1. Об учете эффектов селекции при поиске квазаров методом многоцветной фотометрии.

1.1. Введение.

Поиск и исследование далеких объектов представляет собой важнейшую область современной наблюдательной астрофизики. Исследование далеких объектов позволяет уточнить современные космологические модели, сделать выводы о временных рамках различных процессов формирования современной картины Вселенной, в частности, процессов первичного звездообразования, формирования галактик.

Одной из основных задач в этой области является классификация объектов и определение расстояния до них. На расстояниях, соответствующих красному смещению 1 и больше видимые размеры галактик уходят под предел измерения для наземных методов и классификация, основанная на морфологических особенностях становится невозможной. Единственным методом надежного определения принадлежности объекта к данному типу является спектроскопия, которая зачастую встречает непреодолимые трудности, связанные со слабой яркостью данных объектов. Для получения спектра объекта 23 звездной величины со средним спектральным разрешением и отношением сигнал-шум порядка 5 в континууме на 6-метровом телескопе требуется более 4 часов накопления в прямом фокусе при использовании мультиобъектного или мультизрачкового волоконных спектрографов. Здесь мы сталкиваемся с проблемой наблюдательного времени. Следует принять во внимание то, что в поле размером порядка одного квадратного градуса содержатся десятки тысяч объектов до 23 звездной величины. Для повышения эффективности наблюдений необходимо произвести предварительный отбор кандидатов, к примеру, в далекие квазары, которые затем наблюдать спектроскипическими методами.

Для произведения отбора очень выгодно использовать прямые снимки поля, полученные в различных светофильтрах, то есть многоцветную фотометрию. При этом, во-первых, сильно уменьшаются затраты наблюдательного времени - для прямых снимков экспозиция может быть намного меньше, чем в случае спектроскопии, во-вторых, на одном кадре видны сразу несколько тысяч объектов, что опять же дает выигрыш в наблюдательном времени.

Одной из наиболее важных деталей метода многоцветной фотометрии является правильный подбор фильтров. Довольно часто, как видно из современных публикаций, наблюдатели используют те фильтры, которые у них есть, хотя для получения максимума информации необходимо для конкретной программы создавать свой конкретный набор фильтров.

После получения фотометрических данных по объектам есть два принципиально различных пути выделения интересующих объектов.

Первый метод - метод 2N-мерного анализа цветовых характеристик объектов (N - число фильтров). Для этого строят пространство показателей цвета и находят области связности в многомерном пространстве. При этом утверждается, что объекты разной природы - звезды, галактики, квазары и т.д. образуют в этом многомерном пространстве различные облати связности, причем область связности для звезд не пересекается с областью связности для квазаров и т.д. Для реализации этого метода необходимы значительные даже при современном уровне развития техники вычислительные мощности.

Второй метод - стандартный метод минимизации критерия χ^2. При этом берется некий набор спектров, которые предположительно могут иметь исследуемые объекты и производится интерирование этих спектров с кривыми пропускания светофильтров. После этого производится расчет величины χ^2 и критерия значимости. После этого находится минимум χ^2 или максимум критерия значимости. В дальнейшем, исходя из этого, делается вывод о принадлежности объекта к данному типу и определение красного смещения для внегалактических объектов. Этот метод использовался автором.

Основной целью данной работы являлось исследование эффектов селекции, возникающих при фотометрическом отождествлении квазаров в различных наборах светофильтров. Иследовался набор широкополосных фильтров - стандартная UBVRI система и два набора средне- и узкополосных фильтров - фильтры BATC и SAO. Также предпринимались попытки рассмотрения системы фильтров SAO с добавлением широких фильтров BVRI.

1.2. Математические и статистические основы метода.

В качестве входных данных мы имеем значения потоков от объекта в N фильтрах, их ошибки, template-спектр и кривые пропускания используемых светофильтров. Обозначим наблюдаемые потоки как F_i, их ошибки как ΔF_i, кривые пропускания фильтров как $D_i(\lambda)$, распределение энергии в template-спектре как $S(\lambda)$, модельные потоки как T_i. Предполагается, что наблюдаемые потоки исправлены за спектральную чувствительность приемника.

