

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи
УДК 524.7-1/-8



Котов Сергей Сергеевич

**Поиск активных ядер галактик и изучение их
физических свойств по данным
среднеполосного фотометрического обзора на
1-м телескопе Шмидта**

Специальность 01.03.02 —
«астрофизика и звёздная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель: **Додонов Сергей Николаевич**
кандидат физико-математических наук, заведующий
Лабораторией Спектроскопии и Фотометрии
Внегалактических Объектов САО РАН

Официальные оппоненты: **Киселев Николай Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»

Балашев Сергей Александрович,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится "4" октября 2022 года в "11" часов на открытом заседании диссертационного совета Д 002.203.01 на базе САО РАН по адресу: 368167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан " " августа 2022 года..

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук

Шолухова Ольга Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Активные ядра галактик (AGN) - 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 AGN не только показывают непрерывное излучение аккреционного диска, но также демонстрируют эмиссионные линии от рентгеновского до инфракрасного спектральных диапазонов. В свою очередь, эмиссионные линии могут быть широкими или узкими, в зависимости от ориентации AGN относительно наблюдателя и распределения вещества, поглощающего излучение, вокруг активного ядра ([1; 2]). AGN с широкими эмиссионными линиями обозначаются как активные ядра I типа, в то время как AGN с узкими эмиссионными линиями как активные ядра II типа. Для многочисленных задач в различных областях астрофизики, от физики высоких энергий до космологии, проблема определения полного числа активных ядер галактик является фундаментальной. AGN изучаются в контексте моделей эволюции галактик [3], поскольку есть свидетельства тесной корреляции между СМЧД и свойствами галактик [4; 5], хотя причинное происхождение этих зависимостей не является общепринятым [6; 7]. Кроме того, благодаря большой светимости, оптически самые яркие AGN I типа (квазары) позволяют нам проследить распределение материи с ранних времен (в настоящее время самый далекий квазар, подтвержденный спектроскопией, находится на $z = 7,1$, [8]). Квазары также могут использоваться для расчета ограничений на космологические модели: Буска и др. [9] обнаружили барионные акустические осцилляции (БАО) в Ly_α лесу в спектре квазаров, и в перспективе планируют измерить функцию БАО через кластеризацию квазаров. Также рассматриваются возможности использования квазаров в качестве стандартных свечей [10–12].

Исследование эволюции пространственной плотности и функции светимости квазаров с красным смещением является одним из важнейших методов изучения эволюции AGN. С их помощью мы можем получить ограничения на физические модели роста сверхмассивных черных дыр в галактиках ([13–

15]). Также функция светимости позволяет оценить вклад AGN во внегалактический ультрафиолетовый фон ([16; 17]).

Корректное построение функции светимости квазаров является нетривиальной задачей. Основная трудность заключается в получении репрезентативной выборки объектов во всём исследуемом диапазоне характеристик, таких как красное смещение, тип активного ядра, его абсолютная величина и т.д.. Существует множество наблюдательных методов поиска активных ядер и составления таких выборок, испытывающих влияние селекционных эффектов разного рода.

За последнее время удалось достичь существенного продвижения в понимании космологической эволюции функции светимости AGN. По наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах стало ясно, что их пространственная плотность быстро растёт от $z = 0$ до $z \sim 2$, а на более высоких красных смещениях, $z > 3$, начинает падать ([18; 19]). При этом наблюдаются существенные различия в пространственной плотности квазаров по данным в оптике, рентгене и радиодиапазоне ([20], рис. 1). Уменьшение числа квазаров, отобранных в оптическом диапазоне, может быть вызвано увеличением доли поглощённых объектов среди полного числа AGN и селекционными эффектами. Имеющиеся выборки AGN на высоких красных смещениях, отобранные по данным рентгеновских обзоров, содержат всего несколько десятков объектов на $z > 3$. Также выборки AGN на больших z , полученные по данным радио и рентгеновских обзоров, страдают от неполноты [21]. В настоящее время наибольшей полноты выборки квазаров удаётся достичь при помощи среднеполосной фотометрии в оптическом диапазоне. Среднеполосный фотометрический обзор COMBO-17 [22] был проведен на относительно малой площади (0.78 кв. градуса), и впервые позволил даже по небольшой выборке (189 AGN) проследить поведение функции светимости квазаров в диапазоне красных смещений $1.1 < Z < 4$. Обзор ALHAMBRA [23] проводился на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто с использованием набора из 20 среднеполосных фильтров в интервале длин волн 3500 – 9700 Å, а также трёх стандартных широкополосных инфракрасных фильтров J, H и K. Наблюдения были проведены для 8 площадок размером от 0.19 до 0.50 квадратных градуса, общей площадью 2.38 квадратных градуса. Глубина выборки ограничена звездной величиной в среднеполосном фильтре с центральной длиной

