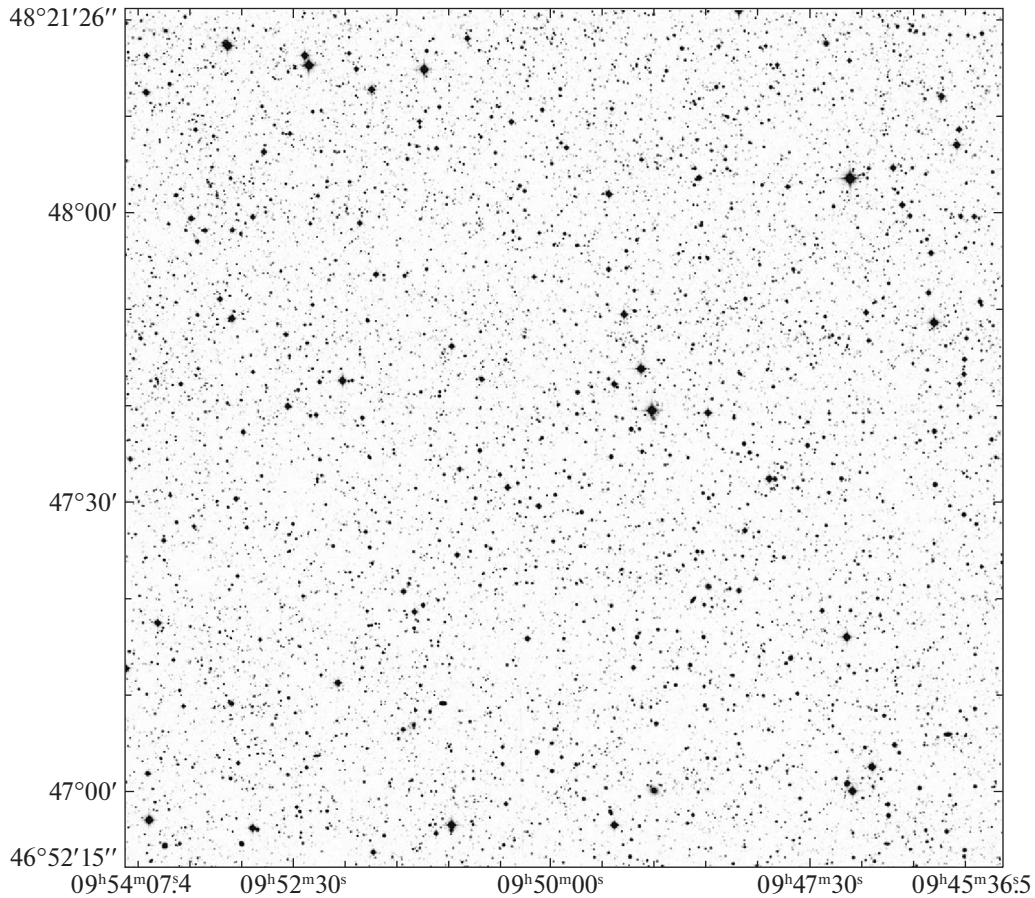


Рис. 2. Карта поля HS47.5-22, полученная на 1-м телескопе Шмидта БАО. $RA = 09^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}}$, $DEC = +47^{\text{d}}35^{\text{m}}00^{\text{s}}$. Мозаика из 4×1 кв. град с перекрытиями 10 угл. мин. Итоговый размер 2.38 кв. град, 16 среднеполосных фильтров с $FWHM = 250 \text{ \AA}$, 4 широкополосных фильтра SDSS. Однородное покрытие спектрального диапазона 4000–8000 \AA , $S/N \approx 5$ для $AB = 23^{\text{m}}$ во всех среднеполосных фильтрах. 144 объекта ROSAT до $3.5 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, 362 объекта FIRST, 209 квазаров SDSS.

Детектирование объектов

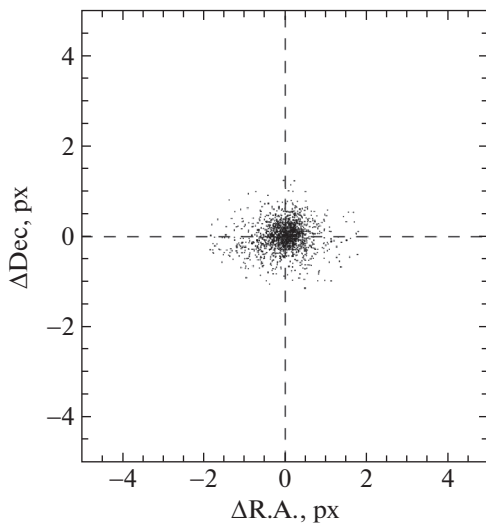


Рис. 3. Точность астрометрии для объектов поля HS47.5-22.

Существуют несколько стратегий использования SExtractor (Бертин, Арно, 1996) для детектирования и фотометрии объектов. Встроенная в программу возможность детектирования объектов на одном изображении и фотометрии на другом — наиболее подходящая схема для фотометрии объектов на снимках, сделанных во многих фильтрах. Важным моментом в этом случае является создание базового изображения, такого, чтобы не потерять объекты с необычными цветовыми характеристиками или объекты с отношением сигнал/шум, близким к пределу обнаружения. Здесь применяются разнообразные подходы: в качестве базового изображения для детектирования объектов используют наиболее глубокий снимок в красном (чтобы не потерять слабые галактики) диапазоне спектра (Вольф и др., 2004); сумму двух или более снимков (как это было сделано для поля HDF, Вильямс и др., 1996); сумму снимков

с наилучшим качеством изображений с весовыми коэффициентами, рассчитанными исходя из шумовых характеристик снимков (Гавайзер и др., 2005); χ^2 -изображения, предложенные для оптимального детектирования слабых объектов на снимках HDF (Залай и др., 1999). Мы взяли вариант суммы снимков с весовыми коэффициентами, так как в этом случае мы можем использовать базовый снимок не только для детектирования объектов, но и для измерения их морфологических параметров. Весовые коэффициенты рассчитывались по методике, предложенной в (Гавайзер и др., 2005). Детектирование объектов производилось в SExtractor после фильтрации с гауссовским ядром, соответствующим качеству изображений на базовом снимке. Уровень детектирования и анализа определялся так, чтобы число “случайных” объектов на “негативном” базовом снимке не превышало 1–2% от числа обнаруживаемых на базовом снимке объектов. Здесь мы учитывали тот факт, что разброс шумовых отсчетов фона неба симметричен и позволяет сделать грубую оценку числа ложных объектов, обнаруживаемых SExtractor.

Фотометрия объектов

Точное распределение энергии в спектрах объектов (SED) может быть построено, только если в каждом фильтре проинтегрированы одни и те же части наблюдаемых объектов. Если не принимать во внимание изменение размера объектов (PSF) от снимка к снимку, то в одинаковых апертурах на разных снимках будут проинтегрированы разные части объектов. Это может привести к ошибкам в цветах объектов до 20% (Кардамоне и др., 2010). Общепринятая техника построения SED объектов состоит в приведении всех снимков к единому качеству изображений, наилучшему среди набора снимков (Лаббе и др., 2003; Капак и др., 2007; Тэйлор и др., 2009). Затем апертуры используются для интегрирования изображений объектов во всех фильтрах. Шумовые характеристики отдельных изображений хорошо описываются дисперсией сигнала, накопленного в каждом канале, поскольку пуассоновский шум сигнала и шум считывания детектора не коррелированы. Однако обработка изображений (сдвиги, сложения и другие процедуры) вносит корреляцию между соседними каналами, малые ошибки при вычитании фона ночного неба также могут влиять на шумы. Понимание свойств шумов необходимо, поскольку именно они определяют глубину снимков и ошибки при фотометрии объектов. Прямые измерения зависимости дисперсии отсчетов (rms) от среднего значения фона неба и от линейного размера $N = \sqrt{A}$, где A — площадь апертуры

интегрирования, дают более реалистичную оценку шумовых характеристик, чем формальная гауссовская оценка шумов $\sigma(N) = N\langle\sigma\rangle$. В SExtractor'e оценка ошибок фотометрии делается именно на основе гауссовой оценки шумов, что приводит к существенному занижению ошибок фотометрии. Для оценки реальных шумовых характеристик на изображениях, готовых к фотометрии, в каждом фильтре мы проводили измерения потоков в более чем 1000 непересекающихся круговых апертурах, случайно расположенных в областях, свободных от объектов. Размеры апертур меняются от 0.5 до 20 угл. сек. Дисперсию сигнала мы оценивали по гистограммам распределения числа отсчетов для каждого размера апертуры. Дисперсия отсчетов зависит от размера апертуры и растет с ее увеличением. По завершении фотометрии объектов полученные таким образом оценки шумов добавляются в квадратурах к ошибкам фотометрии, полученным в SExtractor'e с учетом геометрических размеров объекта.

