

УДК 524.7—77

**Радиодиаграммы Хаббла для квазаров
на длинах волн 6 и 11 см**

М. Ф. Ходячих

Построена зависимость радиовеличины статистически мощнейшего объекта m^0 , от красного смещения z при группировании объектов на интервалах $h=0.2$ по $\ln(1+z)$ для выборки из 902 квазаров. Средний наклон кривой на диаграмме Хаббла равен 1.5. Это можно объяснить уменьшением светимостей квазаров, более быстрым в радиодиапазоне (0.60^m за 10^9 лет при $q_0=1$), чем в оптическом. Зависимости m^0 , ($\lg z$) для выборок квазаров с крутыми и пологими спектрами различаются незначительно. При увеличении разрешения (уменьшении h) выявляются циклические изменения радиовеличин со средним периодом циклов 0.19 по аргументу $\ln(1+z)$ и амплитудой, для некоторых циклов превышающей 1.5^m , при средней погрешности определения m^0 , не более 0.2^m . Характер средней зависимости m^0 , ($\lg z$) и циклических изменений радиовеличин одинаков в обоих диапазонах спектра.

THE HUBBLE RADIODIAGRAMS FOR THE QUASARS AT 6 AND 11 CM, by Khodyachikh M. F.— The dependence of the radiomagnitude for the statistically most powerful quasar m^0 , on $\lg z$ by grouping the objects in intervals $h=0.2$ by $\ln(1+z)$ for 902 quasars is obtained. The mean slope of the redshift—magnitude relation is 1.5. This is, evidently, explained by a decrease of quasars luminosities which is more rapid in the radio range (0.60^m for 10^9 years at $q_0=1$) than in the optical one. The dependences m^0 , ($\lg z$) for quasars with steep and sloping spectra differ insignificantly. It reveals (at $h \leq 0.1$) cyclic changes in the quasars radiomagnitudes with mean period of cycle 0.19 by argument $\ln(1+z)$ and with amplitude for some cycles $> 1.5^m$ (mean error of m^0 , is no more than 0.2^m). The character of average dependence and cyclic changes in the radiomagnitudes is the same in the both spectral ranges.

Диаграммы Хаббла для квазаров строились в ряде работ для оптического диапазона. При этом выявлено значительное отличие наклона кривой зависимости (m , $\lg z$) от теоретического, что привело к важному выводу об эволюции светимостей квазаров [1, 4, 7, 9]. Зависимость радиовеличин квазаров от красного смещения анализировалась в [8] по выборке из 119 объектов каталогов 3CR и 4C. В [6] выявлена корреляция радиовеличин и красных смещений для 142 квазаров в диапазонах 4—6 ГГц и 200—1000 МГц. Среднюю зависимость радиопотока квазаров от красного смещения с высокой точностью построить нельзя вследствие большого рассеяния точек на диаграмме. С другой стороны, ее интерпретация усложняется тем, что среднее значение потока наблюдаемых квазаров в избранном диапазоне красных смещений уменьшается с увеличением предельной чувствительности телескопов за счет включения в выборку все более слабых объектов. Поэтому здесь предпочтительнее строить диаграмму Хаббла для мощнейших объектов. В качестве таких объектов удобно в методическом плане и для дальнейшей интерпретации использовать статистически мощнейшие объекты в группах квазаров с близкими красными смещениями, как делалось в оптическом диапазоне в работах [1, 4], в которых метод статистически ярчайших квазаров был предложен и усовершенствован. Важное достоинство этого метода — согласие результатов обработки выборок квазизвездных объектов, объемы которых различны. Так, при различии объемов выборок квазаров [3, 4] в пять раз средние зависимости блеска статистически ярчайших объектов согласуются в пределах ошибок, что является следствием независимости оценок блеска статистически

ярчайших объектов от числа объектов в группах, на которые разбивается вся выборка (подробнее см. [3, 4]).

