

УДК 524.7-77

КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СРЕДНИХ НЕПРЕРЫВНЫХ СПЕКТРОВ РАДИОИСТОЧНИКОВ НА КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ $Z > 2$

© 2018 О. В. Верховданов^{1*}, Д. Д. Козлова², Ю. В. Сотникова¹¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Университет Гронингена, Гронинген, 9700 АВ Нидерланды

Поступила в редакцию 17 мая 2018 года; принята в печать 25 июля 2018 года

Предложен новый метод исследования популяции далеких радиосточников. Он основан на построении среднего континуального радиоспектра для объектов из заданных диапазонов красных смещений. В данной работе размер интервала красных смещений dz выбран равным 0.1. Данные по средним спектрам теоретически могут позволить исследовать распределение крупномасштабной структуры и особенности ее формирования. В практическом плане средний спектр на разных z позволяет моделировать распределение радиосточников, требующееся в различных вычислительных задачах. Изменение формы спектра на разных z позволяет говорить о космологической эволюции популяций радиосточников.

Ключевые слова: *радиоконтинуум: общее*

1. ВВЕДЕНИЕ

Объяснение современной астрофизической картины мира требует воспроизводства ее особенностей при моделировании разнообразных явлений: от возникновения первичных неоднородностей и формирования крупномасштабной структуры до особенностей эволюции галактик и планетных систем. Одним из таких этапов эволюции является период активности радиосточников. Активность радиосточника вообще представляет собой результат взаимодействия сверхмассивной черной дыры и аккрецирующего на нее газа, то есть процесса, проходящего, как правило, в скоплениях галактик и отражающего общую эволюцию материи нашей Вселенной. Массовое «зажигание» радиосточников приходится на период активных слияний (мерджинга) галактик, которые обеспечивают и приток газа в галактики, и сравнительно быстрый рост центральных сверхмассивных черных дыр в активных галактиках. Эпоха мерджинга галактик фактически начинается в конце эпохи реионизации [1, 2] и практически заканчивается в настоящее время, когда центральные галактики скоплений почти полностью «выедают» вещество из своего окружения. Количество радиосточников в разные эпохи таким образом отражает физические процессы, происходящие при формировании скоплений галактик, а средний радиоспектр радиосточников в различные периоды позволяет грубо оценивать среднюю энергетику этих событий.

Наблюдения радиосточников на больших красных смещениях, кроме физики активных ядер, позволяют исследовать также окружение галактик и свойства той части Вселенной, через которую проходит к нам излучение радиосточников. Например, одна из возможностей восстановления распределения материи в крупномасштабной структуре — изучение абсорбционных линий $\text{H}\alpha$ в спектрах далеких квазаров [3, 4]. Кроме того, радиоспектры наиболее далеких радиосточников могут иметь отклонения от стандартного вида в распределении энергии синхронного излучения, которые вызваны излучением и поглощением в облаках нейтрального водорода в линии 21 см. Этот эффект напоминает вклад излучения первых звезд в распределение фонового излучения в линии 21 см [5, 6], отнесенной в декаметровую и метровую области за счет больших красных смещений. Детали среднего спектра популяции радиосточников из одного диапазона красных смещений могут характеризовать и количество радиогромких активных ядер галактик в определенный период времени, и связанный с ним темп слияний галактик, и особенности крупномасштабной структуры, через которую проходит радиоизлучение. В последнем случае для усиления ожидаемых эффектов требуются множественные осреднения континуальных спектров далеких радиосточников в широком диапазоне радиочастот, как было сделано при поиске первых звезд [5].

Другой важный момент изучения и применения среднего спектра в анализе данных радиообзо-

*E-mail: vo@sao.ru

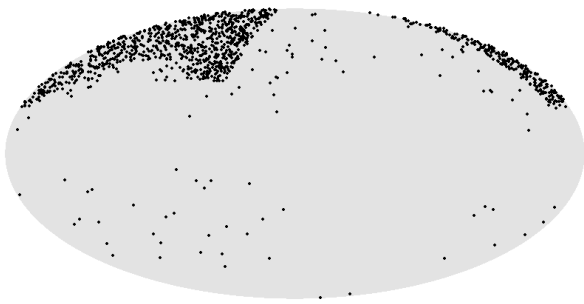


Рис. 1. Распределение анализируемых источников на сфере в галактической системе координат.