Создание полного каталога объектов

Выборка объектов поля HS47.5-22 построена на основе глубоких ($M_{AB} \approx 25^m$) снимков в широкополосных фильтрах g_SDSS , r_SDSS и i_SDSS . Каждая из четырех площадок обрабатывалась отдельно: с использованием своих фотометрических нуль-пунктов, оценкой шумовых характеристик снимков и т.д. Переменность объектов оценивалась между сетями наблюдений с помощью наблюдений в фильтре r_SDSS и корректировалась с учетом разницы звездных величин в фильтре r_SDSS . Астрометрическая привязка также проводилась для каждого поля отдельно после выделения и расчета фотометрических характеристик объектов с помощью SExtractor'a. Полученные каталоги объектов объединялись в общий каталог с использованием астрометрических координат, при этом потоки объектов с совпадающими координатами усреднялись. Общее число объектов поля HS47.5-22 до $R_{AB} \approx 24.5^m$ составляет около 85 000. Полная выборка объектов поля (28 564 объекта) ограничена предельной звездной величиной $R_{AB} \approx 22.5^m$, до которой получены снимки в среднеполосных фильтрах с отношением сигнал/шум $\sim 5-10$.

АЛГОРИТМ ОТБОРА ОБЪЕКТОВ

В самом начале производилась покоординатная идентификация объектов с другими обзорами. Мы использовали инфракрасную фотометрию WISE (Мейснер и др., 2018), глубокую широкополосную фотометрию и спектральные данные SDSS (Пэрис и др., 2018), фотометрию DECaLS (Дей и др.,

2019), данные морфологии из обзора DECaLS и данные о собственных движениях объектов из обзора GAIA (Коллаборация Гайа и др., 2018). Мы также идентифицировали рентгеновские источники ROSAT (Мольтхаген и др., 1997) и радиоисточники FIRST (Беккер и др., 1995).

Нами была изучена морфология квазаров в поле HS47.5-22 по данным DECaLS. Использовалась выборка квазаров из обзора SDSS. Исследование показало, что 97% квазаров являются звездобразными источниками, остальные 3% классифицируются как протяженные объекты, являясь при этом квазарами с яркой подстилающей галактикой на $z < 1$. В то же время морфологическая классификация DECaLS отлично зарекомендовала себя для классификации звезд-галактик до величины $R_{SDSS} = 22.2$, при более слабых значениях далекие компактные галактики начинают классифицироваться как звездобразные объекты. Это было использовано как критерий отбора, который практически не влияет на полноту выборки квазаров, при этом позволяя исключить из выборки протяженные объекты. Поскольку в данной работе акцент делается на изучение далеких квазаров яркостью $M_{145} > -24^m$, у которых вклад подстилающей галактики в общую светимость крайне мал, вероятность потери объектов при использовании этого критерия также крайне мала. Изучение протяженных объектов данного поля, в том числе сейфертовских галактик, приводится в работе Гроховской и др. (2022).

Следующим шагом стала разработка алгоритма автоматического отбора по данным широкополосной и среднесплошной оптической фотометрии. С одной стороны, этот алгоритм основан на том, что звезды многочисленны и образуют узкую последовательность в цветовом пространстве. С другой стороны, квазары, особенно на $z > 2.5$, разбросаны в цветовом пространстве гораздо шире, и их количество на порядок меньше. Поэтому мы можем рассчитать для каждого объекта расстояния до ближайших соседей в цветовом пространстве и через расстояния оценить плотность окружающих соседей. Для звезд эта плотность будет значительно выше. Кроме того, использование евклидова расстояния до ближайших соседей в цветовом пространстве позволяет эффективно отбирать необычные объекты, лежащие на удалении от области, занимаемой звездами (Кови и др., 2007). Дополнение оптической фотометрии инфракрасными данными позволяет выделять такие объекты еще более эффективно. В частности, это позволяет отделить подавляющее большинство звезд при поиске кандидатов в квазары. Данный метод может применяться как для широкополосных, так и для среднесплошных фотометрических данных. Однако такой подход хорошо работает

для фотометрии с большим соотношением сигнал-шум. При переходе к слабым объектам звездная последовательность начинает расширяться за счет ошибок фотометрии, различная глубина фотометрии в разных фильтрах приводит к разному уширению последовательности звезд в разных цветах, в отдельных фильтрах появляются выбросы. Все это сильно усложняет применение данного метода для поиска слабых необычных объектов. Исходя из этого, нами был разработан комбинированный метод поиска квазаров по данным широкополосной оптической фотометрии, инфракрасной фотометрии и среднесплошной оптической фотометрии, позволяющий надежно отбирать слабые квазары с полнотой выборки $>95\%$ в диапазоне красных смещений от 0 до 6 и определять их фотометрическое красное смещение с высокой точностью. Алгоритм отбора кандидатов в квазары разработан для выделения кандидатов среди звездобразных объектов поля, и эффективно работает по нашим наблюдательным данным до звездной величины $r_{SDSS} = 22.5^m$. Его условно можно разделить на три этапа. Первый — выделение в цветовом пространстве ($g - r, r - z, i - z$) последовательности звезд (такой набор фильтров используется, потому что для них глубина имеющихся фотометрических данных максимальна и однородна, а для объектов до $r_{SDSS} = 22.5^m$ практически не происходит уширения звездной последовательности). Это осуществляется вычислением евклидова расстояния до 150-го соседа для каждого объекта. Число 150 было выбрано экспериментальным путем, при этом звездная последовательность выделяется наилучшим образом, а эффективность выделения известных в поле квазаров максимальна. Полученное расстояние отражает плотность окружающих объектов в цветовом пространстве и позволяет выделять уникальные объекты, отличающиеся по спектральным распределениям энергии от звезд. Обозначив логарифм данного расстояния как $\text{dist}1$, мы построили графики распределения объектов, где черными точками отмечены все звездобразные объекты поля, красными — спектрально подтвержденные квазары, синими — отобранные вручную по среднесплошным распределениям энергии квазары (рис. 4). Далее, на графиках были выделены и отброшены области с высокой плотностью объектов, не содержащие при этом известных квазаров, а также областей с вероятным расположением далеких квазаров. Такой подход позволяет отбрасывать звезды, оставляя все квазары нетронутыми, даже если в инфракрасных цветах будет выброс. Таким образом, из 5490 звездобразных объектов поля было отобрано 1355 кандидатов в квазары.