В настоящей работе использовалась выборка квазаров из «Каталога квазаров и активных ядер» [10], содержащего данные о плотностях потока s_ν на волнах 6 и 11 см для 902 квазаров. Для квазаров, плотности потока которых приведены для обеих длин волн (всего 832 объекта), рассчитывался наклон спектра α ($s_\nu \propto \nu^{-\alpha}$), определялась поправка за красное смещение и вычислялись скорректированные радиовеличины m_r . Далее квазары располагались в порядке возрастания красных

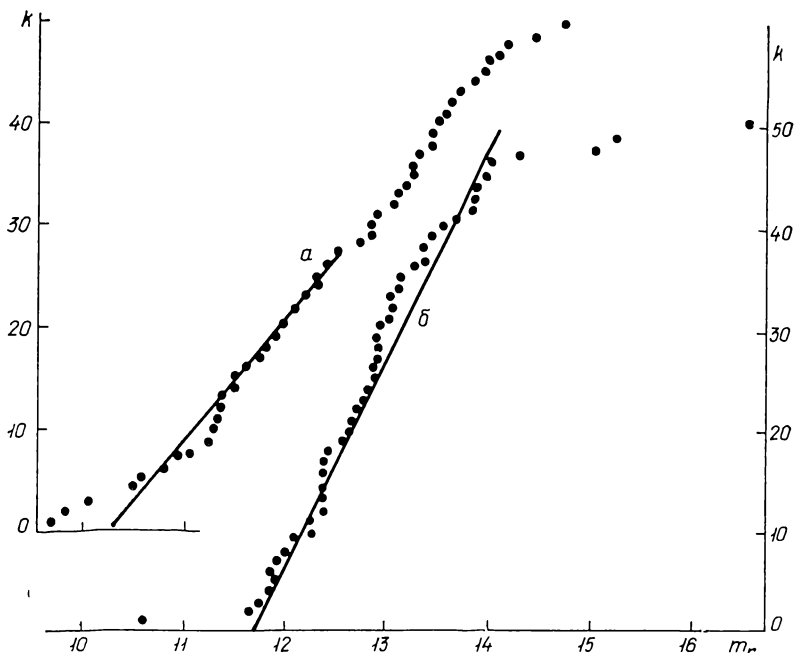


Рис. 1. Функции блеска для групп квазаров в диапазоне 6 см, $W = 50$ при $\ln(1+z) = 0.633$ (а) и $\ln(1+z) = 0.742$ (б)

смещений. Эта выборка объектов использовалась для определения зависимости радиовеличин статистически мощнейших квазаров в группах от величины красного смещения.

Разбиение квазаров на группы проводилось тремя способами: 1 — формировались группы по W объектов в каждой; 2 — в одну группу включались объекты, красные смещения которых попадают в интервал h аргумента $u = \ln(1+z)$; 3 — разбиение квазаров на группы проводилось по равновеликим объемам ΔV в сопутствующем пространстве при $q_0 = 4$ (при этом значении q_0 пространственная плотность квазаров не зависит от z [5]). Начала последующих групп смещались относительно начала предыдущих на величину шага gW , gh или $g\Delta V$ в способах разбиения 1, 2, 3 соответственно. Чтобы уменьшить зависимость результатов от способа разбиения на группы, вычисления проводились при $g = 1/3$ и $g = 1/6$.

В каждой группе отыскивался блеск статистически мощнейшего объекта m_r^0 . Для этого квазары выделенной группы располагались в порядке возрастания m_r , строилась зависимость номера объекта в группе k от m_r — аналог функции блеска в звездной статистике. Были построены функции блеска $k(m_r)$ для многих групп в разных интервалах z при различных W . Анализ функций блеска $k(m_r)$ показал, что их можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$m_r^k = m_r^0 + Dk,$$

где D — постоянная для данной группы. От линейной зависимости уклоняются наиболее яркие объекты (при $W=50$ один — два ярчайших объекта) в некоторых группах на одну звездную величину или более. Поэтому при аппроксимации линейной зависимостью не учитывались квазары в группе с $k \leq j$, где j принималось равным целой части $W/20+1$. Слабые объекты также уклоняются от линейной зависимости, что, по-видимому, происходит вследствие ухудшения полноты выборки при увеличении m_r . Функция блеска для квазаров группы подобна их интегральной функции светимости, так как модули расстояний объектов

