

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

**Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)**

Препринт № 183

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ АБСОЛЮТНАЯ ШКАЛА ПОТОКОВ

В. П. Иванов

К. С. Станкевич

Горький 1984

УДК 523.164.4

Изложены принципы построения абсолютных радиоастрономических шкал для определения потоков и спектров дискретных источников. Сделано сравнение всех опубликованных шкал и проведен анализ их ошибок. Показано, что шкалы, основанные на данных абсолютных измерений, выполненных с рупорными антеннами, противоречивы. Предложена новая точная абсолютная радиоастрономическая шкала, содержащая в качестве первичного эталона спектр источника Лебедя-А и 14 вторичных эталонов из каталога 3С. Приведены данные о структуре, поляризации и спектре этих источников.

Интенсивность радиоизлучения и её частотное распределение, образующее спектр, являются важнейшими характеристиками космического объекта. Радиосветимость и форма спектра дают важнейшую информацию о физических процессах внутри источника. Спектры радиоисточников распределены во всём радиодиапазоне от декаметров до миллиметров. Глубокие обзоры неба показали, что на небесной сфере насчитывается около 100 тысяч дискретных источников. Данные о зарегистрированных объектах собраны примерно в 50 каталогах, которые составлялись, начиная с 50-х годов, и пополняются до наших дней. Только обзор Огайского университета содержит около 20 тысяч радиоисточников, имеющих потоки больше $0,18 \cdot 10^{-26}$ Вт/м²·Гц на длине волны 21 см. Повидимому, в целом сейчас определены координаты и потоки 30 тысяч источников. По мощности радиоизлучения они отличаются в 10^5 раз и охватывают динамический диапазон от 10^{-3} до 10^2 единиц потока. Многие из них переменны, и характерные изменения в спектральном распределении происходят за времена от нескольких минут до нескольких лет.

Точное определение потоков и спектров радиоисточников при таком широком диапазоне многих параметров возможно на основе единой строго обоснованной шкалы интенсивностей, которую можно оперативно применять, в том числе при получении быстрого набора данных, необходимых для построения мгновенных спектров.

Прямые абсолютные измерения потоков в большинстве случаев могут быть проведены лишь для небольшого числа мощных дискретных источников — обычно для Кассиопеи А, Лебедя А и Тельца А — из-за малой площади применяемых для этой цели антенн. Поэтому при определении потока какого-либо дискретного источника он сравнивается по интенсивности с одним или несколькими эталонными источниками, содержащимися в шкале. Шкала образуется представительным набором источников с точно измеренными потоками в достаточном спектральном интервале относительно первичного стандарта. Спектр дискретного источника, играющего роль первичного стандарта потока в шкале (обычно — это Кассиопея А, Лебедь А или Телец А), строится на основе абсолютных изме-

ний. Кроме достаточной для абсолютных измерений мощности, первичный стандарт должен иметь постоянный или хорошо известный во времени спектр, малые угловые размеры, простую форму спектра и однородный окружающий фон.

Перечисленные принципы построения абсолютной шкалы интенсивностей были положены в основу уже первых работ по систематике спектров дискретных источников. В дальнейшем, по мере накопления данных, шкалы непрерывно совершенствовались в направлении повышения точности, и тем не менее широко известен тот факт, что некоторые шкалы, основываясь на одних и тех же данных абсолютных измерений, не совпадают по интенсивности на десятки процентов. Анализ ошибок при построении шкал содержится в обзоре. Так, в подавляющем большинстве опубликованных работ считалось, что указанными свойствами для первичного стандарта в наибольшей мере обладает Кассиопея А. Однако данные измерений, проводившихся с 1969 г. на радиоастрономической станции НИРФИ Кара-Даг [1, 2], показывают, что Кассиопея А имеет значительную и сложную переменность.

Новая радиоастрономическая абсолютная шкала потоков, свободная от недостатков прежних шкал, предложена и обоснована в настоящей работе. При её построении использовался метод относительных спектров, являющийся мощным средством для отбора эталонных спектров.

1. Абсолютные шкалы потоков (обзор)

Впервые систематизация спектров дискретных источников была проведена Уитфилдом [3] в 1957 году. В этой работе содержались спектры 31 источника с потоками, измеренными относительно первичного стандарта — Кассиопеи А, спектр которого был построен по данным абсолютных измерений, имевшихся к этому времени. Этот спектр представлен степенной зависимостью потока от частоты со спектральным индексом $\alpha = 0,8$.

Совершенствование техники и методов радиоастрономических измерений, увеличение точности и объема наблюдательных данных приводили к необходимости построения новых шкал, относительная точность которых возрастала.

Методика построения этих шкал принципиально не отличается от [3], однако в них часто вводятся вторичные эталоны (стандарты) потока — источники с умеренной интенсивностью, удовлетворяющие всем требова-

ниям, предъявляемым к первичному стандарту. Под умеренной интенсивностью в данном случае понимается интенсивность на 1-2 порядка меньше, чем у первичного стандарта. Как правило, такие источники слишком слабы для прямых абсолютных измерений, однако их потоки могут быть очень точно откалиброваны относительно первичного эталона. Сравнение вторичных стандартов с другими источниками, отличающимися от них по интенсивности на 1-2 порядка как в большую, так и в меньшую сторону, не приводит к ошибкам из-за нелинейности приёмника, неизбежным при прямом сравнении более слабых источников с первичным эталоном. Вторичные стандарты выбираются равномерно распределёнными по небу, что даёт возможность при сравнении с ними других источников уменьшить перемещения луча антенны и возникающие при этом ошибки из-за изменения её усиления. Кроме того, наблюдения могут проводиться в удобное время суток, исключающее воздействие Солнца.

Таким образом, применение тщательно откалиброванных по потоку вторичных стандартов даёт возможность значительно повысить относительную точность шкал.

Характеристики основных шкал, созданных после [3], ниже приводятся в хронологическом порядке.

Шкала SKL, опубликованная в 1963 году Конвеем, Келлерманом и Лонгом [4], получила быстрое и всеобщее признание. Первичным стандартом служила Кассиопея А. Спектр её был построен на основе абсолютных измерений, выполненных различными методами и опубликованных не ранее 1955 года. Он включал более 30 точек в диапазоне 16,5 МГц - 9,4 ГГц. Коррекция к эпохе 1961.0 проведена с учётом равномерного по спектру векового убывания потока Кассиопеи А на 1% в год, согласно [5]. Полученный стандартный спектр в диапазоне частот 38 МГц $\leq \nu \leq$ 3,2 ГГц удовлетворял простому соотношению

$$S_{\nu} = S_1 \nu^{-\alpha} \quad (I)$$

или

$$\lg S_{\nu} = \lg S_1 - \alpha \lg \nu, \quad (Ia)$$

где S_{ν} - поток (янски) на частоте ν , S_1 - поток при $\nu = 1$ МГц, ν - частота (МГц), α - спектральный индекс. Значения параметров спектра Кассиопеи А в шкале SKL на эпоху 1961.0 составили: $\alpha = 0,77 \pm 0,2$; $\lg S_1 = 5,789$.

В качестве калибровочных (вторичных стандартов) были предложены

семь умеренно-сильных источников с малыми угловыми диаметрами. Это - ЗС 123, ЗС 161, ЗС 196, ЗС 348, ЗС 353, ЗС 380 и ЗС 409. Их спектры были определены в диапазоне 38 - 1420 МГц относительно первичного стандарта - Кассиопеи А и считались близкими к простым степенным (что в последствии оказалось верным лишь частично). В целом работа содержит спектры 160 источников, главным образом, из каталогов ЗС и ЗСR, найдённые путём сравнения их с калибровочными источниками на частотах: 38, 178, 240, 408, 412, 710, 958, 1420 и 3200 МГц.

Работа Келлермана (К) [15] опубликована вскоре после появления шкалы СКЛ и содержит измерения потоков 238 источников на пяти частотах: 475, 710, 958, 1420 и 2841 МГц, которые проведены с помощью двухэлементного интерферометра. Абсолютная привязка шкалы К основана на спектре первичного стандарта Кассиопея А, идентичном принятому в СКЛ. В качестве вторичных эталонов было выбрано пять источников малой угловой протяжённости: ЗС 123, ЗС 348, ЗС 353, ЗС 380 и ЗС 409. При сравнении с первичным стандартом их спектры оказались близкими к степенным для частот $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1420 \text{ МГц}$. Калибровочные процедуры шкал СКЛ и К имеют небольшое отличие. В обеих работах потоки вторичных эталонов определены на ряде частот ν_i , где имелись точные сравнения их с первичным эталоном. В СКЛ именно эти значения потоков приняты в качестве стандартных на частотах ν_i , а потоки на других частотах определялись интерполяцией между ними. В [15] спектры вторичных эталонов определены подбором степенных функций для наилучшей аппроксимации экспериментальных точек. При этом значения стандартных потоков на частотах ν_i могут не совпадать с измеренными.

Шкала К не отличается от СКЛ больше, чем на 3% на каждой из частот.

В 1965 г. Баарсом, Медгером и Вендекером опубликована шкала BMW [6], где в качестве стандартных в сантиметровом диапазоне предлагаются четыре сильнейших нетепловых источника: Кассиопея А, Телец А, Лебедь А и Дева А.

Спектр первичного стандарта - Тельца А - был построен на основе абсолютных измерений этого источника, дополненных данными измерений относительно Кассиопеи А. Были получены параметры этого спектра: $\alpha = 0,247$; $\lg S_1 = 3,7295$ в диапазоне $400 \text{ МГц} \leq \nu \leq 35 \text{ ГГц}$.

Спектр Кассиопеи А строился на основе данных как абсолютных измерений различного вида, так и относительных измерений, редуцированных к эпохе 1964.4 с учётом векового уменьшения потока, принятого равным

1,1% в год. В итоге спектр состоит из двух прямых участков с изломом на частоте $\nu = 7$ ГГц. Спектры Лебеда А и Девы А найдены путём сравнения с первичным эталоном Телец А в диапазонах $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 14,5 \text{ ГГц}$ и $400 \text{ МГц} \leq \nu \leq 14,5 \text{ ГГц}$ соответственно, и играли роль вторичных эталонов. Вводилась тщательная коррекция за угловые размеры и поляризацию источников.

Шкала КРВ [7] опубликована Келлерманом, Паулини-Тосом и Вильямсом в 1969 году. Спектр первичного стандарта - Кассиопея А - строился по данным абсолютных измерений, выполненных разными методами, но с ошибкой меньше 5% и, если содержалось полное описание методики. Все измерения Кассиопеи А, а также сравнения с ней редуцированы к эпохе 1964.4, предполагая уменьшение потока этого источника 1,1% в год. Спектр Кассиопеи А представлен в диапазоне от 38 МГц до 15,5 ГГц в виде простого степенного, в отличие от [6], с параметрами $\alpha = 0,765 \pm 0,005$ и $\log S_1 = 5,787$. В качестве вторичных стандартов выбраны ЗС 218 (Нуд А), ЗС 274 (Vir А), ЗС 348 (Her А) и ЗС 353, имеющие умеренно сильные потоки и спектры, близкие к степенным в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 5 \text{ ГГц}$. КРВ содержит спектры почти всех источников ЗСР каталога (всего 315 источников), определённые относительно вторичных стандартов на частотах 38, 178, 750, 1400, 2695 и 5000 МГц. Точность взаимного сравнения источников в этой работе весьма высока, благодаря тщательному учёту их угловой структуры и поляризации, совершенству приёмной аппаратуры. Работы [8] и [9] явились продолжением шкалы КРВ на частоты 10,7 и 14,9 ГГц.

Но вскоре после появления шкалы КРВ появились сообщения о том, что эта шкала, как и более ранние, существенно занижена на частотах ниже 750 МГц. Речь идёт, прежде всего, о статье Уайли [11], где приводятся результаты абсолютных измерений пяти умеренно сильных источников на частоте 408 МГц: потоки оказались на 7% выше, чем в КРВ и на 8% и на 12%, чем в шкалах К и СКЛ соответственно. В другой работе [54] Скоттом и Шейкшафтом приведены точные измерения тридцати источников относительно Кассиопеи А и Лебеда А на частоте 81,5 МГц, у которых потоки измерены абсолютно Паркером [10]. Сравнение показало, что шкала КРВ для источников с потоками меньшими 200 ян занижена на частоте 81,5 МГц на $22 \pm 5\%$. Кроме двух названных работ были опубликованы новые данные абсолютных измерений (в том числе и на высоких частотах), уточнившие спектры Кассиопеи А и других мощных дискретных источников [19, 62, 63, 22, 23]. Опираясь на эти

результаты, в 1972 г. Баарс и Хартсуйкер предложили новую, уточнённую и определённую в более широком диапазоне частот, абсолютную шкалу потоков ВН [12]. Первичным стандартом здесь вновь избрана Кассиопея А. К этому времени стало ясно, что уменьшение потока Кассиопеи А имеет частотную зависимость. Проведя измерения в диапазоне 1-3 ГГц, авторы нашли уменьшение потока Кассиопеи А равным 0,9% в год. В то же время на частоте 81,5 МГц оно составило 1,29% в год [13]. Поэтому редукция всех абсолютных измерений, привлечённых к построению стандартного спектра Кассиопеи А, к эпохе 1965.0, сделана с учётом частотной зависимости уменьшения её потока. Следует отметить, что из отобранных 42 точек, по которым был построен этот спектр, 28 получены в НИРФИ методом "искусственной Луны"; остальные - методами эталонных антенн. Спектр Кассиопеи А в ВН аппроксимируется степенной функцией с постоянными параметрами в диапазоне $81,5 \text{ МГц} \leq \nu \leq 35 \text{ ГГц}$, равными: $\alpha = 0,787$, $\lg S_1 = 5,864$ на эпоху 1965.0.