ров неба связан с совершенствованием процедуры моделирования распределения и учета радиоизлучения от внегалактических источников. Классическое моделирование распределения радиоисточников предполагает использование диаграммы $\lg N - \lg S$ на различных частотах, распределений спектральных индексов и угловых размеров объектов [7–9]. Кроме того, при учете красных смещений используется функция радиосветимости. Учет поведения распределения энергии в спектре радиоисточников становится особенно важен при моделировании процедуры разделения компонент для карт поляризации, где пиксельная чувствительность на масштабах больше $5'$ существенно зависит от сигнала синхротронного излучения нашей Галактики [10] и внегалактических радиоисточников.

Отметим, что осреднение спектров источников уже применялось ранее в работах [11–13] и было связано с использованием процедуры стэкинга (stacking) для различных популяций радиогалактик (в том числе и в разных диапазонах красных смещений) для многочастотных микроволновых данных миссии Planck с последующим построением радиоспектра. Однако осреднение в указанном примере проводилось для конкретных частот, но не для всего непрерывного спектра. Кроме того, если быть исторически корректным, то процедура осреднения спектров в различных диапазонах красных смещений применялась ранее как неявно скрытая в алгоритме построения диаграммы «спектральный индекс–красное смещение,» характеризующей излучение релятивистских электронов в ядрах галактик на больших z и применяемой для селекции далеких радиогалактик [14–19].

2. МЕТОД СРЕДНЕГО СПЕКТРА

Гистограммы распределения по спектральному индексу, плотности потока и красному смещению для объектов анализируемой выборки показаны соответственно на рис. 2, 3 и 4.

Метод включает отбор объектов с помощью баз данных NED¹ и CATS² [20, 21], аппроксимацию радиоспектров в случае наличия многочастотных радиоданных и осреднение непрерывных спектров в заданных интервалах красных смещений. Для расчета непрерывных спектров использовались результаты кросс-идентификации в базе данных CATS с окном отождествления $100'' \times 100''$. Удаление случайных радиообъектов поля в заданном боксе проводилось по методике анализа данных, подобной описанной в работах [22, 23]. Суть метода состоит в применении совместного анализа данных в координатном и спектральном пространствах для выделения вероятных отождествлений конкретных радиоисточников на различных радиочастотах. Для этих целей используется программа spg [24] системы обработки непрерывных данных на РАТАН-600. При представлении спектров $S(\nu)$ для дальнейшего вычисления аппроксимационных функций применяется параметризация $S(\nu)$ в формуле $\lg S(\nu) = A + Bx + Cf(x)$, где S — плотность потока в Ян, x — логарифм частоты ν в МГц и $f(x)$ — одна из следующих функций $\exp(-x)$, $\exp(x)$ или x^2 . Этот набор функций далее будем называть стандартными аппроксимационными кривыми (или функциями).

Средние спектры имеют топологию (положение локальных максимумов и минимумов), отличную от стандартных кривых, которая, в принципе, может характеризовать как особенности распределения энергии в радиоспектре в популяции радиоисточников в заданную космологическую эпоху, так и особенности распространения излучения сквозь космическую паутину.

2.1. Выборка объектов

Построение выборки объектов включало два основных этапа: селекцию объектов — радиоисточников на больших красных смещениях с $z > 2$ — в базе данных NED, в том числе и с фотометрическими оценками z , а также кросс-идентификацию полученного списка с радиоастрономическими каталогами базы данных CATS в окне $100'' \times 100''$. Исходная выборка в NED готовилась в площадке неба с ограничениями по прямому восхождению $7^h < \alpha < 17^h$ и по склонению $\delta > 29^\circ$ для пересечения с обзором FIRST [25] в радиодиапазоне и SDSS [26] в оптическом диапазоне и содержала 2002 объекта. При дальнейшем анализе рассматривались те радиоисточники, у которых в CATS имеются измерения плотности

