

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

Котов Сергей Сергеевич

## ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ВЫБОРОК КВАЗАРОВ

### ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Допущен к защите.

Заведующий кафедрой астрофизики:

д.ф.-м.н., профессор Гаген-Торн В.А.

---

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., профессор Гаген-Торн В.А.

---

Научный консультант:

к.ф.-м.н., Додонов С.Н.

---

Рецензент:

к.ф.-м.н., Архаров А.А.

---

Санкт-Петербург, 2016

SAINT-PETERSBURG  
STATE UNIVERSITY

DEPARTMENT OF ASTROPHYSICS

Kotov Sergei

**QSO SAMPLES PROPERTIES STUDY**

GRADUATION THESIS

Admitted for defence.

Head of Department:

Doctor of Science, Professor V.A.

Hagen-Thorn

---

Scientific supervisor:

Doctor of Science, Professor V.A.

Hagen-Thorn

---

Scientific supervisor:

Doctor of Science, Dodonov S.N.

---

Reviewer:

Doctor of Science, Arkharov A.A.

---

Saint-Petersburg, 2016

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>
1.1	Постановка задачи . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Отбор кандидатов в квазары в Слоановском обзоре.</b>	<b>14</b>
2.1	Цветовые критерии отбора кандидатов в квазары Richards, 2002. . . . .	15
2.2	Области включения . . . . .	16
2.3	Области исключения . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Выборка кандидатов в квазары из каталога Richards, 2015</b>	<b>24</b>
3.1	Выборка кандидатов в квазары из каталога Bovy, 2015 . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Отбор кандидатов в квазары по наблюдениям в среднеполюсных фильтрах.</b>	<b>28</b>
4.1	Описание алгоритма . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Сравнение различных методов поиска и выделения кандидатов в квазары</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>Выводы</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>Заключение</b>	<b>38</b>

# 1 Введение

## 1.1 Постановка задачи

Обзоры неба предназначены для получения статистических выборок астрономических объектов с им присущими характеристиками: пространственным объемом, глубиной, полнотой и однородностью выборок объектов. Методически обзорные работы разделяются на спектральные, использующие бесщелевую или мультиобъектную спектроскопию и на обзоры, основанные на прямых снимках неба в нескольких широкополосных или многих среднеполосных фильтрах.

Спектральные обзоры, дающие информацию об объектах с относительно высоким спектральным разрешением, требуют значительного телескопического времени. Обзоры, основанные на прямых снимках неба в широкополосных фильтрах, более экономны, либо при той же экспозиции значительно глубже спектральных обзоров и дают информацию о морфологии и распределении энергии в спектрах всех объектов поля зрения телескопа с очень низким спектральным разрешением. Небольшое число фотометрических полос делает результаты наблюдений весьма чувствительными к вариациям наклона в спектральном распределении энергии (SED) у объектов. Информация о морфологии объектов имеет весьма ограниченное применение при классификации объектов на звёзды, галактики и квазары, т.к. сильно зависит от условий наблюдений и становится непригодной задолго до достижения пределов фотометрии.

Квазары, будучи ярчайшими из известных объектов во вселенной, наблюдаются современными методами до  $z = 6$  и более. Исходя из предположения об однородности и изотропности вселенной, мы можем проследить их эволюцию по объектам, находящимся на различных расстояниях. Однако, по причине большого разнообразия наблюдаемых активных ядер, де-

лать какие-либо выводы об их пространственной концентрации, функции светимости и т.д. можно только при наличии достаточной для составления статистики выборки.

Существует множество методов поиска квазаров. Любой из них начинается с наблюдений. Рассмотрим вкратце плюсы и минусы различных техник наблюдения, применяемых для этой задачи.

- Бесщелевая спектроскопия

В начале 60-х годов Б.Е. Маркарян применил объективную призму в сочетании с 1-м телескопом Шмидта Бюраканской обсерватории с целью поиска объектов с избыточным УФ излучением, положив начало Первому Бюраканскому спектральному обзору. Такая методика давала низкодисперсионный спектр для каждого из объектов поля в 16 квадратных градусов, позволяя отбирать кандидаты в галактики с активным ядром по критерию ультрафиолетового избытка. Позже во Втором Бюраканском обзоре Б.Е. Маркарян и Д.А. Степанян использовали аналогичную методику для отбора кандидатов в квазары. Благодаря своей простоте и эффективности этот подход стал использоваться повсеместно. В 1970 году в фокусе 1-м телескопа обсерватории Китт Пик была применена прозрачная дифракционная решетка (Hoag & Schroeder 1970), в 1975 году объективную призму использовали для проведения обзора на телескопе Кёртиса-Шмидта (Smith 1975), а в 1976 году прозрачную дифракционную решетку установили в фокусе 4-м телескопа обсерватории Серро-Тололо с целью получения глубоких снимков (Hoag 1976).

Большим преимуществом этого метода стало то, что он позволял выйти за рамки критерия голубого избытка, и поиск мог производиться также и напрямую по наличию широких эмиссионных линий, особенно при попадании  $L_{\alpha}$  в наблюдаемый диапазон длин волн.

Однако, при всей своей простоте данный подход имеет ряд серьезных недостатков. Прежде всего, спектры объектов растягиваются поверх фона неба, что, в сравнении с щелевой спектроскопией, понижает предел регистрации сразу на несколько звездных величин. Во-вторых, этот предел однозначно определить нельзя, поскольку он сильно зависит от вида спектра. Кроме того, довольно часто происходят наложения спектров друг на друга, из-за чего данные о существенной части объектов попросту становятся непригодными для исследования. А поскольку фотопластинки изучались вручную при помощи микроскопа, большую роль играл человеческий фактор: каждый исследователь отбирал объекты субъективно.

- Широкополосная фотометрия

В 1956 году Гильермо Аро предложил использовать трехцветную фотометрию для поиска галактик с яркими линиями и избытком в голубой и ультрафиолетовой области, и вскоре вместе с Виллемом Лейтенем приступил к созданию каталога голубых объектов при помощи 48" камеры Шмидта Паломарской обсерватории (Haro & Luyten 1962). Квазары, также обладающие ультрафиолетовым избытком, попадали в этот каталог, и вскоре стало понятно, что они имеют разность цветов  $U - B$ , сильно отличную от большинства звезд, за исключением белых карликов (Sandage & Luyten 1967). Данная методика оказалась вполне эффективной и позволяла избежать недостатков бесщелевой спектроскопии. Однако быстро проявились и ее минусы: смещенные эмиссионные линии, попадая в разные фильтры, порождают большой разброс значений в цветовом пространстве (Sandage 1966, Grewing 1967), из-за чего на  $z > 2.2$  ультрафиолетовый избыток проявляться перестает.

Дальнейшее развитие широкополосной фотометрии пошло в сторону увеличения числа фильтров. Отбор стали проводить сначала в дву-

мерном цветовом пространстве ( $U - B, B - V$ ) по тому же критерию ультрафиолетового избытка (Bracessi et al 1980), что практически полностью отделяло голубые квазары от звезд, однако все еще не позволяло выйти за  $z > 2.2$ . Перейти этот порог помогло использование четырехцветной системы фильтров (Koo & Kron 1982). Обновился, соответственно, и алгоритм отбора: объекты выбирались в трехмерном цветовом пространстве по принципу непринадлежности к областям, занимаемым звездами. Подобный подход оказался результативным: Shanks et al (1983) открыл квазар на  $z = 3.61$  с использованием UBVR-системы, а к 1990 году аналогичными методами было открыто 53 квазара на  $z > 3$  и 3 квазара на  $z > 4$  (Hartwick & Schade 1990).

Несмотря на то, что отдельные объекты на больших красных смещениях этот алгоритм выделить позволял, большая часть все равно пропусклась, попадая на цветовых диаграммах в области, занимаемые звездами. Кроме того, на  $z > 5$  лаймановский скачок переходит в красную область, и на видимый диапазон начинает приходиться ничтожно малая часть излучения, претерпевшая сильное поглощение на луче зрения. Регистрация при этом возможна только в крайнем красном фильтре, и, как правило, с низким соотношением сигнал-шум из-за плохой чувствительности фотоэмульсии в красной области и большого расстояния до источника.

Применение ПЗС решило ряд проблем, поскольку приемники данного типа в сочетании с высокой квантовой эффективностью в целом способны регистрировать излучение вплоть до  $10\,000 \text{ \AA}$  и более. Это позволило спроектировать набор широкополосных фильтров с разделением красной области на две части, что сделало возможным определение лаймановского скачка на  $z > 5$ , и было успешно реализовано в Слоановском цифровом обзоре (SDSS), см. рис. 1. В 1999 году Фэн [41]

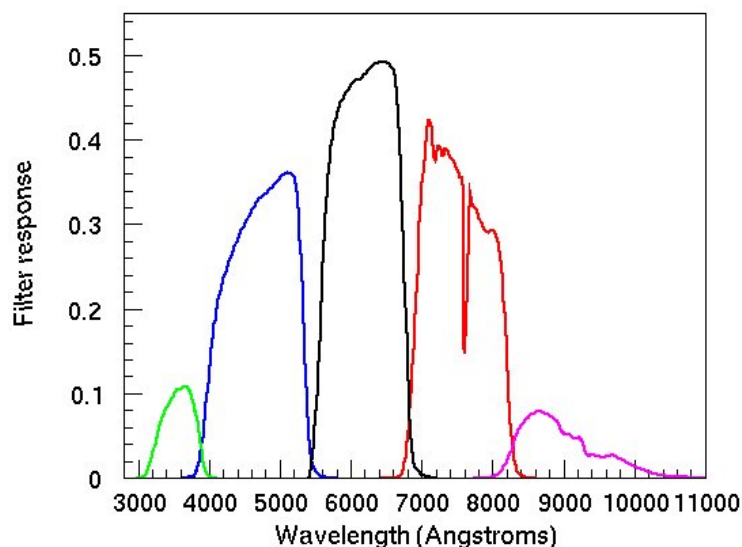


Рис. 1: Фильтры обзора SDSS с учетом спектральной чувствительности детектора, пропускания оптики и атмосферы.

сформулировал, а в 2002 году Гордон Ричардс представил методику поиска квазаров по пяти фильтрам, пригодную вплоть до  $z = 5.8$ , определив ряд новых поисковых критериев. Пересечения с областями, занимаемыми звездами, при этом по-прежнему остались, к тому же хотелось пробиться на как можно большие красные смещения, поэтому следующим шагом стало дополнение оптической фотометрии Слоановского обзора данными с инфракрасных космических телескопов SPITZER и WISE (Richards et al. 2015), а также данными с ультрафиолетового телескопа GALEX (Bovy et al. 2015). Лаймановский скачок на больших красных смещениях фиксировался на границе видимой области благодаря использованию инфракрасной фотометрии, а наличие большого числа фильтров в диапазоне от  $1300\text{\AA}$  до  $22\mu$  позволяло, в теории, надежно отделять активные ядра от звезд во всем наблюдаемом диапазоне  $z$ . На практике же стало возникать множество проблем из-за ошибок фотометрии, особенно при переходе к предельным звезд-



ным величинам: слабые объекты могли быть зафиксированы лишь в нескольких фильтрах, при этом для остальных длин волн определялось максимально возможное значение интенсивности, равное порогу обнаружения.

- Мультиобъектная спектроскопия

Развитие технологии наблюдений привело к появлению мультиобъектных спектрографов (Ellis & Parry, 1988). Для достижения заданного отношения сигнал/шум при сравнимом спектральном разрешении для слабых объектов многоцелевая спектроскопия более эффективна, чем многополосная фотометрия, при условии согласования размера щели с размером изображения, формируемого атмосферой. Однако, измерение красных смещений слабых (слабее  $R = 22^m$ ) внегалактических объектов с помощью спектроскопии — нелегкая задача даже для современных крупных (8 – 10 м) телескопов. Многочасовые экспозиции необходимы для достижения отношения сигнал/шум, достаточного для спектральной классификации объекта и определения его красного смещения. Часто, при хорошем отношении сигнал/шум в спектре объекта, его классификация и определение красного смещения затруднены из-за отсутствия значимых спектральных деталей в наблюдаемом спектральном диапазоне. В результате процесс идентификации линий в спектре объекта становится субъективным и отягощен разного рода ошибками. Серьезным ограничением метода является то, что многоцелевые наблюдения обычно ограничены числом одновременно наблюдаемых объектов и, следовательно, предполагают предварительную селекцию объектов.