Кроме Кассиопеи А, шкала ВН включает в себя спектры Тельца А, Лебедя А и Девы А; первые два построены как на основании данных абсолютных измерений, так и путём сравнения с Кассиопеей А. Спектр Девы А, являющейся вторичным стандартом, построен в диапазоне $400 \text{ МГц} \leq \nu \leq 15 \text{ Гц}$ по 10 точным измерениям относительно остальных трёх источников. Сравнение шкал КРВ и ВМВ с ВН показывает, что последняя даёт более высокие потоки на частотах ниже 3000 МГц; выше 3000 МГц ситуация обратная. Шкала ВН считается определённой в диапазоне $100 \text{ МГц} \leq \nu \leq 20 \text{ ГГц}$.

Всего лишь через год, в 1973 году, опубликована ещё одна работа - "К калибровке потоков и определению спектров на радиочастотах", Уиллс [14] (W). Построение этой шкалы не имеет принципиальных отличий от КРВ, хотя и содержит ряд особенностей. Первичный стандарт - Кассиопея А, его спектр строится на основе данных тех же работ по абсолютным измерениям, что и ВН, однако из массива точек, полученных методом "искусственной Луны", использована лишь часть. Автор отмечает, что спектральный индекс Кассиопеи А для данных, полученных этим методом, заметно отличается (он больше) от соответствующей величины для совокупности всех абсолютных измерений, и селекция точек по методу "искусственной Луны" делается для уменьшения их веса в результирующем спектре; однако принцип этой селекции в работе не указан.

Вековое уменьшение потока Кассиопеи А, принятое равным 1,3% в год, равномерно на всех частотах. Параметры спектра первичного стандарта

на эпоху 1964.4 составили: $\alpha = 0,763 \pm 0,006$; $\text{tg } S_1 = 5,784 \pm 0,0043$.

Для построения абсолютной шкалы потока ряда источников, играющих в этой работе роль вторичных стандартов, были найдены на нескольких частотах из прямых сравнений с первичным эталоном - Кассиопея А. Определив спектры этих же источников в подвергнутой предварительному сглаживанию шкале К [15], автор нашла корректирующий множитель в виде степенной функции частоты для приведения этой шкалы в соответствие с предлагаемым первичным эталоном. Из степенной зависимости корректирующего множителя от частоты следует, что степенная форма спектров при переходе к окончательной абсолютной шкале сохранилась.

Необходимо подчеркнуть, что калибровочные процедуры, применённые в построении шкалы W, не привели к большим отличиям от её прообразов - шкалы К.

Все измерения, использованные в работе [14], корректировались за угловое разрешение источников и их поляризацию. Шкала Уиллс охватывает диапазон частот $81 \text{ МГц} \leq \nu \leq 8000 \text{ МГц}$. Потоки, даваемые этой шкалой, существенно отличаются от КРВ и ВН. Сравнение W и ВН показывает их сильное расхождение, зависящее к тому же от частоты:

$$\left(\frac{S_W}{S_{ВН}} \right)_{178 \text{ МГц}} = 0,932; \quad \left(\frac{S_W}{S_{ВН}} \right)_{750 \text{ МГц}} = 0,968.$$

Следует иметь в виду, что шкалы ВН и W опираются на одни и те же работы, содержащие абсолютные измерения. Данное сравнение - наглядный пример того, что неопределённость шкал [12] и [14] может существенно превышать приведённые в них ошибки, а результат подвержен воздействию способа селекции исходных данных.

В 1973 - 1975 гг. в работах [1, 47, 30] сообщались новые экспериментальные данные о скорости уменьшения потока Кассиопея А, из которых следует зависимость этой величины от частоты. Новые абсолютные измерения потоков Кассиопея А и других источников были представлены в диапазоне 0,5 - 10 ГГц [1], а также на частоте 22, 285 ГГц [24] и на 26,3 МГц [35].

Эти результаты нашли отражение в работе Баарса, Генцеля, Паулини-Тоса и Витцеля [16], опубликованной в 1977 г., в которой построена новая абсолютная шкала потоков ВРВ. Методика её построения не имеет принципиальных отличий от аналогичных работ, опубликованных ранее. Первичный стандарт - Кассиопея А, спектр её вновь был синтезирован по данным абсолютных измерений, выполненных разными методами в диа-

пазоне от 22 МГц до 31 ГГц. В диапазоне $0,3 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$ этот спектр оказался прямым.

Скорость уменьшения потока, d , принята частотно-зависимой в виде

$$d(\nu) [\% \text{ в год}] = a - b \lg \nu [\text{ГГц}], \quad (2)$$

где $a = 0,97 \pm 0,04$; $b = 0,3 \pm 0,04$.

Параметры стандартного спектра на эпоху 1965.0 в диапазоне $0,3 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$: $\alpha = 0,792 \pm 0,007$; $\lg S_1 = 5,83 \pm 0,025$.

На эпоху 1980.0 те же параметры: $\alpha = 0,77 \pm 0,007$; $\lg S_1 = 5,745 \pm 0,025$. Ниже 300 МГц спектр искривляется. Следует отметить, что при синтезе этого спектра вместе с различными другими были использованы и данные НИРФИ, полученные методом "искусственной Луны"; однако отбор этих данных сделан очень произвольно. Отброшены все измерения, опубликованные до 1969 года, а также данные работ [1] и [18], содержащих более протяжённые участки спектра, чем, например, [19], используемая в BCPW. Основные мотивы, выдвинутые авторами для обоснования селекции, заключается в следующем:

1. Редукция спектров НИРФИ на более ранние эпохи, согласно выражению (2), показывает, что расхождение прямо измеренных и редуцированных спектров превышает ошибки измерений;

2. Спектральный индекс, полученный только по данным НИРФИ, всегда существенно больше, чем по всей совокупности абсолютных измерений.

Отсюда авторы BCPW делают вывод о присутствии в измерениях НИРФИ частотно-зависимых систематических ошибок (хотя это предположение нигде не обосновано) и уменьшают число точек НИРФИ, отобранных для построения своего спектра Кассиопеи А.

Кроме спектра Кассиопеи А по данным абсолютных и относительных измерений построены также спектры Тельца А и Лебеда А. Параметры этих спектров:

$$\begin{aligned} & \text{Телец А:} \\ 1 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 35 \text{ ГГц}; & \quad \alpha = 0,299 \pm 0,009; \quad \lg S_1 = 3,915 \pm 0,031; \\ & \text{Лебедь А:} \\ 2 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}; & \quad \alpha = 1,244 \pm 0,014; \quad \lg S_1 = 7,161 \pm 0,053. \end{aligned}$$

Ниже 2 ГГц спектр Лебеда А предполагается плавно загибающимся вниз.

Система вторичных стандартов, включающая 14 умеренно-сильных источников с простыми спектрами, определена в диапазоне $400 \text{ МГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$. До 31 ГГц определены спектры двух тепловых источников: DR-21

и NGC7027, остальные спектры определены в меньшем частотном интервале. Особое место среди вторичных стандартов занимает Дева А, спектр которой, названный авторами "полуабсолютным", построен на основе прямых сравнений с тремя сильнейшими источниками. Точные отношения потоков Девы А и Кассиопеи А, Тельца А, Лебедя А на частотах $0,4 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 22, 285 \text{ ГГц}$ были заимствованы из работ [6-9, 12, 24]. Отмечена особенность этого источника: вклад гало в общий поток на частотах выше 1 ГГц быстро убывает из-за увеличения спектрального индекса. На 5 ГГц излучение гало составляет около 10% от полного; выше этой частоты спектральный индекс гало $\alpha_r \approx (3 + 4)$; на 10 ГГц гало излучает около 1%, и угловые размеры источника становятся меньше угловой минуты. Размер гало Девы А на 1,4 ГГц составляет $400''$.

Дева А предлагается в качестве хорошего микроволнового стандарта, её спектр, считающийся в BCPW степенным, определён в диапазоне $400 \text{ МГц} \leq \nu \leq 25 \text{ ГГц}$: $\alpha = 0,856 \pm 0,01$ и $\log S_1 = 5,023 \pm 0,034$. Угловые размеры вторичных стандартов в BCPW различны: от $1''$ (3С 48, 3С 147, 3С 286) до $50 + 200''$ (3С 218, 3С 227, 3С 348, 3С 353).

В работе приводится сравнение с более ранними шкалами по спектру первичного стандарта - Кассиопеи А, и даются коэффициенты для приведения этих шкал на нескольких частотах к BCPW. Вновь можно наблюдать существенные отличия новой шкалы от её ближайших предшественников: ВН и W, выходящие за пределы ошибок. Для иллюстрации приведём табл. 7 из [16], здесь - это табл. I.

Шкала BCPW сейчас наиболее широко применяется в радиоастрономических измерениях во всём мире.

Почти одновременно с BCPW, также в 1977 году, была опубликована работа Алтунина, Иванова, Станкевича - "Эталонные источники для калибровки потоков и определения параметров антенн радиоастрономическими методами" [17].

Принципиальное отличие шкалы АИС [17] от других состоит в том, что спектры её первичных стандартов основаны только на абсолютных измерениях методом "искусственной Луны".

Шкала АИС перекрывает диапазон частот $25 \text{ МГц} \leq \nu \leq 100 \text{ ГГц}$. В разных частотных интервалах первичными эталонами радиоизлучения служили Кассиопея А, Лебедь А и Эпитейр, поскольку ни один из них не может выполнять эту функцию во всём диапазоне.

На частотах $25 \text{ МГц} \leq \nu \leq 10 \text{ ГГц}$ первичным эталоном являлась Кассиопея А. Параметры её спектра были получены из абсолютных измерений,

Т а б л и ц а I

Частота, МГц	СКЛ	K	KPW	BMW	ВН	W
38	1,029	0,979	0,981		0,88	0,976
81,5	1,074	1,021	1,02		0,935	1,013
178	1,11	1,054	1,051		0,974	1,042
400	1,129	1,074	1,065	1,08	1,007	1,048
750	1,114	1,059	1,046	1,044	1,004	1,035
1400	1,099	1,038	1,029	1,015	1,000	1,017
2700	1,083	1,03	1,011	0,981	1,000	0,997
5000	1	1,016	0,993	0,951	1,000	0,979
10600		1,000	0,974	1,065	0,99	0,949
15000			0,966	1,218	0,989	0,949

проведённых, в диапазоне 0,5 + 10 ГГц методом "искусственной Луны" на Кара-Даге в 1973 году. Измеренный спектр оказался прямым, а его продолжение до частот декаметрового диапазона при неизменных параметрах α и $\lg S_1$ показало хорошее соответствие с результатами измерений на УТР-I в Харькове [32]. Поэтому в работе [17] было принято, что спектр Кассиопеи А прямой в диапазоне частот 25 МГц $\leq \nu \leq$ 10 ГГц и удовлетворяет соотношению (Ia) с параметрами: $\alpha = 0,793$; $\lg S_1 = 5,8235$ на эпоху 1973.8.

Как и ранее [1], в [17] отмечен сложный характер переменности Кассиопеи А: для приведения спектра этого источника к более ранним эпохам принята упрощенная зависимость потока от времени с убыванием его на 0,9% в год на всех частотах. Эта величина была получена, как средняя по диапазону на основе многолетних измерений.

С повышением частоты роль первичного стандарта переходила к Лебеду А, имеющему меньшие угловые размеры. Спектр его в диапазоне 6 ГГц $\leq \nu \leq$ 20 ГГц также считался линейным с параметрами $\alpha = 1,241$; $\lg S = 7,0833$, полученными из абсолютных измерений методом "искусственной Луны" на Кара-Даге. На частотах, превышающих 20 ГГц, первичным стандартом становился Юпитер с $T_{\text{я}} = 137 \pm 5$ (°К) на частоте $\nu = 35$ ГГц.

Выбор вторичных эталонов в [17] производился на основании следующих требований:

I. Постоянство потока во времени.

2. Точно измеренный относительно первичного стандарта спектр.
3. Достаточная интенсивность на частотах, где они применяются как стандарты.

4. Угловые размеры $\leq 1'$.

5. Степень линейной поляризации меньше 10%.

В результате проведённого анализа оказалось, что один набор источников не может удовлетворить всем перечисленным требованиям в интервале длин волн от декаметров до миллиметров, поэтому в [17] сформированы три набора источников для трёх диапазонов частот.

В диапазоне $25 \text{ МГц} \leq \nu \leq 200 \text{ МГц}$ в качестве вторичных эталонов отобраны источники: ЗС 9, 28, 161, 196, 1, 218, 226, 238, 317, 404, 433. Все эти источники удовлетворяют требованию: $S_{(125 \text{ МГц})} \geq 150 \text{ гц}$.