Кроме того, были изучены возможности использования астрометрических данных GAIA для выделения звезд от внегалактических объектов. Для

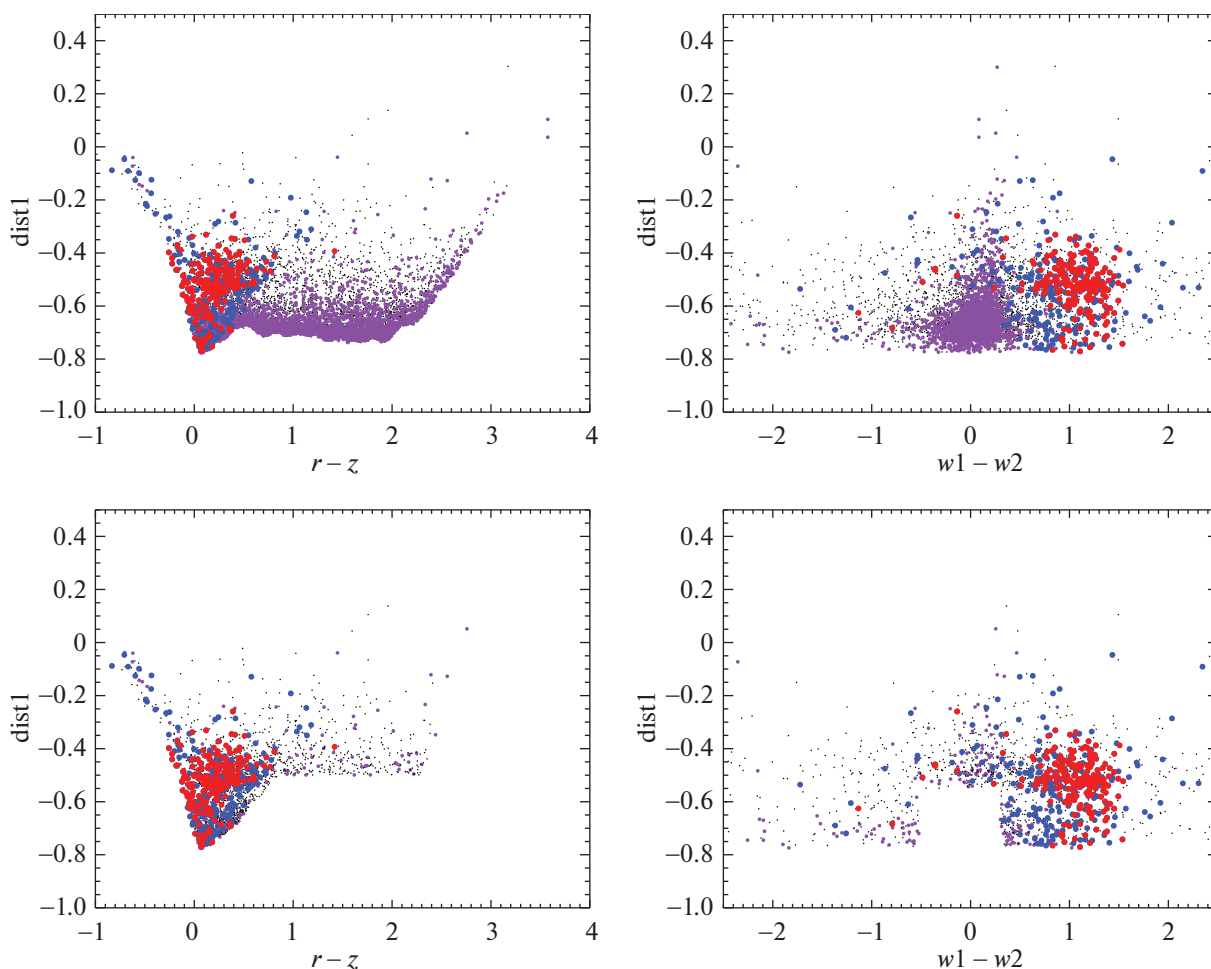


Рис. 4. Комбинация логарифма расстояния в цветовом пространстве (dist1) с цветовыми критериями $r - z$ (DECaLS, Дей и др., 2019) и $w1 - w2$ ([3.4]–[4.7] мкм) (WISE, Мейснер и др., 2018). Спектроскопически подтвержденные квазары отмечены красным цветом, а кандидаты в квазары, выбранные вручную по данным среднеполосной фотометрии, синим. Фиолетовым выделены объекты, имеющие собственные движения на уровне более 3σ по данным Gaia (Коллаборация Гаиы и др., 2018). На верхних рисунках показаны все объекты, на нижних — выбранные объекты после применения критериев.

исследования брались звездообразные объекты по морфологии DECaLS, отобранные на предыдущем шаге из областей, не содержащих известных квазаров, и являющиеся, предположительно, звездами. Исследование показало, что наличие собственного движения позволяет отбросить более 90% таких звезд до $r_{\text{SDSS}} = 20.5^m$ и отдельные звезды до $r_{\text{SDSS}} = 21^m$. При этом для квазаров с известными спектральными данными ошибок в определении собственных движений обнаружено не было. Для более слабых объектов точность измерений GAIA недостаточна. Звезды, отбираемые по собственным движениям из полного каталога звездообразных объектов, отмечены на цветовых диаграммах фиолетовыми точками (рис. 4).

На втором этапе были построены среднеполосные спектральные распределения энергии объектов выборки, рассматриваемые как низкодиспер-

сионные спектры (рис. 5). Каждый из них просматривался вручную. В итоговую выборку были отобраны 682 объекта из 1355, классифицированные как квазары. Остальные 673 объекта по среднеполосным спектральным распределениям энергии были классифицированы как звезды, из-за выбросов в данных либо из-за низкой глубины и пространственного разрешения инфракрасной фотометрии отличающиеся от большинства звезд.

На последнем этапе фотометрические красные смещения определялись с помощью пакета ZEBRA (Фельдман и др., 2006) с использованием опорных спектров из библиотеки спектров квазаров LePhare (Арно и др., 1999), правильность определения контролировалась вручную. На рис. 6 показано соотношение фотометрических и спектроскопических (SDSS) красных смещений объектов. Также мы провели спектроскопию отдельных объ-