волны 675 нм: $m_{678} < 23.5^m$, что приблизительно соответствует $r_{SDSS} < 24^m$. Всего было отобрано 1079 объектов, 585 по двум эмиссионным линиям и 494 по трём и более эмиссионным линиям. Полнота выборок оценивается авторами, соответственно, в 73% и 67% на $z < 2$ и в 85% и 77% на $z > 2$ [24]. Данные ALHAMBRA подтверждают результаты, полученные COMBO-17, о падении пространственной плотности AGN на высоких красных смещениях. Однако данные о падении пространственной плотности AGN на высоких красных смещениях не являются вполне надежными и расходятся с данными более глубокого обзора COSMOS (155 объектов на $z > 3.1$ в поле 1.64 квадратных градуса, [25]), по которым спад пространственной плотности AGN выражен гораздо слабее. Вопрос остаётся открытым и требует дальнейшего изучения.

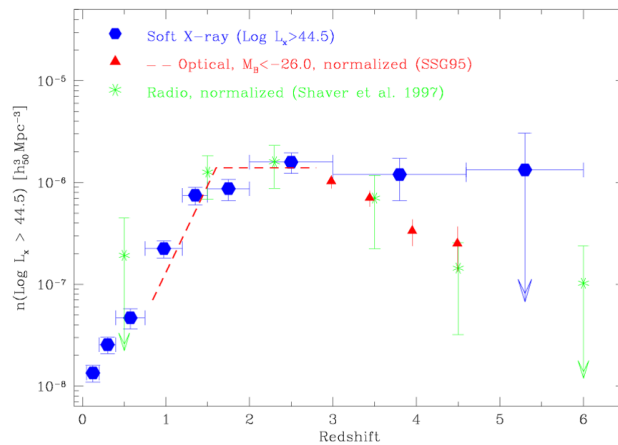


Рис. 1 — Различие в пространственной плотности квазаров, отобранных по данным оптических, рентгеновских и радиообзоров [20]

Целью данной работы является изучение эволюции активных ядер галактик и построение их функции светимости в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 5$.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. На основе наблюдательных данных, полученных на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской обсерватории, провести анализ пространственного распределения квазаров поля HS47.5-22 площадью 2.38 кв. гр. до $z \sim 5$, и построить их функцию светимости. Провести сравнение с результатами обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.

2. Разработать методику отбора квазаров по данным среднеполосной фотометрии, полученным на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН. Создать максимально полную выборку квазаров поля. Провести определение фотометрических красных смещений отобранных кандидатов в квазары. Промоделировать полноту отбора квазаров по среднеполосным фотометрическим данным.
3. Провести оценку селекционных эффектов, влияющих на полноту выборки квазаров в обзорах SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA, оценить селекционные эффекты полученной нами выборки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Исследованы возможности модернизированного 1-м телескопа Шмидта БАО НАН для глубокой фотометрии в широких полях с широкополосными и среднеполосными фильтрами. Показано, что для звездообразных объектов в широкополосных фильтрах за 2 часа экспозиции достигается глубина 25^m , а в среднеполосных фильтрах за 1 час экспозиции достигается глубина 23^m .
2. Результаты применения методики отбора кандидатов в квазары по среднеполосным и широкополосным фотометрическим данным в поле NS47.5-22. Разработанная автором методика использует в качестве критерия отбора плотность ближайших соседей в многомерном цветовом пространстве и данные фотометрии в ближнем инфракрасном диапазоне.
3. Каталог из 682 квазаров в поле NS47.5-22. Для 473 из них впервые проведена классификация и определены красные смещения по данным среднеполосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта и спектроскопии на телескопе БТА САО РАН.
4. Показано, что функция светимости квазаров, построенная по полученной выборке, демонстрирует более высокие значения в диапазоне красных смещений $3 < z < 4$, в сравнении с данными обзора COMBO-17.