Отбор вторичных эталонов по интенсивности в диапазоне $0,2 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 6 \text{ ГГц}$ проведён согласно требованию: $S_{(1 \text{ ГГц})} \geq 10 \text{ ян}$. Список вторичных эталонов представлен источниками: ЗС 20, 119, 123, 138, 147, 161, 196, 218, 295, 409, 433. Диапазон $0,2 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 6 \text{ ГГц}$ следует считать наиболее важной частью работы [17], поскольку значительное большинство частот, на которых методом "искусственной Луны" измерялись потоки Кассиопеи А, находится в этом диапазоне.

На частотах выше 6 ГГц вторичными эталонами стали 5 источников с достаточно большой интенсивностью на $\nu = 10 \text{ ГГц}$. Это - ЗС 123, ЗС 147, ЗС 218, DR-21, NGC7027.

Во всех трёх диапазонах одним из вторичных эталонов был источник ЗС 218 Гидра А, имеющий значительные угловые размеры, однако его присутствие оправдано тем, что он является основным эталоном южного полушария.

Сравнение [17] с другими шкалами показало, что потоки первичного эталона в SKL, KPW и ВН на волнах короче 6 см на 10-15% выше, чем в [17]; на волнах длиннее 30 см шкала [17] по интенсивности выше других: на частоте $\nu = 408 \text{ МГц}$ [17] выше SKL на 14%, а KPW - на 7%.

Столь значительное отличие АИС от всех других шкал является следствием различия методик получения спектров первичных эталонов. На примере Кассиопеи А видно, что параметры спектров, измеренных только методом "искусственной Луны", и спектров, синтезированных по абсолютным измерениям разных видов, существенно различны.

Работа [17] показала, что проблема построения точных абсолютных шкал на получила окончательного решения. Требовался дальнейший тщательный анализ ошибок, которые могли бы возникнуть при построении

шкал. Остановимся на некоторых предположениях, положенных, без достаточного обоснования, в основу процедуры построения шкал.

1. Во всех работах важнейшее место занимает Кассиопея А — первичный стандарт шкал потоков. Между тем многолетние исследования на радиоастрономической станции НИРФИ Кара-Даг выявили у этого источника сложную переменность. Исследования проводились путём многократных абсолютных измерений спектра Кассиопеи А методом "искусственной Луны". Как известно, метод основан на взаимном сравнении радиоизлучений источника и "чёрного" диска, радиопоток которого известен на любой частоте.

Для определения спектра Кассиопеи А в заданную эпоху проводилась серия измерений на многих частотах, распределённых в широком диапазоне. Продолжительность одной серии составляла 3—4 месяца, что позволяет считать полученные спектры мгновенными.

Начало исследованиям на Кара-Даге было положено в 1962 году. С 1969 года по настоящее время измерения спектров выполнялись регулярно через 2 года на 25 частотах, повторяемых во всех сериях и распределённых в диапазоне 0,5 — 10 ГГц. Благодаря высокой точности измерения отношений "источник/диск" и постоянству условий эксперимента во всех сериях наблюдений, удалось проследить временные вариации спектра Кассиопеи А в исследуемом диапазоне частот и найти их основные закономерности. Приведены в единую систему все результаты наблюдений на Кара-Даге за период времени более, чем 20 лет. Из всего материала следует вывод, что переменность Кассиопеи А значительно сложнее, чем вековое убывание потока в виде (2), даже если постоянная $b \neq 0$. Вариации потока на некоторых частотах могут достигать нескольких процентов за время меньше года. Поэтому редукция мгновенных спектров Кассиопеи А, измеренных в разное время, к одной эпохе с помощью выражения (2) не приводит к их совпадению, что видно на примере работы [16].

2. За исключением [17], стандартные спектры первичного эталона Кассиопея А составлялись всегда на основе всех абсолютных измерений, выполненных разными методами в разное время. Но необходимо рассмотреть вопрос о взаимной совместимости этих измерений между собой, поскольку спектральные индексы, полученные в однородных сериях измерений в широком диапазоне частот методом "искусственной Луны", отличаются от значений α в синтезированных спектрах.

3. В [17] спектр Кассиопеи А измерен в короткий промежуток вре-

мени единым методом "искусственной Луны" в интервале частот $\cdot 0,5 + 10$ ГГц. Однако продолжение его за пределы этих частот и редукция к более ранним эпохам оказались грубыми.

Из сказанного следует, что возникла важнейшая задача разработки чётких критериев, позволяющих оценить правильность спектров источников, составляющих абсолютную шкалу потоков.

2. Метод относительных спектров

Метод, позволяющий с высокой точностью определить спектры нескольких источников в широком диапазоне частот $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, имея данные абсолютных измерений лишь в части этого диапазона и относительные измерения этих источников во всём диапазоне, предложен Ивановым [25] и назван методом относительных спектров. Метод состоит в следующем.

Сравнение интенсивностей некоторых источников - относительные измерения - выполнены с высокой точностью, в широком интервале длин волн - от дециметров до миллиметров. Результаты относительных измерений содержатся во многих опубликованных работах, в частности, в упомянутых уже в настоящем обзоре шкалах потоков [7-9, 12, 14, 16] и др.

Если отношения потоков двух источников измерены в некотором частотном интервале, то логарифм отношения потоков представляет собой разность спектров этих источников, построенных в логарифмическом масштабе:

$$\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}} = \lg S_{u1} - \lg S_{u2}. \quad (3)$$

Зависимость $\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}}$ от $\lg \nu$ далее всюду называется относительным спектром.

Оба спектра сравниваемых источников можно представить в виде

$$\begin{aligned} \lg S_{u1} &= \lg S_{11} - \alpha_1 \lg \nu + f_1(\lg \nu), \\ \lg S_{u2} &= \lg S_{12} - \alpha_2 \lg \nu + f_2(\lg \nu), \end{aligned} \quad (4)$$

где $f_1(\lg \nu)$ и $f_2(\lg \nu)$ - некоторые функции частоты.
Тогда

$$\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}} = \lg \frac{S_{11}}{S_{12}} - (\alpha_1 - \alpha_2) \lg \nu + [f_1(\lg \nu) - f_2(\lg \nu)] \quad (5)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи вида относительного спектра в зависимости от функций f_1 и f_2 .

1. Если спектры обоих источников имеют одинаковую кривизну и особенности, т.е.

$$f_1(\lg \nu) \equiv f_2(\lg \nu) \quad \text{при } \nu_1 \leq \nu \leq \nu_2 \quad (6)$$

то, как следует из (5), график зависимости $\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}}$ от $\lg \nu$ будет прямой линией.

2. В общем случае выполнение условия (6) для случайно выбранной пары источников кажется маловероятным. Если в некотором интервале $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$ относительный спектр (5) изображается прямой, то почти всегда выполняется более жесткое, чем (6), условие

$$f_1(\lg \nu) \equiv f_2(\lg \nu) = 0, \quad \nu_1 \leq \nu \leq \nu_2. \quad (7)$$

В этом случае спектры обоих источников удовлетворяют равенству (1а) и являются степенными на данном частотном интервале.

3. Один из источников в интервале $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$ имеет прямой спектр, а спектр второго источника, также всюду линейный, терпит излом в точке $\nu = \nu_n$, где у него скачком, на величину $\Delta\alpha$, меняется спектральный индекс.

Тогда

$$f_1 = \begin{cases} 0, & \nu_1 \leq \nu \leq \nu_n \\ -\Delta\alpha \lg \frac{\nu}{\nu_n}, & \nu_n \leq \nu \leq \nu_2 \end{cases}, \quad (8)$$

$$f_2 \equiv 0.$$

Следовательно

$$\lg S_{u1} = \begin{cases} \lg S_{11} - \alpha_1 \lg \nu, & \nu_1 \leq \nu \leq \nu_n \\ \lg S_{11} + \Delta\alpha \lg \frac{\nu}{\nu_n} - (\alpha_1 + \Delta\alpha) \lg \nu, & \nu_n \leq \nu \leq \nu_2 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lg S_{u2} = \lg S_{12} - \alpha_2 \lg \nu$$

$$\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}} = \begin{cases} \lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}} - (\alpha_1 - \alpha_2) \lg \nu, & \nu_1 \leq \nu \leq \nu_n \\ \lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}} + \Delta \alpha \lg \nu - (\alpha_1 + \Delta \alpha - \alpha_2) \lg \nu, & \nu_n \leq \nu \leq \nu_2 \end{cases} \quad (10)$$

Как ясно из (10), в этом случае относительный спектр, также оставаясь линейным, терпит излом, и изменение спектрального индекса в точке $\nu = \nu_n$ равно $\Delta \alpha$. Если решается обратная задача, то по излому в относительном спектре можно судить о наличии аналогичной особенности в спектре одного из сравниваемых источников. Но какого именно? На этот вопрос можно ответить вполне определённо, если в сравнении участвует не два источника, а значительно большее их количество.

Предположим, что построен график $\lg \frac{S_{u1}}{S_{u2}}$, имеющий излом на той же частоте ν_n и меняющий спектральный индекс на ту же величину $\Delta \alpha$, что и график $\lg \frac{S_{u1}}{S_{u3}}$, тогда очевидно, что излом принадлежит спектру S_{u1} . Поскольку для каждого из источников группы сравнения характерны свои особенности спектра, появляющиеся на определённых для каждого источника частотах, то, повторяясь во всех спектрах отношений данного источника с другими, эти особенности выявляются вполне определённо. Иначе говоря, система относительных спектров позволяет определять все функции f_1, f_2, \dots, f_n , где n — число источников сравнения. Кроме того, при большом n практически устраняется неопределённость выбора между пунктами 1 и 2 в определении вида функции f_n , возникающая в случае линейности части относительных спектров.

Предположим теперь, что в некотором интервале частот $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$, где $\nu_1 \geq \nu_{\min}$, а $\nu_2 \leq \nu_{\max}$, спектр одного источника из группы сравнения определён путём абсолютных измерений. Пусть, для определённости, этот источник с номером 1, и в данном интервале частот его спектр является прямым (это условие не необходимо), т.е. известны параметры α_1 и $\lg S_{11}$. Тогда, зная функцию f_1 , из анализа относительных спектров в интервале частот $\nu_{\min} \leq \nu \leq \nu_{\max}$ можно аналитически продолжить спектр на весь частотный интервал $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$ по известному уже закону, согласно выражению (4).

Поскольку полученный спектр является абсолютным, а абсолютные измерения в интервале $[\nu_1, \nu_2]$ проведены каким-либо одним методом (например, методом "искусственной Луны"), то все абсолютные измере-

ния, выполненные разными методами и попадающие в интервал $[\nu_{\min}, \nu_{\max}]$, могут быть сопоставлены между собой. Источник, абсолютный спектр которого построен таким образом, будем считать первичным стандартом. Спектры остальных источников легко определяются с помощью отношений к первичному стандарту.

По сравнению с другими методами абсолютных измерений метод "искусственной Луны" имеет большие преимущества по ряду важнейших характеристик: точности измерений, ширине перекрываемого диапазона частот, возможности получать в этом диапазоне "мгновенные" спектры с малыми частотными интервалами между соседними точками. Поэтому параметры спектров, полученных методом "искусственной Луны", намного точнее, чем по другим абсолютным измерениям. В этом случае точность построения абсолютных спектров с помощью предлагаемого метода — очень высока, поскольку она определяется двумя видами точных измерений: источников относительно друг друга и абсолютных измерений спектра первичного стандарта методом "искусственной Луны". Но необходимо отметить, что метод "искусственной Луны" не является единственно возможным.

3. Выбор первичного стандарта и источников группы сравнения

Для достижения большой точности в определении параметров относительных спектров должно быть достаточное число точек в каждом из них. С этой целью необходимо использовать результаты относительных измерений, накопленные за длительный срок, что делает невозможным применение переменных источников для получения относительных спектров. Ранее уже говорилось о значительной переменности Кассиопей А; учитывая, что радиоизлучение Крабовидной туманности также переменное [26-28], единственным источником, пригодным для роли первичного стандарта, является радиогалактика Лебедь А. Постоянство радиоизлучения этого источника отмечено во многих работах, в том числе, показано многолетними наблюдениями на Кара-Даге в сравнении с "чёрным" диском.

Поведение спектра Лебеда А в зависимости от частоты в диапазоне $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 30 \text{ ГГц}$ определено методом относительных спектров. С этой целью была подобрана группа источников сравнения, в которую вошли ЗС 123, ЗС 218, ЗС 274, ЗС 348, ЗС 353. У этих источников не замечена переменность, они чаще, чем другие, сравнивались между собой. Большим преимуществом ЗС 123 является малая угловая протяжённость;

ЗС 218, ЗС 274, ЗС 348 и ЗС 353 - вторичные стандарты КРВ, где их спектры считались прямыми в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 5000 \text{ МГц}$. Отношения потоков пар, составленных из этих источников на разных частотах и в разных комбинациях, были найдены по данным работ [4, 6-8, 12, 24, 29, 31, 32, 43-61].

Относительные спектры приведены на рис. I-4.

Анализ относительных спектров этих источников приводит к следующим результатам.

