

# Методика поиска галактик с активными ядрами

Котов С.С.<sup>1,2</sup>, Додонов С.Н.<sup>1,2</sup>

1. Институт прикладной астрономии РАН  
2. Специальная астрофизическая обсерватория РАН

Cosmic Evolution Survey (COSMOS)(Weaver et al. 2021; <https://cosmos.astro.caltech.edu/>) — это астрономический обзор, предназначенный для изучения формирования и эволюции галактик в зависимости как от космического времени (красное смещение), так и от локального окружения галактики. Исследование охватывает экваториальное поле площадью 2 квадратных градуса с оптической фотометрией, спектроскопией, рентгеновскими и радиоданными, полученными на крупнейших наземных и космических телескопах. В оптическом диапазоне были сняты широкополосные фотометрические данные в фильтрах SDSS глубиной до 27 звездной величины, в ближнем ИК-диапазоне (фильтры J, H, K) до 26 величины, в среднем инфракрасном диапазоне (фильтры Chanel-1 и Chanel-2 телескопа Spitzer) до 25.5 величины. Телескоп Chandra обнаружил в поле 4016 рентгеновских источников, для 97% из них отождествлены компоненты в оптике или ИК. В поле получено 20689 оптических спектров галактик. Также поле снято на телескопе Хаббла в фильтре F814W до глубины 27.2m с угловым разрешением порядка 0.1 угловой секунды, что предоставляет уникальные данные о морфологии галактик. Полученные наблюдательные данные находятся в открытом доступе.

Мы решили использовать эти данные для изучения возможностей отбора галактик с активными ядрами по данным широкополосной оптической и инфракрасной фотометрии. Для этого рассматривались данные об оптической, инфракрасной и ультрафиолетовой широкополосной фотометрии, среднеполосной оптической фотометрии, данные о наличии рентгеновского источника, морфологические данные с телескопа имени Хаббла, а также спектроскопия отдельных галактик в оптическом диапазоне. Снимки с телескопа имени Хаббла позволяют по морфологии объектов и их окружения оценить вероятность искажения фотометрии, а также выделить объекты со вспышкой звездообразования, вызванной соседями. Спектроскопия, в свою очередь, позволяет проверить наличие активного ядра в галактике по наличию широких эмиссионных линий, и оценить качество фотометрической классификации.

Выборка ограничивалась по глубине до  $i\_sdss=22m$ , чтобы избежать существенных ошибок фотометрии и провалов в данных для объектов с сильным наклоном в спектральном распределении энергии. Итоговая выборка галактик, использовавшаяся для изучения, содержит 14323 объекта, из них 6866 объектов имеют спектроскопию, и 410 объектов отождествлены с рентгеновскими источниками.

Галактики образуют в пространстве широкополосных цветовых избытков сложную фигуру, разделенную на сгустки. Эти сгустки обусловлены разделением галактик на классы, изменением цветов галактик от красного смещения, и степени активности ядра. Определение критериев разделения галактик на сгустки вручную в многомерном пространстве не представляется возможным. Поэтому нами была предпринята попытка создать алгоритм разделения галактик на сгустки, используя критерий плотности окружения в цветовом пространстве. Плотность окружения, в свою очередь, определялась методом K ближайших соседей (KNN). Для каждого объекта определяется среднее расстояние до ближайших  $n$  соседей в цветовом пространстве, где число  $n$  выбирается исходя из полного количества объектов выборки, степени зашумленности фотометрических данных и количества спектральных полос. Методом градиентного спуска каждый объект приводится к ближайшему сгустку плотности: среди ближайших соседей в цветовом пространстве определяется объект с наибольшей плотностью окружения. Если его ближайшие  $k$  соседей имеют меньшую плотность окружения, следовательно он и является центром сгустка. Если нет, далее по цепочке определяется сосед с наибольшей плотностью окружения, к которому за несколько итераций сводится весь сгусток. Нами рассматривались различные комбинации чисел  $n$  и  $k$ . Чем меньше число  $n$ , тем более мелкие сгустки будут выделяться, но тем больше будет влияние ошибок фотометрии на группирование. Величина числа  $k$  пропорциональна скорости схождения градиентного спуска, но при слишком большом его значении сгустки начнут «перетекать» в соседние сгустки. Оптимальными оказались значения  $n=20$  и  $k=20$  при разделении 14323 галактик в 8-мерном цветовом пространстве.