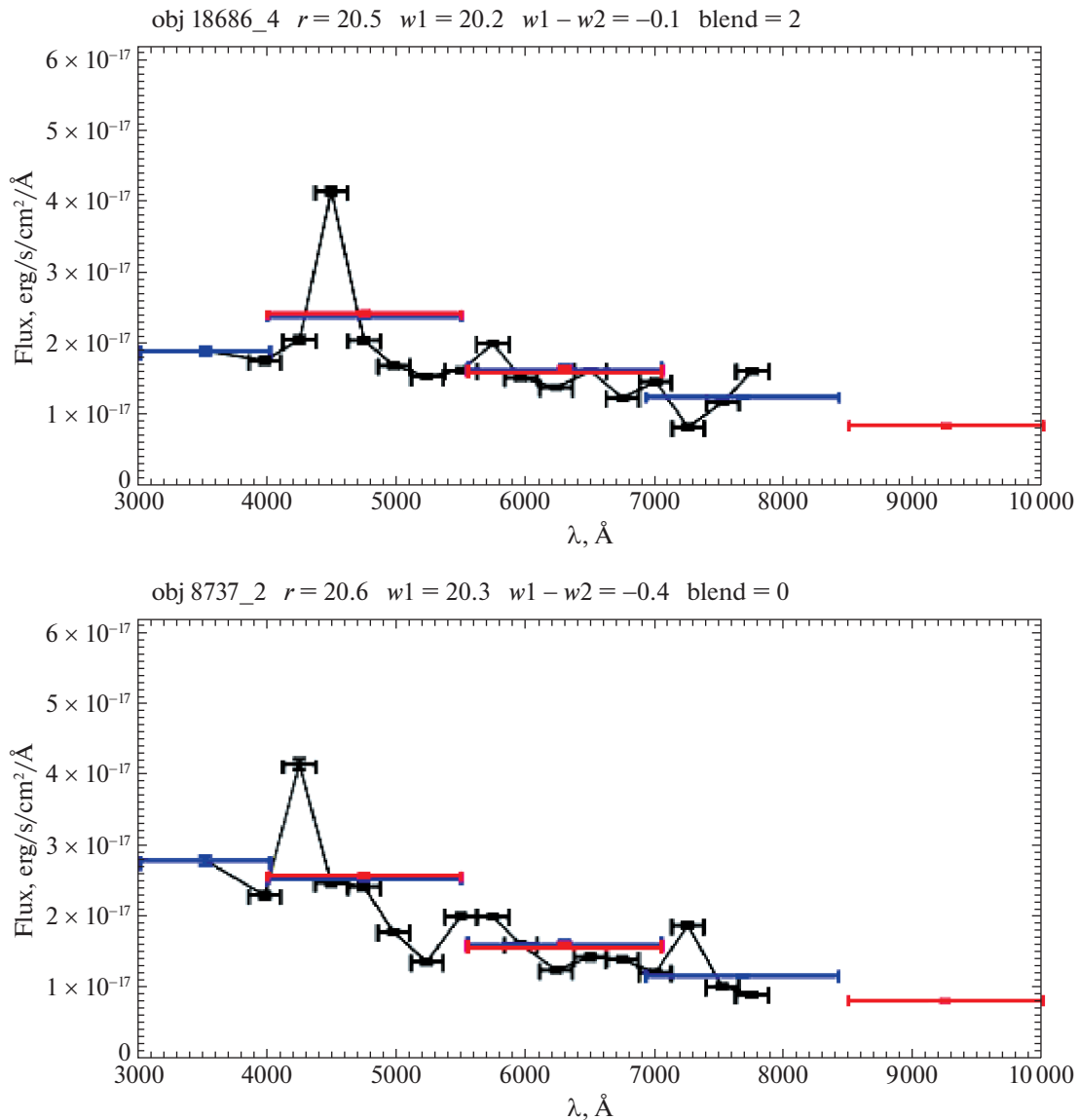


Рис. 5. Среднеполосные спектральные распределения энергии, рассматриваемые как низкодисперсионный спектр (черная кривая). Также показаны данные широкополосной фотометрии 1-м телескопа Шмидта (синие отрезки) и фотометрия обзора DECaLS (красные отрезки).

ектов на телескопе БТА (Большой азимутальный телескоп САО РАН) для проверки качества классификации и определения красных смещений.

красные смещения. Каталог квазаров после публикации будет выложен в открытый доступ на сайте САО РАН.

ИТОГОВЫЙ КАТАЛОГ КВАЗАРОВ

Итоговый каталог квазаров содержит данные о 682 квазарах, организованные по столбцам так, как указано в табл. 2. 209 из них имеют спектроскопию SDSS. Для остальных 473 впервые проведена классификация и определены красные смещения по данным среднеполосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта. Также для четырех из них была проведена спектроскопия на телескопе БТА САО РАН и определены спектроскопические

ОЦЕНКА ПОЛНОТЫ ОТБОРА КВАЗАРОВ

Мы промоделировали полноту отбора квазаров, используя предел обнаружения эмиссионных линий в среднеполосных фильтрах. Учитывались распределения каждой эмиссионной линии по эквивалентным ширинам (Чилингарян, 2003) и уширение линий из-за красного смещения. Линия считалась зарегистрированной, если она регистрировалась на уровне 3σ над континуумом. В расчете использовались шесть эмиссионных линий: $L\alpha$, CIV, CIII,

Таблица 2. Описание столбцов каталога квазаров

Столбец	Единицы	Описание	Столбец	Единицы	Описание
ID	—	Unique object ID	m625	mag	mb625-band magnitude
ra	degree	R.A., J2000	er625	mag	mb625-band magnitude error
dec	degree	decl., J2000	m650	mag	mb650-band magnitude
zph	—	photometric redshift	er650	mag	mb650-band magnitude error
zsp	—	spectroscopic redshift	m675	mag	mb675-band magnitude
m400	mag	mb400-band magnitude	er675	mag	mb675-band magnitude error
er400	mag	mb400-band magnitude error	m700	mag	mb700-band magnitude
m425	mag	mb425-band magnitude	er700	mag	mb700-band magnitude error
er425	mag	mb425-band magnitude error	m725	mag	mb725-band magnitude
m450	mag	mb450-band magnitude	er725	mag	mb725-band magnitude error
er450	mag	mb450-band magnitude error	m750	mag	mb750-band magnitude
m475	mag	mb475-band magnitude	er750	mag	mb750-band magnitude error
er475	mag	mb475-band magnitude error	m775	mag	mb775-band magnitude
m500	mag	mb500-band magnitude	er775	mag	mb775-band magnitude error
er500	mag	mb500-band magnitude error	mu	mag	u-SDSS magnitude
m525	mag	mb525-band magnitude	eru	mag	u-SDSS magnitude error
er525	mag	mb525-band magnitude error	mg	mag	g-SDSS magnitude
m550	mag	mb550-band magnitude	erg	mag	g-SDSS magnitude error
er550	mag	mb550-band magnitude error	mr	mag	r-SDSS magnitude
m575	mag	mb575-band magnitude	err	mag	r-SDSS magnitude error
er575	mag	mb575-band magnitude error	mi	mag	i-SDSS magnitude
m600	mag	mb600-band magnitude	eri	mag	i-SDSS magnitude error
er600	mag	mb600-band magnitude error			

MgII, H β , H α . Видно, что при больших красных смещениях ($z > 2.2$) вероятность обнаружения линий оценивается в 80% и выше для объектов ярче $AB = 22.5^m$ (рис. 7). В свою очередь, на красных смещениях $1 < z < 2.2$ полнота отбора более 90% достигается применением широкополосных критериев $u - g < 0.6$ и $w1 - w2 > 0.4$ (Ричардс и др., 2002) (рис. 8). Таким образом, полученная выборка квазаров имеет полноту более 80% во всем исследуемом диапазоне красных смещений, поэтому для изучения пространственной плотности и функции светимости квазаров коррекция за неполноту выборки не требуется.

ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ КВАЗАРОВ

Для построения функции пространственной плотности и функции светимости квазаров использовались фотометрические красные смещения. Была учтена геометрия сопутствующего объема и рассчитаны абсолютные звездные величины квазаров на длине волны 145 НМ. Для вычисления абсолютных звездных величин брались данные фотометрии в фильтре i_{SDSS} , рассчитывалась К-поправка (Оке, Сэнделл, 1968), и проводился пересчет на $\lambda = 145$ НМ по шаблонному спектру квазара с наклоном континуума $\alpha = -0.75$, также учитывалось межгалактическое поглощение,

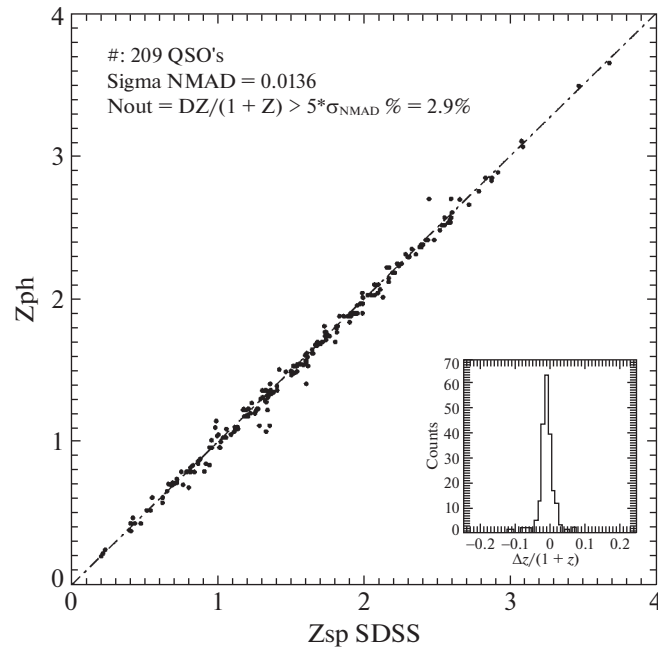
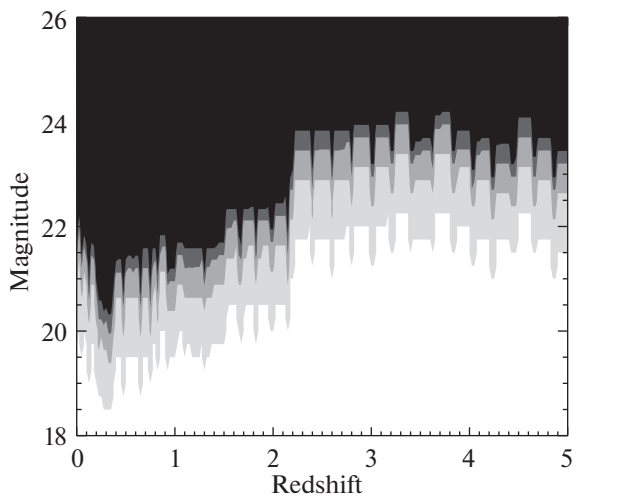


Рис. 6. Точность определения среднеполосных фотометрических красных смещений по данным 1-м телескопа Шмидта. По вертикальной оси фотометрическое красное смещение, по горизонтальной оси спектроскопическое красное смещение по данным обзора SDSS.