¹<http://ned.ipac.caltech.edu>

²<http://cats.sao.ru>

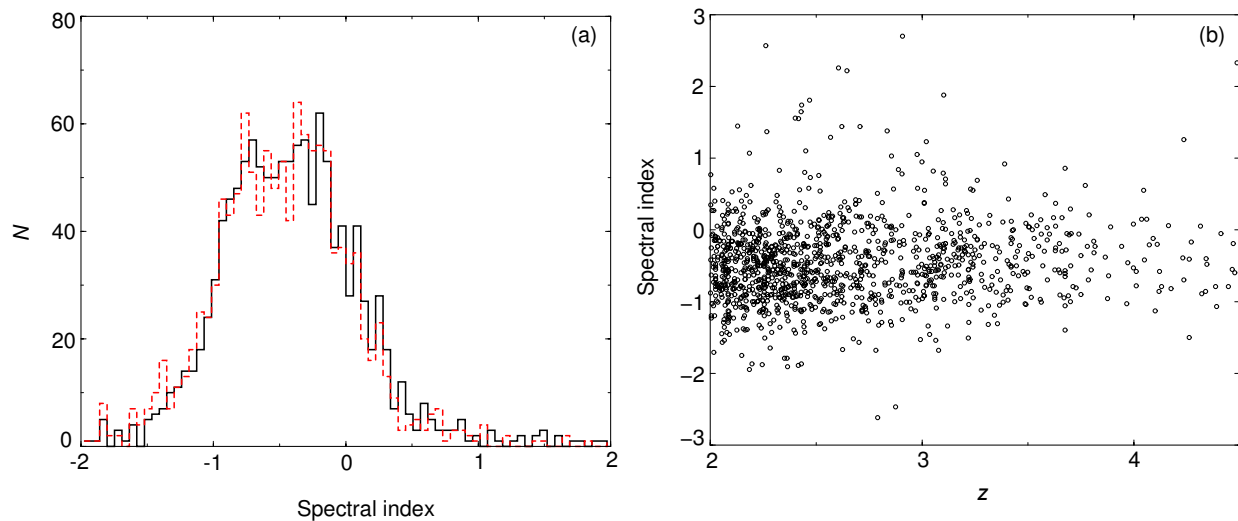


Рис. 2. (а) Гистограмма распределения по спектральному индексу анализируемых источников на частотах 1400 МГц (сплошная линия) и 4850 МГц (штриховая линия); (b) диаграмма «красное смещение z –спектральный индекс на частоте 1400 МГц» для общей выборки радиоисточников.

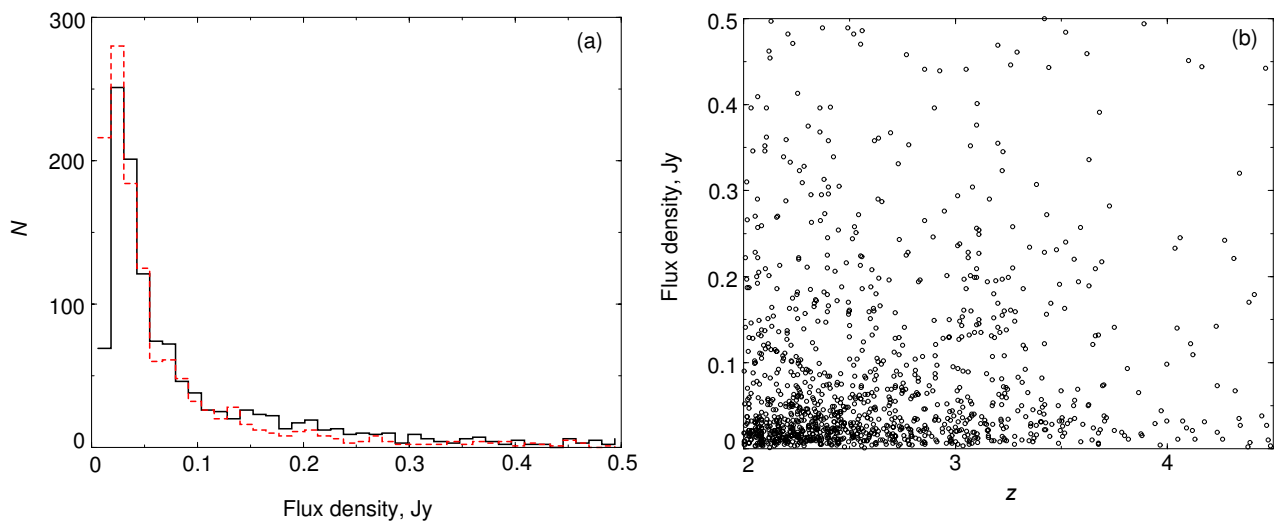


Рис. 3. (а) Гистограмма распределения по плотности потока анализируемых источников на частотах 1400 МГц (сплошная линия) и 4850 МГц (штриховая линия); (b) диаграмма «красное смещение z –плотность потока на частоте 1400 МГц» для общей выборки радиоисточников.