- Среднеполосная фотометрия

Впервые идея увеличения количества фильтров и использования фо-

тометрических данных для определения красных смещений галактик была предложена и реализована Баум [1]. Значительно позже эта идея была возрождена Ло и Спиллар [2], Куу [3] и Коннолли и др. [4] и после работ Lanzetta et al. (1996), Connolly et al. (1997), Fernandes-Soto et al. (1999) получила всеобщее признание как метод, позволяющий исследовать все объекты, видимые в поле зрения телескопа, и с приемлемой точностью определять их тип, фотометрические красные смещения, делать оценки их физических параметров. Такая методика наблюдений является промежуточной между широкополосной фотометрией и многоцелевыми наблюдениями. Она включает в себя прямые снимки через относительно большое число среднеполосных фильтров ( $FWHM = 200 - 300 \text{ \AA}$ ). Фотометрия каждого отдельного изображения в фильтре даёт точку в распределении энергии каждого объекта, попавшего в поле зрения телескопа. На этом пути низкодисперсионная спектрофотометрия может быть получена для большого числа объектов. Разные варианты этой методики применялись в обзорах CADIS, COMBO-17, MUSIC, ALHAMBRA.

Hickson et al. (1994) и Chen et al. (1994) были первыми, кто использовал среднеполосные фильтры, равномерно покрывающие большой спектральный диапазон, и полученные фотометрические данные рассматривали как низкодисперсионный спектр каждого наблюдаемого объекта. Для слабых объектов многополосная фотометрия при прочих равных условиях сравнима по эффективности (с точки зрения числа одновременно исследуемых объектов) с бесщелевой спектроскопией (Hickson, et al., 1994), однако современные интерференционные фильтры могут быть изготовлены с пропусканием 80 – 90 % в широком диапазоне длин волн, в то время как объективная призма, гризма или гринза имеют высокую эффективность только в области угла блеска.

Многополосная фотометрия ограничена только блендированием объектов и искажением их цветовых избытков взаимным влиянием, и может давать информацию о многих тысячах объектов (практически о всех объектах в поле зрения телескопа) одновременно.

При многополосной фотометрии, для заданного количества наблюдательного времени, время интегрирования в каждом диапазоне обратно пропорционально числу диапазонов и отношению ширины спектрального диапазона, покрываемого одним фильтром, ко всему спектральному диапазону, запланированному для наблюдений. При оптимальном соотношении числа фильтров, их ширин и наблюдаемого спектрального диапазона многополосная фотометрия значительно превосходит бесцелевую спектроскопию и сравнима по отношению сигнал/шум с многоцелевой спектроскопией, проигрывая по наблюдательному времени первой и выигрывая по числу объектов и простоте наблюдений у второй. Применение многополосной фотометрии на телескопах с большим полем зрения только увеличивает её эффективность.

- Радиообзоры

Являлись исторически первым методом поиска активных ядер из-за их относительно большой яркости в радиодиапазоне: практически все сильные радиоисточники на ночном небе являются квазарами либо радиогалактиками, лишь на малых яркостях возможна путаница с радиоизлучением областей звездообразования (Mushotzky 2004). Кроме того, радиоаппаратура очень чувствительна, а благодаря применению радиоинтерферометров есть возможность определить координаты источника с очень высокой точностью. Также важно и то, что высокая разрешающая способность позволяет разглядеть в подробностях структуру излучающих областей. Однако, определение красного смещения по данным радиообзоров практически невозможно, и с этой целью при-

ходится обращаться к оптической спектроскопии.

В 1959 году был опубликован Третий Кембриджский каталог радиобъектов (3C), по данным которого проводились первые отождествления радиоисточников с объектами в оптике (3C 48, 3C 273). В середине 1960 годов было замечено, что существенная часть из них не проявляет каких-либо признаков незвездной активности в оптическом диапазоне (Kristian, Sandage & Katem 1974), ничем не отличаясь от обычных галактик. В то же время, подавляющее большинство оптически отобранных активных ядер не являются сильными источниками радиоизлучения (White et al. 2000).

При переходе к объектам малой радиояркости, дабы избежать путаницы с другими источниками, для поиска активных ядер пользуются дополнительными критериями. Во-первых, практически все из них имеют плоский радиоспектр, что хорошо определяется при наблюдениях на нескольких длинах волн. Кроме того, прослеживается жесткая корреляция между интенсивностью в инфракрасном и в радиодиапазоне (Condon, Anderson, & Broderick 1995).

- Рентгеновские и гамма-обзоры

Так же, как и в радиодиапазоне, наличие яркого компактного рентгеновского или гамма-источника — надежный индикатор активного ядра галактики (AGN). Кроме того, многие галактики, проявляющие в оптике крайне слабые признаки нетеплового излучения, активно излучают в рентгеновском диапазоне, позволяя судить о наличии в них активного ядра (Griffiths et al. 1979). Большое преимущество этого метода заключается также в том, что, за редким исключением, практически все активные ядра являются рентгеновскими источниками. За счет этого регистрируется в несколько раз больше активных ядер, чем при оптических наблюдениях, до одной и той же предельной звездной величины

(Grazian et al. 2000; Palunas et al. 2000). Тем не менее, отношение интенсивности рентген/оптика не всегда велико, и выделен целый подкласс объектов с широкими эмиссионными линиями в оптике, но слабым либо вообще незарегистрированным рентгеновским излучением. Кроме того, при светимости ниже  $10^{-42}$  эрг/с велика вероятность, что мы имеем дело с ультраярким рентгеновским источником (ULX), а не с активным ядром галактики (Colbert & Ptak 2002).

Поскольку рентгеновский диапазон включает в себя энергии от 0.2 до 10 keV, существует большая разница в излучении квазаров в мягком и жестком рентгене. В первом случае поглощение может играть такую же значимую роль, как в оптике и ультрафиолете, в то время как для высоких энергий данный эффект становится гораздо менее существенным. По этой причине наблюдения на разных энергиях обнаруживают объекты разных типов. В диапазоне низких энергий (0.2 – 2 кэВ) прежде всего определяются квазары с широкими эмиссионными линиями и Сейфертовские галактики с узкими линиями. Наблюдения же в диапазоне 2 – 10 кэВ более эффективны для обнаружения Сейфертовских галактик первого типа, квазаров, а также объектов, у которых эмиссионные линии и нетепловой континуум обнаруживаются слабо.

К сожалению, определение красного смещения при помощи рентгеновской спектроскопии редко представляется возможным, и, как и в случае с радиообзорами, приходится пользоваться оптическими данными. Также из недостатков можно отметить сложность в реализации метода, так как требуются внеатмосферные наблюдения с высоким угловым разрешением для возможности отождествления с оптическими источниками.

- Ультрафиолетовые обзоры

Не применялись для поиска активных ядер до недавнего времени, так

как отсутствовали крупномасштабные ультрафиолетовые обзоры достаточного разрешения. После введения в строй в 2003 году GALEX полученные данные нашли применение для поиска квазаров в сочетании с оптическими и инфракрасными наблюдениями (Vovv et al. 2015).

- Инфракрасные обзоры

Широкополосные инфракрасные обзоры предоставляют интересные возможности для поиска квазаров. Например, в 2MASS (Cutri et al. 2002) 60% объектов с цветовой разницей  $J - K > 2$  имеют оптические характеристики квазаров. Кроме того, Andreani et al. (2003) обнаружил, что для большинства квазаров отношение болометрической и инфракрасной светимости остается постоянным, несмотря на огромный разброс значений в оптике, рентгене, и радиодиапазоне. Обсерватория WISE, запущенная в 2009 году, завершила первый обзор всего неба в 2010 году в четырех полосах ИК-диапазона : 3.4, 4.6, 12, и 22 мкм. Подобно методу поиска квазаров по UV-избытку, отбор квазаров в ИК-диапазоне основан на отличии степенного распределения энергии в спектре квазара от чернотельного распределения энергии звезд в спектрах галактик (Stern et al., 2012; Asef et al., 2013). Очень эффективным оказалось применение инфракрасных данных в сочетании с оптической широкополосной фотометрией (Richards et al. 2015; Vovv et al. 2015).

Целью данной работы является сравнение методик наблюдения и отбора кандидатов в квазары при широкополосной фотометрии (SDSS) и среднеполосной фотометрии на примере поля  $09^h40^m + 50^\circ$  размером 0.8 кв. градуса. Для сравнения мы используем выборки объектов этого поля одинаковой глубины ( $i = 21.5^m$ ) из данных SDSS и данных каталога объектов этого поля, исследованного фотометрически в 16 среднеполосных фильтрах (FWHM 200-300 Å) на 0.6-м телескопе Шмидта обсерватории Xilong

Station (China), и спектрально на 6-м телескопе CAO РАН (Додонов, 2012). Оценка селекционных эффектов при отборе кандидатов в квазары в оптическом диапазоне позволит приблизиться к пониманию различий, обнаруженных в эволюции пространственной плотности квазаров по наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн (Mijaji et al., 1998), см. рис. 2.

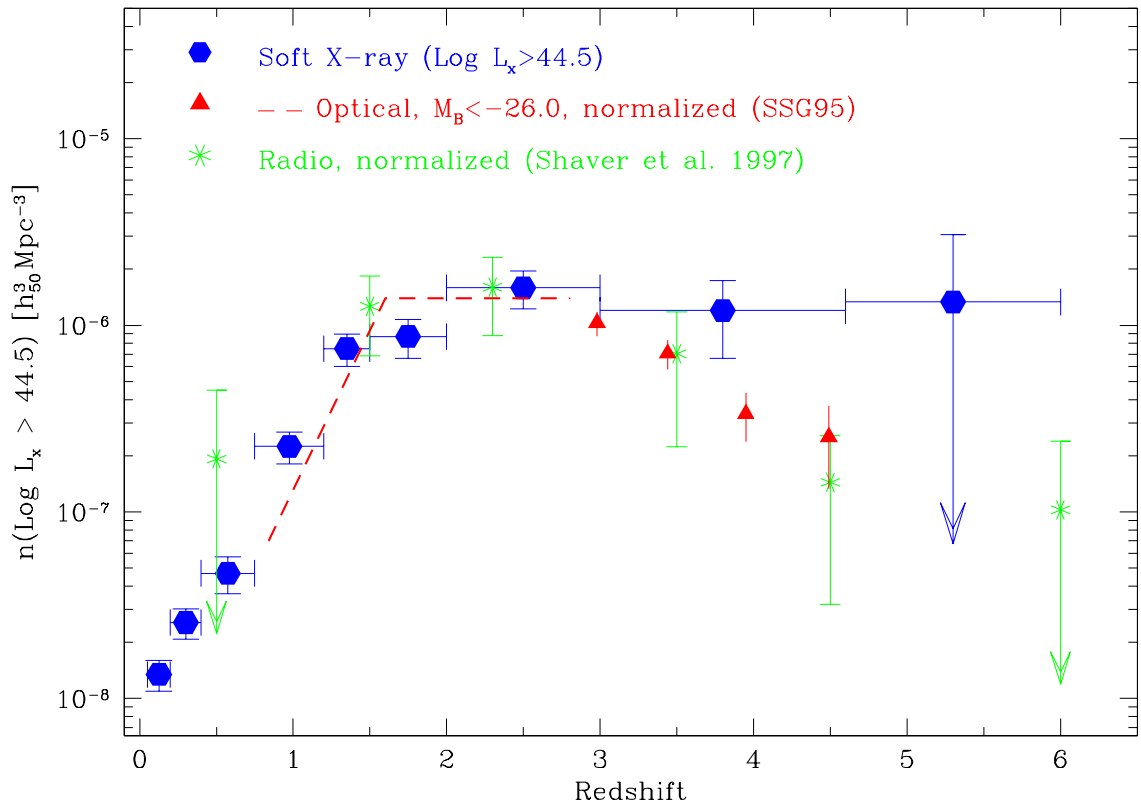


Рис. 2: Подсчеты AGN в рентгеновском, радио и оптическом диапазонах, Mijaji et al., 1998

## 2 Отбор кандидатов в квазары в Слоановском обзоре.

Слоановский обзор покрывает суммарно более 10 000 квадратных градусов в пяти широкополосных фильтрах. В процессе подготовки обзора были определены первичные цветовые критерии отбора кандидатов в квазары (Fan, 1999), см. рис. 3. В 2002 году вышла работа, описывающая алгоритм и критерии отбора кандидатов в квазары, применявшиеся впоследствии в обзоре до 2007 года (Richards et al. 2002). Ставилась цель достигнуть хорошей полноты выборки для всех  $z \leq 5.8$ . Фильтры проектировались таким образом, чтобы было возможно отделить квазары на малых  $z$  от звезд класса A, а на больших  $z$  фиксировать лаймановский скачок при его смещении в красную область.