Разделение на группы профидилось в цветовом пространстве фильтров  $g,r,i,z,J,H,K,Chanel-1$  (CH1), где  $griz$  – фильтры SDSS, JHK – фильтры ближнего инфракрасного диапазона, а фильтр Chanel-1 (CH1) – первый канал ИК-телескопа Spitzer, примерно соответствующий фильтру W1 инфракрасного телескопа WISE. В качестве цветовых избытков были выбраны следующие комбинации фильтров:  $[g-r]$ ,  $[g-z]$ ,  $[r-z]$ ,  $[i-z]$ ,  $[z-J]$ ,  $[z-H]$ ,  $[z-K]$ ,  $[z-CH1]$ . Данная комбинация показала наибольшую эффективность разделения галактик на сгустки.

Выборка ограничивалась по глубине до  $i\_SDSS < 22$ . Было выделено 54 условные группы галактик. На рис. 1 изображено разделение на группы в нескольких цветовых проекциях. Критерий  $dist\_dx\_plot$  отражает плотность соседей для центрального объекта каждой группы. Также изображены комбинации цветовых избытков  $[r-z]$ ,  $[i-z]$ ,  $[z-h]$  и фотометрического красного смещения  $z\_phot$  из каталога COSMOS (Ilbert, Sarak, Salvato et al., ApJ, 2008, astro-ph/0809.2101). Цветами выделены различные сгустки галактик. Хорошо видно разделение на сгустки по красному смещению, а также по различию в цветовых избытках на одном красном смещении.

Распределение рентгеновских источников по группам оказалось неравномерным. На рис. 2 синим цветом выделены все галактики, зеленым цветом отмечены галактики с рентгеновским источником. Примерно половина групп не содержит рентгеновских источников, в остальных группах их концентрация варьируется от незначительной (< 1%) до существенной (~17%). Это может указывать на различную концентрацию галактик с активными ядрами в разных группах.