Тогда

$$T_i = \int_0 S(\lambda) D_i(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

Критерий χ^2 вычисляется следующим образом:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\alpha T_i - F_i)^2}{\Delta F_i^2} \tag{2}$$

Где нормировочный множитель α можно вычислить исходя из соображений о минимуме χ^2, при фиксированных значениях потоков, продифференцировав выражение для χ^2 по α и приравняв значение производной 0, откуда получаем:

$$\alpha = \sum_{i=1}^{N} \frac{\frac{T_i F_i}{\Delta F_i^2}}{\frac{T_i^2}{\Delta F_i^2}} \tag{3}$$

Вычислив значение χ^2 легко вычислить критерий значимости:

$$P(\chi^2) = \frac{\int_{\chi^2} e^{-t} t^{\frac{N}{2}-1} dt}{\int_0 e^{-t} t^{\frac{N}{2}-1} dt} \tag{4}$$

В нашем случае в качестве template-спектра использовался композитный спектр квазара (Francis et al., 1991), к которому была пристыкована красная область (после 6000Å) спектра близкой Сейфертовской галактики 1-го типа NGC 5548, и библиотека спектров звезд (Pickles). Также была создана библиотека спектров галактик по типам и возрастам, но в данной работе она не рассматривается. Так как основной задачей при поиске далеких квазаров наряду с выделением кандидатов является фотометрическое определение красного смещения z, на первом этапе расчета формировалась библиотека модельных значений потоков, при этом спектр квазара сдвигался по z от 0 до 7.5 с шагом 0.02, вводился эффект Ly-forest согласно работе Madau, покраснение, связанное с поглощением в самом объекте не вводилось.

На втором этапе формировались потоки для модельных квазаров, для заданной предельной звездной величины в фильтре V и отношения сигнал-шум для нее. При этом при расчете отношения сигнал-шум размер изображения принимался равным 2", значение яркости фона неба - 22^m с квадратной секунды. Отсюда получаем:

$$B(m) = B_0 \sqrt{\frac{1 + 10^{0.4(m_{\lim} - m_{sky})}}{1 + 10^{0.4(m - m_{sky})}}}, \tag{5}$$

где m_{sky} - фон неба с площадки, эквивалентной размеру изображения, $m_{\lim}$ - предельная звездная величина, которой соответствует отношение сигнал-шум B_0. После этого значения потоков зашумлялись для моделирования данных с соответствующим отношением сигнал-шум путем добавления к значениям случайного числа с дисперсией T_i/B^2 и нулевым средним значением. При этом выбирался шаг по звездной величине 1 и формировалось 6 списков объектов для каждой звездной величины с соответствующим отношением сигнал-шум в количестве, указываемом в работе Додонова и для каждого значения z с заданным шагом. Распределение по z выбиралось равномерным, чтобы выявить эффекты секлекции. В результате для каждого значения z было сформировано около 900 тест-объектов.

На третьем этапе производился сам расчет χ^2 при использовании модельных потоков от квазаров и определение фотометрического красного смещения для каждого объекта. В качестве результата бралось значение z, при котором достигался минимум χ^2. Далее вычислялись две зависимости - эффективность селекции от "реального" красного смещения и вычисленного красного смещения от реального красного смещения. Для оценки качества фотометрического определения красного смещения вычислялись те же самые зависимости, но для объектов, у которых модельное красное смещение отличалось от определенного не более чем на 0.1.

На последнем этапе производилась аналогичная процедура, но использовались модельные потоки от звезд.для выяснения вероятности принять квазар за звезду.

При построении вышеупомянутых зависимостей принимались значения критерия значимости 0.67 и 0.99.

В данной работе под эффективностью селекции понимается отношение $\frac{N_{confirm}}{N_{total}}$, где $N_{confirm}$ - число объектов, отождествленных как квазары (звезды во втором случае) из выборки N_{total} квазаров с заданным критерием значимости.

Для выполнения вышеописанных действий был написан программный пакет на языке IDL, который обрабатывал 100 объектов за 6 секунд в 15 фильтрах в диапазоне по z от 0 до 7.5 с шагом 0.02.

1.3. Система широкополосных фильтров UBVRI

Система UBVRI состоит из 5 широких фильтров, кривые пропускания соответствуют Джонсоновкому стандарту (рис. 1).

Основной целью исследования данной системы фильтров было изучение работы алгоритмов, их оптимизация и сравнение результатов с результатами других научных групп, занимавшихся подобными исследованиями. При работе с системой UB-