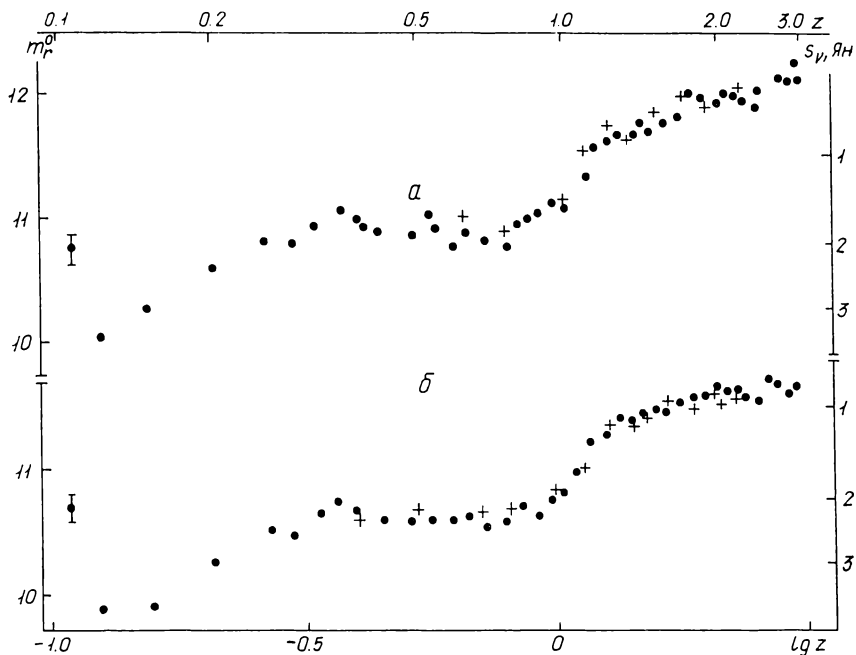


Рис. 2. Радиодиаграммы Хаббла для полной выборки квазаров при $\lambda=6$ см (а) и $\lambda=11$ см (б)

группы близки. Чтобы работать с одним участком функции светимости в разных группах и исключить из рассмотрения уклонение слабых объектов от линейной зависимости, аппроксимация линейной зависимостью проводилась по объектам с $m_r^k < m_r^j + \Delta m_r$.

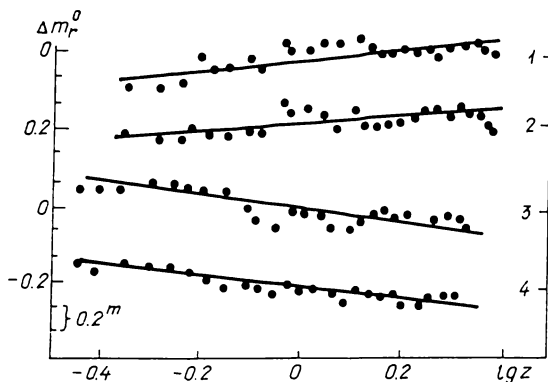
Величина Δm_r принималась равной 2.5^m . По методу наименьших квадратов рассчитывался блеск статистически ярчайшего квазара m_r^0 и стандартная ошибка его определения σ_{m_r} для групп, в которых число объектов на участке аппроксимации $m_r^k < m_r^j + \Delta m_r$ было не менее 10.

Контрольные расчеты при Δm_r равном 2^m и 3^m показали, что оценка m_r^0 при варьировании Δm_r изменяется незначительно. На рис. 1 приведены функции блеска для двух групп ($\lambda=6$ см, $W=50$) при $\ln(1+z)=0.633$ и $\ln(1+z)=0.742$. Прямые проведены по способу наименьших квадратов по точкам, попавшим на участок аппроксимации. В соответствии с изложенным слабые объекты с $m_r^k > m_r^j + \Delta m_r$, при проведении прямых не учитывались. Точки пересечения прямых с осью абсцисс ($k=0$) определяют величины m_r^0 .