потока на двух и более частотах. В итоге в выборке осталось 1153 источника³.

На рис. 1 приведено распределение положения анализируемых источников на сфере.

Наша выборка была расширена за счет дополнительного списка объектов с $z \geq 3$ — квазаров, наблюдаемых на радиотелескопе РАТАН-600. Эта подвыборка имеет 18 пересечений с выборкой радиоисточников из баз данных NED

и CATS, описанных выше. Она включает 106 квазаров с известными фотометрическими красными смещениями $z \geq 3$ и с плотностями потоков $S_{1.4 \text{ GHz}} \geq 100$ мЯн. Около 40% квазаров выборки являются блазарами [27] — квазарами, релятивистская струя (джет) которых ориентирована близко к лучу зрения наблюдателя (до 20°). Распределения параметров объектов подвыборки радиоисточников РАТАН-600 показаны на рис. 1–4.

Наблюдения на радиотелескопе проводились в 2017 г. с использованием двух радиометрических комплексов диапазона 1–21.7 и 4.8–21.7 ГГц.

³Список объектов доступен по адресу http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_aver_src_list.html

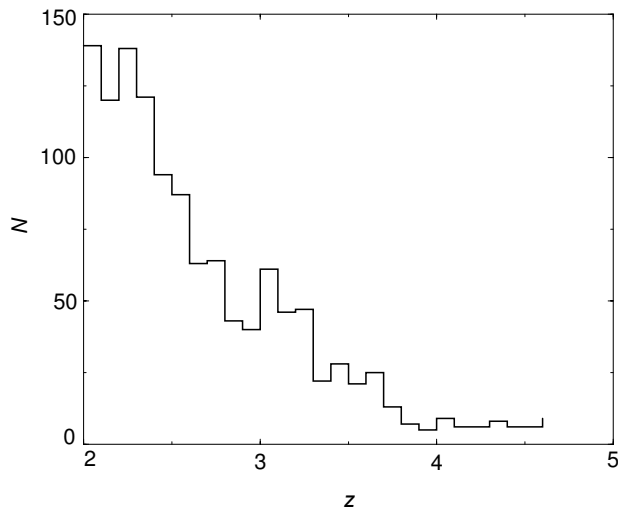


Рис. 4. Гистограмма распределения по красному смещению анализируемых источников.

Обработка наблюдательного материала производилась с использованием штатной автоматизированной системы потоковой обработки данных радиометров континуума вторичных зеркал 1 и 2 [28], базируемой на модулях пакета FADPS [29, 30]. По результатам наблюдений готовится отдельная работа для публикации в «Астрофизическом бюллетене» в 2019 г. с описанием методики наблюдений и полученного каталога.

2.2. Процедура осреднения

Список радиисточников был разбит на подвыборки, сформированные по принципу принадлежности объектов к группам с красными смещениями из интервалов $[z_i + dz]$, где i — номер интервала и $dz = 0.1$. В рамках каждого интервала красных смещений мы проводили осреднения аппроксимационных спектров, представленных в виде набора из 300 равноотстоящих точек в логарифмической шкале в диапазоне частот от 300 до 30 000 МГц. Бин $dz = 0.1$ выбран, исходя из следующих рассуждений. При меньшем бине на красных смещениях $z > 3.5$ резко падает число объектов, что делает неэффективной процедуру построения средних спектров в таких интервалах. Для большего бина сказывается физический временной интервал. Так, если «грубая» оценка среднего сопутствующего размера минимальной ячейки однородности составляет около 60–90 млн св. лет, то временной шаг в Λ CDM-космологической модели для $dz = 0.2$ между $z = 2$ и $z = 2.2$ составит примерно 300 млн лет, что значительно больше ячейки однородности.