Научная новизна:

1. Впервые были получены среднеполосные фотометрические наблюдательные данные для однородного поля HS47.5-22 площадью 2.38 квадратных градуса до $R_{AB} = 22.5^m$.
2. Впервые разработан алгоритм отбора кандидатов в квазары, использующий как данные среднеполосной и широкополосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта, так и данные оптических обзоров SDSS и DECaLS, инфракрасного обзора WISE, астрометрического обзора GAIA, рентгеновского обзора ROSAT и радио обзора FIRST. Оценена эффективность применения алгоритма для задач отбора квазаров и поиска необычных объектов.
3. Впервые произведен отбор кандидатов в квазары в поле HS47.5-22 площадью 2.38 квадратных градуса до $R_{AB} = 22.5^m$.
4. Впервые создан однородный до $R_{AB} = 22.5^m$ каталог кандидатов в квазары в поле HS47.5-22, содержащий данные 682 объектов.
5. Впервые по созданному каталогу квазаров построена функция светимости, демонстрирующая более высокие значения в диапазоне красных смещений $3 < z < 4$, в сравнении с данными обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.

Практическая значимость

1. Представленный в диссертации новый метод отбора квазаров позволяет создавать репрезентативные выборки для построения функции светимости и изучения космологической эволюции активных ядер галактик. Это позволит уточнить имеющиеся представления об эволюции сверхмассивных черных дыр во Вселенной.
2. Полученный в ходе работы каталог квазаров с фотометрическими красными смещениями является актуальным для анализа пространственной плотности квазаров и построения их функции светимости для изучения эволюции активных ядер галактик.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

1. “QSO Samples Properties Study” (устный доклад). Fifth Byurakan international summer school. 12-23 сентября 2016 г., Бюракан, Армения

2. “1-м телескоп Шмидта : первые результаты” (соавтор доклада). Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2016. 20-23 декабря 2016 г., Москва
3. “Оценка полноты выборки квазаров в Слоановском обзоре” (постер). Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2016. 20-23 декабря 2016 г., Москва
4. “Active galactic nuclei search” (устный доклад). 11th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics. Šabac, Serbia, August 21-25, 2017
5. “1-м телескоп Шмидта БАО: первые результаты” (устный доклад). Всероссийская астрономическая конференция 2017 года (ВАК-2017). 17-22 сентября 2017 г., Ялта
6. “Выборка квазаров в поле HS47.5-22” (соавтор доклада). Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2017. 18-21 декабря 2017 г., Москва
7. “Среднеполосный Бюраканский обзор: оценка селекционных эффектов” (устный доклад). Актуальные проблемы внегалактической астрономии. Пушино, 24 – 27 апреля 2018
8. “Поиск квазаров с помощью среднеполосной фотометрии” (устный доклад). VII Пулковская молодежная астрономическая конференция. 28-31 мая 2018 г.
9. “Отбор квазаров по наблюдениям в среднеполосных фильтрах” (устный доклад). Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2018. 18-21 декабря 2018 г., Москва
10. “OPTICAL IDENTIFICATION OF X-RAY SOURCES IN THE HS47.5-22 FIELD” (соавтор постера). ADASS XXX. 8-12 ноября 2020, онлайн
11. “Quasars physical properties study based on the medium-band photometric survey” (устный доклад). 13th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics. 23-27 августа 2021, Белград, Сербия
12. “Изучение физических свойств квазаров по данным среднеполосного фотометрического обзора” (устный доклад). ВАК-2021, 23-28 августа 2021, Москва