Для анализа работы алгоритмов выделения кандидатов в квазары в SDSS мы возьмем выборку объектов поля с координатами центра  $09^h40^m + 50^\circ$ , размер поля 0.8 кв. градуса, ограничим выборку предельной звездной величиной  $i = 21.5^m$ . Выбор глубины выборки определяется глубиной выборок Richards, 2015 и Vovv, 2015 с которыми мы будем проводить сравнение. Всего в поле 12590 объектов ( $i = 22.5^m$ ), в выборку вошло 5333 объекта ( $i = 21.5^m$ ). Рассмотрим работу алгоритмов выделения объектов кандидатов в квазары на примере работы цветовых критериев отбора Richards, 2002, выборки кандидатов в квазары из работы Richards, 2015 и выборки кандидатов в квазары из работы DiPompeo, 2015 (далее мы будем называть выборку объектов кандидатов в квазары из этой работы Vovv, 2015, поскольку это выборка из каталога объектов, впервые опубликованного Vovv в 2011 году, и модифицированного в 2015 г.)



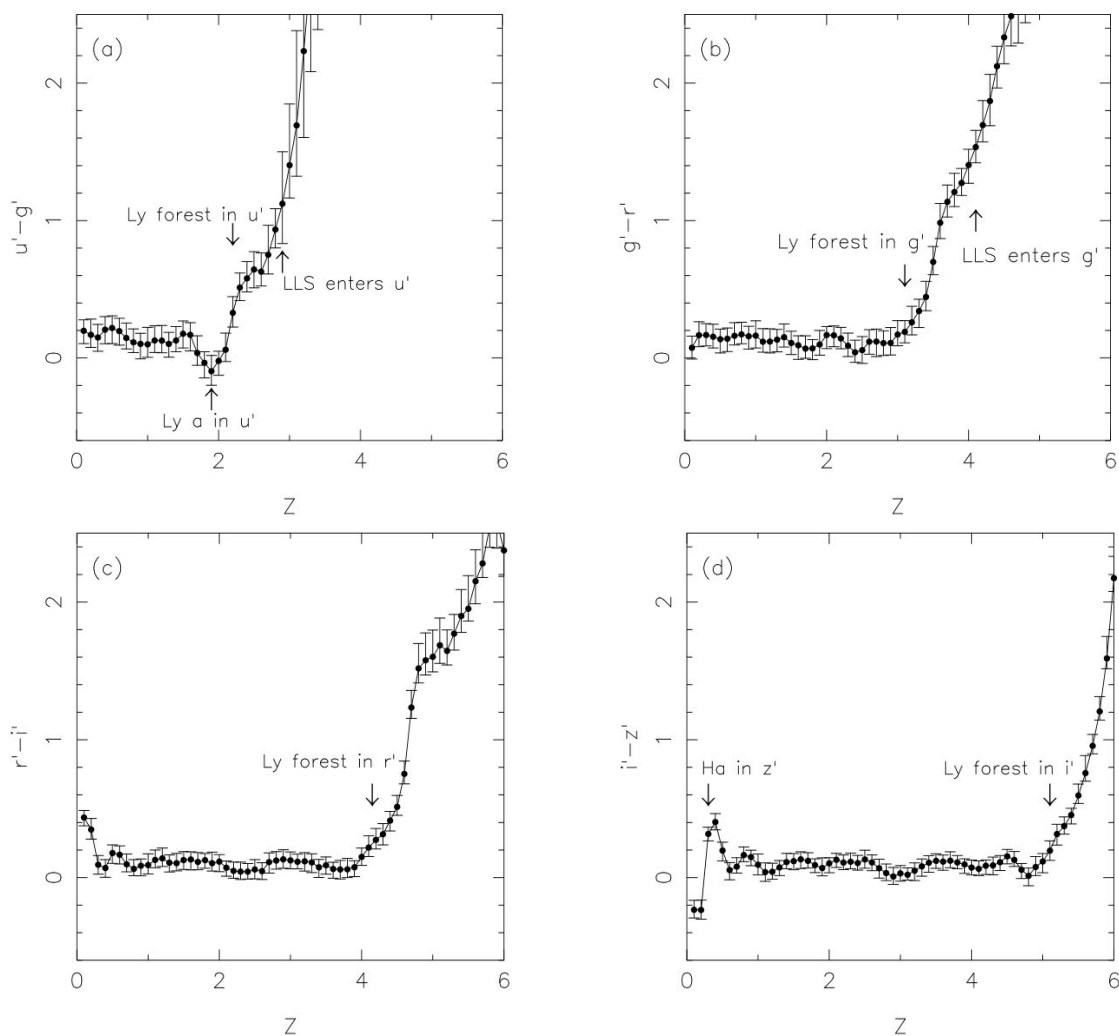


Рис. 3: Изменение цветных избытков квазаров с красным смещением (Fan, 1999)

## 2.1 Цветовые критерии отбора кандидатов в квазары Richards, 2002.

Алгоритм отбора состоит в следующем: в четырехмерном цветовом пространстве определяются области, соответствующие цветовым характеристикам квазаров с изменением красного смещения. Затем исключаются области, занимаемые звездами главной последовательности, M-звездами, A-звездами и белыми карликами. Для определения границ областей звездного населения находится распределение звезд в сечении звездной последовательности на диаграмме, и определяется критерий  $4\sigma$  и  $2\sigma$  для этого

распределения. По первому критерию определялись области исключения для квазаров на малых и больших  $z$ . Второй же критерий определялся для нахождения границ области включения, позволяющей вносить в выборку квазары на средних красных смещениях ( $z \sim 2.7$ ), но пересекающейся при этом с областью звезд главной последовательности. Само собой, процент попадания звезд в выборку при этом существенно возрастает.

Для создания выборки кандидатов в квазары, соответствующей алгоритму отбора, был написан пакет программ на языке IDL, использующий те же цветовые критерии. Прежде всего, брались данные по всем объектам исследуемого поля, для которых ошибки фотометрии не превышали заданные методикой значения (Richards et al. 2002). Затем проводился отбор квазаров по цветовым критериям, описанным ниже, и данные по отобранным объектам заносились в итоговую таблицу.

## 2.2 Области включения

**Квазары на  $z < 2.2$**

$$u - g < 0.6$$

Таким образом определяется критерий ультрафиолетового избытка (UVX-критерий), успешно применяемый для поиска квазаров с середины 60-х годов прошлого века. Для исследуемого поля отобрано 103 объекта (Рис. 4).

**Квазары на  $z \sim 2.7$**

$$0.6 < u - g < 1.5$$

$$0.0 < g - r < 0.2$$

$$-0.1 < r - i < 0.4$$

$$-0.1 < i - z < 0.4$$

Один из самых сложных критериев алгоритма, поскольку данный регион пересекается с областью, населенной звездами.

### **Квazarы на $z > 3.0$**

$$u > 20.6$$

$$u - g > 1.5$$

$$g - r < 1.2$$

$$r - i < 0.3$$

$$i - z > -1.0$$

$$g - r < 0.44 * (u - g) - 0.56$$

UGR-критерий. Отобрано 14 объектов.

Здесь, как и в последующих областях включения, выделяются кандидаты в квазары с большими красными смещениями (Рис. 5). При этом, хоть критерии и исключают пересечения с основной звездной последовательностью, происходит включение в выборку слабых красных звезд, цвета которых в широкополосных фильтрах совпадают с цветами квазаров на больших  $z$ .

### **Квazarы на $z > 3.6$**

$$\sigma_i < 0.2$$

$$u - g > 1.5 \text{ OR } u > 20.6$$

$$g - r > 0.7$$

$$g - r > 2.1 \text{ OR } r - i < 0.44(g - r) - 0.358$$

$$i - z < 0.25$$

$$i - z > -1.0$$

GRI-критерий. Отобран 9 объектов (Рис. 6).

### **Квazarы на $z > 4.5$**

$$\sigma_i < 0.2$$

$$u > 21.5$$

$$g > 21.0$$

$$r - i > 0.6$$

$$i - z > -1.0$$

$$i - z < 0.52 * (r - i) - 0.412$$

RIZ-критерий. Отобрано 17 объектов (Рис. 7).

## 2.3 Области исключения

### Белые карлики

$$-0.8 < u - g < 0.7$$

$$-0.8 < g - r < -0.1$$

$$-0.6 < r - i < -0.1$$

$$-1.0 < i - z < -0.1$$

### Звезды А-класса

$$0.7 < u - g < 1.4$$

$$-0.5 < g - r < 0.0$$

$$-0.5 < r - i < 0.2$$

$$-0.4 < i - z < 0.2$$

### Двойные системы М-звезды + белые карлики

$$-0.3 < g - r < 1.25$$

$$0.6 < r - i < 2.0$$

$$0.4 < i - z < 1.2$$

$$\sigma_g < 0.2$$

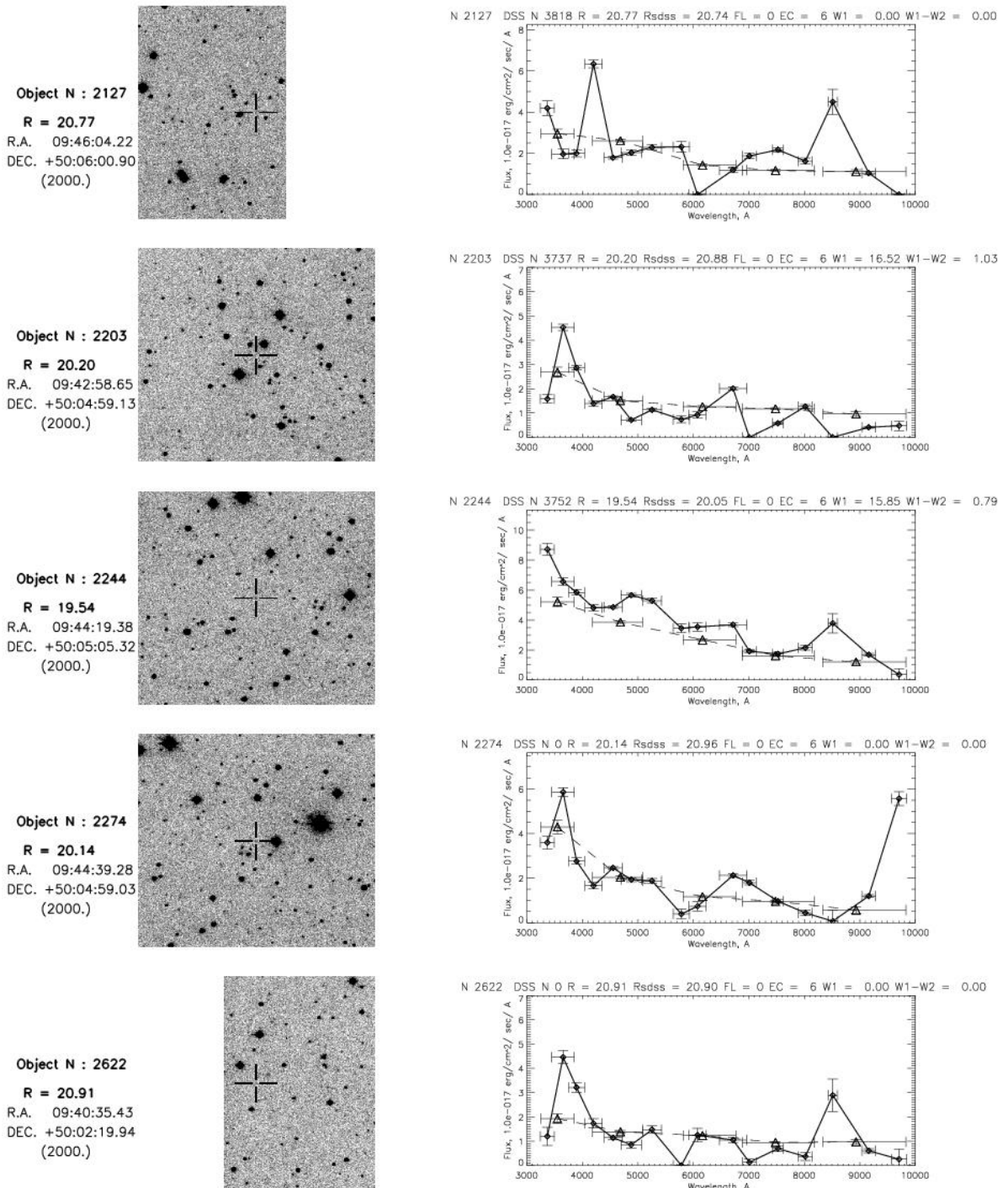


Рис. 4: Распределения энергии объектов, отобранных в соответствии с UVX-критерием. Сплошная линия SED по данным среднеполосной фотометрии, штриховая — по данным SDSS.