а) Спектр Лебедя А состоит из трёх характерных участков. Обозначив S_{ν_i} - поток, ν - частота (МГц), α - спектральный индекс, $i = 1, 2, 3, \dots$ - номер частотного интервала, можно выразить спектр на каждом участке с помощью соотношений

$$1) 10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 463,5 \text{ МГц}$$

$$\lg S_{\nu_1} = \lg S_{11} - \alpha_1 \lg \nu - \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^\delta,$$

$$\alpha_1 = 8, \quad \delta = 2,167.$$

На участке $i = 1$ спектр искривлён, наблюдается завал на низких частотах, задаваемый третьим слагаемым.

$$2) 463,5 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1832,5 \text{ МГц},$$

$$\lg S_{\nu_2} = \lg S_{12} - \alpha_2 \lg \nu,$$

$$\alpha_1 - \alpha_2 = 0,327.$$

На участке $i = 2$ спектр прямой. На частоте 463,5 МГц, разделяющей участки 1 и 2, в спектре есть излом, где α меняется на 0,327.

$$3) 1.832 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 30 \text{ ГГц},$$

$$\lg S_{\nu_3} = \lg S_{13} - \alpha_3 \lg \nu,$$

$$\alpha_3 - \alpha_2 = 0,193.$$

На частоте 1832 МГц - излом, где α меняется на 0,193, а выше спектр прямой до частот более 30000 МГц.

Из четырёх источников - вторичных стандартов КРВ лишь один - ЗС 348 (Геркулес А) - имеет прямой спектр в диапазоне $12,6 \text{ МГц} \leq \nu \leq 10,7 \text{ ГГц}$. Однако спектры оставшихся трёх источников также достаточно просты и состоят из двух прямолинейных участков каждый.

Спектр ЗС 218 (Гидра А) имеет излом в точке $\nu = 1880 \text{ МГц}$, где α меняется на 0,124. Это случай, когда крутизна спектра уменьшается с ростом частоты.

Линейность спектра Девы А (ЗС 274) подбиривалась во многих ра-

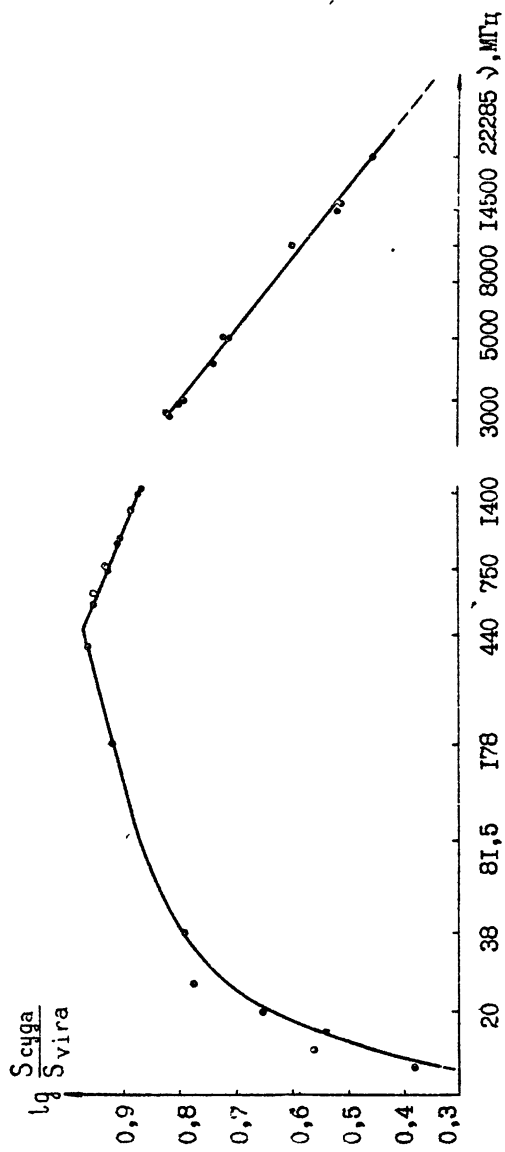
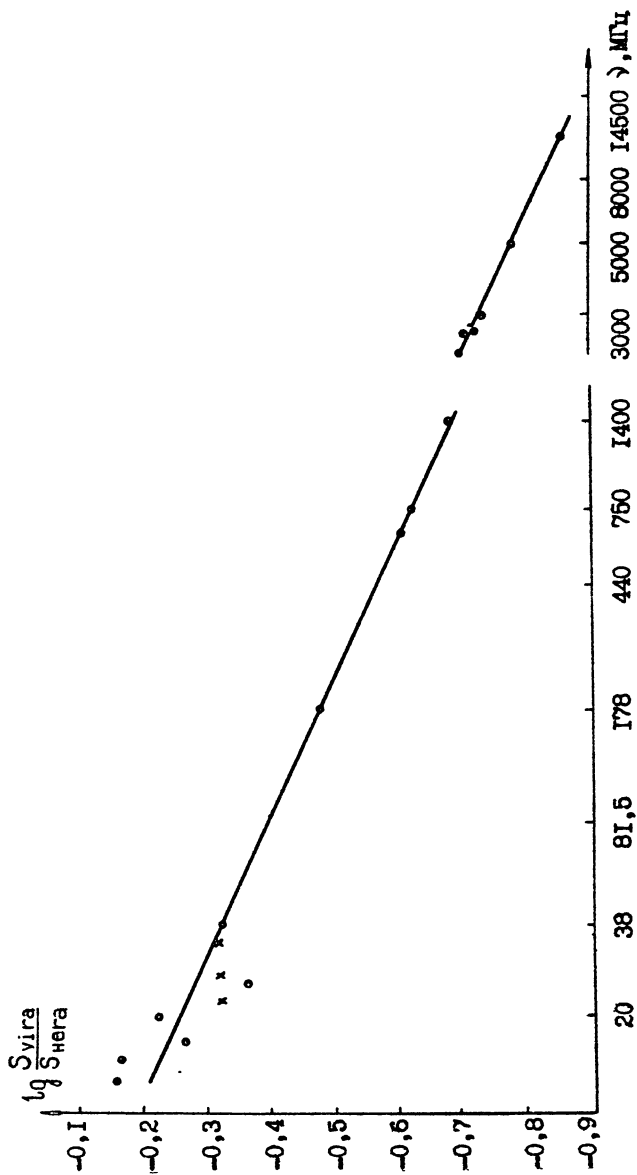
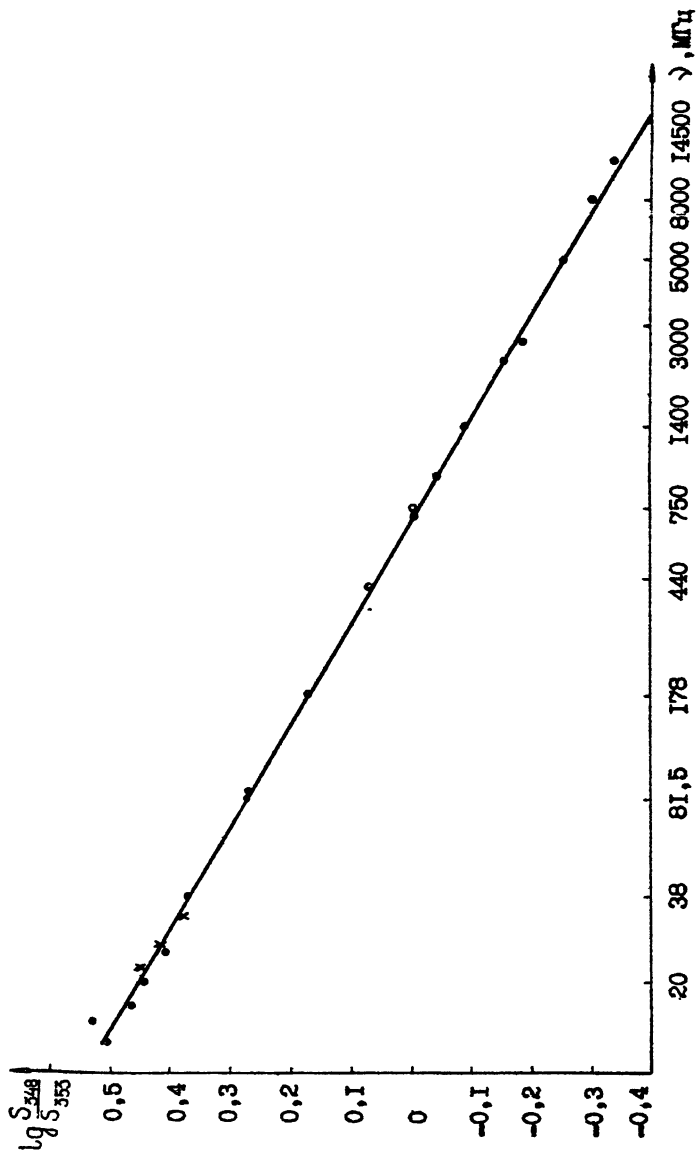


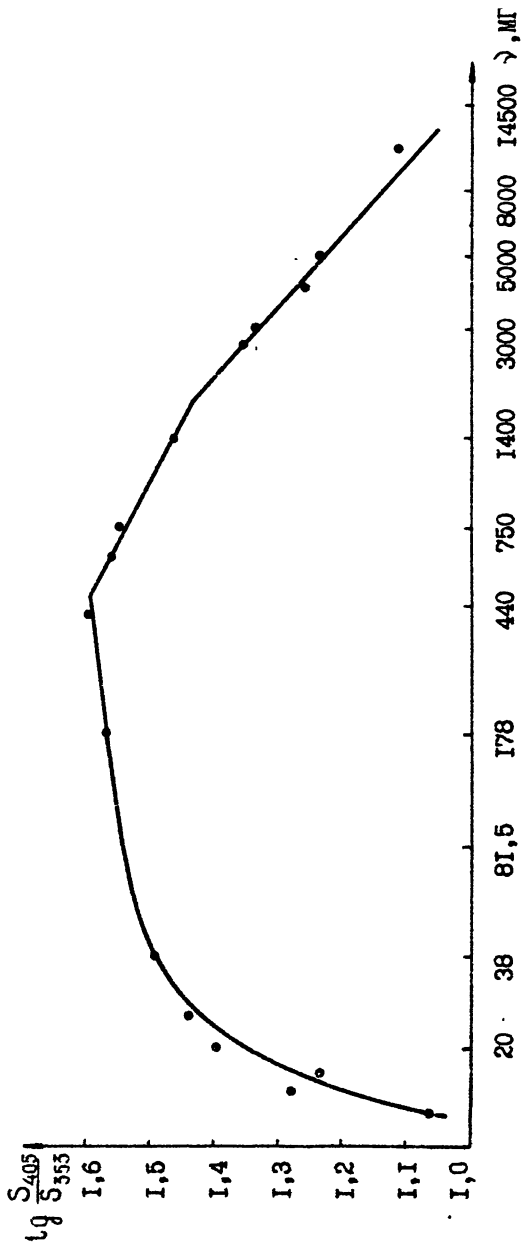
Рис. I



Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4

ботах. Как уже отмечалось, в ВОРВ [16] этот спектр считается линейным в диапазоне $0,4 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 25 \text{ ГГц}$. Тем более интересен результат, полученный в [25] методом относительных спектров: спектр Девы А состоит из двух прямолинейных участков, один - на частотах $178 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1420 \text{ МГц}$, второй - в интервале $2295 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ (и, вероятно, выше). Спектральные индексы обоих участков равны в пределах ошибок, однако продолжение низкочастотной ветви на более высокие частоты привело бы к завышению потока на 10%. Измерений в интервале $1420 \text{ МГц} \leq \nu \leq 2295 \text{ МГц}$ нет. В целом, сложный характер спектра Девы А может быть объяснен комбинацией спектров гало и ядра источника по данным работы ВОРВ [16].

3С 353 имеет спектр, состоящий в диапазоне $12,6 \text{ МГц} \leq \nu \leq 10,7 \text{ ГГц}$ из двух линейных участков с изломом на частоте $\nu_n = 4615 \text{ МГц}$. Изменение спектрального индекса на частоте излома $\Delta\alpha = 0,043$, крутизна возрастает с ростом частоты, как и у подавляющего большинства источников.

Лебедь А, выбранный здесь в качестве первичного стандарта, имеет достаточную мощность для прямых абсолютных измерений методом "искусственной Луны". Однако он расположен в области неба с ярким и неоднородным фоном. Поэтому точность прямых абсолютных измерений Лебеда А при малом угловом разрешении оказалась не достаточной, исключение составляет лишь результат на $\lambda = 3 \text{ см}$. Поэтому при получении спектра Лебеда А в диапазоне $0,9 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 23 \text{ ГГц}$ применялось сравнение его при достаточно высоком угловом разрешении с Кассиопеей А, спектр которой измерялся в ту же эпоху методом "искусственной Луны" в диапазоне $0,5 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 10 \text{ ГГц}$. Отношения потоков Лебеда А и Кассиопеи А были получены в работах, перечисленных в табл. 2. Поток на частоте 9800 МГц - результат прямых абсолютных измерений методом "искусственной Луны".