Зависимость $m_r^0(\lg z)$ рассчитывалась для обеих длин волн. По найденной зависимости (первое приближение) радиовеличины квазаров в группах приводились к среднему значению $\lg z$ для всех объектов группы. Все вычисления повторялись заново. На рис. 2 показаны диаграммы Хаббла на волнах 6 и 11 см, полученные при $h=0.20$. Диаграммы, рассчитанные при разбиении на группы по способам 2 и 3, анало-

гичны. Для иллюстрации на рис. 2 даны диаграммы (крестики), построенные при $g=1/3$ по способу 2 для $\lambda=6$ см и при разбиении на группы по равновеликим объемам для $\lambda=11$ см.

Далее квазары делили на две выборки с крутыми (s) и пологими (p) спектрами. В первую выборку ($\alpha>0.4$) вошло 394 объекта, во вторую ($\alpha<0.4$) — 438. Различия диаграмм Хаббла для этих выборок и для полной выборки невелики. На рис. 3 приведены разности звездной величины Δm_p статистически ярчайшего объекта в выборке p и



полной выборке, а также Δm_s для выборки s . Заметно небольшое монотонное изменение Δm_p и Δm_s с увеличением $\lg z$.

Рис. 3. Разности блеска статистически ярчайших объектов выборок p , s и полной выборки: 1 — $\alpha < 0.4$, $\lambda = 6$ см; 2 — $\alpha < 0.4$, $\lambda = 11$ см; 3 — $\alpha > 0.4$, $\lambda = 6$ см; 4 — $\alpha > 0.4$, $\lambda = 11$ см

В первом приближении эти изменения можно аппроксимировать линейной зависимостью, как это проиллюстрировано на рис. 3.

Для оценки точности метода сделаны расчеты с выборкой, в которой величинам m_r квазаров присваивались случайные числа в интервале, соответствующем диапазону изменения блеска квазаров. В этой выборке распределение квазаров равномерно по звездным величинам. Согласно [4], оценка m_r^0 должна совпадать с нижней границей интервала m_r^1 . По описанной методике вычислялись m_r^0 и определялись их средние квадратичные отклонения от m_r^1 . Средняя стандартная ошибка оценки m_r^0 по результатам десяти численных экспериментов с разными выборками случайных чисел и различными W оказалась $\sigma_m = 1.2 W^{-1/2}$. Следует отметить, что она существенно превышает внутреннюю ошибку σ_{m_r} , определяющуюся по способу наименьших квадратов для всех групп. Это различие обусловлено тем, что σ_{m_r} характеризует точность проведения прямой по построенной функции блеска и не учитывает погрешностей построения функции блеска, вызванных случайными флуктуациями чисел квазаров при разных m_r выделенной группы. На рис. 2 и далее указаны средние значения σ_m .

Кривые на рис. 2 для обеих длин волн сходны. Уверенно отмечается увеличение m_r^0 с увеличением z . Наклон кривой на диаграмме близок к 1.5. В области $-0.5 < \lg z < 0.1$ в обоих диапазонах спектра наблюдается замедление ослабления блеска квазаров с увеличением z . Депрессия в пять — шесть раз превышает σ_m .

Обсудим влияние эффектов селекции на построенные диаграммы. Исползованная в работе выборка неполная. Возникает вопрос, как изменится найденная зависимость $m_r^0(\lg z)$ при добавлении квазаров, открытых позднее.

Увеличение объема выборки со временем происходит в основном за счет открытия более слабых объектов. Очевидно, пополнение выборки слабыми объектами не должно сильно влиять на оценки блеска статистически ярчайших объектов. При этом пополнении в каждой группе квазаров с фиксированными границами по z число объектов увеличится, т. е. функция блеска будет определяться более надежно. Как уже отмечалось, увеличение числа объектов в группе W не приводит к сме-

щению оценок m_r^0 [4]. Поэтому зависимость $m_r^0(\lg z)$, построенная по новой выборке, должна согласоваться с прежней зависимостью в пределах ошибок. Убедительное подтверждение этого вывода — согласие диаграмм Хаббла для квазаров и квазагов, построенных в [3, 7] и [4] по выборкам разного объема.