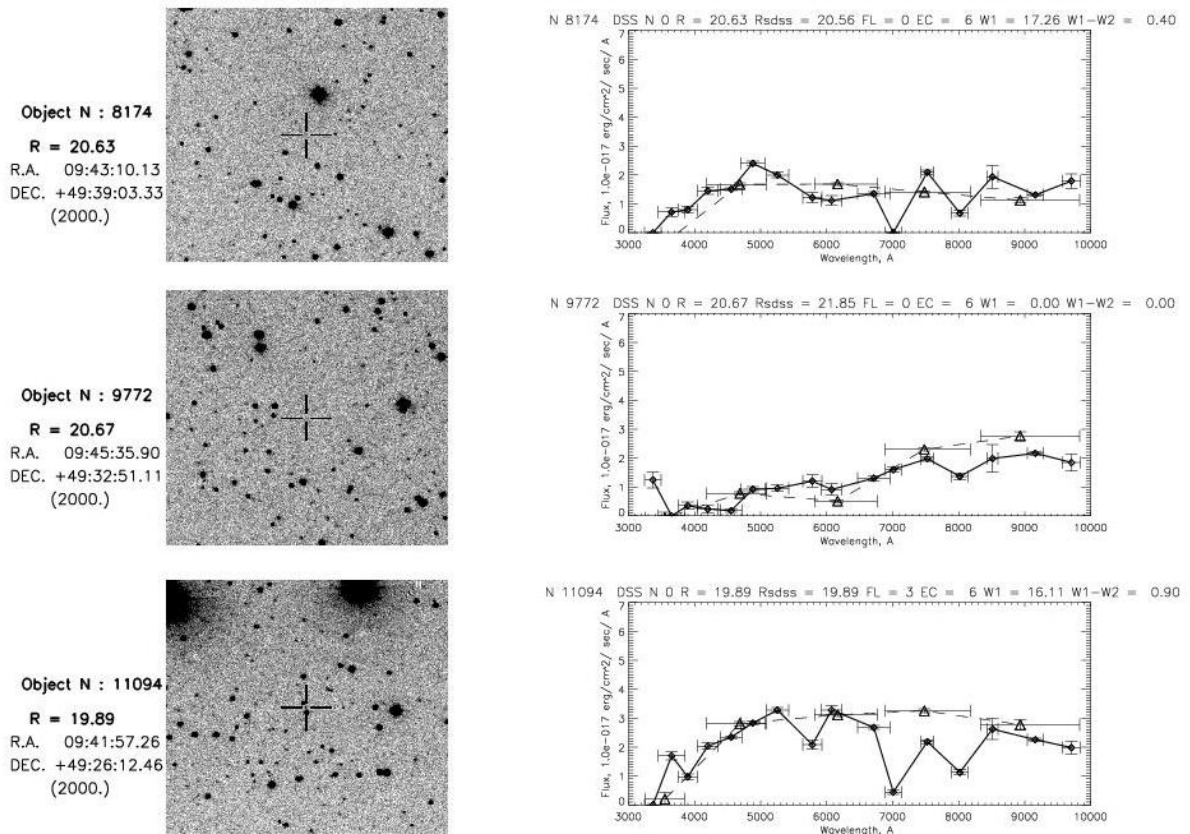


Рис. 5: Распределения энергии объектов, отобранных в соответствии с UGR-критерием. Сплошная линия SED по данным среднеполосной фотометрии, штриховая — по данным SDSS.

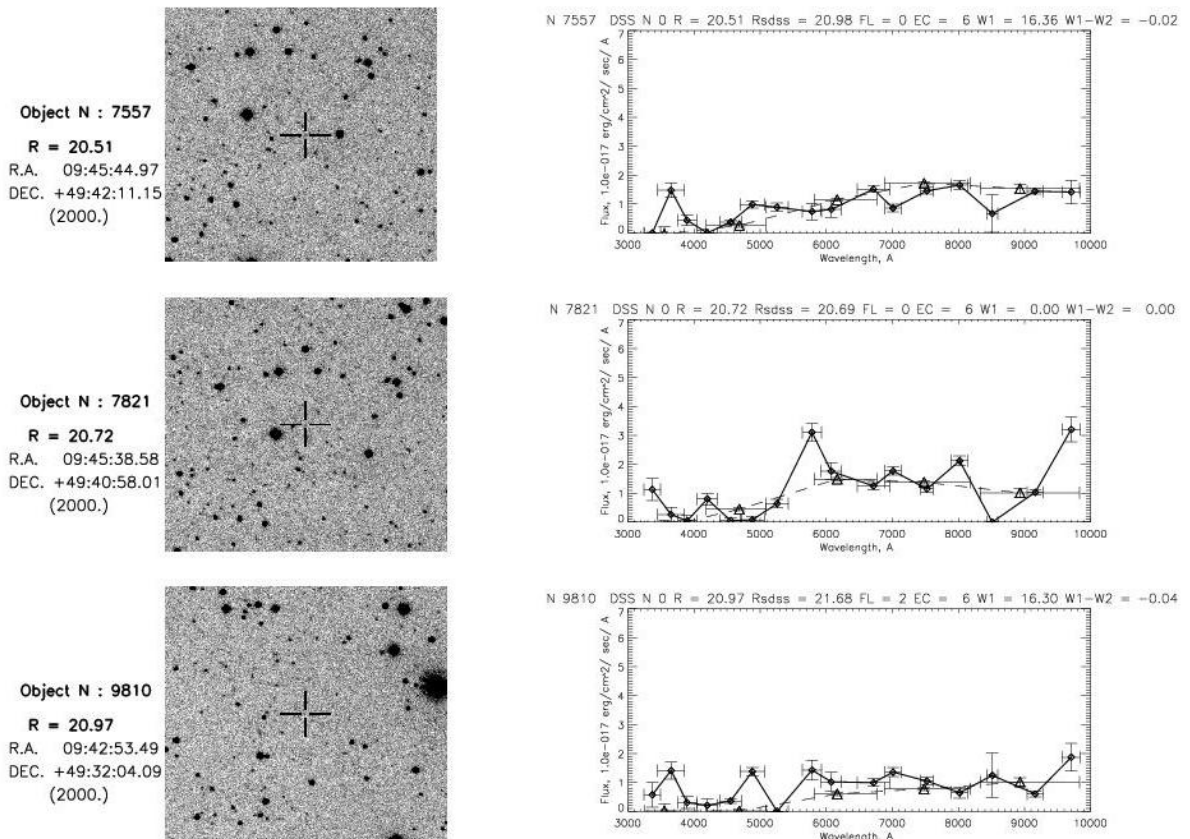


Рис. 6: Распределения энергии объектов отобранных в соответствии с GRI-критерием. Сплошная линия SED поданным среднеполосной фотометрии, штриховая — по данным SDSS.

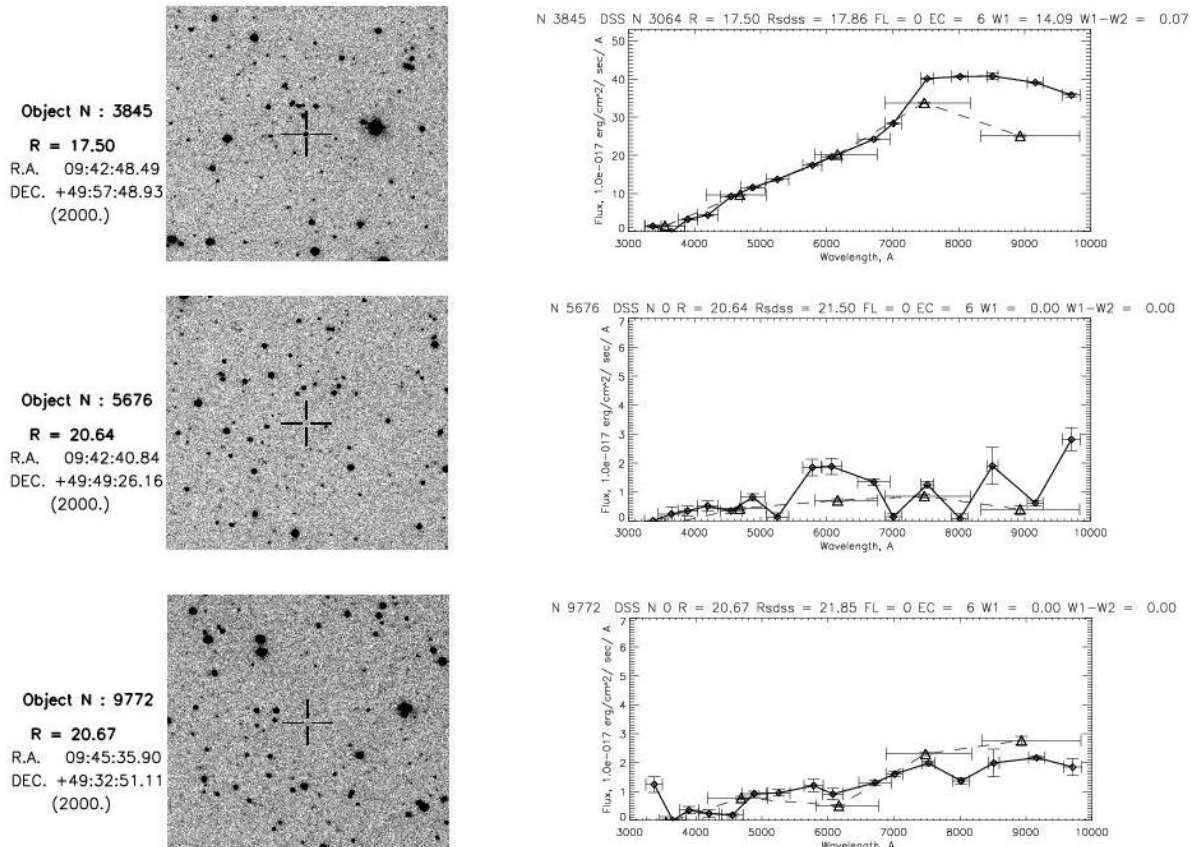


Рис. 7: Распределение энергии объектов, отобранных в соответствии с RIZ-критерием. Сплошная линия SED по данным среднеполосной фотометрии, штриховая — по данным SDSS.