Из спектров, полученных на Кара-Даге, потоки Кассиопеи А определяются со случайной ошибкой не более 1%. Точность относительных измерений приведена вместе с отношениями потоков $S_{\text{Леб.}}/S_{\text{Касс.}}$ взятых из оригинальных работ [12, 24, 29, 30].

График $\lg S_{\nu, \text{Леб.}}$ в зависимости от $\lg \nu$, построенный в диапазоне $2667 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ по данным табл. 2, очень хорошо представляется прямой линией с незначительным разбросом экспериментальных точек. Тот факт, что этот источник на частотах выше $\nu_n = 1632 \text{ МГц}$ должен иметь именно такую форму спектра, следует из анализа относи-

тельных спектров. В связи с этим следует отметить, что на частоте

Т а б л и ц а 2

Потоки Лебея А, полученные из отношения $S_{\nu} \text{ Леб.} / S_{\nu} \text{ Касс.}$

Частота, : МГц :	$(S_{\nu})_{\text{Леб.}}$: $(S_{\nu})_{\text{Касс.}}$:	$(S_{\nu})_{\text{Леб.}}$: ян :	Эпоха : измерений :	Ссылка :
935	$0,7904 \pm 0,0025$	2305	1981.4	Иванов, Бубукин, Станкевич [29]
1420	$0,687 \pm 0,002$	1492,6	1971.6	ИИ [12]
2667	$0,5525 \pm 0,002$	721	1971.6	ИИ [12]
8000	$0,356 \pm 0,002$	185,9	1969	Дент и др. [30]
9800	Абсолютн.	$147 \pm 2,5$	1971, 1979, 1980	
22285	$0,221 \pm 0,005$	52,6	1973	Джансен и др. [24]

22285 МГц поток Лебеда А определён из отношения $S_{\nu} \text{ Леб.} / S_{\nu} \text{ Касс.}$ по данным [24] и по потоку Кассиопеи А, взятому из линейного продолжения спектра этого источника выше диапазона $0,5 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 10 \text{ ГГц}$, где он был измерен в ту же эпоху методом "искусственной Луны"; правильность положения точек на спектре Лебеда А говорит о линейности спектра Кассиопеи А в 1973 году во всём диапазоне $0,5 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 22,285 \text{ ГГц}$.

Абсолютный спектр Лебеда А в диапазоне $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 30 \text{ ГГц}$ построен на основе относительных спектров и спектра по данным табл.2, имеющего абсолютную привязку к методу "искусственной Луны". Параметры стандартного спектра Лебеда А приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Параметры спектра первичного стандарта Лебедь А

Номер i : частот- ного ин- тервала :	ν_{min} : МГц :	ν_{max} : МГц :	Спект- ральный : индекс :	$\lg S_{i1}$: ян :	δ :	γ , МГц :
1.	10	463,5	0,713	5,58	2,167	8,652
2.	463,5	1832	1,04	6,452	-	-
3.	1832,5	30000	1,233	7,082	-	-

4. Вторичные эталоны

Требования к источникам, применяемым в качестве вторичных эталонов, и список отобранных для этого источников приведены в работе [26]. Вторичные стандарты, как уже отмечалось, должны иметь

1. постоянный во времени поток,
2. точно измеренный относительно первичного стандарта спектр,
3. умеренную интенсивность, позволяющую при измерениях не выходить за пределы линейности аппаратуры, но достаточную для высокоточного сравнения с первичным стандартом,
4. малые угловые размеры,
5. степень линейной поляризации меньше 10%.

Остановимся кратко на некоторых пунктах требований к отбираемым источникам.

Спектр эталонного источника в идеальном случае должен быть прямым во всём диапазоне. Однако на практике такие спектры встречаются достаточно редко, и случай линейного в диапазоне $12,6 \text{ МГц} \leq \nu \leq 10,7 \text{ ГГц}$ спектра источника ЗС 348 - Геркулес А - представляется скорее исключением, чем обычным явлением. Отказ от требования линейности спектра во всём диапазоне и данная здесь формулировка п. 2 вызваны ограниченностью выбора источников.

На первом этапе отбора источников в работе [17] критерии 3 и 4 были установлены более жёстко, чем в окончательной формулировке и выглядели так:

3. поток на $\nu = 1 \text{ ГГц}$, $S(1 \text{ ГГц}) \geq 10 \text{ ян}$,
4. угловые размеры $\leq 1'$.

Тогда вторичные эталоны были отобраны в результате полной выборки из каталогов ЗСР [33] и ЗС [34].

Как известно, каталог ЗС полон для источников с потоками $S(178 \text{ МГц}) \geq 8 \text{ ян}$, т.е. это каталог наиболее сильных нетепловых радиоисточников со склонениями $\delta \geq -5^\circ$. Следовательно, выборка из этого каталога гарантирует полноту отбора "сильных" вторичных эталонов, пригодных для калибровки на широтах $\varphi \geq 40^\circ$. Около 30% источников ЗС имеют угловые размеры меньше $1'$, и у них не было обнаружено переменности потока [17]. Из них были отобраны сильные - с потоками $S(1 \text{ ГГц}) \geq 10 \text{ ян}$ и однородным фоном в близлежащей области. Таких источников оказалось всего девять: ЗС 20, ЗС 119, ЗС 123, ЗС 138, ЗС 147, ЗС 196, ЗС 295, ЗС 409 и ЗС 433. Позднее при сопостав-

лении разных измерений источника ЗС 20, возникли соображения об его переменности, и он был исключён из списка. Не выходя за рамки поставленных условий, удалось пополнить список лишь одним источником из ЗС - ЗС 161. Поэтому в дальнейшем требования 3 и 4 были ослаблены и в список вторичных эталонов вошли хорошо измеренные источники ЗС 218, ЗС 274, ЗС 348 и ЗС 353 с угловыми размерами больше I' , а также высокочастотные стандарты DR -2I и NGC 7027 с потоками на I Гц < 10 ян. Список вторичных стандартов содержит 14 источников, достаточно равномерно распределённых по небу северного полушария вплоть до склонения $\delta = -12^{\circ}$. Абсолютные спектры вторичных эталонов построены с привлечением отношений потоков этих источников и Лебедя А, содержащихся в работах [7-9, 14-16]. Как и спектр первичного эталона Лебедь А, полученная шкала имеет абсолютную привязку к методу "искусственной Луны".

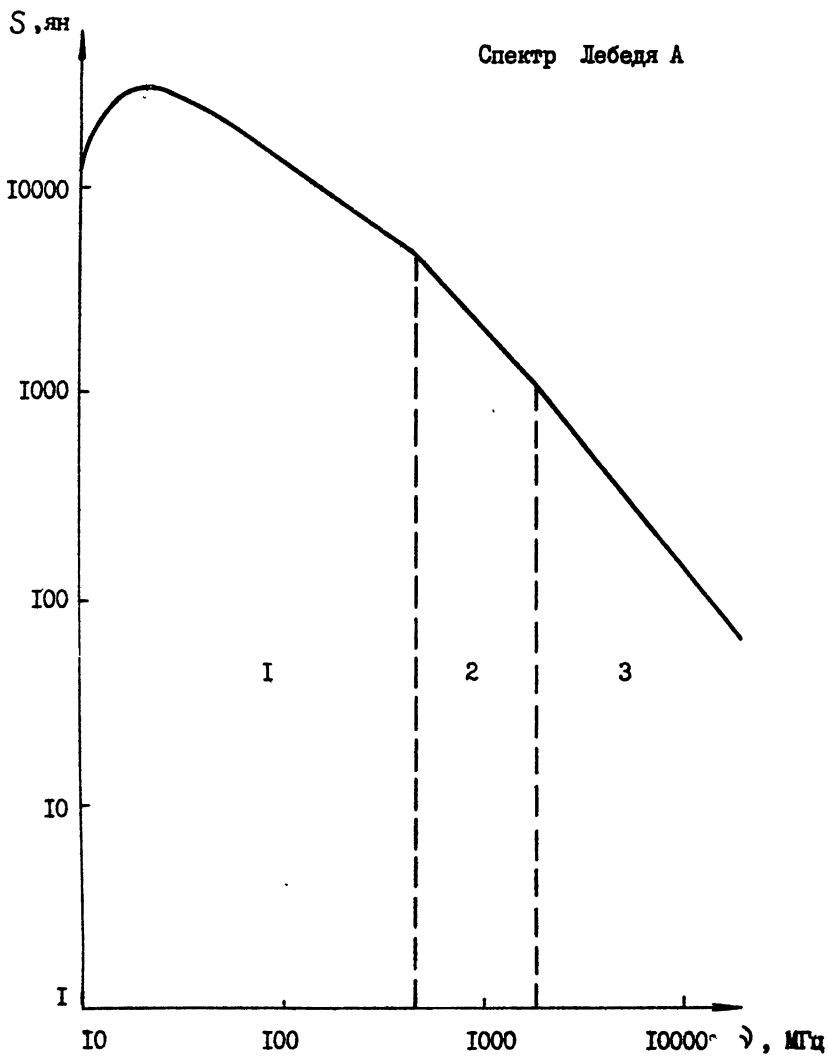
Табл. 4 содержит список вторичных стандартов и параметры их спектров. Обозначено: $S_{\nu i}$ - поток в ян; ν - частота в МГц; α_i - спектральный индекс; $i = 1, 2, 3$ - номер участка спектра. В i -ом участке спектральные параметры сохраняются.

Спектры источников приведены на рис. 5-8. Почти все (исключая ЗС 348) спектры вторичных эталонов хорошо представляются в виде сочетания 2-3 прямолинейных в логарифмическом масштабе отрезков, спектральный индекс более высокочастотных участков больше у всех источников, кроме ЗС 218.

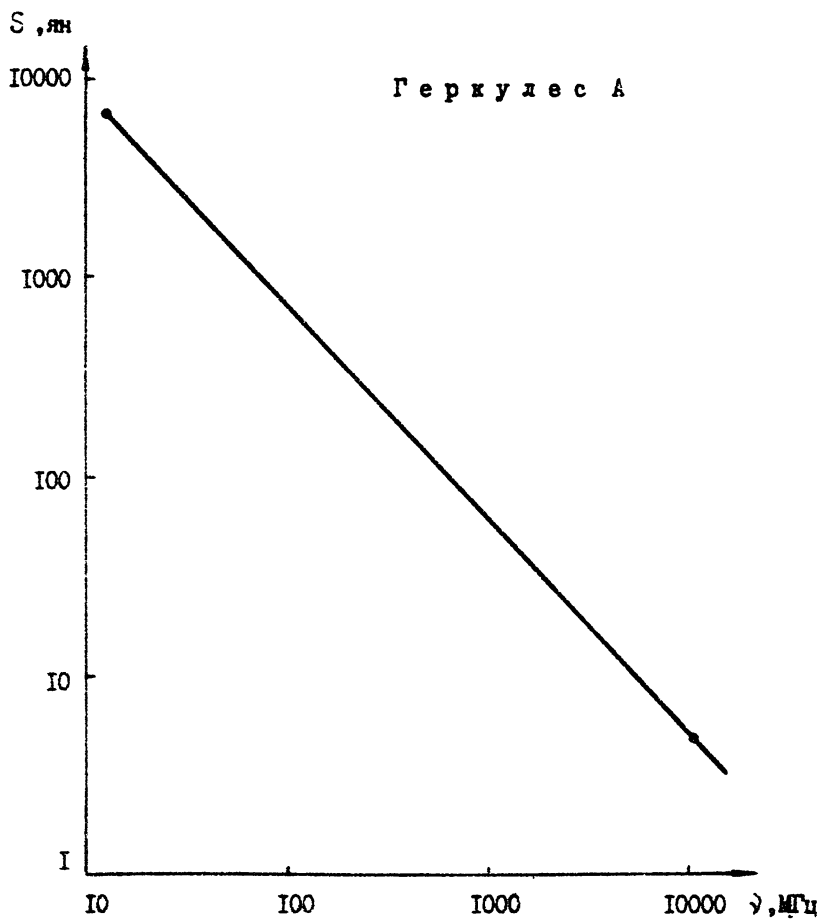
Необходимо отметить, что изменение спектральных индексов происходит на сравнительно коротких частотных интервалах и носит характер изломов спектра. В работах [4, 7, 16] и др. многие спектры рассматриваются, как искривлённые, с плавной кривизной. Представляемые здесь результаты свидетельствуют, что такая форма спектров встречается значительно реже, чем это предполагалось в упомянутых работах; преобладают спектры в форме ломаных линий. Характерный пример - спектр Лебедя А, в котором имеется два излома и два прямых участка: искривлён лишь низкочастотный участок I.

Построенная здесь абсолютная шкала потоков, представленная первичными и вторичными стандартами, основана на абсолютных измерениях методом "искусственной Луны" и не опирается на какие-либо другие абсолютные измерения. Абсолютная точность её предполагается не худшей $\pm 5\%$ в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$ и в декаметровом диапазоне $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 38 \text{ МГц}$ составляет около $\pm 10\%$.