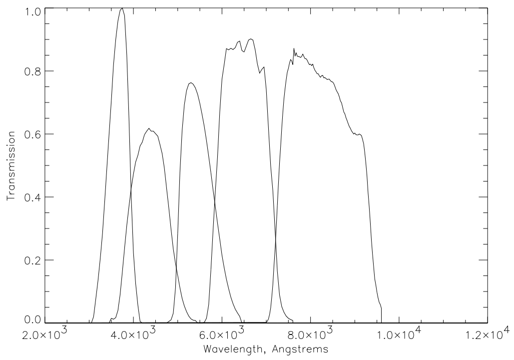

Рис. 1: *Кривые пропускания фильтров системы UBVRI*

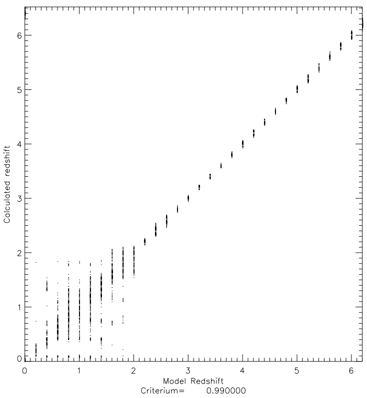

Рис. 2: *Зависимость модельное - вычисленное красное смещение для системы фильтров UBVRI*

VRI использовались модельные выборки квазаров до 23 звездной величины, начиная с отношения сигнал-шум 5. При этом шаг по z был выбран равным 0.2. Общее число объектов в выборке составляло около 32000.

Эффективность селекции довольно по критерию значимости 0.99 довольно близка к 1 и составляет виличину порядка 0.95, то есть практически все объекты в выборке отождествляются как квазары, но обращает внимание очень плохое качество определения z в диапазоне от 0 до 2 (рис. 2). По-видимому это вызвано большой шириной фильтров, из-за чего эмиссионные детали в спектре не дают дополнительной информации. На z=2 в фильтр U попадает линия Ly-α, имеющая достаточную интенсивность и ширину, чтобы внести значительный вклад в поток в сравнительно узком U-фильтре. После z=2.5 в оптический диапазон попадает Лаймановский скачок, что позволяет довольно неплохо определять z даже с помощью 5 широких фильтров.

Что касается вероятности принять квазар за звезду, то ситуация на z=0..2 довольно неплохая, она начинает сильно портиться после z=2.2,

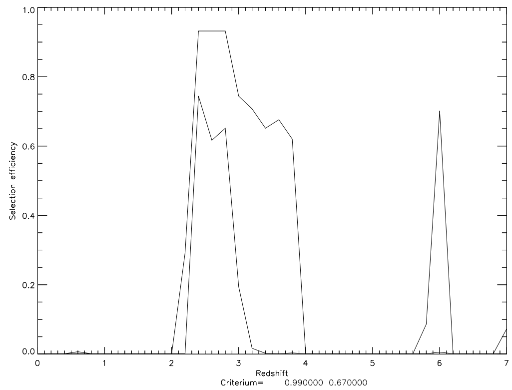

Рис. 3: *Зависимость вероятности принятия квазара за звезду от красного смещения для системы фильтров UBVRI для значений критерия значимости 0.67 (верхняя кривая) и 0.99*

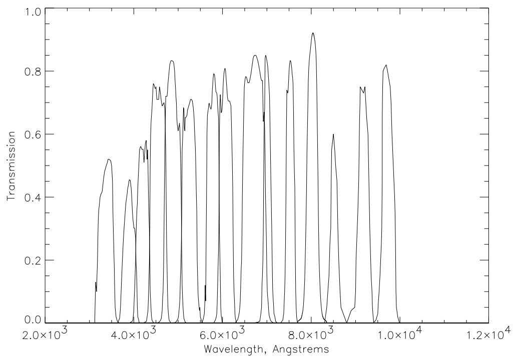

Рис. 4: *Кривые пропускания фильтров системы BATC*

так как потоки от квазара становятся очень похожими на потоки от звезды спектрального класса A. При дальнейшем увеличении z спектральный класс плавно изменяется до K0, для z=4. После этого вероятность путаницы падает до 0 и появляется небольшой пик около z=6, вызванный холодными красными звездами.

1.4. Система среднеполосных фильтров BATC

Система среднеполосных фильтров BATC, используемая китайской группой наблюдателей (Chen et al.), представляет собой отличный пример системы светофильтров, построенной специально для выполнения конкретной задачи.- поиска квазаров. Система состоит из 15 фильтров с пропусканием до 92% в максимуме и полуширинами от 110Å до 420Å с центральными длинами волн от 3370Å до 9720Å. (Рис. 4.)