13. "One-Meter Schmidt Telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory: New Capabilities" (соавтор доклада). 12th Gaia Science Alerts Workshop. 8-12 ноября 2021, Крит, Греция
14. "Исследования поля HS47.5-22" (соавтор доклада). Традиционный конкурс-конференция научных, научно-технических и научно-популярных работ САО РАН. 8 февраля 2022, Нижний Архыз

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

1. Movsessian, T. A., Dodonov, S. N., Gabrielyan, V. V., Kotov, S. S., Gevorgyan, M. H.; "New Capabilities of One-Meter Schmidt Telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory after modernization Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory, Vol. 64, Issue 1, pp. 92–101. (2017)
2. Dodonov, S. N., Kotov, S. S., Movsessian, T. A., Gevorgyan, M. H.; "One-meter Schmidt telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory: New capabilities"; Astrophysical Bulletin, Vol. 72, Issue 4, pp. 473–479 (2017)
3. Kotov S., Dodonov S., Grokhovskaya A.; "Quasars' physical properties study based on the medium-band photometric survey"; Astronomische Nachrichten, Vol. 343, Issue 1/2, e210092 (2022)
4. Kotov S., Dodonov S.; "Active Galactic Nuclei Search"; Atoms, Vol. 5, Issue 4 (2017)
5. Grokhovskaya A., Dodonov S.N., Movsessian T.A., Kotov S.S.; "The gMOSS: the galaxy survey and galaxy populations of the large homogeneous field Mon. Not. R. Astron. Soc., Vol. 513, Issue 4, pp. 5973-5987 (2022)
6. Kotov, S. S., Dodonov, S. N., Movsessian, T. A., Grokhovskaya A. A.; "A catalog of quasars created from the results of a medium-band photometric survey at the 1-m Schmidt telescope"; Astronomy Letters, Vol. 48, Issue 8 (2022)

Личный вклад.

1. В работах [1, 2] автор принимал участие в модернизации 1-м телескопа Шмидта БАО НАН: измерение кривых пропускания фильтров,

изучение температурной стабильности ПЗС-детектора. Участие в балансировке телескопа, разработке системы освещения подкупольного экрана плоского поля. Участие в отладке системы наведения и ведения телескопа.

2. В работах [3, 4, 6] вклад автора определяющий. Автором разработана методика автоматического отбора квазаров по данным широкополосной фотометрии, среднеполосной фотометрии, инфракрасных данных UnWISE, морфологии обзора DECaLS, данных о параллаксах и собственных движениях GAIA, а также по оптическим отождествлениям рентгеновских и радиоисточников. Автором создана программа для отбора квазаров по спектральным распределениям энергии вручную, проведено моделирование полноты отбора квазаров, создан каталог квазаров. Автором проведено вычисление пространственной плотности квазаров, выполнена к-коррекция, учет межгалактического поглощения, построение функции светимости квазаров. Автором проведено сравнение полученной пространственной плотности и функции светимости квазаров с результатами обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.
3. В работах [3, 4, 5, 6] автор принимал участие в проведении среднеполосного фотометрического обзора поля HS47.5-22, около 100 наблюдательных ночей. Также автором проводились эксперименты с применением различных методов обработки изображений, полученных на 1-м телескопе, наравне с соавторами. Автором проводилась спектроскопия квазаров и галактик на телескопе БТА САО РАН, наравне с соавторами.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации **105** страниц текста с **30** рисунками и **3** таблицами. Список литературы содержит **112** наименований.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи

работы, обосновывается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена описанию различных методов поиска активных ядер галактик и методик создания репрезентативных выборок квазаров. В **разделе 1.1** приводится описание развития методов поиска квазаров, рассматриваются их сильные и слабые стороны. В **разделе 1.2** подробно рассматриваются современные обзоры, нацеленные на поиск активных ядер галактик, а также приводится анализ методов создания выборок квазаров, делаются предположения о возможных селекционных эффектах, возникающих при использовании этих методов. Приводится обоснование выбора среднеполосной фотометрии для изучения эволюции активных ядер галактик.