Осреднение континуальных радиоспектров проводилось двумя методами: 1) в плоскости плотности потоков и 2) в плоскости логарифма плотности

потока. В первом случае строилась зависимость

$$S(\nu_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(\nu_j)/f_k(1400), \quad (1)$$

где ν_j — набор частот в аппроксимационном массиве данных для k -го источника, $f_k(\nu_j)$ — значение плотности потока, рассчитанной для аппроксимационной кривой k -го источника на частоте ν_j , N — количество радиисточников, у которых есть аппроксимационный спектр, в заданном интервале красных смещений $[z_i + dz]$. Перед процедурой осреднения все спектры приводились к одной величине на частоте 1400 МГц домножением на соответствующий коэффициент в пространстве плотности потока. Во втором случае применялось осреднение по формуле

$$\lg S(\nu_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \lg f_k(\nu_j). \quad (2)$$

Обозначения те же, что и в Формуле (1). Процедура осреднения радиоспектров выполнялась с помощью утилиты `srcalc` системы обработки данных FADPS⁴[30] на ПАТН-600.

Далее будем обозначать спектр, полученный по Формуле (1), как $S^{\text{fd}}(\nu)$, а по Формуле (2) — как $S^{\text{lfd}}(\nu)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние континуальные $S^{\text{fd}}(\nu)$ - и $S^{\text{lfd}}(\nu)$ -спектры⁵ радиисточников в разных диапазонах красных смещений показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Разнообразие форм спектров $S^{\text{fd}}(\nu)$ на разных z отражает чувствительность метода осреднения к топологическим особенностям спектра в отличие от метода вычисления $S^{\text{lfd}}(\nu)$, где среднее по логарифмам оказывается сглаженным и в общем случае соответствует спектру с медленно увеличивающейся крутизной при росте красного смещения.

Как видно на рис. 5 и 6, при улучшении чувствительности кривой, описывающей поведение спектра в пространстве плотностей потоков, такое осреднение в дальнейшем может быть использовано для поиска особенностей (локальных максимумов и минимумов) в радиоспектрах в различные космологические эпохи. Здесь важно отметить, что число обзоров неба на радиочастотах выше 5 ГГц незначительно, и либо их чувствительность