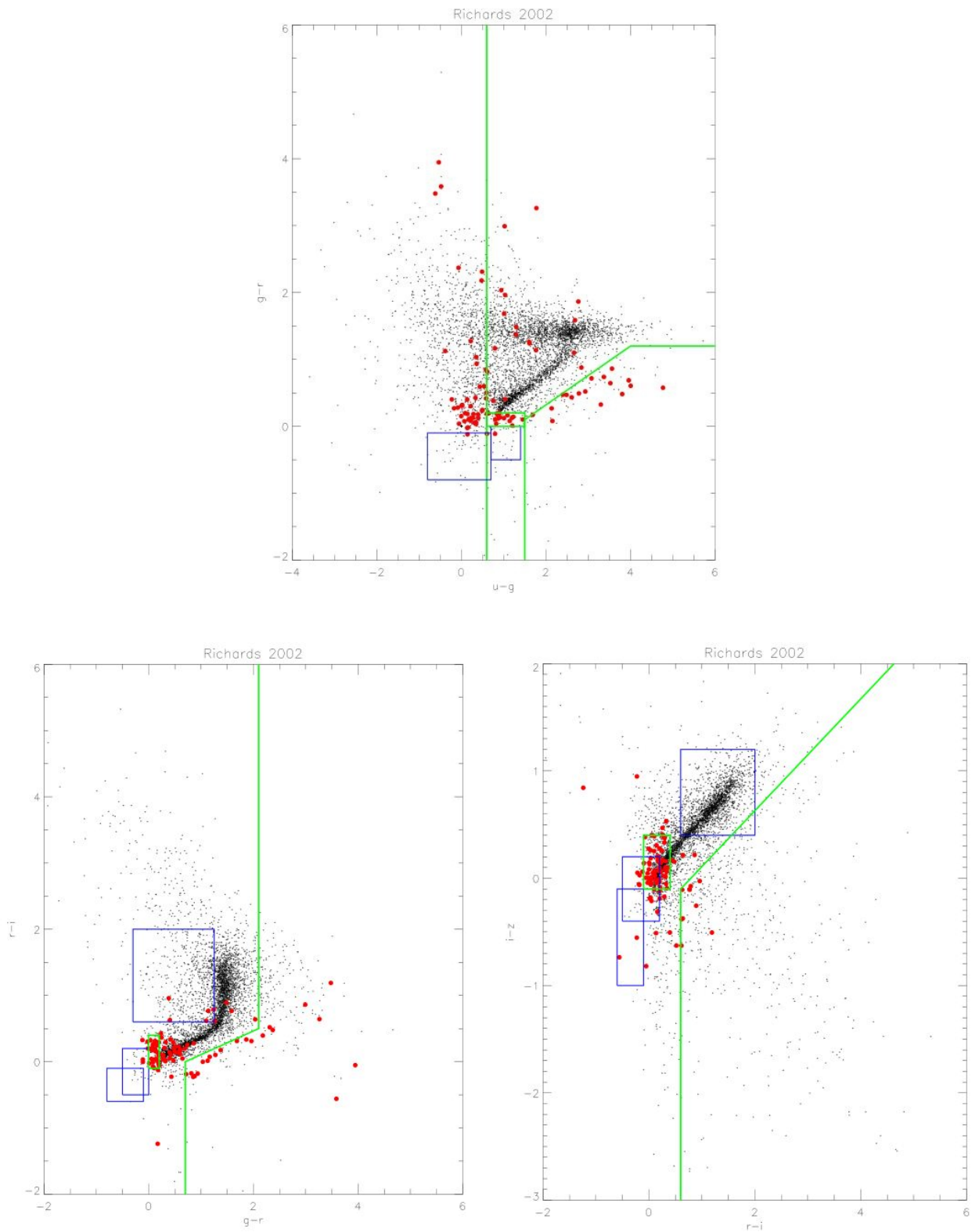


Рис. 8: Цветовые диаграммы  $(u-g - g-r)$ ,  $(g-r - r-i)$ ,  $(r-i - i-z)$  для Richards 2002. Зеленым цветом указаны области включения, синим — области исключения. Красными точками обозначены отобранные кандидаты в квазары, черными точками — множество всех остальных звездообразных объектов.

### 3 Выборка кандидатов в квазары из каталога Richards, 2015

Авторы каталога на основе тестовой выборки квазаров слоановского обзора, подтвержденных спектрально, определили изменения средних значений цветовых индексов, добавив к анализу распределений энергии объектов инфракрасные данные WISE (Рис. 9). Оценка вероятности того, что объект является квазаром, производится на основе расчета уклонения цветовых индексов исследуемого объекта от среднего значения цветовых индексов, рассчитанных по тестовой выборке квазаров.

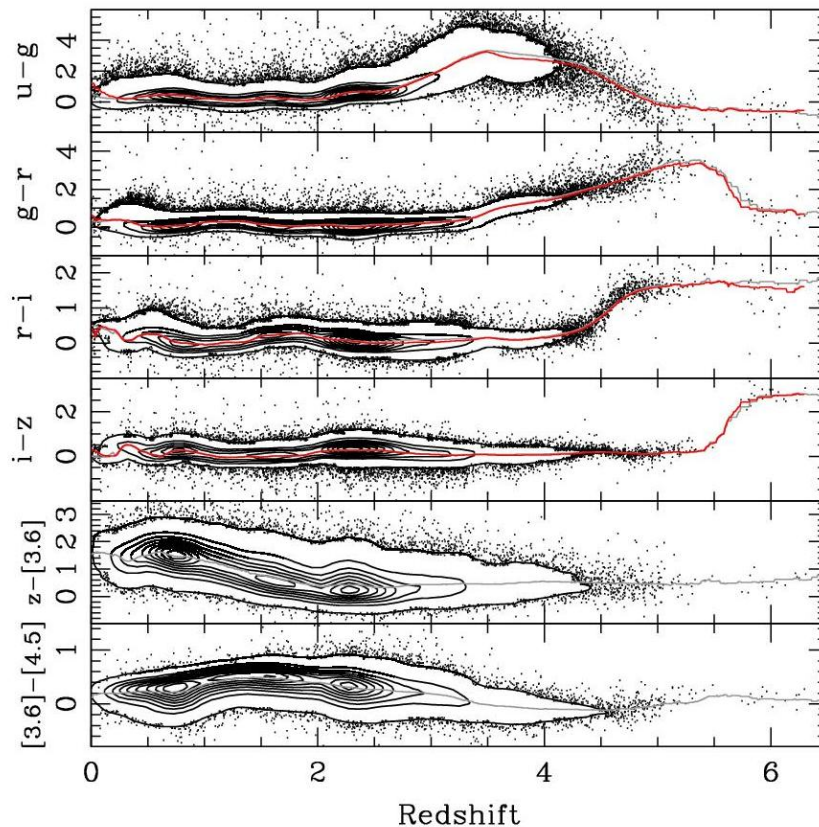


Рис. 9: Изменение цветовых индексов квазаров с красным смещением для тестовой выборки Richards, 2015 и средние показатели цвета.

Выборка объектов кандидатов в квазары в поле  $09^h 40^m + 50^\circ$  состоит из 50 объектов. Из них 40 объектов соответствуют UVX-критерию, 2 объекта UGR-критерию.

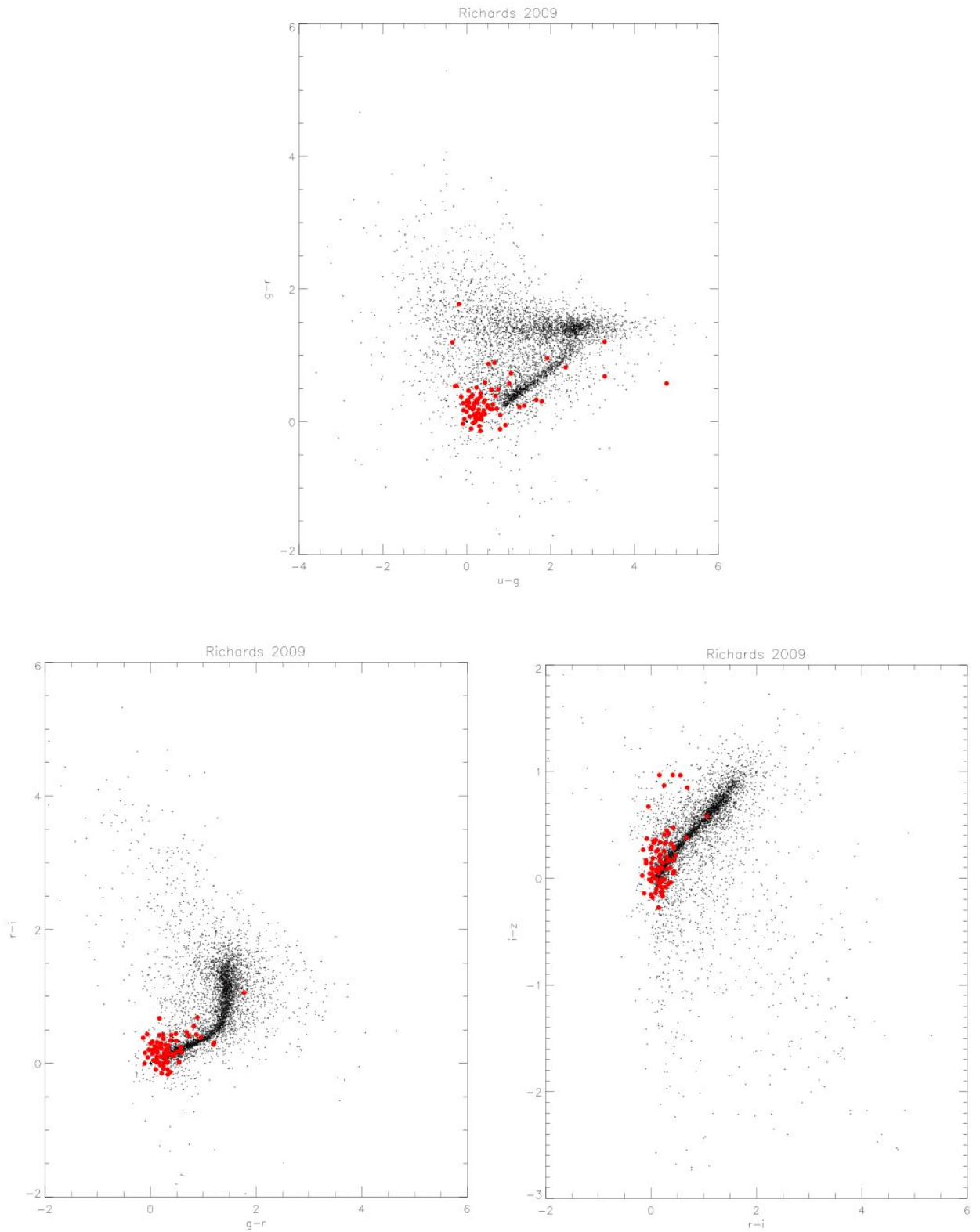


Рис. 10: Цветовые диаграммы  $(u-g - g-r)$ ,  $(g-r - r-i)$ ,  $(r-i - i-z)$  для Richards 2015. Красными точками обозначены отобранные кандидаты в квазары, черными точками — множество всех остальных звездообразных объектов.

### 3.1 Выборка кандидатов в квазары из каталога Bouy, 2015

Авторы каталога используют тестовую выборку квазаров и звезд и модельную функцию светимости квазаров для определения областей связности в многопараметрическом пространстве. Оценка вероятности того, что объект является квазаром в данном диапазоне красных смещений, делается на основе соответствия потоков объектов областям связности в цветовом многопараметрическом пространстве. В анализ данных добавлены данные UV-спутника GALEX, IR-спутника WISE и обзора UKIDSS. Выборка объектов кандидатов в квазары в поле  $09^h40^m + 50^\circ$  ограничена по звездной величине  $i = 21.5^m$  и состоит из 88 объектов. Из них 68 объекта соответствуют UVX-критерию, 2 объекта UGR-критерию, 2 объекта GRI-критерию и 1 объект RIZ-критерию.

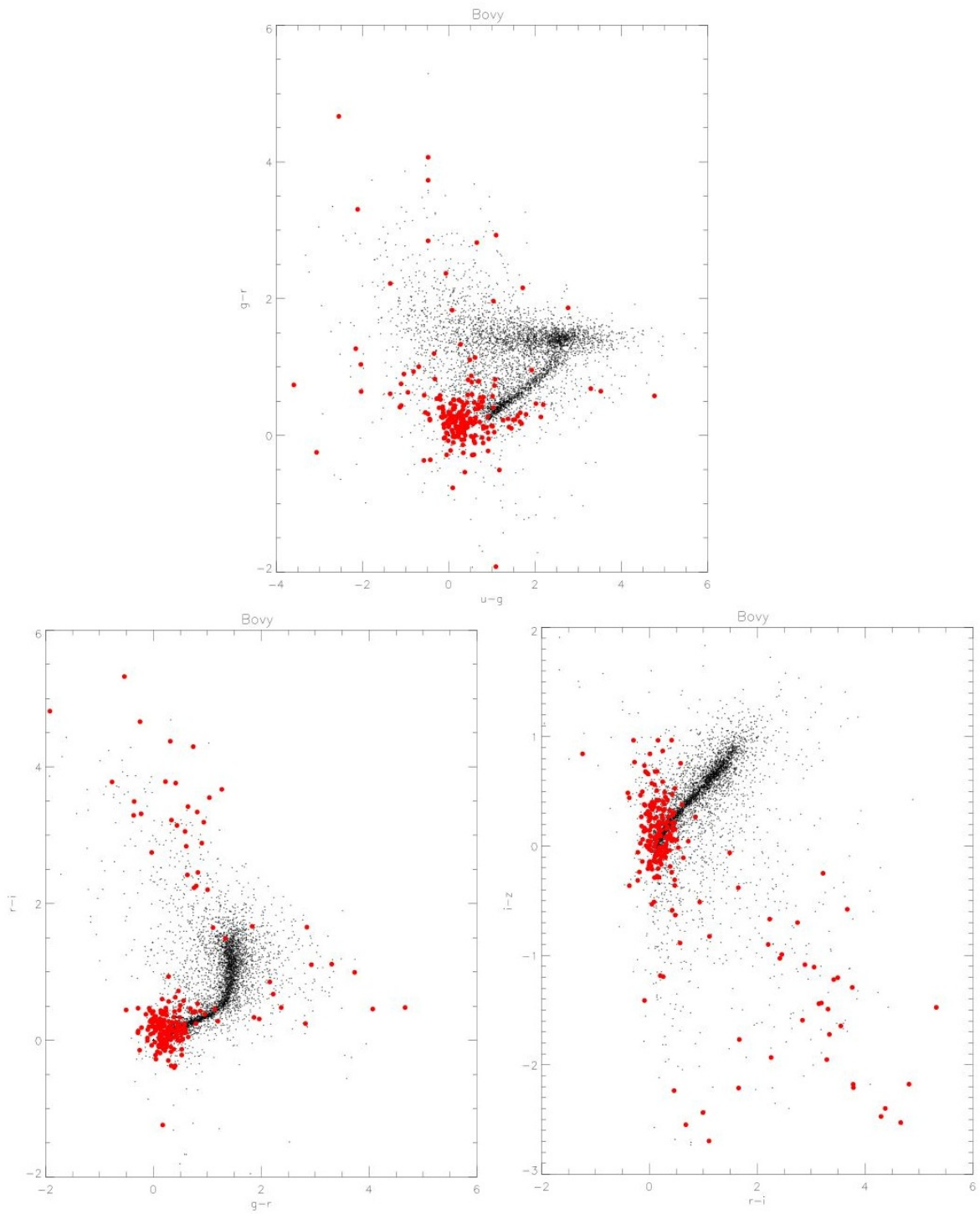


Рис. 11: Цветовые диаграммы  $(u-g - g-r)$ ,  $(g-r - r-i)$ ,  $(r-i - i-z)$  для Bovy 2015. Красными точками обозначены отобранные кандидаты в квазары, черными точками — множество всех остальных звездообразных объектов.