Вторая глава посвящена модернизации 1-м телескопа Шмидта БАО НАН и проведению среднеполосного фотометрического обзора в поле HS47.5-22. Телескоп входит в пятерку крупнейших телескопов системы Шмидта в мире по размеру зеркала (100/125/213), и в тройку — по размеру объективных призм, и является одним из самых светосильных ($F/2.1$) среди инструментов своего класса. В фокусе телескопа нами был установлен CCD-детектор (4Кx4К, с жидкостным охлаждением, $RON \sim 11.1e^-$, производитель Arroyo, USA) с элементом разрешения 0.868 arcsec/px и полем зрения около 1 квадратного градуса. 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). Для наблюдений нами было выбрано поле HS47.5-22. По наблюдениям на рентгеновском спутнике ROSAT [26] в нём обнаружено 144 рентгеновских источников до уровня $3.5 \cdot 10^{-14} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [26], а по результатам обзора FIRST в поле обнаружено 362 радиоисточника [27], [28]. Центральная часть поля была покрыта четырьмя наборами экспозиций в широкополосных и среднеполосных фильтрах. Наблюдения проводились на протяжении нескольких сетов в 2017 - 2018 годах. Суммарное время экспозиции подбиралось таким образом, чтобы достичь глубины $t_{AB} \approx 25^m$ с соотношением сигнал-шум 5 в широкополосных (около 2 часов) и $t_{AB} \approx 23^m$ с соотношением сигнал-шум 3 в среднеполосных фильтрах (около 40 мин в пике кривой чувствительности детектора и около 2 часов на краях диапазона). Полученные снимки обрабатывались авторским пакетом программ на языке IDL. По данным USNO-B

[29] создавалась астрометрическая структура, с помощью которой пересчитывались положения объектов в R.A. и DEC. Для фотометрии использовалась программа SExtractor [30] в варианте суммы снимков с весовыми коэффициентами, которые рассчитывались по методике, предложенной в Gawiser et al., 2005 [31]. Общее число объектов поля HS47.5-22 до $R_{AB} \approx 24.5^m$ составляет около 85000. Полная выборка объектов поля (28564 объекта) ограничена предельной звездной величиной $R_{AB} \approx 22.5^m$, до которой получены снимки в среднеполосных фильтрах с отношением сигнал/шум $\sim 5 - 10$.

Третья глава посвящена методике отбора квазаров и изучению влияния селекционных эффектов. Для начала проводится покоординатное отождествление объектов с другими обзорами, исследуются морфологические и фотометрические характеристики известных квазаров. Излагается концепция отделения необычных объектов от последовательности звёзд при помощи критерия плотности ближайших соседей в многомерном пространстве широкополосных фильтров. Рассматриваются комбинации критерия плотности ближайших соседей с различными цветовыми критериями для выделения квазаров. Изучаются возможности использования данных о собственных движениях звёзд из обзора Gaia для отделения квазаров от звёзд. Описывается финальный этап визуального отбора квазаров по среднеполосным спектральным распределениям энергии, а также методика определения среднеполосных фотометрических красных смещений и создание итогового каталога квазаров. Проводится моделирование полноты отбора квазаров в данной методике. Моделирование показало, что при больших красных смещениях ($z > 2,2$) вероятность обнаружения линий оценивается в 80% и выше для объектов ярче $AB = 22,5^m$. В свою очередь, на красных смещениях $1 < z < 2,2$ полнота отбора более 90% достигается применением широкополосных критериев $u - g < 0.6$ и $w1 - w2 > 0.4$. Представляется созданный каталог из 682 квазаров.