⁴http://sed.sao.ru/~vo/fadps_e.html

⁵Таблицы средних спектров доступны по адресу

http://sed.sao.ru/~vo/pub_tab/tab_aver_sp_z.html

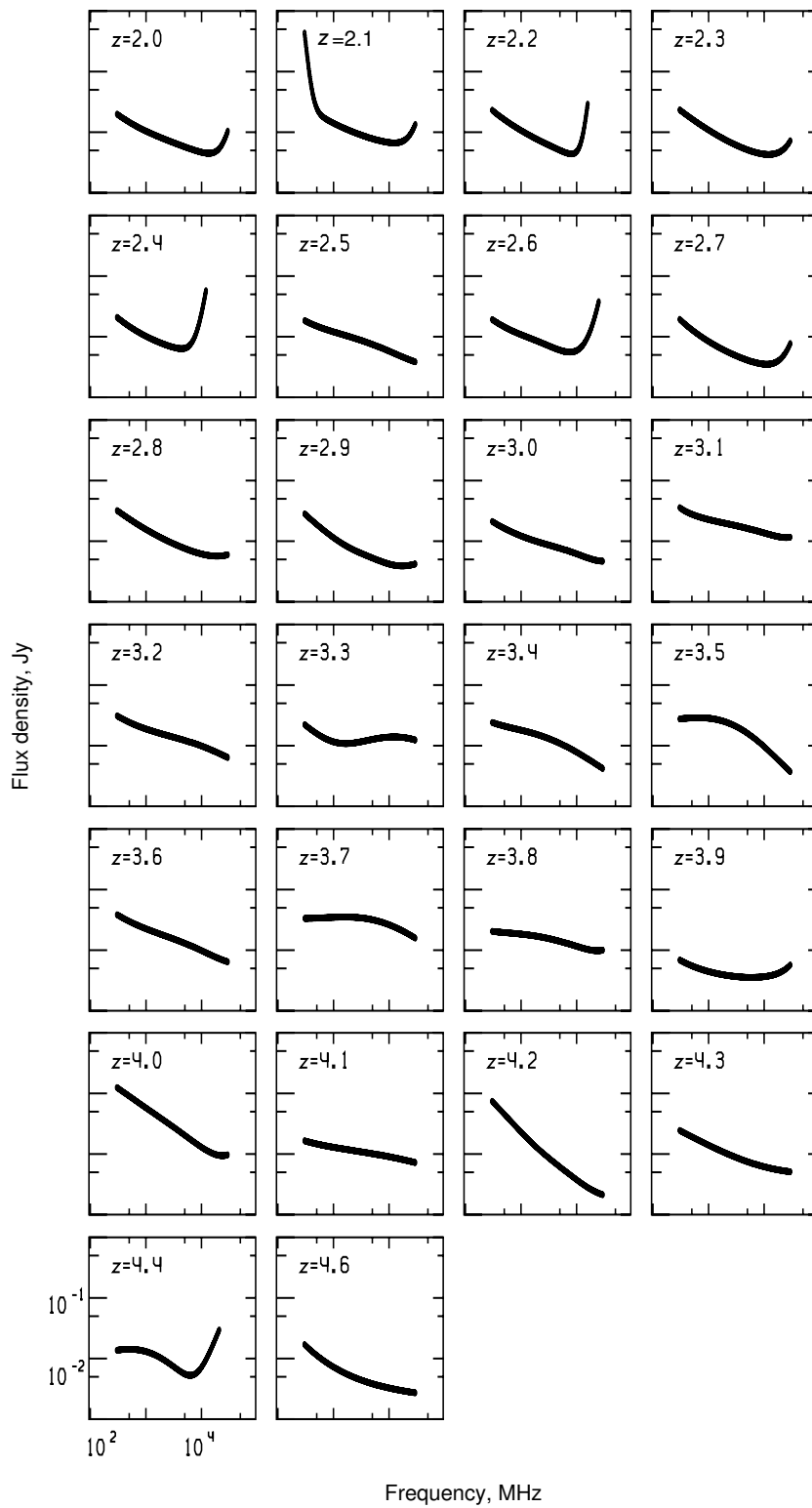


Рис. 5. Средние континуальные спектры радиоисточников в разных диапазонах красных смещений, построенные по методу 1 (Формула (1)).