В настоящее время имеются изображения области неба размером $1^\circ\times1^\circ$, полученные в этих 15 светофильтрах на 60-см камере Шмидта. На каж-

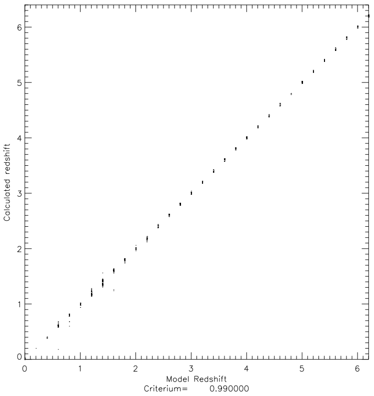

Рис. 5: *Зависимость модельное - вычисленное красное смещение для системы фильтров BATC*

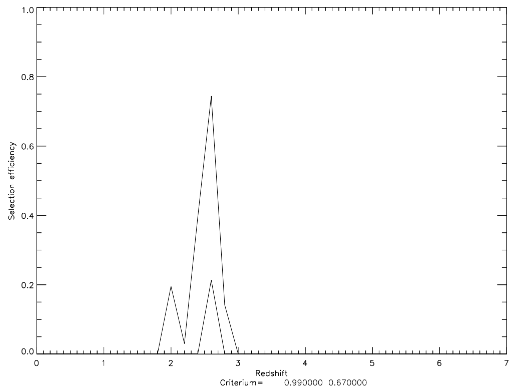

Рис. 6: *Зависимость вероятности принятия квазара за звезду от красного смещения для системы фильтров BATC для значений критерия значимости 0.67 (верхняя кривая) и 0.99*

дом изображении размером 2048×2048 пикселов видны около 8000 объектов до звездной величины 21.5, соответствующей отношению сигнал-шум 5. Первоначально программный пакет для SED-фиттинга создавался именно для поиска квазаров по этим наблюдательным данным. Выборки объектов имели те же параметры, что и в случае системы фильтров UBVRI.

Большое число фильтров, их сравнительно маленькая ширина и практически полное отсутствие "окон" позволяет определять красное смещение с высокой точностью, а широкий диапазон по длинам волн, уходящий далеко в синюю сторону, перекрываемый данной системой фильтров позволяет значительно снизить вероятность ложного отождествления объекта.

Эффективность селекции по критерию значимости 0.99 равна 1 на всем диапазоне значений z.

Небольшие проблемы с определением красного смещения возникают только при малых значениях z, когда обе наиболее яркие детали в спектрах квазаров - линия водорода H-α ($\lambda = 6563$Å) и дублет [OIII]($\lambda = 4959$Å, 5007Å)+H-β ($\lambda = 4861$Å) попадают между фильтрами (в "окна"). Тогда возможно неправильное определение z (Рис. 5).

Ложное отождествление или вероятность принятия квазара за звезду практически равна нулю на всем диапазоне z, кроме небольшого участка от z=2 до z=3 (Рис. 6). Там возникает ложное отождествление со звездами класса F, вызванное смазыванием эмиссионных деталей, попадающих в фильтры при малом отношении сигнал-шум (от 5 до 10).

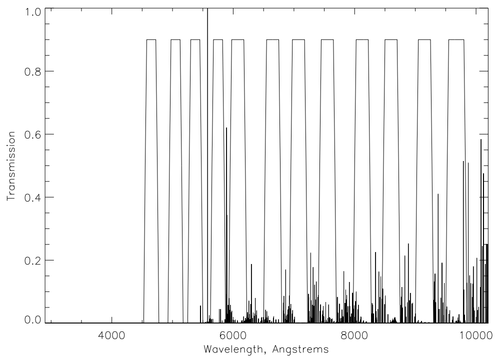

Рис. 7: *Кривые пропускания фильтров первоначального варианта системы SAO, наложенные на высокодисперсионный спектр ночного неба.*

1.5. Система среднеполосных фильтров SAO

Система вреднеполосных фильтров САО была разработана С. Н. Додоновым специально для программы по поиску далеких квазаров на 6-метровом телескопе САО РАН и 2.6-метровом телескопе Бюраканской Астрофизической Обсерватории. Первоначально система включала 12 светофильтров с пропусканием 90% в максимуме и полуширинами от 180Å до 270Å с центральными длинами волн от 4650Å до 9670Å с близкими к идеальным кривыми пропускания. Фильтры расставлялись по диапазону длин волн так, чтобы по возможности избежать ярких эмиссионных линий ночного неба, особенно в красной области спектра (Рис. 7).

Отсутствие фильтров в синей области (длина волны короче 4500Å) обусловлена кривой чувствительности ПЗС-матрицы, которую планируется использовать для данной задачи, а именно пониженной чувствительностью в синем участке спектра. Отсутствие фильтров в коротковолновой области не позволяет выявлять квазары на малых z, об этом пойдет речь ниже.