Четвертая глава посвящена построению функции светимости квазаров по данным созданного каталога. Описывается методика определения абсолютных звёздных величин и учёта геометрии пространства. Приводится сравнение полученной функции светимости квазаров с данными других обзоров. 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 nm. Для вычисления абсолютных звездных величин брались данные фотометрии в фильтре i_{SDSS} , рассчитывалась К-поправка [32] и проводился пересчет на $\lambda = 145$ nm по шаблонному спектру квазара с наклоном континуума $\alpha = -0.75$, также учитывалось межгалактическое поглощение согласно модели Мадау [33]. Была проведена коррекция за неполноту выборки согласно построенной модели.

В **заклучении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Исследованы возможности модернизированного 1-м телескопа Шмидта БАО НАН для глубокой фотометрии в широких полях с широкополосными и среднеполосными фильтрами. Показано, что для звездообразных объектов в широкополосных фильтрах за 2 часа экспозиции достигается глубина 25^m , а в среднеполосных фильтрах за 1 час экспозиции достигается глубина 23^m .
2. Проведен среднеполосный фотометрический обзор на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН. Разработан и отлажен алгоритм обработки полученных данных.
3. Разработан и отлажен алгоритм отбора кандидата в квазары по среднеполосным и широкополосным фотометрическим данным, полученным на 1-м телескопе Шмидта БАО, а также по данным оптических обзоров SDSS и DECaLS, инфракрасного обзора WISE, астрометрического обзора GAIA, рентгеновского обзора ROSAT и радио обзора FIRST. Создана выборка из 682 квазаров в поле HS47.5-22.
4. Проведено изучение статистических свойств полученной выборки квазаров, построена функция светимости, проведено сравнение с результатами обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.
5. Показано, что функция светимости квазаров, построенная по полученной выборке, демонстрирует более высокие значения в диапазоне красных смещений $3 < z < 4$, в сравнении с данными обзора COMBO-17.

Список литературы

1. *Antonucci R.* Unified models for active galactic nuclei and quasars. // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1993. — янв. — т. 31. — с. 473—521. — DOI: [10.1146/annurev.aa.31.090193.002353](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.002353).
2. *Urry C. M., Padovani P.* Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei // Publications of the ASP. — 1995. — сент. — т. 107. — с. 803. — DOI: [10.1086/133630](https://doi.org/10.1086/133630). — arXiv: [astro-ph/9506063](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9506063) [astro-ph].
3. *Heckman T. M., Best P. N.* The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe // Annual Review of Astron and Astrophys. — 2014. — авг. — т. 52. — с. 589—660. — DOI: [10.1146/annurev-astro-081913-035722](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035722). — arXiv: [1403.4620](https://arxiv.org/abs/1403.4620) [astro-ph.GA].
4. *Kormendy J., Richstone D.* Inward Bound—The Search For Supermassive Black Holes In Galactic Nuclei // Annual Review of Astron and Astrophys. — 1995. — янв. — т. 33. — с. 581. — DOI: [10.1146/annurev.aa.33.090195.003053](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.33.090195.003053).
5. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion / К. Gebhardt [и др.] // Astrophysical Journal, Letters. — 2000. — авг. — т. 539, № 1. — с. L13—L16. — DOI: [10.1086/312840](https://doi.org/10.1086/312840). — arXiv: [astro-ph/0006289](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006289) [astro-ph].
6. *Peng C. Y.* How Mergers May Affect the Mass Scaling Relation between Gravitationally Bound Systems // The Astrophysical Journal. — 2007. — дек. — т. 671, № 2. — с. 1098—1107. — DOI: [10.1086/522774](https://doi.org/10.1086/522774). — URL: <https://doi.org/10.1086/522774>.
7. *Jahnke K., Macciò A. V.* The Non-causal Origin of the Black-hole-galaxy Scaling Relations // Astrophysical Journal. — 2011. — июнь. — т. 734, № 2. — с. 92. — DOI: [10.1088/0004-637X/734/2/92](https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/2/92). — arXiv: [1006.0482](https://arxiv.org/abs/1006.0482) [astro-ph.CO].
8. A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$ / D. J. Mortlock [и др.] // Nature. — 2011. — июнь. — т. 474, № 7353. — с. 616—619. — DOI: [10.1038/nature10159](https://doi.org/10.1038/nature10159). — arXiv: [1106.6088](https://arxiv.org/abs/1106.6088) [astro-ph.CO].