Диаграммы Хаббла в радиодиапазоне (рис. 2) сильно отличаются от теоретических: наклон кривой на диаграммах более чем в три раза

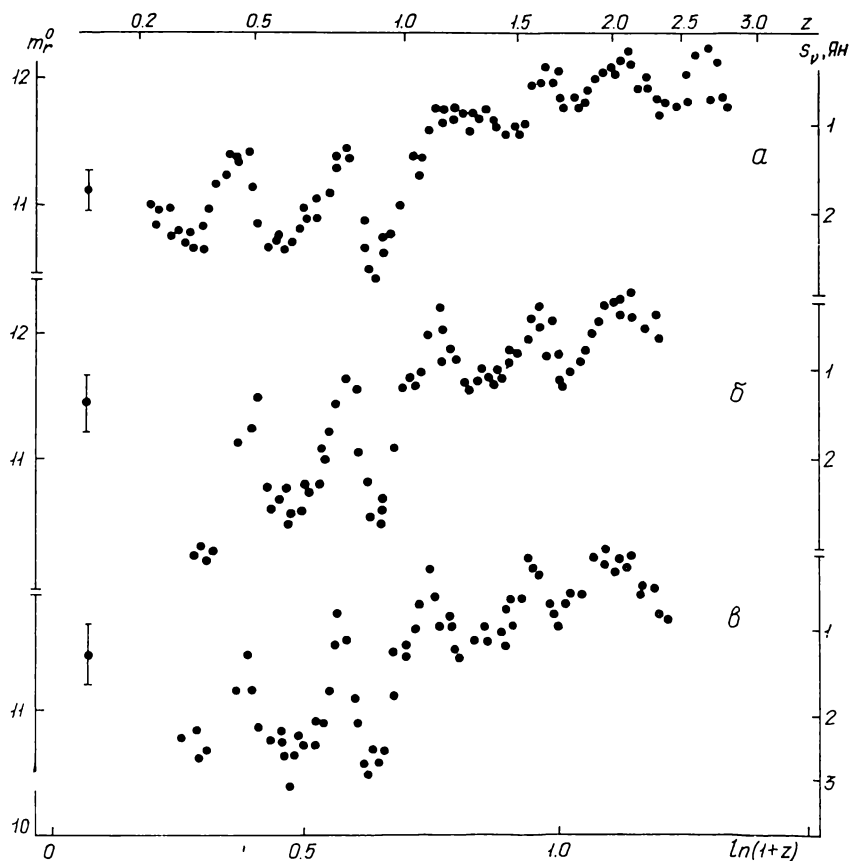


Рис. 4. Зависимость блеска статистически ярчайшего объекта от $\ln(1+z)$, вычисленная по полной выборке при $\lambda=6$ см (а); по выборке квазаров с $\alpha < 0.4$ при $\lambda=6$ см (б); при $\alpha < 0.4$ и $\lambda=11$ см (в)

меньше теоретического. Это несоответствие (как и в оптическом диапазоне) можно объяснить эволюцией радиосветимостей квазаров. Уменьшение светимостей объектов со временем приводит к уменьшению наклона кривой на диаграмме Хаббла, построенной для этих объектов, так что меньший наклон кривой на диаграмме соответствует более быстрой эволюции светимостей. В оптическом диапазоне наклон кривой на диаграмме Хаббла равен примерно 2.2. Следовательно, в радиодиапазоне светимости квазаров со временем уменьшаются быстрее. Среднее изменение абсолютной величины квазаров за 10^9 лет при q_0 равном 0.05, 1 и 4 ($H_0=50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$) в радиодиапазоне составляет 0.53, 0.60 и 0.76^m , в оптическом — 0.43, 0.46, 0.52^m соответственно [4].