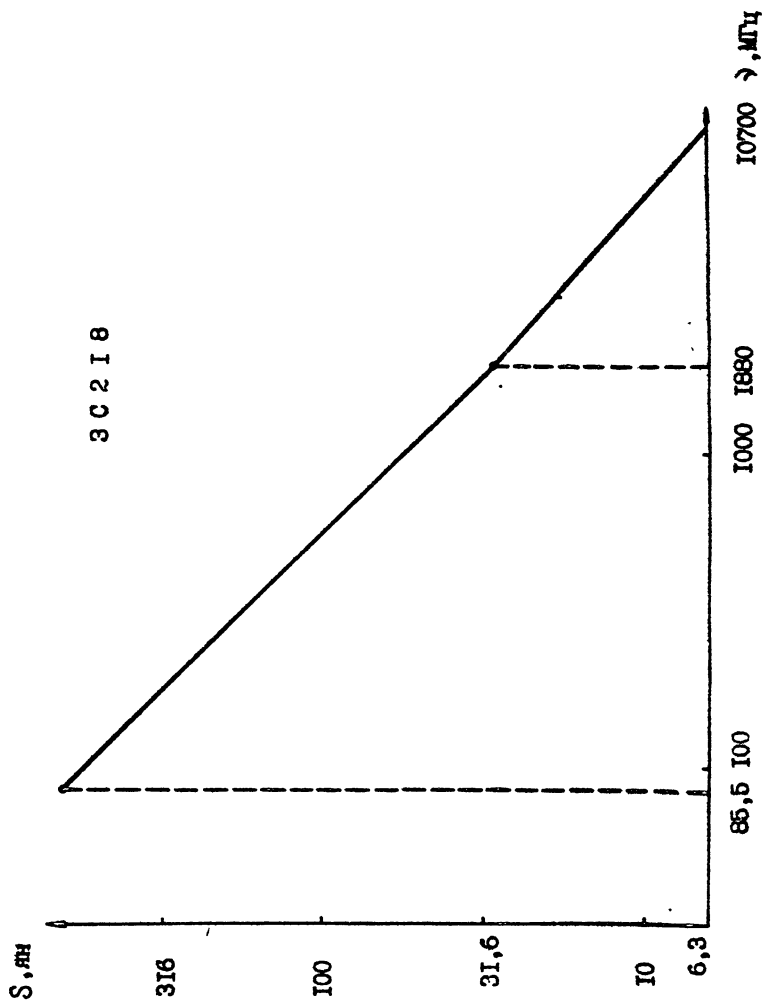
Источн.: Диапазон I:		α_1	: lqS_{11} : Диапазон II:		α_2	: lqS_{12} : Диапазон III:		α_3	: lqS_{13}
3C 119	38 - 459	-0,143	1,552	459-1483	-0,571	2,693	1483-10700	-0,745	3,243
I23	I78 - I073	-0,7414	3,98	I073-9905	-0,846	4,295	9909-14900	-1,294	6,067
I38	I78 - I400	-0,493	2,489	2295-4036	-0,493	2,424	4036-10700	-0,509	3,565
I47	I78 - I071	-0,502	2,947	I071-2695	-0,661	4,095	5000-10700	-0,881	4,126
I61	85,5-1213	-0,657	3,322	1213-8000	-0,835	3,872			
218	85,5-1880	-1,002	4,746	1880-10700	-0,878	4,339			
274	I78 - I420	-0,8376	4,944	2295-22285	-0,8357	4,9032			
295	I78 - I000	-0,672	3,468	I000-9030	-0,98	4,392	9030-14900	-1,616	6,909
348	I2,6-10700	-1,0694	4,9881						
353	I2,6-4615	-0,7716	4,1458	4615-10700	-0,8148	4,3038			
409	I78 - 876	-0,848	3,828	876-10700	-1,163	4,754			
433	I78 - 521	-0,75	3,472	521-10700	-0,926	3,95	10700-15000	-1,194	5,03
DR -21							7000-31000	-0,122	1,77
NGC7027							10000-31000	-0,127	1,28



Р и с. 5



Р и с. 6



Р и с. 7

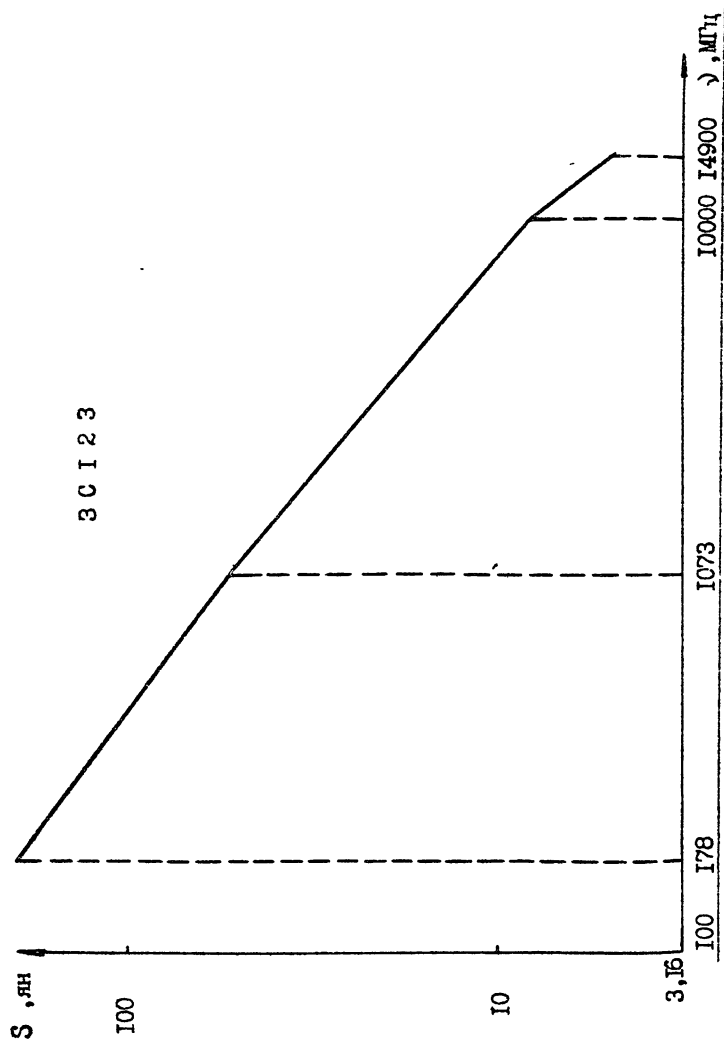


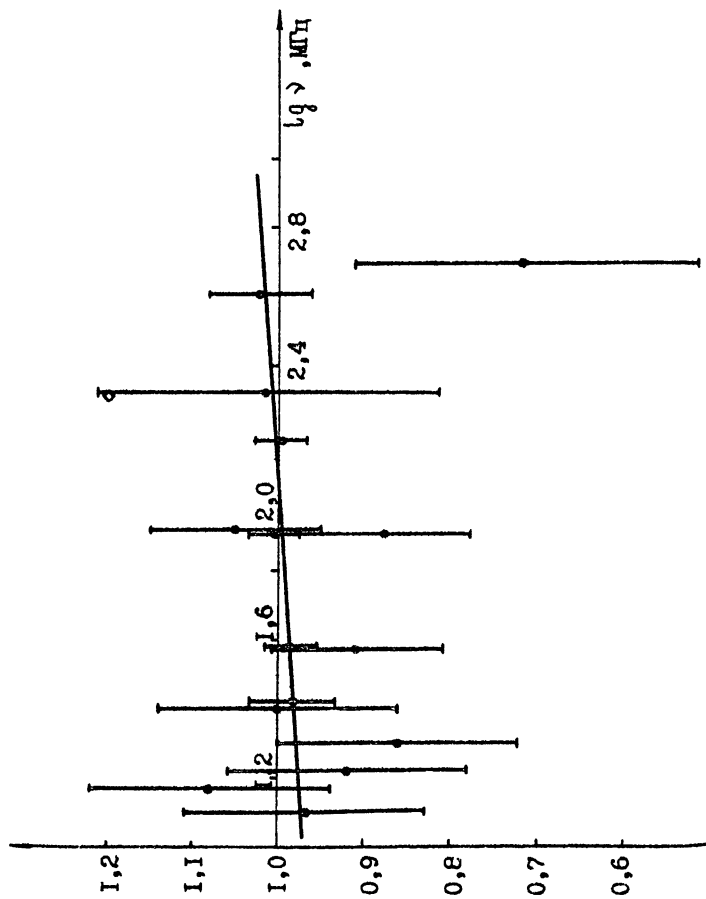
Рис. 8

Очевидный интерес представляет сравнение результатов абсолютных измерений, проводившихся с эталонными диполями или рупорами, с одной стороны, и потоками, соответствующими методу "искусственной Луны" на тех же частотах. Такое сравнение содержится в табл. 5 и 6 и рис. 9 и 10. Потоки, соответствующие методу "искусственной Луны" получены из спектров табл. 3 и 4, а также спектров Кассиопеи А и Крабовидной туманности.

Т а б л и ц а 5

Сравнение результатов абсолютных измерений эталонными диполями со шкалой, основанной на методе "искусственной Луны"

Частота, МГц	Эпоха измерений	$\left\langle \frac{S_{3A}}{S_{1A}} \right\rangle$	$\left\langle \frac{S_{3A}}{S_{1A}} \right\rangle - 1$, %	ΔS_{3A} , %	Источники ЗС	Ссылка
12,6	1966	0,971	- 2,9	14	348,353,405	Брауде и др. [32]
14,7	1966	1,08	+ 8	14	"-	"-
16,7	1966	0,92	- 8	14	"-	"-
20	1966	0,86	-13,6	14	"-	"-
25	1966	1	0	14	353,405	"-
26,3	1969,9	0,985	- 1,5	5	405	Винер, [35]
38	1955	0,907	- 9,3	10	405	Эджи, Смит, [36]
38	1966,9	0,985	- 1,5	3,3	405	Паркер, [10]
81,5	1955	0,876	-12,4	10	405	Эджи, Смит, [36]
81,5	1966,9	1,005	+ 0,5	3,1	405	Паркер, [10]
85,7	1956	1,05	+ 5	10	144,218,348	Литтл, [37]
152	1966,5	0,996	- 0,4	3	405	Паркер, [10]
210	1955	1,013	+ 1,3	20	405	Эджи, Смит, [36]
408	1967	1,019	+ 1,9	6	161,218	Уайли, [11]
500	1955	0,71	-29	20	405,461	Эджи, Смит, [36]



Р и с. 9

Табл. 5 и 6 содержат: в первой колонке - частоту ν (МГц), во второй колонке - эпоху измерений, в третьей колонке - помещены средние отношения \bar{k} потоков $S_{ЭА}$, измеренных с эталонной антенной, к потокам $S_{ИЛ}$ "искусственной Луны"; в четвертой - среднюю относительную разность потоков в процентах; в пятой - приведённую авторами ошибку абсолютных измерений в процентах; в шестой - ссылки на авторов и литературные источники.

5. Сравнение абсолютных измерений, выполненных методами эталонных диполей и "искусственной Луны"

На рис. 9 представлен график, где по оси абсцисс отложен логарифм частоты, а по оси ординат - $\bar{k} = \langle S_{ЭА} / S_{ИЛ} \rangle$ - среднее отношение потоков по данным табл. 5, каждой точке графика соответствует ошибка, приводимая авторами абсолютных измерений.

Из всех точек графика лишь две, по данным старой работы Эджи и Смита [36], отличаются от 1 больше, чем на величину ошибки. Во всех других случаях отличия потоков с большим запасом перекрываются ошибками измерений, даже при малой их величине. Так, в работе [10] при ошибках, меньших 3,5%, максимальное отличие измеренного потока от представляемой шкалы меньше 1,5%. Прямая, найденная методом наименьших квадратов для аппроксимации точек рис. 9 в виде

$$\bar{k} = p \lg \nu + q \quad (II)$$

без учёта результатов [36], имеет параметры

$$p = 0,028 \pm 0,044 ; \quad q = 0,944 \pm 0,083.$$

Отсюда следует, что частотной зависимости отношения потоков $\langle \frac{S_{ЭА}}{S_{ИЛ}} \rangle$, выходящей за пределы ошибок аппроксимации, в данном случае нет. Дипольные абсолютные измерения находятся в очень хорошем соответствии с методом "искусственной Луны" и взаимно согласованы на разных частотах.

6. Сравнение абсолютных измерений, выполненных методами эталонных диполей и "искусственной Луны"

Принципиально иная ситуация наблюдается для абсолютных измерений с эталонными диполями.

На графике рис. 10 изображена зависимость $\bar{K} = S_{3A}/S_{иЛ}$ от логарифма частоты для рупорных антенн по данным табл. 6. Ошибки, как на рис. 9, - это ошибки абсолютных измерений.