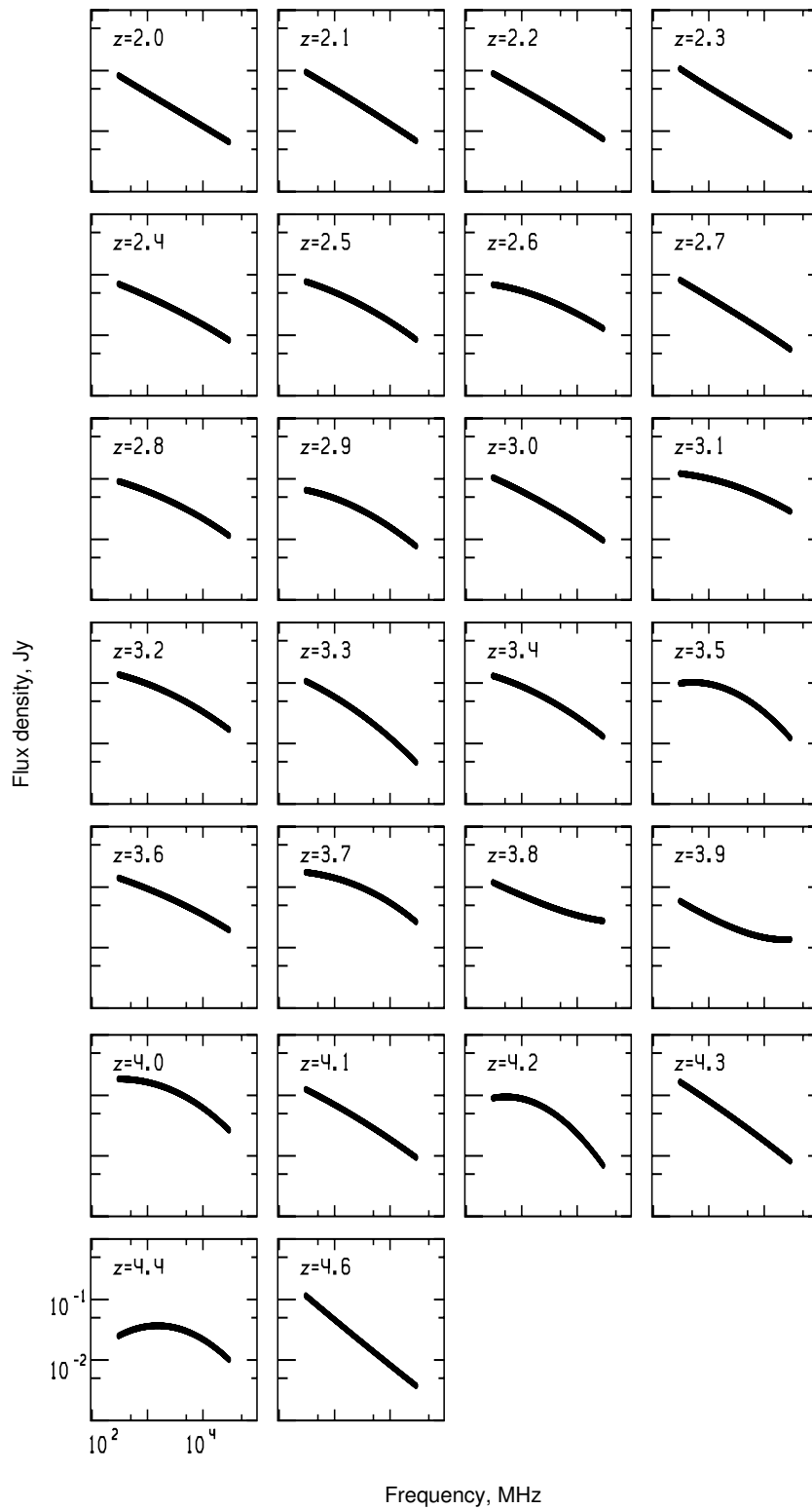


Рис. 6. Средние континуальные спектры радиоисточников в разных диапазонах красных смещений, построенные по методу 2 (Формула (2)).

не очень высока для анализа спектров, либо они не покрывают исследуемые области. Тогда в рассматриваемом интервале спектра данные неполны и вклад в спектр определенного типа объектов, а именно блазаров, возрастает. В этом случае для учета неполноты спектра требуется введение весовой функции.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен, реализован и протестирован метод осреднения континуальных спектров радиоисточников, представленных в виде набора аналитических аппроксимационных кривых, в различных диапазонах красных смещений. Как предполагается, подобные средние спектры могут дать дополнительную информацию о распределении вещества в крупномасштабной структуре, связанную с излучением линии нейтрального водорода 21 см, отнесенной на различные z . В качестве плюса применяемого подхода можно отметить ожидаемое устойчивое формирование топологических искажений радиоспектра излучением или поглощением линий водорода, которые накладываются на спектр на разных смещениях и дают, как ожидается, вклад в распределение энергии в спектре любого, в том числе и переменного, радиоисточника. Это позволяет использовать в осреднении все типы объектов на больших красных смещениях, имеющих континуальное радиоизлучение. Минусом метода является существенная неполнота используемых данных как по числу самих объектов (неполное и неглубокое покрытие неба радиоисточниками с измеренными z), так и по заполнению распределения энергии измерениями на различных радиочастотах.

Общие выводы таковы:

- качество существующих данных не очень высокое, но все же позволяет строить средние спектры по данным для десятков и сотен радиоисточников;
- радиоспектры следует представлять более сложными функциями, чем стандартный набор, связанный с физическими механизмами излучения и морфологией радиоисточника; в этом смысле (то есть без подгонки физической аналитической модели континуального радиоспектра) спектр, который поможет выделить множественные топологические особенности, нужно описывать кривыми как минимум 3-го или 4-го порядка;
- для ряда диапазонов из области $z < 3$ наблюдаются искажения в среднем спектре в высокочастотной (близкой к миллиметровому диапазону) части, что может говорить о росте вклада излучения ядра (и/или пылевой компоненты излучения) в эпоху наиболее активного мерджинга;

- даже по имеющимся данным можно сделать вывод, что есть очевидная эволюция среднего спектра, отраженная в виде зависимости от красного смещения z (а также их размера θ и радиоспектрального индекса α), которая может быть связана с числом слияний в различные космологические эпохи, «зажиганием» радиоисточников и их собственной эволюции.