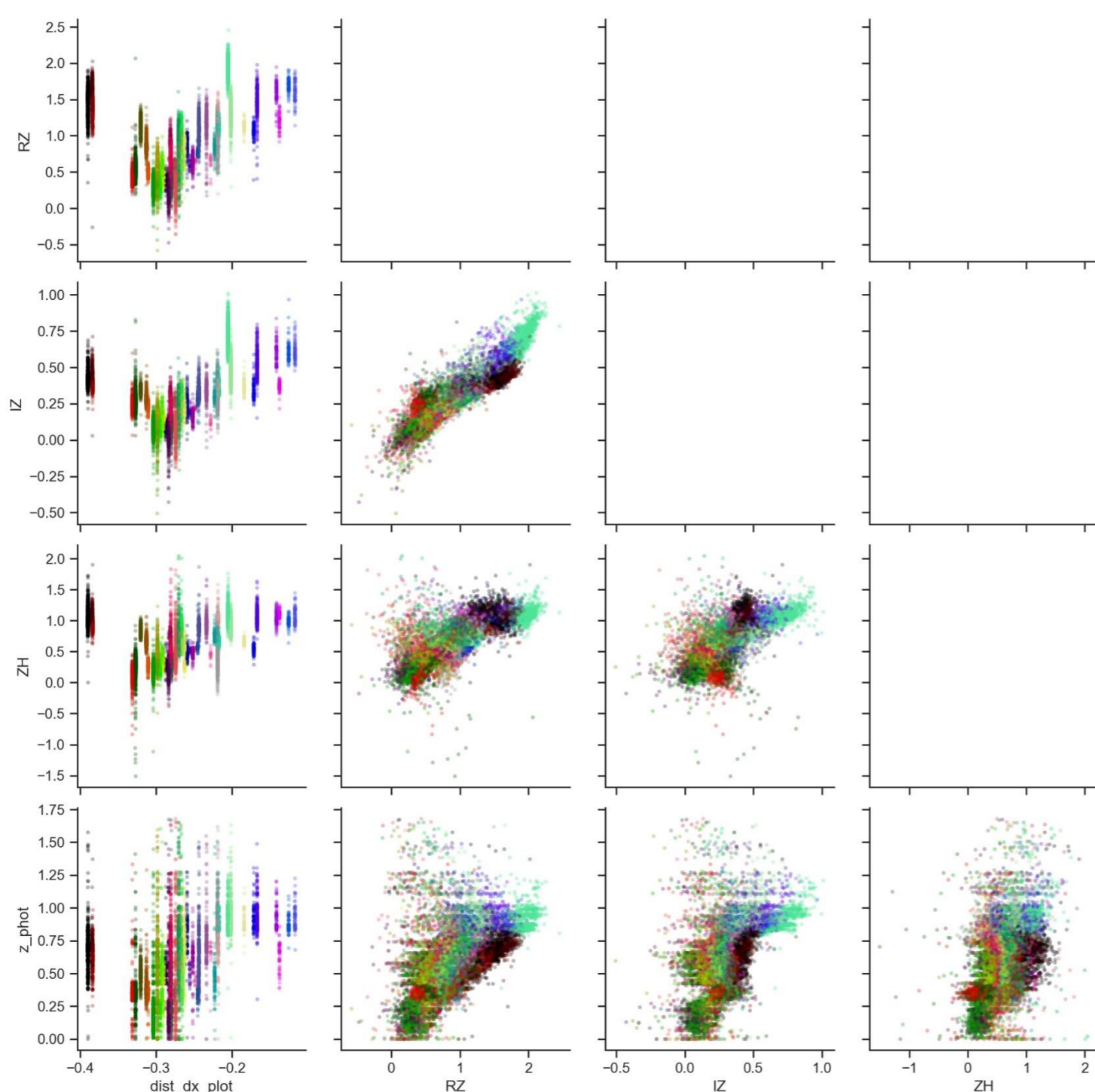


Рис.1. Результат автоматизированного разделения галактик на группы в пространстве широкополосных цветовых избытков. Разными цветами обозначены отдельные выделенные сгустки галактик.