9. Baryon acoustic oscillations in the Ly α forest of BOSS quasars / N. G. Busca [и др.] // *Astronomy and Astrophysics*. — 2013. — апр. — т. 552. — A96. — DOI: [10 . 1051 / 0004 - 6361 / 201220724](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220724). — arXiv: [1211 . 2616](https://arxiv.org/abs/1211.2616) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/1211.2616)].
10. Supermassive Black Holes with High Accretion Rates in Active Galactic Nuclei. IV. H β Time Lags and Implications for Super-Eddington Accretion / P. Du [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2015. — июнь. — т. 806, № 1. — с. 22. — DOI: [10 . 1088 / 0004 - 637X / 806 / 1 / 22](https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/22). — arXiv: [1504 . 01844](https://arxiv.org/abs/1504.01844) [[astro-ph.GA](https://arxiv.org/abs/1504.01844)].
11. A New Cosmological Distance Measure Using Active Galactic Nuclei / D. Watson [и др.] // *Astrophysical Journal, Letters*. — 2011. — окт. — т. 740, № 2. — с. L49. — DOI: [10 . 1088 / 2041 - 8205 / 740 / 2 / L49](https://doi.org/10.1088/2041-8205/740/2/L49). — arXiv: [1109 . 4632](https://arxiv.org/abs/1109.4632) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/1109.4632)].
12. *Risaliti G., Lusso E.* Cosmology with AGN: can we use quasars as standard candles? // *Astronomische Nachrichten*. — 2017. — март. — т. 338, № 329. — с. 329—333. — DOI: [10 . 1002 / asna . 201713351](https://doi.org/10.1002/asna.201713351). — arXiv: [1612 . 02838](https://arxiv.org/abs/1612.02838) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/1612.02838)].
13. *Haehnelt M. G., Rees M. J.* The formation of nuclei in newly formed galaxies and the evolution of the quasar population // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1993. — июль. — т. 263, № 1. — с. 168—178. — DOI: [10 . 1093 / mnras / 263 . 1 . 168](https://doi.org/10.1093/mnras/263.1.168).
14. *Haiman Z., Loeb A.* Observational Signatures of the First Quasars // *Astrophysical Journal*. — 1998. — авг. — т. 503, № 2. — с. 505—517. — DOI: [10 . 1086 / 306017](https://doi.org/10.1086/306017). — arXiv: [astro-ph/9710208](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710208) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710208)].
15. *Kauffmann G., Haehnelt M.* A unified model for the evolution of galaxies and quasars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2000. — янв. — т. 311, № 3. — с. 576—588. — DOI: [10 . 1046 / j . 1365 - 8711 . 2000 . 03077 . x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03077.x). — arXiv: [astro-ph/9906493](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9906493) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9906493)].
16. *Meiksin A., Madau P.* On the Photoionization of the Intergalactic Medium by Quasars at High Redshift // *Astrophysical Journal*. — 1993. — июль. — т. 412. — с. 34. — DOI: [10 . 1086 / 172898](https://doi.org/10.1086/172898).