За счет очень удачного расположения фильтров полностью отсутствуют диапазоны по z, в ко-

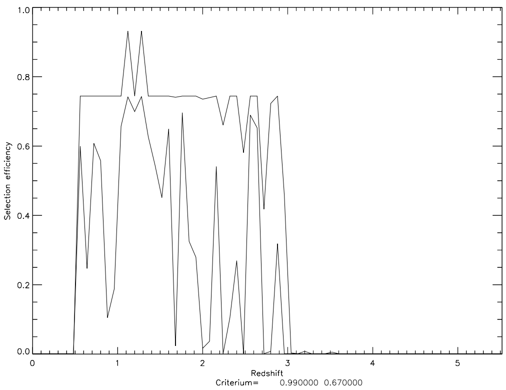

Рис. 8: *Зависимость вероятности принятия квазара за звезду от красного смещения для первоначального варианта системы фильтров SAO для значений критерия значимости 0.67 (верхняя кривая) и 0.99*

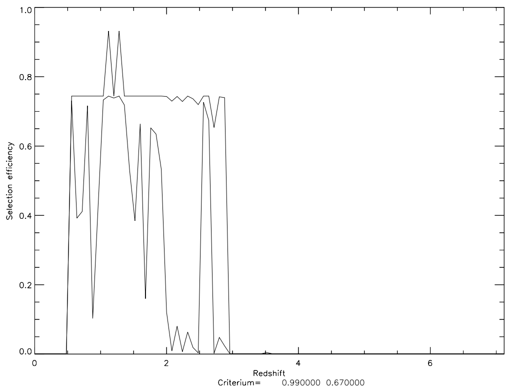

Рис. 10: *Зависимость вероятности принятия квазара за звезду от красного смещения для окончательного варианта системы фильтров SAO для значений критерия значимости 0.67 (верхняя кривая) и 0.99*

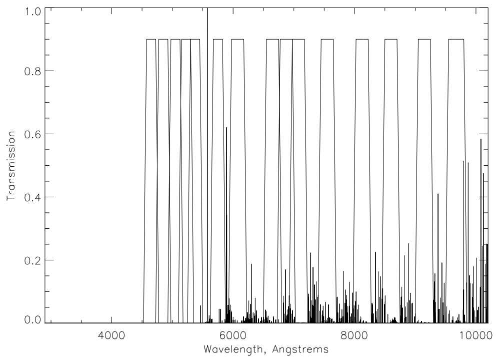

Рис. 9: *Кривые пропускания фильтров окончательного варианта системы SAO, наложенные на высокодисперсионный спектр ночного неба.*

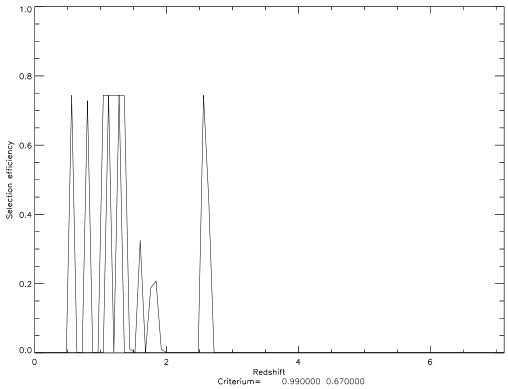

Рис. 11: *Зависимость вероятности принятия квазара за звезду от красного смещения для окончательного варианта системы фильтров SAO для значений критерия значимости 0.67 (верхняя кривая) и 0.99 для минимального отношения сигнал-шум 10.*

торых все эмисионные детали оказываются в провалах между фильтрами, за счет этого точность определения z довольно высокая на всем диапазоне от 0 до 7.5 и ошибки не превышают 0.1 практически ни на одном участке.

С целью более детального исследования данной системы фильтров шаг по z был уменьшен с 0.2 до 0.08. Таким образом число тест-объектов в списке возросло до 81000.

Из-за отсутствия фильтров в синей части спектра вероятность ложного отождествления велика при $0 < z < 3$ (Рис. 8), для уменьшения которой в диапазоне $2 < z < 3$ было добавлено еще 3 фильтра (Рис. 9). Результаты улучшились (Рис. 10)

При $0 < z < 2$ ситуация с ложным отождествлением остается непреодолимой в связи с очень похожими распределениями энергии в спектрах квазаров и спектраз звезд ранних и средних спектральных классов (O, B, A, F, G). Однако при переходе с минимального отношения сигнал-шум 5 на 10 ситуация резко улучшается (Рис. 11). Это связано с наличием эмиссионных деталей в спектрах квазаров и абсорбционных в спектрах звезд, которые замываются при малых отношениях сигнал шум. Этот результат является главным выводом данной работы. Переход на отношение сигнал-шум 10 необходим для точных измерений красного смещения, при меньших отношениях сигнал-шум увеличение количества фильтров и уменьшение их ширины до разумных пределов не дает никакой дополнительной информации.