## 4 Отбор кандидатов в квазары по наблюдениям в среднеполосных фильтрах.

### 4.1 Описание алгоритма

Сравнение методик наблюдений и отбора кандидатов в квазары при широкополосной фотометрии (SDSS) и среднеполосной фотометрии мы проведем на примере поля  $09^h40^m + 50^\circ$  размером 0.8 кв. градуса. Для сравнения мы используем выборки объектов этого поля одинаковой глубины ( $i = 21.5^m$ ) из данных SDSS и данных каталога объектов этого поля, исследованного фотометрически в 16 среднеполосных фильтрах ( $FWHM = 200 - 300 \text{ \AA}$ , Рис. 12) на 0.6-м телескопе Шмидта обсерватории Xilong Station (China), и спектрально на 6-м телескопе САО РАН (Додонов, 2012). Всего в каталог фотометрических данных вошло 12590 объектов. Выборка, ограниченная  $i = 21.5^m$ , состоит из 5333 объектов. Для звездобразных объектов полнота выборки в 50% достигается на  $r = 22^m$ . Для классификации объектов и определения фотометрических красных смещений использована методика, разработанная в САО РАН (Додонов, 2016).

Методика классификации объектов и определения фотометрических красных смещений с применением шаблонных распределений энергии достаточно проста и понятна: фотометрические данные сравниваются с синтетической фотометрией, полученной из шаблонных распределений энергии в широком диапазоне красных смещений, и наиболее вероятное значение красного смещения определяется из статистического анализа разницы между наблюдаемыми и модельными данными опорных распределений энергии звезд, галактик и квазаров, что дает возможность определить тип объекта и его красное смещение.

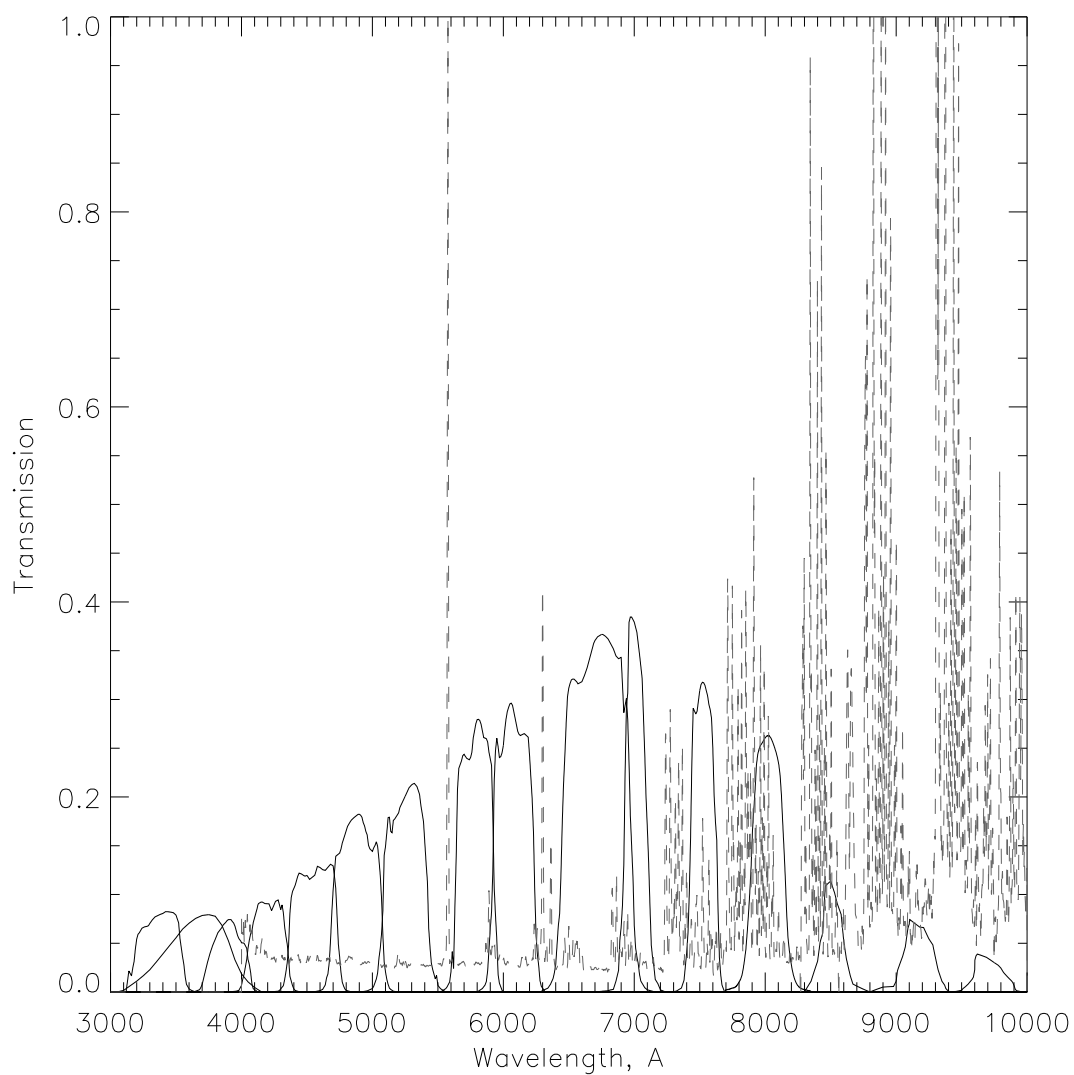


Рис. 12: Набор среднеполосных фильтров, в которых исследовалось поле  $09^h40^m + 50^\circ$  (Додонов, 2012). Спектральная чувствительность детектора и пропускание оптики учтено.

Для анализа SEDs используются:

- Библиотека спектров звезд (Peakles 1998);
- Библиотека спектров галактик (Dodonov & Chilingarin 2003);
- Библиотека спектров квазаров (Ilbert et al. 2006);
- Вероятность того что галактика с наблюдаемой звездной величиной может находиться на определяемом красном смещении  $Z$ ;
- Информация о протяженности объекта.

В результате мы получаем вероятность того, что объект с рассматриваемым SED может быть классифицирован как звезда, галактика или квазар данного спектрального типа и на данном красном смещении.

В результате анализа распределений энергии объектов, полученных по наблюдениям в среднеполосных фильтрах, выделено 194 кандидата в квазары. Более 60 из них подтверждены спектральными наблюдениями на 6-м телескопе. Для сравнения с объектами, отобранными по цветовым критериям Richards, 2002, а также с данными каталогов Richards, 2015 и Vovv, 2015, мы нанесли на цветовые диаграммы отобранные кандидаты в квазары из каталога Додонов, 2016 (Рис. 16).

Применив цветовые критерии Richards, 2002, мы обнаружили, что в выборку вошли 98 объектов, удовлетворяющих UVX-критерию, 2 объекта, удовлетворяющих UGR-критерию, 2 объекта, удовлетворяющих GRI-критерию, и 1 объект, удовлетворяющий RIZ-критерию. Следует отметить, что значительная часть (91 объект) объектов кандидатов в квазары не выделяются цветовыми критериями Richards, 2002 (Рис. 17).



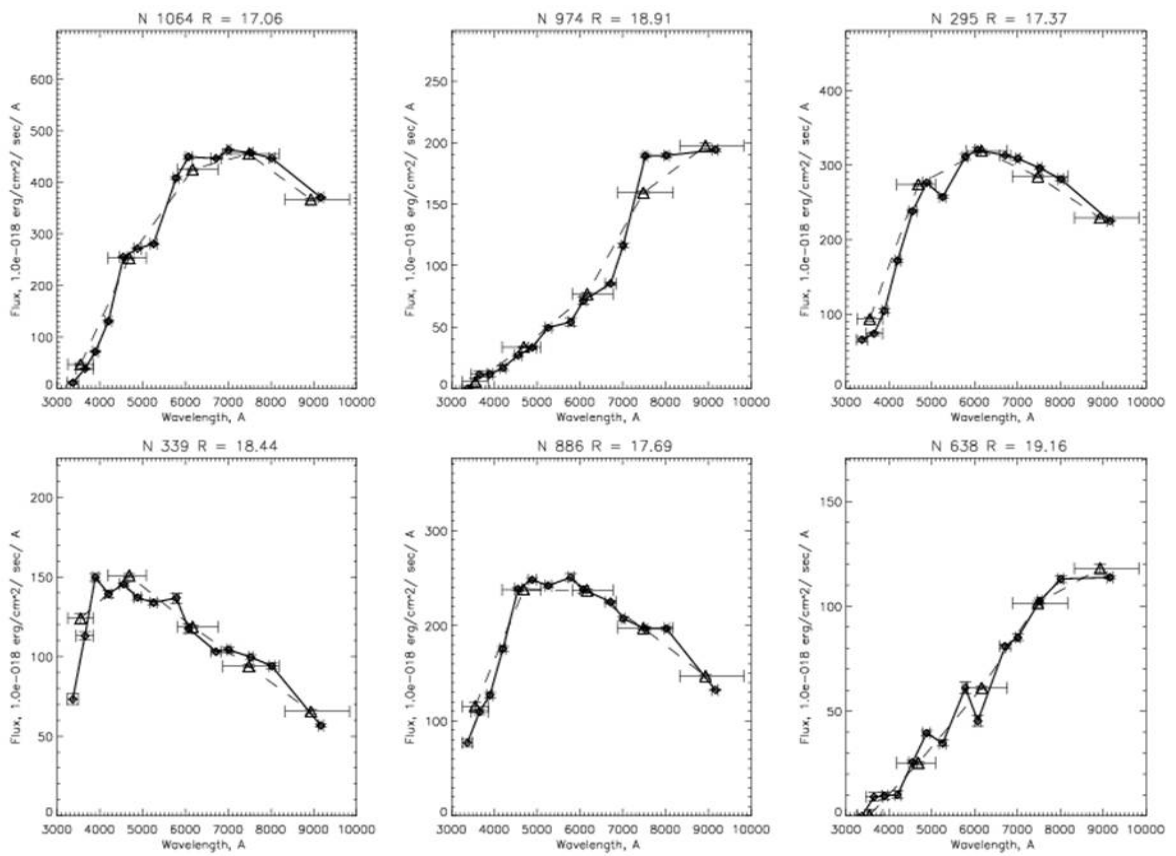


Рис. 13: SED's звезд в поле  $09^h40^m + 50^\circ$ . Пунктиром — SED's звезд по данным SDSS.