17. *Boyle B. J., Terlevich R. J.* The cosmological evolution of the QSO luminosity density and of the star formation rate // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — янв. — т. 293, № 2. — с. L49—L51. — DOI: [10.1046/j.1365-8711.1998.01264.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01264.x). — arXiv: [astro-ph/9710134](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710134) [[astro-ph](#)].
18. Cosmological Evolution of the Hard X-Ray Active Galactic Nucleus Luminosity Function and the Origin of the Hard X-Ray Background / Y. Ueda [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2003. — т. 598, № 2. — с. 886—908. — arXiv: [astro-ph/0308140](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0308140) [[astro-ph](#)].
19. *Barger A. J., Cowie L. L.* The Number Density of Intermediate- and High-Luminosity Active Galactic Nuclei at $z \sim 2-3$ // *Astrophysical Journal*. — 2005. — т. 635, № 1. — с. 115—122. — arXiv: [astro-ph / 0508558](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0508558) [[astro-ph](#)].
20. *Miyaji T., Hasinger G., Schmidt M.* Soft X-ray AGN luminosity function from its ROSAT surveys. I. Cosmological evolution and contribution to the soft X-ray background // *A&A*. — 2000. — т. 353. — с. 25—40. — arXiv: [astro-ph/9910410](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910410) [[astro-ph](#)].
21. The Luminosity Function of X-Ray-selected Active Galactic Nuclei: Evolution of Supermassive Black Holes at High Redshift / J. D. Silverman [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2008. — т. 679, № 1. — с. 118—139. — arXiv: [0710.2461](https://arxiv.org/abs/0710.2461) [[astro-ph](#)].
22. The evolution of faint AGN between $z \sim 1$ and $z \sim 5$ from the COMBO-17 survey / C. Wolf [и др.] // *A&A*. — 2003. — т. 408. — с. 499—514. — eprint: [astro-ph/0304072](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304072).
23. Quasi-stellar objects in the ALHAMBRA survey - I. Photometric redshift accuracy based on 23 optical-NIR filter photometry / Matute, I. [и др.] // *A&A*. — 2012. — т. 542. — A20.
24. ELDAR, a new method to identify AGN in multi-filter surveys: the ALHAMBRA test case / J. Chaves-Montero [и др.] // *MNRAS*. — 2017. — т. 472. — с. 2085—2106. — arXiv: [1707.07690](https://arxiv.org/abs/1707.07690).
25. Evolution of the Quasar Luminosity Function over $3 < z < 5$ in the COSMOS Survey Field / D. Masters [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2012. — т. 755, № 2. — с. 169.

26. *Molthagen K., Wendker H. J., Briel U. G.* Multiwavelength observations of the field HS 47.5/22 in Ursa Major. I. The X-ray catalogue of a medium deep ROSAT survey // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1997. — т. 126. — с. 509—517.
27. A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey / R. L. White [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 1997. — т. 475, № 2. — с. 479. — URL: <http://stacks.iop.org/0004-637X/475/i=2/a=479>.
28. *Helfand D. J., White R. L., Becker R. H.* The Last of FIRST: The Final Catalog and Source Identifications // *Astrophys. J.* — 2015. — т. 801. — с. 26. — arXiv: [1501.01555](https://arxiv.org/abs/1501.01555).
29. The USNO-B Catalog / D. G. Monet [и др.] // *Astrophysical Journal*. — 2003. — т. 125, № 2. — с. 984—993. — arXiv: [astro - ph / 0210694](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0210694) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
30. *Bertin E., Arnouts S.* SExtractor: Software for source extraction. // *Astronomy and Astrophysics, Supplement*. — 1996. — т. 117. — с. 393—404.
31. *Gawiser E., MUSYC Collaboration.* The MUSYC Census of Protogalaxies at $z=3$ // *American Astronomical Society Meeting Abstracts*. т. 207. — 2005. — с. 157.01. — (American Astronomical Society Meeting Abstracts).
32. *Oke J. B., Sandage A.* Energy Distributions, K Corrections, and the Stebbins-Whitford Effect for Giant Elliptical Galaxies // *Astrophysical Journal*. — 1968. — окт. — т. 154. — с. 21. — DOI: [10.1086/149737](https://doi.org/10.1086/149737).
33. *Madau P.* Radiative transfer in a clumpy universe: The colors of high-redshift galaxies // *Astrophys. J.* — 1995. — т. 441. — с. 18—27.

Котов Сергей Сергеевич

Поиск активных ядер галактик и изучение их физических свойств по
данным среднеполосного фотометрического обзора на 1-м телескопе
Шмидта

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 0 × 90. Усл. печ. л.1. Тираж 100 экз.

Типография _____