На следующем этапе применения метода мы планируем расширить выборку объектов, включить данные дополнительных измерений на РАТАН-600, расширить возможности взвешивающих и аппроксимирующих функций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность рецензенту за полезные замечания, позволившие улучшить содержание предлагаемой статьи. Авторы благодарны А. Г. Дорошкевичу за предварительные обсуждения проблемы формирования крупномасштабной структуры. При исследовании использовалась база данных внегалактических объектов NED (NASA/IPAC Extragalactic Database which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration). Авторы также применяли базу данных радиоастрономических каталогов CATS и систему обработки радиоастрономических данных FADPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. M. Heckman, S. Borthakur, R. Overzier, et al., *Astrophys. J.* **730**, 5 (2011).
2. P. D. Meerburg, C. Dvorkin, and D. N. Spergel, *Astrophys. J.* **779**, 124 (2013).
3. A. G. Doroshkevich, J. P. Mucket, and V. Miller, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **246**, 200 (1990).
4. M. Demiański, A. G. Doroshkevich, and V. I. Turchaninov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371**, 915 (2006).
5. J. D. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, et al., *Nature* **555**, 67 (2018).
6. R. Barkana, *Nature* **555**, 71 (2018).
7. J. J. Condon, *Astrophys. J.* **284**, 44 (1984).
8. C. A. Jackson and J. V. Wall, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **304**, 160 (1999).
9. D. I. Solovyov and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **72**, 217 (2017).
10. M. Remazeilles, A. J. Banday, C. Baccigalupi, et al., *J. Cosmology Astroparticle Physics* **4**, 023 (2018).
11. O. V. Verkhodanov, E. K. Maiorova, O. P. Zhelenkova, et al., *Astronomy Reports* **60**, 630 (2016).
12. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, and M. L. Khabibullina, *Astrophysical Bulletin* **71**, 139 (2016).

13. O. V. Verkhodanov, D. I. Solovyov, O. S. Ulakhovich, et al., *Astronomy Reports* **61**, 297 (2017).
14. G. R. Whitfield, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **117**, 680 (1957).
15. R. D. Dagkesamanskii, *Nature* **226**, 432 (1970).
16. G. Blumenthal and G. Miley, *Astron. and Astrophys.* **80**, 13 (1979).
17. A. I. Kopylov, W. M. Goss, Y. N. Pariiskii, et al., *Astronomy Letters* **32**, 433 (2006).
18. M. L. Khabibullina and O. V. Verkhodanov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 123 (2009).
19. O. V. Verkhodanov and M. L. Khabibullina, *Astronomy Letters* **36**, 7 (2010).
20. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
21. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Sci. J.* **8**, 34 (2009).
22. O. V. Verkhodanov, H. Andernach, and N. V. Verkhodanova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **49**, 53 (2000).
23. O. V. Verkhodanov, N. V. Verkhodanova, and H. Andernach, *Astrophysical Bulletin* **64**, 72 (2009).
24. O. V. Verkhodanov, in *Proc. 27th Radio Astron. Conf. on Problems of Modern Radio Astronomy, St.-Petersburg, 1997* (Inst. Appl. Astronomy RAS, St.-Petersburg, 1997), Vol. 1, p. 322 [in Russian].
25. R. H. Becker, R. L. White, and D. J. Helfand, *Astrophys. J.* **450**, 559 (1995).
26. K. N. Abazajian, J. K. Adelman-McCarthy, M. A. Agüeros, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **182**, 543 (2009).
27. E. Massaro, P. Giommi, C. Leto, et al., *Astron. and Astrophys.* **495**, 691 (2009).
28. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71**, 496 (2016).
29. O. V. Verkhodanov, *ASP Conf. Ser.* **125**, 46 (1997).
30. O. V. Verkhodanov, B. L. Erukhimov, M. L. Monosov, et al., *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **36**, 132 (1993).

Cosmological Evolution of Average Continuum Spectra of Radio Sources at $Z > 2$ Redshifts

O. V. Verkhodanov, D. D. Kozlova, and Yu. V. Sotnikova

A new method is proposed for studying the population of distant radio sources. It is based on building the average continuum radio spectrum for objects located within the given redshift interval. In this paper the redshift bin size dz is set equal to 0.1. The data about the average spectra can theoretically be used to study the distribution of the large-scale structure and the features of its formation. On the practical side the average spectra at different z can be used to simulate the distribution of radio sources, which is required in various computational tasks. The change of the form of the spectrum at different z is indicative of the cosmological evolution of the population of radio sources.

Keywords: *radio continuum: general*