Total completeness, %, LEVELS = [10, 30, 50, 80, 95]

Рис. 7. Моделирование полноты отбора квазаров по среднеполосным фотометрическим данным. Цветовая градация от белого до черного указывает на уровни полноты 95, 80, 50, 30 и 10% соответственно.

согласно модели Мадау (1995). Была проведена коррекция за неполноту выборки, согласно построенной модели. Но так как полученная зависимость полноты выборки от красного смещения практически равномерна и имеет значение не меньше 80%, коррекция за неполноту не приводит к существенному изменению формы кривых пространственной плотности и функции светимости.

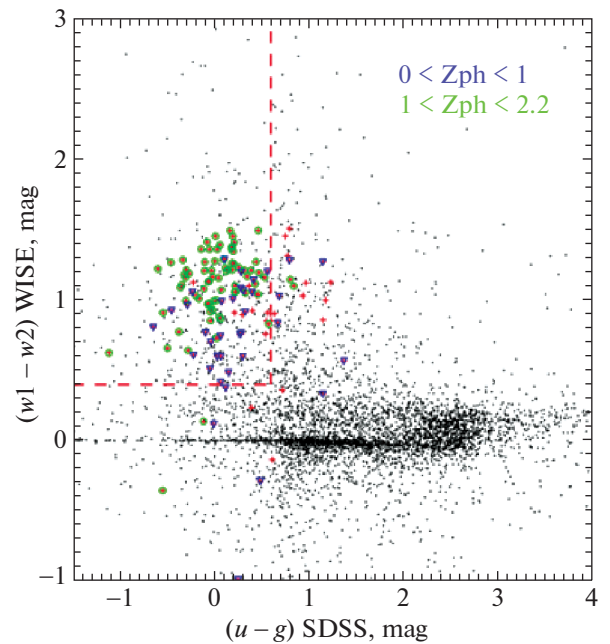


Рис. 8. Отбор квазаров на красном смещении $z < 2.2$ по критериям $(u - g) < 0.6$ и $(w1 - w2) > 0.4$. Синим и зеленым отмечены известные в поле квазары, а также квазары, отобранные вручную по среднеполосным спектральным распределениям энергии. Полнота отбора объектов на $0 < z < 1$ равна 73%, на $1 < z < 2.2$ равна 92% до $r_{SDSS} = 22.5^m$.

График распределения квазаров по абсолютной звездной величине и красному смещению приведен на рис. 9.

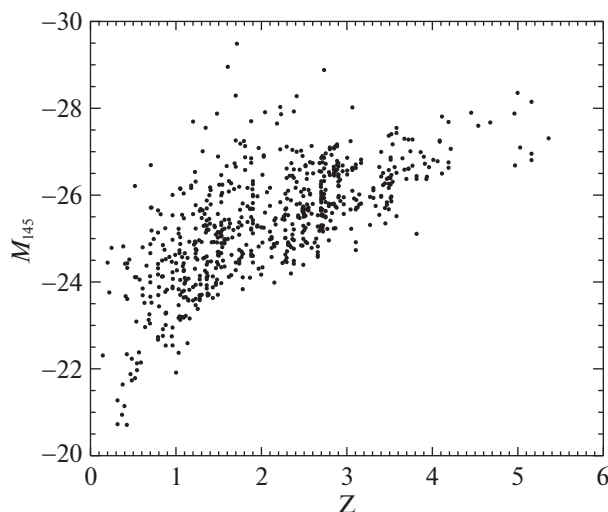


Рис. 9. Зависимость абсолютной звездной величины квазаров на длине волны 145 нм от красного смещения.

Мы сравнили пространственную плотность и функцию светимости квазаров, рассчитанную по нашим данным и по данным других обзоров.

Наш обзор дает нам 682 квазара в поле размером 2.38 кв. град. Для сравнения функций пространственной плотности квазаров мы использовали данные следующих обзоров:

- SDSS-DR14 (отбор на основе данных широкополосной фотометрии и инфракрасных цветов, 9376 кв. град, 899 098 квазаров) (Пэрис и др., 2018). Активные ядра отбирались в два этапа. На первом создавался каталог кандидатов в квазары, на втором их природа подтверждалась мультиобъектной спектроскопией. Основным методом отбора кандидатов была классификация объектов по методике Бови и др. (2012) по данным оптической фотометрии SDSS и инфракрасной фотометрии WISE, выборка получила название “ядро” (CORE). Кроме этого, кандидаты для спектроскопии отбирались из внешних источников: оптические отождествления каталога радиисточников FIRST (Беккер и др., 1995), каталога рентгеновских источников SPIDERS на базе обзора ROSAT (Вогс и др., 1999), а также каталога переменных источников TDSS (Моргансон и др., 2015). Глубина обзора ограничена $g_{\text{dred}} < 22.5$;
- Stripe-82 (отбор на основе данных переменности и широкополосной фотометрии) (Паланк-Делабуриль и др., 2016). В течение 10 лет было проведено несколько десятков фотометрических наблюдений площадки stripe_82 размером 94.5 кв. град. Это позволило выделить переменные объекты поля, и по характеру переменности отобрать квазары. Итоговая выборка QSO_VAR_S82 состоит из 16 243 объектов. Заявленная глубина выборки $g_{\text{dred}} < 22.5$. Авторы оценивают полноту выборки в 70–90%;
- ALHAMBRA (среднеполосная и широкополосная фотометрия, 2.79 кв. град, 1079 квазаров) (Чавес-Монтеро и др., 2017). Использовался набор из 20 среднеполосных фильтров в интервале длин волн 3500–9700 Å, а также три стандартных широкополосных инфракрасных фильтра *J*, *H* и *K* (Мэтьют и др., 2012). Наблюдались восемь площадок размером от 0.19 до 0.50 кв. град, общей площадью 2.38 кв. град. Глубина выборки ограничена величиной в среднеполосном фильтре с центральной длиной волны 675 нм: $M_{678} < 23.5$, что приблизительно соответствует $r_{\text{SDSS}} < 24$. Всего было отобрано 1079 объектов — 585 по двум эмиссионным линиям и 494 по трем и более эмиссионным линиям. Полнота выборок оценивается авторами соответственно в 73 и 67% на $z < 2$ и в 85 и 77% на $z > 2$;
- COSMOS (среднеполосная и широкополосная фотометрия, морфология, 2 кв. град, 155 квазаров на красном смещении $z > 3$) (Мастерс и др., 2012). Фотометрические наблюдения в обзоре COSMOS проводились на 8.3-м телескопе Субару, 4-м телескопах KPNO и CTIO, а также 3.6-м телескопе