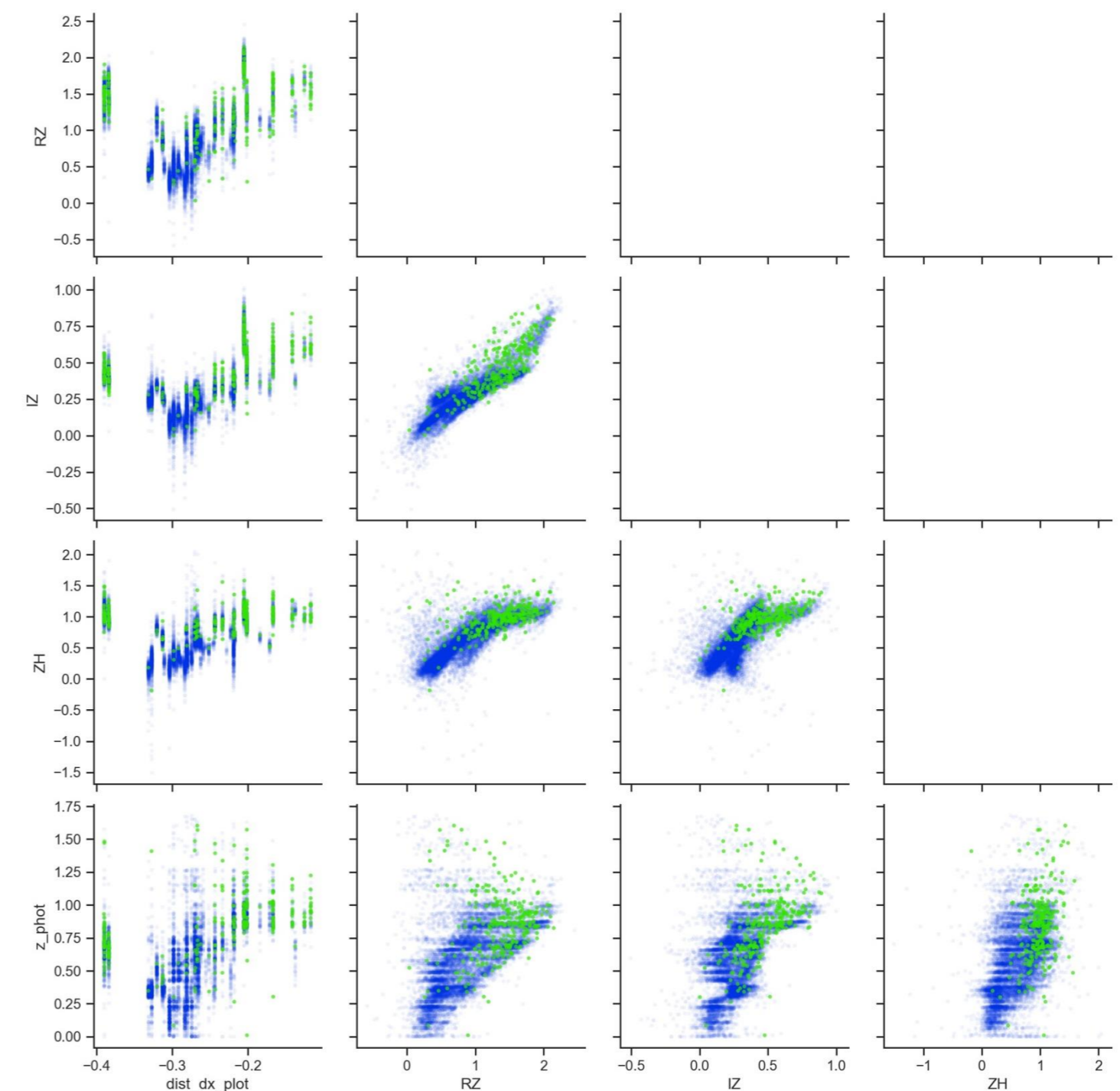


Рис.2. Распределение галактик и рентгеновских источников в нескольких цветовых проекциях. В левом столбце приведено разбиение галактик на группы. Синим отмечены все галактики, зеленым отмечены галактики с рентгеновским источником.

Изучение спектроскопии галактик (Lilly et al., 2007, ApJS, 172, 70) показало, что в выделенных группах с высоким содержанием рентгеновских источников признаки активного ядра наблюдаются у многих объектов, не являющихся рентгеновскими источниками (рис. 3). В свою очередь, в группах без рентгеновских источников наблюдаются близкие по типу галактики, по большей части не проявляющие признаков активности (рис. 4).