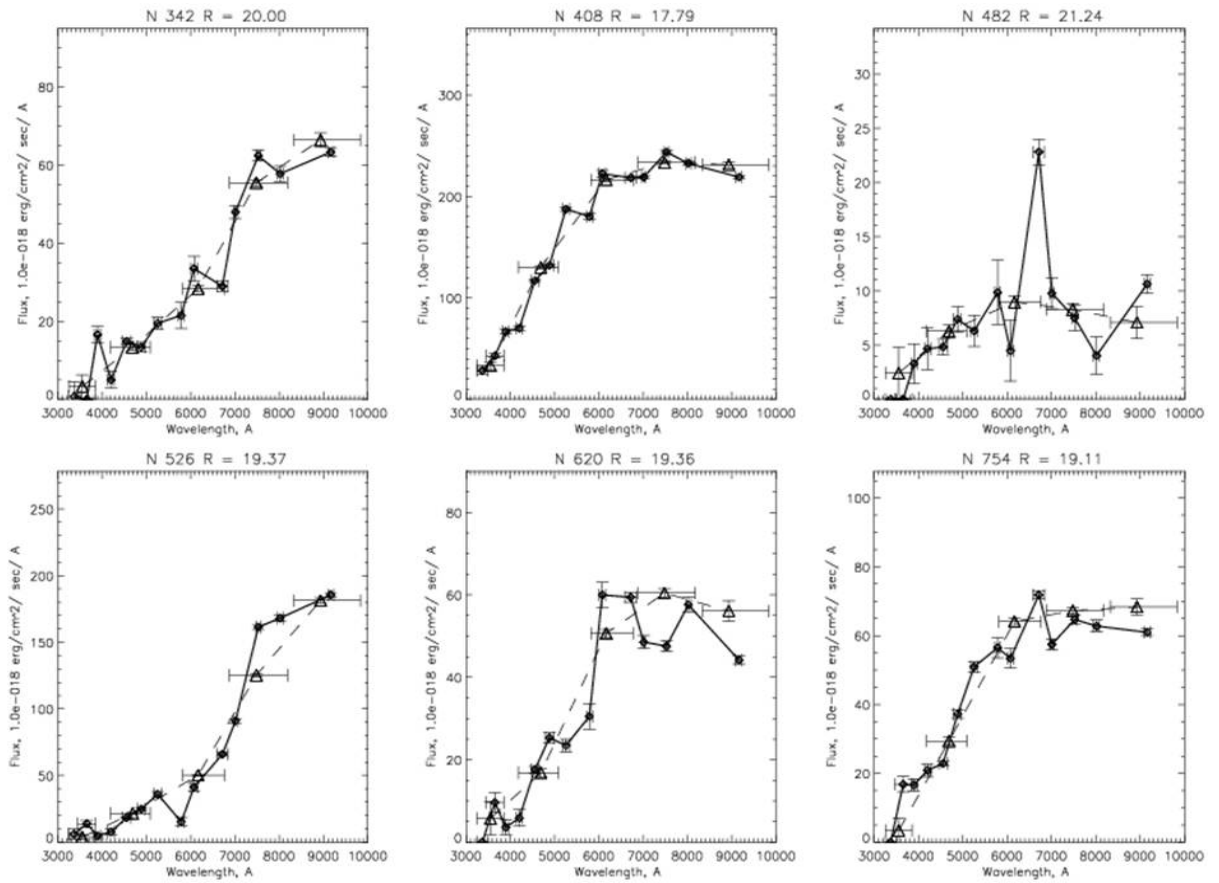


Рис. 14: SED's галактик в поле  $09^h40^m + 50^\circ$ . Пунктиром — SED's галактик по данным SDSS.

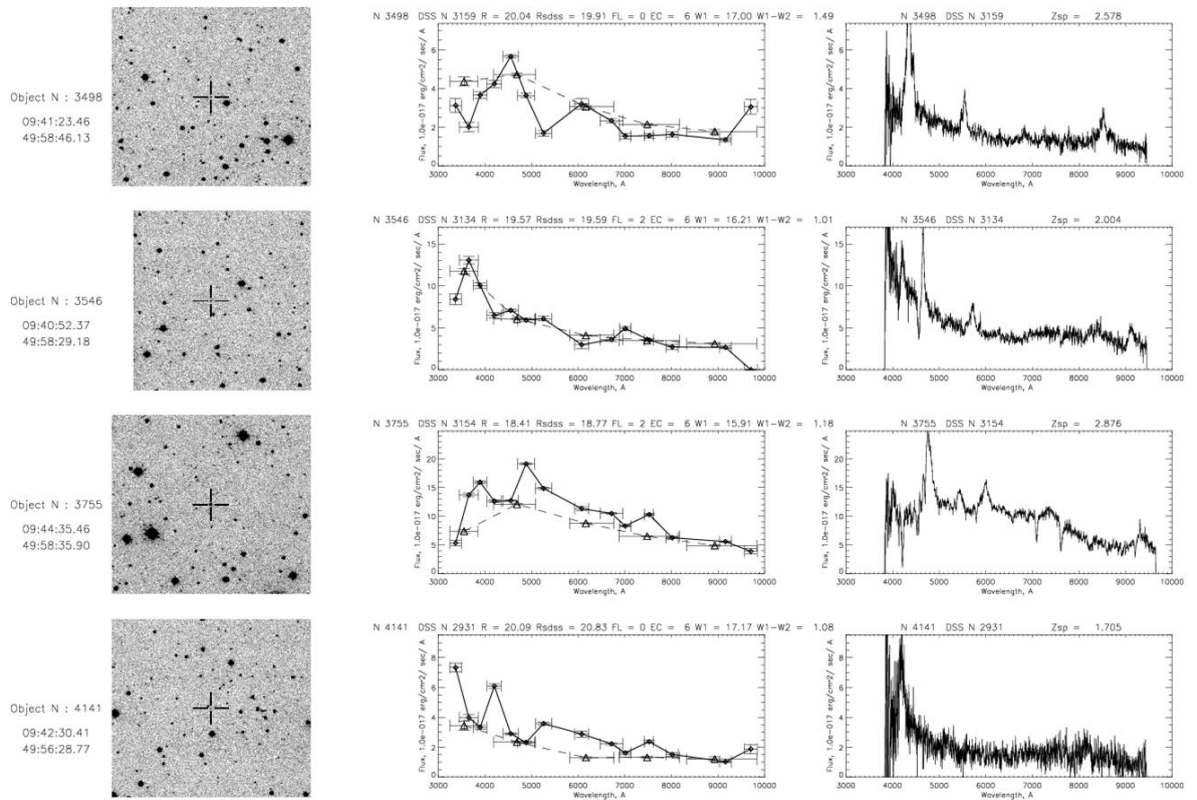


Рис. 15: SED's квазаров в поле  $09^h40^m + 50^\circ$ . Пунктиром — SED's квазаров по данным SDSS.

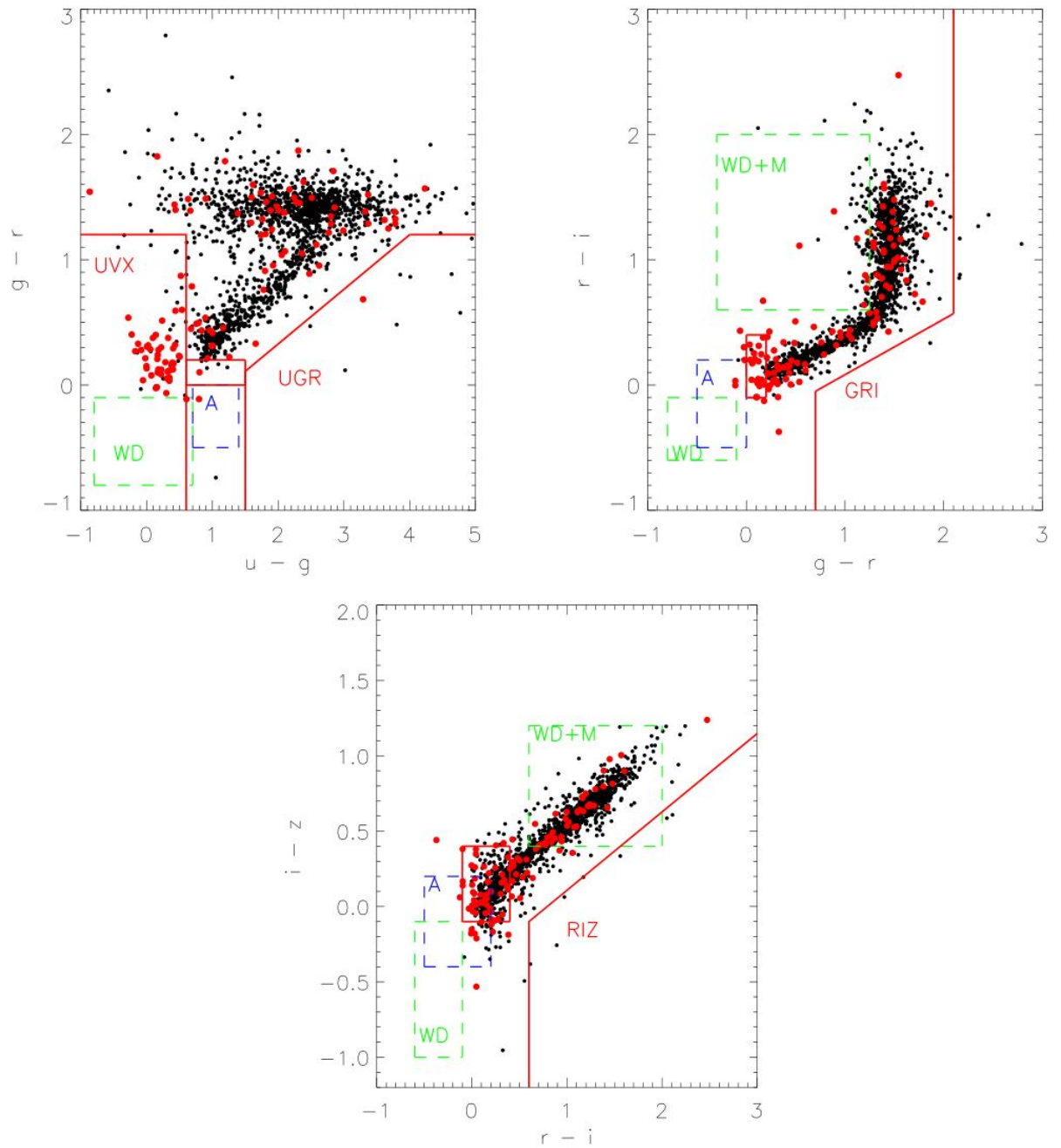


Рис. 16: Цветовые диаграммы для звездообразных объектов поля  $09^h40^m + 50^\circ$ . Красными точками нанесены квазары, обнаруженные в результате анализа распределения энергии объектов, полученных из наблюдений в среднеполосных фильтрах.

## 5 Сравнение различных методов поиска и выделения кандидатов в квазары

Теперь мы имеем возможность сравнить результаты отбора кандидатов в квазары тремя разными способами по широкополосным данным между собой и оценить работу методик отбора с помощью данных, полученных в среднеполосных фильтрах.

- Выборка объектов, построенная на основе цветовых критериев Richards, 2002, засорена звездами, и для выделения кандидатов в квазары необходимо привлекать дополнительные данные: переменность, собственные движения, радио, рентгеновские и ИК-данные. Наибольшие проблемы вызывает выделение кандидатов в квазары с цветовыми характеристиками, неотличимыми от звезд. Наиболее успешно происходит выделение кандидатов в квазары до  $z = 2.2$  с помощью UVX-критерия.
- Выборка объектов, построенная на основе каталога Richards, 2015, в основном состоит из объектов, удовлетворяющих UVX-критерию (40 из 50 объектов, 80%).
- Выборка объектов, построенная на основе каталога Vovv, 2015, почти полностью (за исключением 3 объектов) содержит в себе выборку Richards, 2015, и также в основном состоит из объектов, удовлетворяющих UVX-критерию, (68 из 88 объектов, 78%).
- В обеих работах декларируется, что они направлены на то, чтобы улучшить отбор объектов в диапазоне красных смещений  $z > 2.2$ , и для этого привлекаются ИК-данные обсерваторий SPITZER и WISE. Однако из 133 объектов, удовлетворяющих критерию отбора AGN, сформулированного Stern, 2012, в выборки Richards 2015 и Vovv 2015 попадают