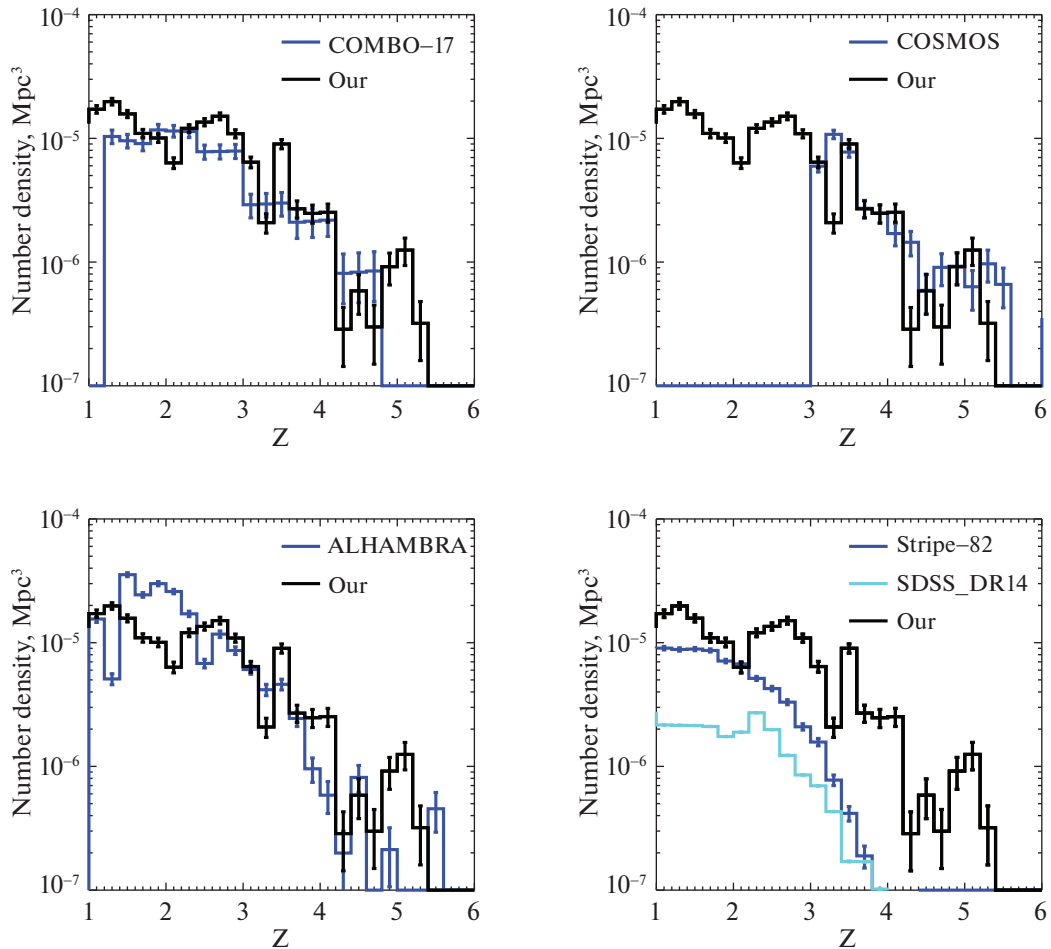


Рис. 10. Сравнение пространственной плотности квазаров по нашим данным и по данным других обзоров (COMBO-17, Вольф и др., 2003; COSMOS, Мастерс и др., 2012; ALHAMBRA, Чавес-Монтеро и др., 2017; Stripe-82, Паланк-Делабруиль и др., 2016; SDSS-DR14, Пэрис и др., 2018).

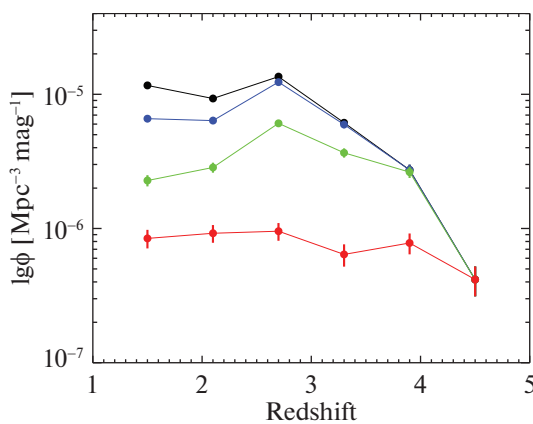


Рис. 11. Зависимость пространственной плотности квазаров от красного смещения, построенная для разных диапазонов светимости. Яркость рассчитывалась для длины волны 145 нм в системе покоя. Черная кривая — для квазаров в поле ярче -24^m ; синяя — для квазаров ярче -25^m ; зеленая — ярче -26^m ; красная — ярче -27^m .

CFHT (Капак и др., 2007), для морфологической классификации объектов используются снимки с телескопа HST. Используемые фотометрические данные — это широкополосный, среднеполосный и узкополосный фотометрические каталоги, всего 29 фильтров в диапазоне 0.1–8.0 мкм. Наблюдалось единое поле площадью 1.64 квадратных градусов. Брались только звездообразные объекты, отобранные по снимкам с телескопа им. Хаббла. Классификация по среднеполосным спектрам делалась в два этапа, сперва автоматически с использованием шаблонных спектров методом максимального правдоподобия, затем визуально. Выборка ограничена диапазоном звездных величин $16 < I < 25$. Также для существенного числа объектов проводилась спектроскопия на телескопах Кека и VLT. Несмотря на период наблюдений в несколько лет, переменность объектов при построении SED не учитыва-

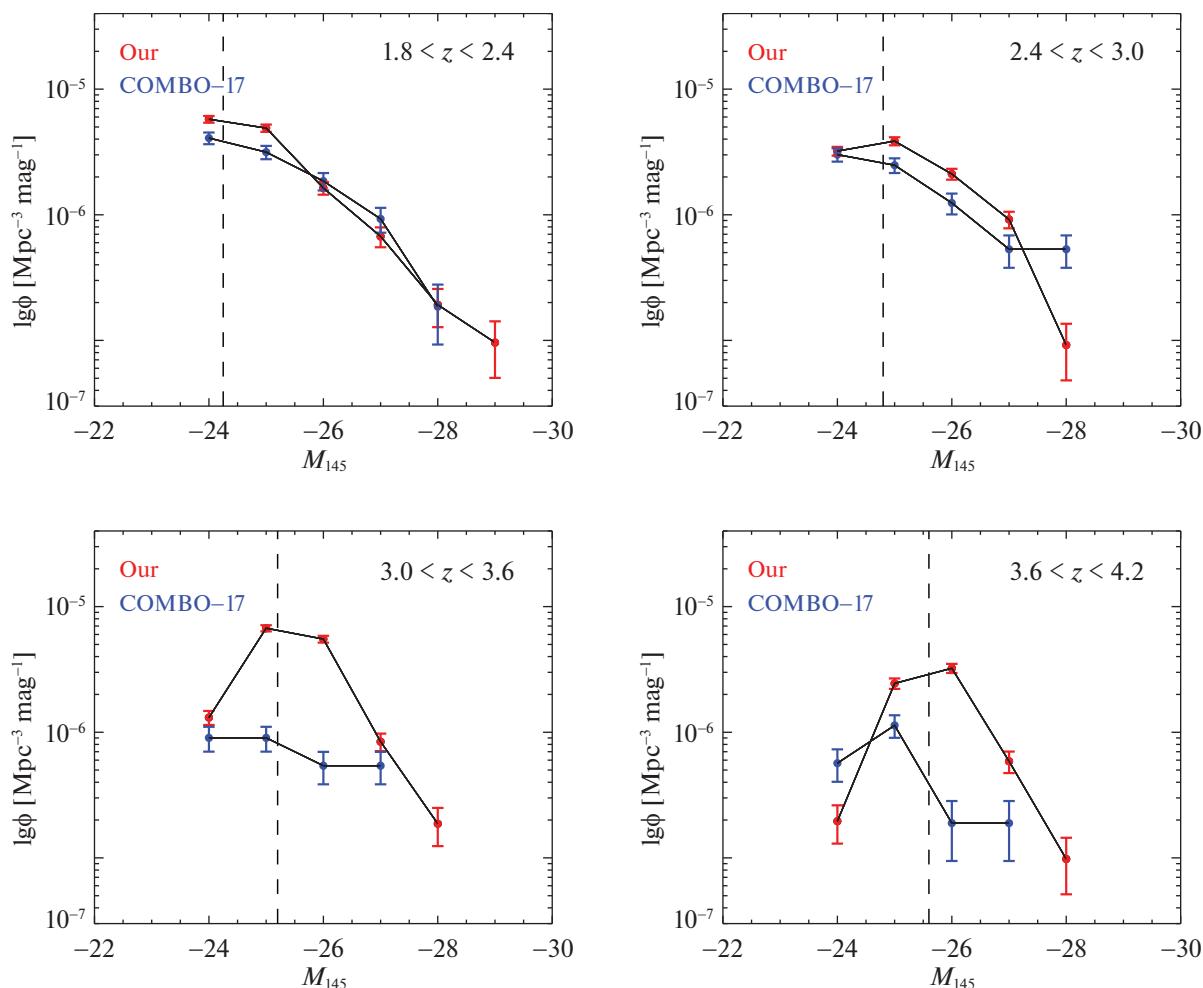


Рис. 12. Функция светимости квазаров по нашим данным и по данным обзора COMBO-17 (Вольф и др., 2003), построенная для разных диапазонов красного смещения. Пунктирной линией отмечена граница, левее которой полнота нашей выборки становится менее 80% из-за ограничения по глубине.