При увеличении разрешения по аргументу $u=\ln(1+z)$ у зависимости $m_r^0(u)$ выявляются мелкомасштабные изменения. Проведены вычисления $m_r^0(u)$ для полной выборки и для выборок p и s при разбиении на группы способами 1 и 2 для набора значений h и W в интервалах $h=0.1-0.03$ и $W=75-25$. На кривых для полной выборки при h

равном 0.1 и 0.07 в обоих диапазонах спектра наблюдаются экстремумы: максимумы m_r^0 при u равном 0.19, 0.36, 0.57, 0.74, 0.97, 1.13 и минимумы при u равном 0.28, 0.45, 0.62, 0.83, 1.03, 1.21. В расположении экстремумов прослеживается регулярность. Средний период циклических изменений $P=0.19$. При дальнейшем увеличении разрешения по u (уменьшении h) вследствие увеличения σ_m средняя кривая $m_r^0(u)$ проводится неуверенно, хотя циклический характер кривой сохраняется. Циклические изменения отмечаются и в зависимостях $m_r^0(u)$ для выборок p и s . У квазаров с пологими спектрами циклические изменения с тем же периодом более четкие: это позволило уточнить положения экстремумов, в частности выявить минимум при $u=0.83$. На рис. 4 показаны зависимости, рассчитанные при $h=0.07$ для полной выборки квазаров при $\lambda=6$ см (а), для выборки p при $\lambda=6$ см (б) и $\lambda=11$ см (в). Аналогичные результаты получаются при разбиении на группы по способу 2. В численных экспериментах с выборкой случайных чисел разность максимального и минимального из всего набора значений m_r^0 не превышала $4.5 \sigma_m$, и расположение экстремумов по $\ln(1+z)$ было беспорядочным. В зависимости $m_r^0(u)$ разность блеска соседних экстремумов в некоторых циклах превышает 1.5^m при погрешности $\sigma_m \approx 0.17^m$. Соотношение амплитуды и погрешности σ_m , регулярность в расположении экстремумов, хорошее соответствие изменений $m_r^0(u)$ в двух диапазонах спектра, устойчивость $m_r^0(u)$ при изменении способа разбиения на группы — убедительные аргументы в пользу реальности циклических изменений $m_r^0(u)$ в радиодиапазоне. Следует отметить, что в оптическом диапазоне циклические изменения блеска статистически ярчайшего квазара по аргументу $\ln(1+z)$ с таким же периодом обнаружены в 1979 г. [2].

Автор благодарит Б. В. Комберга и участников семинара С. Я. Брауде в Радиоастрономическом институте АН УССР за обсуждение работы.

1. Ходячих М. Ф. О зависимости светимостей и пространственной плотности квазаров от красного смещения // Астрон. журн.— 1975.—52, вып. 6.— С. 1132—1138.
2. Ходячих М. Ф. Циклические изменения блеска квазаров по параметру $\ln(1+z)$ // Там же.— 1979.—56, вып. 6.— С. 1174—1178.
3. Ходячих М. Ф. Диаграммы Хаббла для квазаров и квазагов // Пробл. космич. физики.— 1982.— Вып. 17.— С. 124—128.
4. Ходячих М. Ф. Эволюция светимостей квазаров и квазагов // Астрон. журн.— 1983.—60, вып. 5.— С. 840—845.
5. Ходячих М. Ф. О пространственной плотности квазаров // Пробл. космич. физики.— 1985.— Вып. 20.— С. 72—76.
6. Basu D. Redshift and radio magnitude of quasars // Astrophys. and Space Sci.— 1978.—53, N 1.— P. 245—249.
7. Setti G., Zamorani G. On the Hubble diagrams of quasars and the shapes of their optical luminosity functions derived by a new method // Astron. and Astrophys.— 1978.—66, N 1/2.— P. 249—255.
8. Turner E. L. Nonparametric statistics of the quasar Hubble diagrams // Astrophys. J.— 1979.—228, N 2.— P. L51—L54.
9. Turner E. L. Statistics of the Hubble diagram // Ibid.— 1979.—230, N 2.— P. 291—303.
10. Veron-Cetty M. P., Veron P. A. Catalogue of quasars and active nuclei // Sci. Rept. Eur. Southern Observ.— 1984.— N 1.— P. 1—172.