Т а б л и ц а 6

Сравнение результатов абсолютных измерений эталонными рупорами со шкалой, основанной на методе "искусственной Луны"

Частота, МГц	Эпоха измерений	$\left\langle \frac{S_{3A}}{S_{иЛ}} \right\rangle$	$\left\langle \frac{S_{3A}}{S_{иЛ}} \right\rangle - I$, %	ΔS_{3A} , %	Источники: ЗС	Ссылка
320	1962	0,944	- 5,6	5	405	Мак Рей, Сиквейст, [38]
1415	1969.5	1,05	+ 5	2,5	46I	Энкренас и др., [20]
1440	1960-1964	1,038	+ 3,8	3	46I	Биндлей и др., [39]
3150	1964.4	1,069	+ 6,9	3	144, 405, 46I	Медд, Рамана [40]
3200	1959	1,117	+11,7	4	144, 405, 46I	Бротен, Медд, [41]
4080	1965.3	1,126	+12,6	4	274, 405	Уилсон, Пензиас, [31]
6660	1965.0	1,124	+12,4	3	144, 405	Медд, Романа, [40]
8250	1965.9	1,164	+16,4	5	144, 46I	Аллен, Барретт, [42]
13490	1969.9	1,162	+16,2	3	46I	Медд, [22]
15500	1966.1	1,175	+17,5	5,9	144, 46I	Аллен, Барретт, [42]
16043	1970.6	1,158	+15,8	6	144, 46I	Уриксон и др. [23]
22285	1973.5	1,149	+ 4,9	4,5	144, 274, 405, 46I	Джанссен и др., [24]

График не содержит ни одной точки, отличающейся от I меньше, чем на ошибку. Все точки располагаются на графике, следуя явно видимой закономерности: в интервале $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 8250 \text{ МГц}$ \bar{K} возрастает пропорционально $\lg \nu$, выше $\nu \approx 8 \text{ ГГц}$ сохраняется на уровне $\bar{K} \approx$

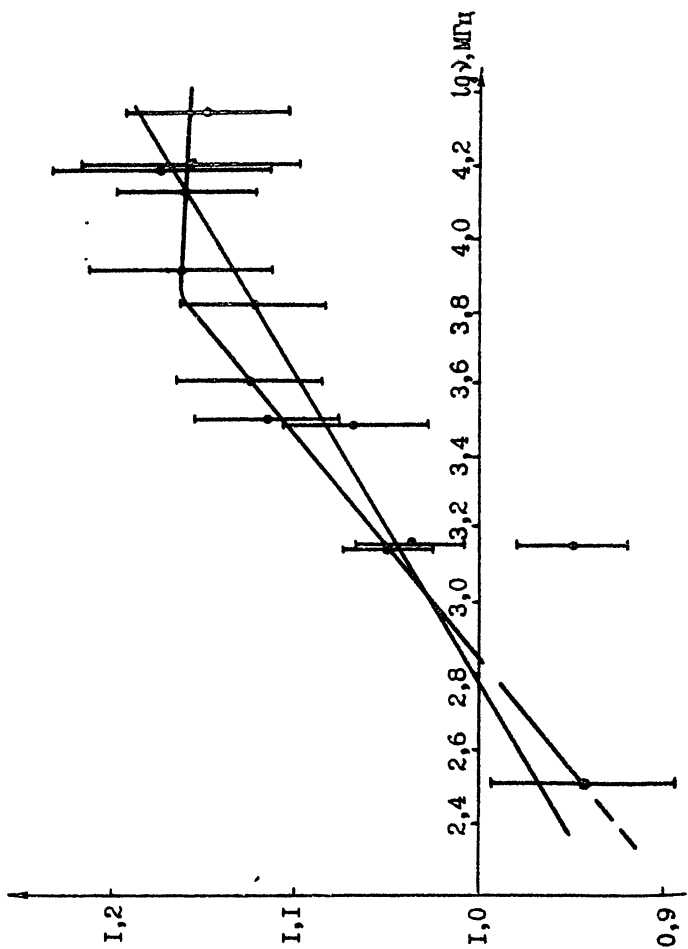


Рис. 10

I,162. Интересно сравнить, как представлена эта зависимость $\bar{k}(\lg \nu)$ в аналогичных работах двух разных групп исследователей. Обе группы, каждая на своей антенне, выполняли абсолютные измерения на нескольких частотах. Измерения на частотах 1415 МГц [20], 4080 МГц [31] и 16 ГГц [23] были сделаны на одной рупорно-параболической антенне; во всех статьях одним из соавторов был Пензиас, в двух - Уилсон, т.е. определение эффективной площади везде выполнялось по единой методике. Значения \bar{k} для этих трёх точек не лежат на одну прямую. Прямая, проходящая через точки $\nu = 1415$ МГц и $\nu = 4080$ МГц, описывается выражением

$$\bar{k} = 0,165 \lg \nu + 0,529. \quad (12)$$

На частоте 16 ГГц $\bar{k} = 1,158$. Это значение ниже даваемого (12) на величину, большую ошибки, и очень близко к среднему значению в диапазоне $8250 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$.

В работе Медда [22] представлены абсолютные измерения на частотах 3150 МГц, 6660 МГц и 13490 МГц, выполненные также на одной рупорно-параболической антенне, коэффициент усиления которой определялся на всех частотах по единой методике. Значения \bar{k} , вычисленные для первых двух точек, лежат на прямой

$$\bar{k} = 0,169 \lg \nu + 0,477. \quad (13)$$

Отметим, что наклон прямых (12) и (13) практически совпадает, хотя в диапазоне $1,4 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 8 \text{ ГГц}$ значения (13) на 3,8% ниже, чем (12). На частоте $\nu = 13490$ МГц $\bar{k} = 1,162$. Эта величина совпадает со средним \bar{k} по всем измерениям в диапазоне $8 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 23 \text{ ГГц}$, находясь ниже (13), хотя и в пределах ошибки. В целом, характер зависимости $\bar{k}(\lg \nu)$ в обеих сравниваемых сериях измерений один и тот же, но график $\bar{k}(\lg \nu)$ для [22] имеет постоянный сдвиг по оси абсцисс вправо по сравнению с [20, 31, 23] и обе зависимости совпадут, если частоты [22] уменьшить в 1,693 раза. Линейная зависимость $\bar{k}(\lg \nu)$, найденная методом наименьших квадратов с весами, обратными квадрату ошибки, для диапазона $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 8250 \text{ МГц}$ без учёта результатов [22], имеет вид

$$\bar{k} = [0,164 \pm 0,043] \lg \nu + [0,53 \pm 0,14], \quad (14)$$

что совпадает с (I2).

Как уже отмечалось, в диапазоне $8250 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ разброс значений \bar{K} мал, среднее значение $\bar{K} = 1,162$ при максимальных отклонениях $(\Delta \bar{K})_{\text{max}} = 0,013$. Метод наименьших квадратов с такими же, как и в (I4), учётом весов даёт в этом диапазоне следующую линейную зависимость:

$$\bar{K} = [-0,03 \pm 0,15] \lg \nu + [1,29 \pm 0,63]. \quad (I5)$$

Таким образом, наилучшее представление зависимости для рупорных антенн - это две прямые (I4) и (I5), пересекающиеся в точке $\nu = 8270 \text{ МГц}$.

Формальное применение метода наименьших квадратов для линейной аппроксимации всех точек табл. 6 в диапазоне $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ приводит к выражению

$$\bar{K} = [0,119 \pm 0,023] \lg \nu + [0,671 \pm 0,082]. \quad (I6)$$

Следует отметить, что все точки табл. 6 в пределах ошибок согласуются с (I6).

7. Шкалы, основанные на методе относительных спектров и абсолютных измерениях с рупорами

Установленная для абсолютных измерений с рупорами зависимость $\bar{K}(\lg \nu)$ в виде двух пересекающихся прямых противоречит методу относительных спектров. Действительно, если спектр какого-либо источника построен в двух абсолютных шкалах, удовлетворяющих методу относительных спектров, то отношения потоков из этих шкал для одного источника \bar{K} образуют степенную зависимость от частоты: зависимость $\bar{K}(\lg \nu)$ близка в этом случае к линейной, если $\bar{K} \approx 1$. В рассматриваемом случае шкала, основанная на методе "искусственной Луны", построена с учётом анализа относительных спектров, и излом в графике $\bar{K}(\lg \nu)$ означает, что абсолютные измерения с рупорами в совокупности не согласуются с методом относительных спектров. Однако на основе абсолютных измерений с рупорами, образующих один из прямых участков графика рис. 10, согласно выражениям (I4), (I5), (I6), можно построить абсолютные шкалы, не противоречащие методу относительных спектров. Рассмотрим эти шкалы и их согласованность с разными видами

абсолютных измерений.

а) Рупорная шкала № 1.

В шкале, основанной на абсолютных измерениях с рупорами в диапазоне $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 8270 \text{ МГц}$, спектральные индексы источников на $\Delta\alpha = 0,069$ меньше, чем в шкале, основанной на методе "искусственной Луны". На краях диапазоне $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 30 \text{ ГГц}$ между этими двумя шкалами возникает значительные расхождения. Так на частотах $\nu = 12,6 \text{ МГц}$, 38 МГц и 178 МГц рупорная шкала № 1 соответственно на 30%, 20% и 10% ниже шкалы "искусственной Луны" и не согласуется с дипольными абсолютными измерениями; и, наоборот, на частотах $\nu = 6 \text{ ГГц}$ и $22,285 \text{ ГГц}$ - соответственно на 15% и 25% выше шкалы "искусственной Луны". Отметим также, что абсолютные измерения, выполненные с рупорной антенной в работе [24], дают потоки на 10% меньше, чем в рупорной шкале № 1, что больше ошибок этих измерений.

б) Рупорная шкала № 2.

Эта шкала основана на абсолютных измерениях с рупорами в диапазоне $8250 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$. Спектральные индексы источников в этой шкале и в шкале "искусственной Луны" совпадают, хотя последняя по интенсивности ниже на 16%. Таким образом, потоки, измеренные с помощью как эталонных рупоров на частотах $\nu < 3 \text{ ГГц}$, так и эталонных диполей и методом "искусственной Луны", оказываются ниже рупорной шкалы № 2 далеко за пределами ошибок.

в) На совокупности всех абсолютных измерений табл. 6 в диапазоне $320 \text{ МГц} \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$ основана рупорная шкала № 3, согласующаяся со всеми этими измерениями в пределах их ошибок. Из выражения (16) следует, что спектральные индексы источников в этой шкале на $\Delta\alpha = 0,048$ меньше, чем в шкале "искусственной Луны", поэтому на метровых и сантиметровых волнах различия этих шкал значительны. Рупорная шкала № 3 в метровом диапазоне, на частотах $\nu = 12,6 \text{ МГц}$, 38 МГц и 178 МГц ниже шкалы "искусственной Луны" соответственно на 20%, 14% и 6% и не согласуется с дипольными абсолютными измерениями. В сантиметровом диапазоне рупорная шкала № 3 на частотах $\nu = 4080 \text{ МГц}$, 8250 МГц и 22285 МГц соответственно на 10%, на 13,5% и на 18,5% выше шкалы "искусственной Луны".

Проведенный анализ показывает, что попытки построения абсолютной шкалы на основе абсолютных измерений с эталонными рупорами встречаются с большими трудностями. Ни одна из трёх возможных рупорных шкал не согласуется с абсолютными измерениями, выполненными как с помощью

эталонных диполей, так и методом "искусственной Луны". В то же время, рупорные шкалы № 1 и № 2 не согласуются также с частью абсолютных измерений с рупорами, а рупорная шкала № 3 не учитывает деталей зависимости $K(\nu)$. Это даёт основание утверждать, что абсолютные измерения с помощью рупоров являются внутренне противоречивыми и не согласующимися с другими видами абсолютных измерений. Причиной может быть частотно-зависимая ошибка в методике определения коэффициента усиления рупорных антенн.

8. Сравнение абсолютной шкалы потоков, основанной на методе "искусственной Луны" с предшествующими абсолютными шкалами

Исследования особенностей спектров дискретных источников, а также их эволюции требуют приведения всех когда-либо проводившихся измерений к единой абсолютной шкале. С этой целью были вычислены корректирующие множители $n(\nu)$, позволяющие найти истинные значения потоков по потокам, определённым первоначально в какой-либо из шкал.

Сравнение представляемой здесь абсолютной шкалы, основанной на методе "искусственной Луны", с другими шкалами приведено в табл. 7 и на графике рис. II, где по оси ординат отложен корректирующий множитель $\bar{n} = \langle S_{ил} / S_{шкалы} \rangle$, по оси абсцисс в логарифмическом масштабе - частота.

Корректирующие множители табл. 7 для всех шкал, кроме ЕМW и ЕН, являются результатом усреднения отношений $S_{ил} / S_{шкалы}$ по многим, в большинстве случаев точечным, источникам. Множители для шкал ЕМW и ЕН можно вычислить лишь по трём источникам: ЗС 144, ЗС 274 и ЗС 405, угловые размеры которых значительны.

Из табл. 7 и рис. II следует, что шкалы СКL и КPW в метровом диапазоне значительно занижены: на частоте 38 МГц соответственно на 20% и 18%, на 178 МГц - на 10% и 8%.