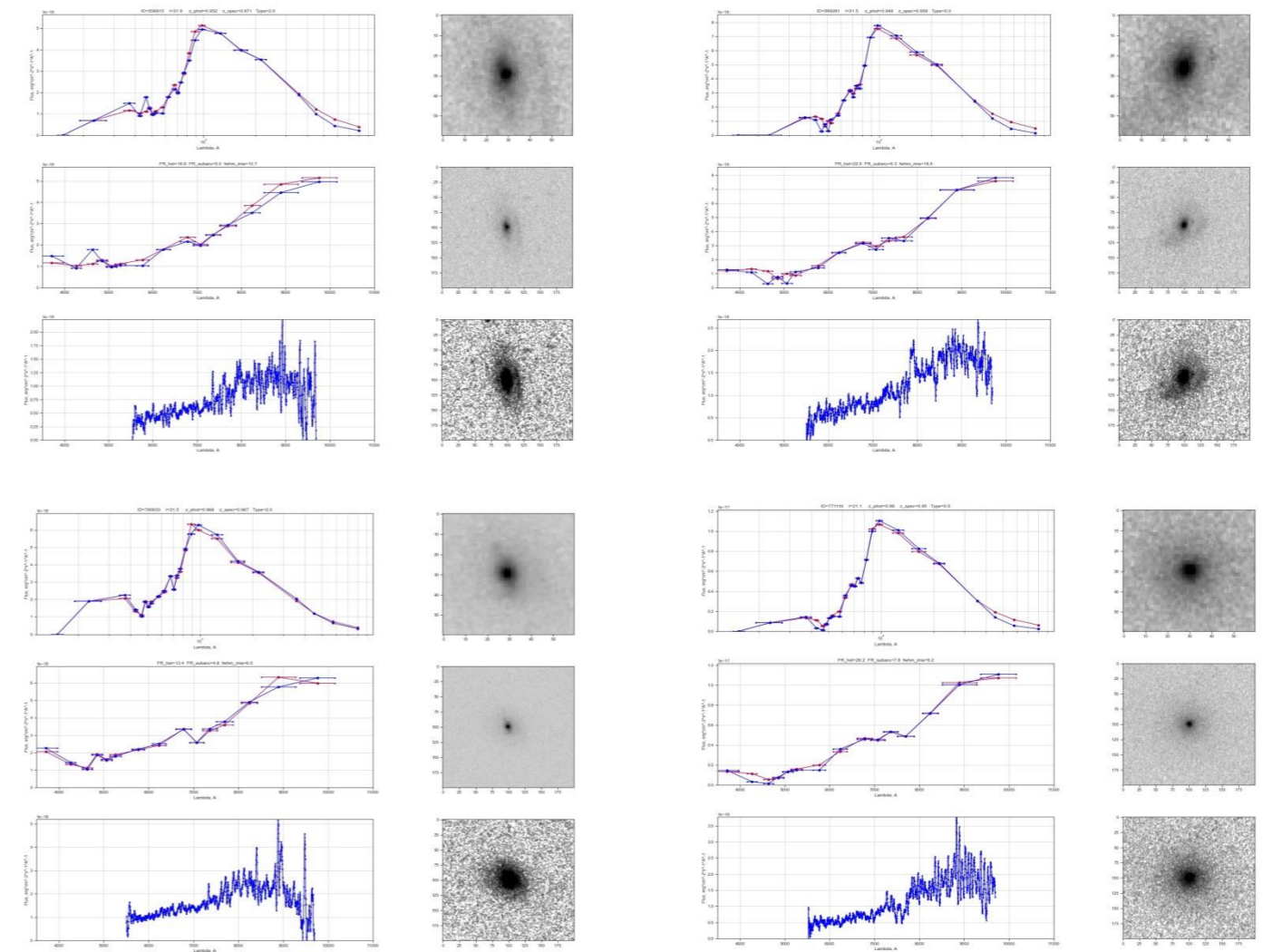


Рис.3. Спектральные распределения энергии (SED), спектры и прямые снимки галактик из группы с высоким содержанием рентгеновских источников. Левый столбец – объекты с рентгеновским источником, правый столбец – объекты без рентгеновского источника. Видны морфологические и спектральные признаки активности ядра в обоих столбцах.

Для каждого объекта верхний левый график демонстрирует SED в логарифмическом масштабе в диапазоне 150nm – 5000nm. Средний левый график демонстрирует SED в линейном масштабе.

Нижний левый график – спектр в линейном масштабе. Верхний прямой снимок отображает площадку 2''x2''. Два нижних прямых снимка отображают площадку 6''x6'' с разным контрастом.

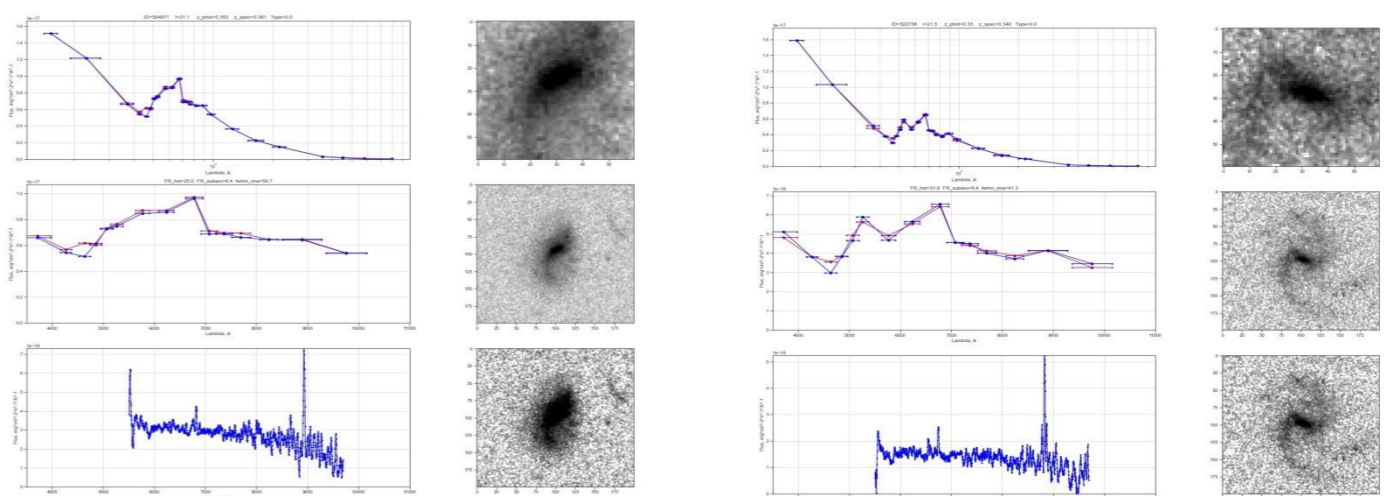


Рис.4. Спектральные распределения энергии (SED), спектры и прямые снимки галактик из группы без рентгеновских источников. Спектральные и морфологические признаки активности ядра не наблюдаются.

Таким образом, данная методика разделения галактик на группы может быть успешно применена для поиска галактик с активными ядрами, для которых нет данных о рентгеновском излучении, либо их яркость в рентгеновском диапазоне слишком мала для обнаружения.