лась. Всего было отобрано 155 квазаров на $z > 3.1$;

- COMBO-17 (среднеполосная фотометрия, 0.78 кв. град, 192 квазара) (Вольф и др., 2003). В нем использовались 5 широкополосных $UBVRI$ -фильтров, и 12 среднеполосных фильтров шириной от 140 до 270 Å. При этом среднеполосные фильтры расположены по длинам волн со значительными промежутками. Всего наблюдалось 3 площадки общей площадью 0.78 кв. град. Выборка объектов ограничена диапазоном звездных величин $17 < R < 24$. Всего было отобрано 192 объекта.

Анализируя доступные данные, мы можем видеть разницу в пространственной плотности по

данным разных обзоров. Для SDSS-DR14, Stripe-82, ALHAMBRA и COMBO-17 пространственная плотность начинает уменьшаться в диапазоне красных смещений $2 < z < 2.5$, тогда как по нашим данным уменьшение начинается только при $z = 3$. По данным обзора COSMOS, в диапазоне $3 < z < 5$ распределение пространственной плотности квазаров совпадает с нашими данными (рис. 10).

График пространственной плотности квазаров, построенный для разных диапазонов светимости (рис. 11), наглядно демонстрирует, что для объектов ярче -24^m , -25^m и -26^m максимум пространственной плотности соответствует $z = 2.7$. В то же время для самых ярких объектов (ярче -27^m) пространственная плотность квазаров остается практически постоянной вплоть до $z = 4$. Это можно объяснить ограничением выборки по глубине и по

терей слабых активных ядер на больших красных смещениях.

Сравнение графиков функций светимости квазаров по нашим данным и по данным обзора COMBO-17 (рис. 12) показывает, что мы имеем похожую картину на $z < 3$, а на $z > 3$ пространственная плотность квазаров средней светимости (-25^m и -26^m) по нашим данным получается существенно выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выборки из 682 квазаров поля HS47.5-22, ограниченной по потоку до $r_{\text{SDSS}} = 22.5^m$, нами изучена зависимость пространственной плотности квазаров от красного смещения. Полученные данные хорошо согласуются с данными обзора COSMOS в диапазоне красных смещений $3 < z < 5$. По нашим данным, уменьшение пространственной плотности квазаров начинается на $z = 2.7$, что хорошо согласуется с рентгеновскими данными (Мияши и др., 2000). При этом в обзоре COMBO-17 спад начинается уже на $z = 2.5$, в обзоре SDSS-DR14 — на $z = 2.4$, в обзоре ALHAMBRA — на $z = 2.2$, а в обзоре Stripe-82 — на $z = 1.8$. Эти отличия мы связываем с тем, что с увеличением глубины выборки и улучшением качества отбора квазаров уменьшается влияние селекционных эффектов и увеличивается полнота выборки на больших красных смещениях. График пространственной плотности квазаров, построенный для разных диапазонов светимости, демонстрирует отсутствие значимого спада пространственной плотности ярких квазаров вплоть до $z = 4$ (рис. 11). При этом более слабые активные ядра демонстрируют спад пространственной плотности, обусловленный ограничением выборки по глубине. Это хорошо видно в распределении квазаров по светимости и красному смещению (рис. 9). Полученная нами функция светимости квазаров хорошо согласуется с данными обзора COMBO-17 на $z < 3$ (рис. 12). На $z > 3$ функция светимости остается практически неизменной по нашим данным (не считая потери слабых квазаров из-за ограничения выборки по глубине), в то время как в обзоре COMBO-17 наблюдается ее существенное снижение.

Мы благодарим наших коллег из CAO РАН и БАО НАН, которые помогли нам в модернизации 1-м телескопа Шмидта и сделали возможными эти наблюдения. Мы благодарим команды обзоров SDSS, DECaLS, WISE, FIRST, ROSAT и GAIA за данные в открытом доступе, которые мы использовали в нашем исследовании. Наблюдения на телескопах CAO РАН выполняются при поддержке

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”. Настоящая работа проводилась при поддержке гранта РФФ 21-12-00210.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонуччи (R. Antonucci), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 473 (1993).
2. Арно и др. (S. Arnouts, S. Cristiani, L. Moscardini, S. Matarrese, F. Lucchin, A. Fontana, et al.), *MNRAS* **310**, 540 (1999).
3. Баум (W.A. Baum), *IAU Symp.* **15**, 390 (1962).
4. Беккер и др. (R.H. Becker, R.L. White, and D.J. Helfand), *Astrophys. J.* **450**, 559 (1995).
5. Бертин, Арно (E. Bertin and S. Arnouts), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
6. Бови и др. (J. Bovy, A.D. Myers, J.F. Hennawi, D.W. Hogg, R.G. McMahon, D. Schiminovich, et al.), *Astrophys. J.* **749**, 41 (2012).
7. Бойль и др. (B.J. Boyle, R. Fong, T. Shanks, and B.A. Peterson), *MNRAS* **243**, 1 (1990).
8. Бойль и др. (B.J. Boyle and R.J. Terlevich), *MNRAS* **293**, L49 (1998).
9. Буска и др. (N.G. Busca, T. Delubac, J. Rich, S. Bailey, A. Font-Ribera, D. Kirkby, et al.), *Astron. Astrophys.* **552**, A96 (2013).
10. Вильямс и др. (R.E. Williams, B. Blacker, M. Dickinson, W.V.D. Dixon, H.C. Ferguson, A.S. Fruchter, et al.), *Astrophys. J.* **112**, 1335 (1996).
11. Ворс и др. (W. Voges, B. Aschenbach, T. Boller, H. Bräuninger, U. Briel, W. Burkert, et al.) *Astron. Astrophys.* **349**, 389 (1999).
12. Вольф и др. (C. Wolf, K. Meisenheimer, H.-J. Roser, S.V.W. Beckwith, F.H. Chaffee, J. Fried, et al.), *Astron. Astrophys.* **365**, 681 (2001).
13. Вольф и др. (C. Wolf, L. Wisotzki, A. Borch, S. Dye, M. Kleinheinrich, and K. Meisenheimer), *Astron. Astrophys.* **408**, 499 (2003).
14. Вольф и др. (C. Wolf, K. Meisenheimer, M. Kleinheinrich, A. Borch, S. Dye, M. Gray, et al.), *Astron. Astrophys.* **421**, 913 (2004).
15. Гавайзер и др. (E. Gawiser and MUSYC Collaboration), *Am. Astron. Soc Meet. Abstracts* **207**, 157.01 (2005).
16. Гавайзер и др. (E. Gawiser, P.G. van Dokkum, D. Herrera, J. Maza, F.J. Castander, L. Infante, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **162**, 1 (2006).
17. Гаотонг и др. (H. Zhang, S. Xue, D. Burstein, X. Zhou, Z. Jiang, H. Wu, et al.), *Astron J* **127**, 2579 (2004).
18. Гаро, Лейтен (G. Haro and W.J. Luyten), *Boletin de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya* **3**, 37 (1962).
19. Гебхарт и др. (K. Gebhardt, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, S.M. Faber, A.V. Filippenko, et al.), *Astrophys. J. (Lett)* **539**, L13 (2000).