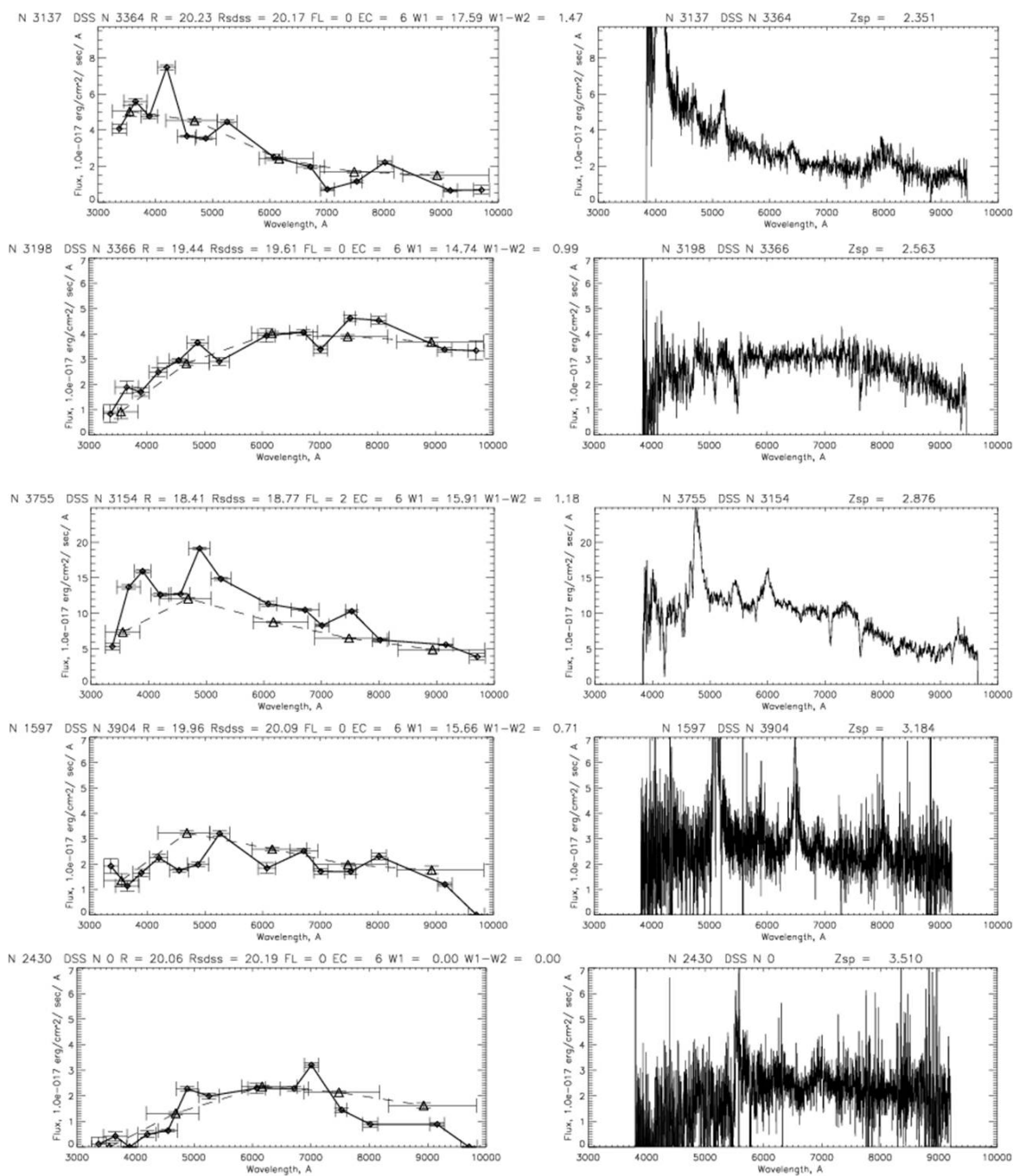


Рис. 17: Примеры SEDs и спектров квазаров, не выделяемых по цветовым критериям Richards et al., 2002.

7 и 12 объектов соответственно (5% и 9% от общего числа объектов с  $[3.4] - [4.6] > 0.7$ . В квадратных скобках указаны длины волн в микронах, соответствующие инфракрасным фильтрам).

- В выборку объектов кандидатов в квазары, созданную на основе наблюдений в среднеполосных фильтрах, вошли 98 объектов, удовлетворяющих критерию UVX (5 объектов были классифицированы как звезды), из них 48 объектов имеют  $[3.4] - [4.6] > 0.7$ . Также в выборку вошли 85 объектов с  $[3.4] - [4.6] > 0.7$ , в основном это объекты с  $z > 2.2$ .

Таким образом, несмотря на значительные усилия в разработке алгоритмов выделения кандидатов в квазары, по данным наблюдений в широкополосных фильтрах решить эту задачу в полном объеме пока не удалось, выделение объектов с  $z > 2.2$  со статистически значимой полнотой пока не достигнуто. Применение в наблюдениях среднеполосных фильтров, несмотря на очевидные издержки наблюдательного времени, позволяют решить задачу выделения квазаров с  $z > 2.2$  достаточно уверенно, и полнота выборки будет определяться глубиной обзора (так, при пределе  $AB = 23^m$ , можно обнаружить все AGN с  $M_B = -23$  до  $z = 3.2$ ).

## 6 Выводы

В данной работе впервые проведено сравнение методов отбора кандидатов в квазары с помощью широкополосной фотометрии и среднеполосной фотометрии. Спектроскопические подтверждения природы отобранных объектов позволяют судить о качестве получающейся выборки непосредственно. Сделанные оценки полноты выборки квазаров, полученной методами широкополосной фотометрии SDSS, показывают, что она не превышает 25% для  $z > 2.2$ . Таким образом, построенные по данным выборкам кривые пространственной плотности AGN, также как и функции светимости, сильно искажены селекционными эффектами. Несмотря на то, что в данной работе использовалась небольшая выборка объектов, она дает хорошую общую картину.

## 7 Заключение

Традиционная техника определения фотометрических красных смещений, хорошо зарекомендовавшая себя при определении красных смещений галактик, в общем виде плохо применима к квазарам. Это не связано с тем, что распределение энергии в спектрах квазаров близко к степенному. В отличие от галактик, цвета квазаров не образуют плавную поверхность в цветовом пространстве, и конкретный цветовой избыток не соответствует единственному красному смещению. К популяции AGN относят разные типы объектов (BAL QSOs, BL Lacs и т.д.), однако четкого разделения на спектральные типы пока не существует. Кроме того, звездная величина квазаров менее информативна, чем у галактик. Для галактик красное смещение, в общем, коррелирует со звездной величиной: более далекие галактики слабее близких. В целом, более далекие квазары слабее близких, но динамический диапазон светимости квазаров настолько широк, что связь



между красным смещением и звездной величиной квазара замывается. Всё это объясняет трудности, возникающие на пути создания представительных, статистически значимых выборок квазаров, необходимых для изучения эволюции AGN. Анализ таких выборок позволит провести измерения пространственной плотности AGN на разных космологических расстояниях, построить функцию светимости AGN, сделать оценки их космологической эволюции, а также оценки пространственного распределения материи во Вселенной.

## Список литературы

- [1] Boyle, B. J., Fong, R., Shanks, T. and Peterson, B. A. 1990, M.N.R.A.S., 243, 1.
- [2] Drinkwater, MJ, 1988, Objective Prism Measurements of Quasar Redshifts. M.N.R.A.S., 231 2: 391-396.
- [3] Baum, W. A., Problems of Extra-Galactic Research, Proceedings from IAU Symposium no. 15, New York, 1962, p. 390.
- [4] Loh, E. D., Spillar, E. J., ApJ, Part 1, vol. 303, April 1, 1986, p. 154-161
- [5] Koo, D. C., AJ, vol. 90, March 1985, p. 418-440.
- [6] Connolly, A.J., Csabai, I., Szalay, A.S., Koo, D.C., Kroon, R.C., Munn, J.A., 1995, AJ, 110, 2655
- [7] Lanzetta, K. M., Yahil, A., & Fernández-Soto, A. 1996, Nature, 381, 759
- [8] Connolly, A. J., Szalay, A. S., Dickinson, M., Subbarao, M. U., & Brunner, R. J. 1997, ApJ, 486, L11
- [9] Fernández-Soto, A., Lanzetta, K. M., & Yahil, A. 1999, ApJ, 513, 34
- [10] Markarian, Benjamin E. (1969). "Galaxies with ultraviolet continuum. I". *Astrofizika* 5: 443
- [11] Crampton, D., Cowley, A.P., and Hartwick, F.D.A. 1989, Ap. J., 345, 59
- [12] Walker, G., 1987. *Astronomical Observation*, Cambridge University Press.
- [13] Hickson P., Gibson B.K., Callaghan A.S., 1994, MNRAS, 267,911-917.
- [14] Chen J.-S., 1994,IAUS 161, 17

- [15] Ellis, R.S., Parry, I.R. 1988. In *Instrumentation for Ground Based Optical Astronomy*, ed. L Robinson, p. 192. New York: Springer
- [16] Pickles, A.J., 1998, *PASP*, 110, 863
- [17] Ilbert, O.; Arnouts, S.; McCracken, H. J.; Bolzonella, M.; Bertin, E et al., 2006, *A&A*, 457, 841
- [18] Stern, D. A., Assef, R. J., Benford, D. J., et al. 2012, *ApJ*, 753, 30
- [19] Assef, R. J., Stern, D., Kochanek, C. S., et al. 2013, *ApJ*, 772, 26
- [20] Haro, G., and Luyten, W.J. 1962. *Bol. Obs. Tonantsintla y Tocubaya*, 3 (No. 22), 37.
- [21] Koo, D.C., & Kron, R.G.: 1982, *A. GA.* 105, pp. 107-119.
- [22] Sandage, A. 1962, *Ap.J.*, 146, p.13.
- [23] Smith, M.G. 1957, *Ap. J.*, vol. 202, Dec. 15, 1975, pt. 1, p. 591-595.
- [24] Hoag, A. A. 1976, *Astronomical Society of the Pacific, Publications*, vol. 88, Dec. 1976-Jan. 1977, p. 860-864.
- [25] Shanks, T.; Fong, R.; Boyle, B. J. 1983, *Nature* (ISSN 0028-0836), vol. 303, May 12, 1983, p. 156-158.
- [26] Hartwick, F. D. A.; Schade, D., 1990, IN: *Annual review of astronomy and astrophysics*. Vol. 28 (A91-28201 10-90). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., 1990, p. 437-489.
- [27] Richards, Gordon T., et al. 2015, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 219, Issue 2, article id. 39, 21 pp. (2015).
- [28] Richards, Gordon T., et al. 2002, *The Astronomical Journal*, Volume 123, Issue 6, pp. 2945-2975.

- [29] DiPompeo, M. A.; Bovy, J.; Myers, A. D.; Lang, D., 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 452, Issue 3, p.3124-3138.
- [30] Ellis, R. S.; Parry, I. R., 1988, Instrumentation for Ground-Based Optical Astronomy, Present and Future. The Ninth Santa Cruz Summer Workshop in Astronomy and Astrophysics, July 13- 24, 1987, Lick Observatory. Editor, L.B. Robinson; Publisher, Springer-Verlag, New York, NY, 1988. LC # QB856 .S26 1987. ISBN # 0-387-96730-3. P.192, 1988.
- [31] Mushotzky, R., 2004, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2004, p.53.
- [32] Kristian, J.; Sandage, A.; Katem, B., 1974, Astrophysical Journal, Vol. 191, p. 43 - 50.
- [33] White, R.L., et al. 2000, ApJS, 126, 133.
- [34] Condon, J. J.; Anderson, E.; Broderick, J. J., 1995, Astronomical Journal v.109, p.2318.
- [35] Griffiths, R. E.; Schwartz, D. A.; Schwarz, J.; Doxsey, R. E.; Johnston, M. D.; Blades, J. C., 1979, Astrophysical Journal, Part 2 - Letters to the Editor, vol. 230, May 15, 1979, p. L21-L25.
- [36] Grazian, A.; Cristiani, S.; D'Odorico, V.; Omizzolo, A.; Pizzella, A., 2000, The Astronomical Journal, Volume 119, Issue 6, pp. 2540-2555.
- [37] Palunas, P., et al. 2000, The Astrophysical Journal, Volume 541, Issue 1, pp. 61-65.
- [38] Colbert, E. J. M.; Ptak, A. F., 2002, The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 143, Issue 1, pp. 25-45.
- [39] Cutri, Roc M.; Nelson, B. O.; Francis, P. J.; Smith, P. S., 2002, AGN Surveys, Proceedings of IAU Colloquium 184, ASP Conference Proceedings,

Vol. 284, held 18-22 June, 2001 in Byurakan, Armenia. Edited by R.F. Green, E.Ye. Khachikian, and D.B. Sanders. San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2002, p. 127.

[40] Andreani, Paola; Spinoglio, Luigi; Malkan, Matthew A., 2003, *The Astrophysical Journal*, Volume 597, Issue 2, pp. 759-767.

[41] Fan, X. 1999, *AJ*, 121, 31

[42] Hoag, A. and Schroeder, D. (1970). *Publ.Astron.Soc. Pac.*, 82: 1141.

[43] Sandage, A., and Luyten, W.J.1967, *Ap.J.*, 148, 767.

[44] Додонов С.Н., 2016, *Astr.Bull*, in press

[45] Додонов С.Н., 2016, *Astr.Bull*, in preparation