20. Гроховская и др. (A. Grokhovskaya, S.N. Dodonov, T.A. Movsessian, and S.S. Kotov), arXiv e-prints, arXiv:2204.07012 (2022).
21. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astrophys. J.* **157**, 168 (2019).
22. Джуитт (D. Jewitt), *Earth Moon and Planets* **92**, 465 (2003).
23. Ди Помпео и др. (M.A. DiPompeo, J. Bovy, A.D. Myers, and D. Lang), *MNRAS* **452**, 3124 (2015).
24. Додонов и др. (S.N. Dodonov, S.S. Kotov, T.A. Movsesyan, and M. Gevorkyan), *Astrophys Bull* **72**, 473 (2017).
25. Ду и др. (P. Du, C. Hu, K.-X. Lu, Y.-K. Huang, C. Cheng, J. Qiu, et al.), *Astrophys. J.* **806**, 22 (2015).
26. Залай и др. (A.S. Szalay, A.J. Connolly, and G.P. Szokoly), *Astrophys. J.* **117**, 68 (1999).
27. Капак и др. (P. Capak, H. Aussel, M. Ajiki, H.J. McCracken, B. Mobasher, N. Scoville, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 99 (2007).
28. Кардамоне и др. (CN Cardamone PG van Dokkum CM Urry Y Taniguchi E Gawiser G. Brammer, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **189**, 270 (2010).
29. Кауфман, Хаенхельт (G. Kauffmann and M. Haehnelt), *MNRAS* **311**, 576 (2000).
30. Кови и др. (K.R. Covey, Ž. Ivezić, D. Schlegel, D. Finkbeiner, N. Padmanabhan, R.H. Lupton, et al.), *Astron. J.* **134**, 2398 (2007).
31. Коллаборация Гайа и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
32. Коллаборация Гайа и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, and C. Babusiaux), *Astron. Astrophys.* **616**, A1 (2018).
33. Корменди, Ричстон (J. Kormendy and D. Richstone), *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* **33**, 581 (1995).
34. Котов (S. Kotov), Res Reposit of Saint Petersburg State University (2016).
35. Лаббе и др. (I. Labbé, M. Franx, G. Rudnick, N.M. Förster Schreiber H.-W. Rix. A. Moorwood, et al.), *Astrophys. J.* **125**, 1107 (2003).
36. Лури и др. (X. Luri, A.G.A. Brown, L.M. Sarro, F. Arenou, C.A.L. Bailer-Jones, A. Castro-Ginard, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, A9 (2018).
37. Мадау (P. Madau), *Astrophys. J.* **441**, 18 (1995).
38. Маркарян (B.E. Markarian), *Astrofizika* **3**, 24 (1967).
39. Мастере и др. (D. Masters, P. Capak, M. Salvato, F. Civano, B. Mobasher, B. Siana, et al.), *Astrophys. J.* **755**, 169 (2012).
40. Мейксин, Мадау (A. Meiksin and P. Madau), *Astrophys. J.* **412**, 34 (1993).
41. Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, and D.J. Schlegel), *Res Not Am Astron Soc* **2**, 1 (2018).
42. Мияши и др. (T. Miyaji, G. Hasinger, and M. Schmidt), *Astron. Astrophys.* **353**, 25 (2000).
43. Молес и др. (M. Moles, N. Benítez, J.A. Aguerri, E.J. Alfaro, T. Broadhurst, J. Cabrera-Cão, et al.), *Astron. J.* **136**, 1325 (2008).
44. Мольтхаген и др. (K. Molthagen, H.J. Wendker, and U.G. Briel), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **126**, 509 (1997).
45. Монет и др. (D.G. Monet, S.E. Levine, B. Canzian, H.D. Ables, A.R. Bird, C.C. Dahn, et al.), *Astrophys. J.* **125**, 984 (2003).
46. Моргансон и др. (E. Morganson, P.J. Green, S.F. Anderson, J.J. Ruan, A.D. Myers, M. Eracleous, et al.), *Astrophys. J.* **806**, 244 (2015).
47. Мортлок и др. (D.J. Mortlock, S.J. Warren, B.P. Venemans, M. Patel, P.C. Hewett, R.G. McMahon, et al.), *Nature* **474**, 616 (2011).
48. Мэтьют и др. (I. Matute I. Márquez, J. Masegosa, C. Husillos, A. del Olmo, J. Perea, et al.), *Astron. Astrophys.* **542**, A20 (2012).
49. Оке, Сэндедж (J.B. Oke and A. Sandage), *Astrophys. J.* **154**, 21 (1968).
50. Паланк-Делабруиль и др. (N. Palanque-Delabrouille, Ch. Magneville, Ch. Yèche, I. Pâris, P. Petitjean, E. Burtin, et al.), *Astron. Astrophys.* **587**, A41 (2016).
51. Пенг (C.Y. Peng), *Astrophys. J.* **671**, 1098 (2007).
52. Пэрис и др. (I. Pâris, P. Petitjean, É. Aubourg, A.D. Myers, A. Streblyanska, B.W. Lyke, et al.), *Astron. Astrophys.* **613**, A51 (2018).
53. Рисалити, Луссо (G. Risaliti and E. Lusso), *Astronomische Nachrichten* **338**, 329 (2017).
54. Ричардс и др. (G.T. Richards, X. Fan, H.J. Newberg, M.A. Strauss, D.E. Vanden Berk, D.P. Schneider, et al.), *Astrophys. J.* **123**, 2945 (2002).
55. Ричардс и др. (G.T. Richards, A.D. Myers, C.M. Peters, C.M. Krawczyk, G. Chase, N.P. Ross, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 39 (2015).
56. Сильверман и др. (J.D. Silverman, P.J. Green, W.A. Barkhouse, D.W. Kim, M. Kim, B.J. Wilkes, et al.), *Astrophys. J.* **679**, 118 (2008).
57. Тэйлор и др. (E.N. Taylor, M. Franx, P.G. van Dokkum, R.F. Quadri, E. Gawiser, E.F. Bell, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **183**, 295 (2009).
58. Уайт и др. (R.L. White, R.H. Becker, D.J. Helfand, and M.D. Gregg), *Astrophys. J.* **475**, 479 (1997).
59. Уотсон и др. (D. Watson, K.D. Denney, M. Vestergaard, and T.M. Davis), *Astrophys. J. (Lett)* **740**, L49 (2011).
60. Уррю, Падовани (C.M. Urry and P. Padovani), *PASP* **107**, 803 (1995).
61. Фельдман и др. (R. Feldmann, C.M. Carollo, C. Porciani, S.J. Lilly, P. Capak, Y. Taniguchi, et al.), *MNRAS* **372**, 565 (2006).

62. Хаехнелт, Риз (M.G. Haehnelt and M.J. Rees), *MNRAS* **263**, 168 (1993).
63. Хайман, Лоэб (Z. Haiman and A. Loeb), *Astrophys. J.* **503**, 505 (1998).
64. Хекман, Бест (T.M. Heckman and P.N. Best), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **52**, 589 (2014).
65. Хельфанд и др. (D.J. Helfand, R.L. White, and R.H. Becker), *Astrophys. J.* **801**, 26 (2015).
66. Хиксон и др. (P. Hickson, B.K. Gibson, and K.A.S. Callaghan), *MNRAS* **267**, 911 (1994).
67. Хогг (D.W. Hogg), arXiv e-prints, astro-ph/9905116 (1999).
68. Чавес-Монтеро и др. (J. Chaves-Montero, S. Bonoli, M. Salvato, N. Greisel, L.A. Díaz-García, C. López-Sanjuan, et al.), *MNRAS* **472**, 2085 (2017).
69. Чен (J.-S. Chen), *IAU Symp.* **161**, 17 (1994).
70. Чилингарян (I.V. Chilingarian), *Astronet* (2003).
71. Ян и др. (L. Yan, E. Donoso, C.-W. Tsai, D. Stern, R.J. Assef, P. Eisenhardt, et al.), *Astrophys. J.* **145**, 55 (2013).
72. Янке, Маччио (K. Jahnke and A.V. Macciò), *Astrophys. J.* **734**, 92 (2011).