В диапазоне 408 МГц $\leq \nu \leq$ 3200 МГц шкала СКL завышена в среднем на $7\% \pm 4\%$ без сколько-нибудь заметного наклона графика $\bar{n}(\nu)$

Аналогична ситуация для шкалы К, равномерно завышенной на всех содержащихся в ней частотах на $6,5\% \pm 3,5\%$. Отсюда следует, что в диапазоне $0,4 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 3 \text{ ГГц}$ спектральные индексы источников в шкалах СКL и К, в среднем, даны верно. Этот вывод следует сопоставить

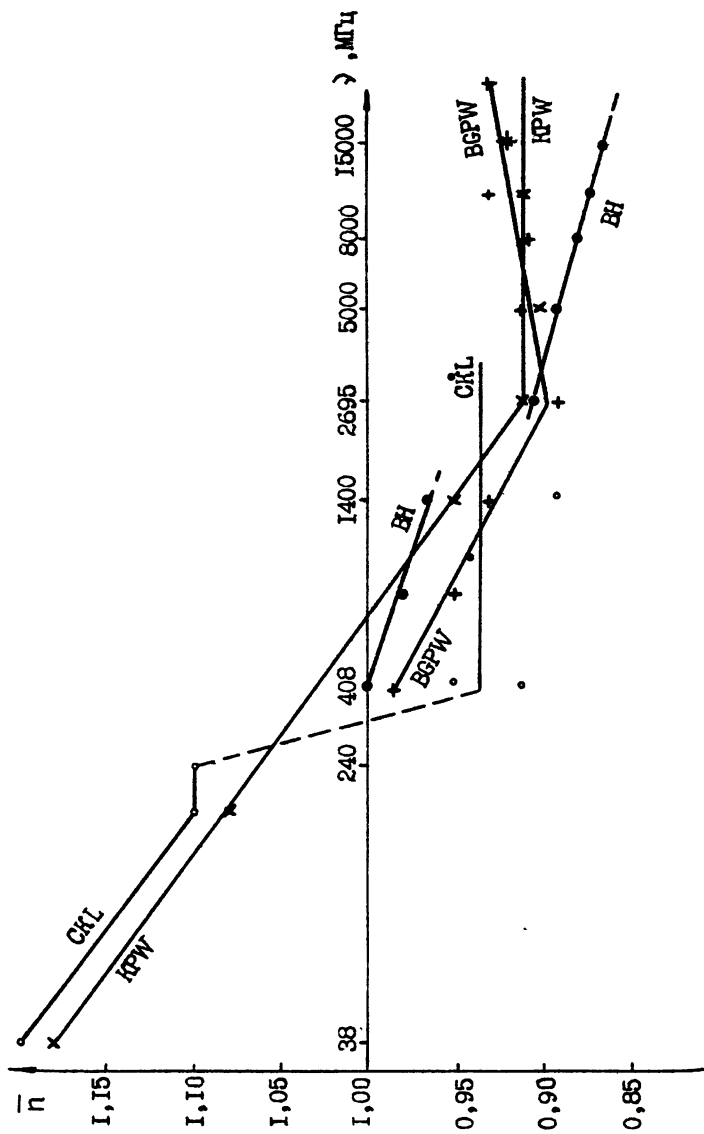
+) Здесь и далее даны максимальные отклонения от среднего.

с тем фактом, что спектральный индекс первичного эталона шкал СКЛ и К, Кассиопех А, равен 0,77, что значительно меньше, чем по данным метода "искусственной Луны" в этом диапазоне.

Т а б л и ц а 7

Корректирующие множители для шкал СКЛ, К, ВМВ, КРВ, ВН,
ВРРВ и АИС

Шкала:	СКЛ								[4]
λ , МГц :	38	178	240	408	412	710	958	1420	3200
\bar{n} :	1,2	1,1	1,1	0,91	0,95	0,97	0,94	0,89	0,95
Шкала:	К								[15]
λ , МГц :					475	710	958	1420	2841
\bar{n} :					0,9	0,946	0,968	0,923	0,942
Шкала:	ВМВ								[6]
λ , МГц :	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	
\bar{n} :	1,055	1,013	0,959	0,901	0,874	0,854	0,842	0,847	
Шкала:	КРВ								[7]
λ , МГц :	38	178	750	1400	2695	5000	10700	14900	
\bar{n} :	1,18	1,08	0,98	0,95	0,91	0,9	0,91	0,92	
Шкала:	ВН								[12]
λ , МГц :	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	
\bar{n} :	1	0,98	0,965	0,904	0,889	0,878	0,871	0,864	
Шкала:	W								[14]
λ , МГц :	468	635	960	1410	2650	2700	5000	5009	
\bar{n} :	0,93	0,91	0,92	0,91	0,86	0,89	0,91	0,91	
Шкала:	ВРРВ								[16]
λ , МГц :	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	22235
\bar{n} :	0,985	0,95	0,93	0,89	0,91	0,91	0,93	0,92	0,93
Шкала:	АИС								[17]
λ , МГц :	178	408	750	960	1400	2695	5000	8000	10000
\bar{n} :	0,75	0,88	0,965	0,995	1,004	0,985	0,982	1,11	1,11



Р и с. II

Шкала W близка по поведению к шкале K, с которой она связана генетически. Она так же равномерно завышена, но на $9 \pm 2\%$ (без учета частоты 2650 МГц, где отклонение больше). По сравнению со шкалой K шкала W отличается меньшим разбросом и большей самосогласованностью. Спектральные индексы источников в этой шкале, в среднем, верны в диапазоне $450 \text{ МГц} \leq \nu \leq 5000 \text{ МГц}$, хотя для первичного стандарта Кассиопеи А приводится сильно заниженный спектральный индекс $\alpha = 0,763$. Как уже отмечалось, в шкалах SKL, K и W на частотах выше 450 МГц спектральные индексы большинства источников верны, хотя это не относится к Кассиопее А. Таким образом, поведение первичного стандарта в этих шкалах не отражает поведения всей шкалы, и проводить сравнение шкал по первичному стандарту, как это делается, например, в ВН [12], ВГРВ [16] и др., неправильно.

В шкале КРВ виден компромисс между сильно заниженными в метровом диапазоне и завышенными - в сантиметровом (из-за ошибок при абсолютных измерениях с рупорами) значениями потоков. График зависимости $\bar{n}(\lg \nu)$ для КРВ представляет собой наклонную прямую в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 2695 \text{ МГц}$, где \bar{n} меняется от 1,18 до 0,91 и сохраняется на уровне $0,91 \pm 0,01$ в диапазоне $2695 \text{ МГц} \leq \nu \leq 14900 \text{ МГц}$. Поэтому спектральные индексы источников в шкале в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 2695 \text{ МГц}$ занижены, в среднем, на $\Delta\alpha = 0,061$, что находится в близком соответствии с занижением спектрального индекса первичного стандарта КРВ Кассиопеи А, принятого в КРВ равным $\alpha = 0,765$. Постоянство \bar{n} на более высоких частотах, $2695 \text{ МГц} \leq \nu \leq 14900 \text{ МГц}$, указывает на то, что спектральные индексы в этом диапазоне совпадают в обеих шкалах. Таким образом, в спектрах, основанных на данных КРВ и продолжающих её работ [8, 9] на частоте 2,7 ГГц, имеется систематический излом, вызванный ошибками шкалы, где $\Delta\alpha = 0,061$.

Спектральные индексы в шкале ВМВ занижены на частотах $408 \text{ МГц} \leq \nu \leq 2700 \text{ МГц}$ на 0,087 и на $2,7 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 15 \text{ ГГц}$ - на 0,05, потоки на 408 МГц занижены, в среднем на 5,5% и на 15 ГГц - завышены на 17%.

В шкале ВН спектральный индекс занижен во всём диапазоне на $\Delta\alpha = 0,028$; в диапазоне $408 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1400 \text{ МГц}$ корректирующий множитель меняется от 1 до 0,965; от 2700 МГц до 15 ГГц шкала завышена от 10 до 14%; между 1400 МГц и 2700 МГц дать значение \bar{n} затруднительно.

Как следует из анализа зависимости $\bar{n}(\lg \nu)$, в шкале ВГРВ не

частотах от 408 МГц до 2,4 ГГц все спектральные индексы занижены на 0,053, а выше $\nu = 2,4$ ГГц - завышены на 0,017. Ошибки определения потока в шкале BGPW распределены по частоте так: от 408 МГц до 2,4 ГГц потоки завышены от 1,5% до 10%, а от 2,4 до 24 ГГц ошибка уменьшается от 10% до 7%. Таким образом, в шкале BGPW спектры источников имеют завышенные потоки, неправильные спектральные индексы и излом на частоте $\nu = 2,4$ ГГц с изменением в этой точке спектрального индекса на $\Delta\alpha = 0,07$, которого реально нет.

Интересно сравнение шкалы АИС [17] с представляемой. Обе шкалы основаны на абсолютных измерениях методом "искусственной Луны" и практически совпадают в диапазоне $0,96 \text{ ГГц} \leq \nu \leq 6 \text{ ГГц}$. На частотах выше 6 ГГц шкала АИС занижена на 11% и более, поскольку спектр её первичного эталона в этом диапазоне, источника Лебедь А, был получен из прямых абсолютных измерений методом "искусственной Луны" на антеннах с низким угловым разрешением, давших заниженные потоки из-за влияния фона.

На частотах, меньших 0,96 ГГц, шкала АИС завышена из-за неправильной экстраполяции спектров первичного и вторичного эталонов. В действительности спектр Кассиопей А, представленный в [17] прямым от сантиметровых до метровых волн, имеет излом ниже 0,5 ГГц; спектры многих других источников в этом диапазоне также становятся менее крутыми. Выявить эти особенности стало возможно только с помощью метода относительных спектров, поэтому ни одна из абсолютных шкал, созданных ранее, не была верной на всех частотах.

Заключение

1. Абсолютные спектры группы источников в широком диапазоне частот могут быть построены, даже если абсолютные измерения интенсивности, хотя бы для одного из них, проводились лишь в части этого диапазона. Сделать это позволяет применение метода относительных спектров.

2. Комбинируя метод относительных спектров с абсолютными измерениями какого-либо определённого типа (методами "искусственной Луны", эталонных диполей, эталонных рупоров), можно построить абсолютные спектры группы источников, образующие шкалу интенсивностей. В каждом случае шкала будет опираться только на данный вид абсолютных измерений. Это позволяет прямо сравнивать между собой результаты раз-

ных методов абсолютных измерений, даже сильно разнесённых по частоте.

3. Шкала потоков, построенная на основе анализа относительных спектров и абсолютных измерений методом "искусственной Луны", представленная первичным эталоном Лебедь А и 14-ю вторичными стандартами, имеет точность не хуже $\pm 5\%$ в диапазоне $38 \text{ МГц} \leq \nu \leq 31 \text{ ГГц}$ и 10% в декаметровом диапазоне. Она хорошо согласуется со всеми результатами дипольных абсолютных измерений и не согласуется с потоками, измеренными с помощью эталонных рупоров.

4. Невозможно построить на основе рупорных абсолютных измерений шкалу, согласующуюся с другими видами абсолютных измерений. Два из трёх рассмотренных вариантов такой шкалы не согласуются также и с частью рупорных абсолютных измерений. Из сравнения со шкалой "искусственной Луны" следует, что частотная зависимость потоков, измеренных методом эталонных рупоров, расходится с результатами метода относительных спектров, хотя и в пределах ошибок.

Это даёт основание предположить, что рупорные абсолютные измерения содержат частотно-зависимую ошибку, достигающую 16% .

Анализ шкал потоков, обсуждавшихся в обзоре, показывает их ошибочность, обусловленную двумя главными причинами:

1) несовместимость абсолютных измерений, основанных на применении эталонных рупоров со всеми другими видами абсолютных измерений при построении спектра первичного стандарта, что было показано выше;

2) выбором Кассиопеи А в качестве первичного стандарта при упрощённом учёте переменности этого источника - остатка сверхновой - на самом деле имеющего сложные частотно-временные изменения спектра на различные эпохи наблюдений.

Л и т е р а т у р а

1. Станкевич К.С., Иванов В.П., Целюшенко С.А., Торхов В.А., Иванникова А.Н. Радиоизлучение остатка сверхновой Кассиопея А. - Известия вузов - Радиофизика, 1973, т. 16, № 5, с. 786 - 798.
2. Барабанов А.П., Иванов В.П., Станкевич К.С., Торхов В.А. Временные локальные измерения интенсивности в спектре радиомсточника Кассиопея А. - Письма в АЖ, 1977, т. 3, № 7, с. 302 - 305.
3. Whitfield G.R. The spectra of radio stars. - Mon.Not.R.Astr. soc., 1957, v.117, N 6, p.680 - 691.
4. Conway G.R., Kellermann K.I., Long R.J. The radio frequency spectra of discrete radio sources. - Mon.Not.R.Astr.Soc., 1967, v.125, N 3-4, p.261 - 284.
5. Högbom J.A., and Shakeshaft J.R. Secular variation of the flux density of the radio source Cassiopeia A. - Nature, 1961, v.189, N 4764, p.561 - 562.
6. Baars J.W.M., Mezger P.G. and Wendker H. The spectra of the strongest non-thermal radio sources in the centimeter-wave length. - Astrophys.J., 1965, v.142, N 1, p.122 - 134.
7. Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K., and Williams P.J.S. The spectra of radio sources in the revised 3C catalogue. - Astrophys.J., 1969, v.157, N 1, p.1 - 34.
8. Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K. Measurements of the flux density and spectra of discrete radio sources at centimeter wavelengths. IV. The observations at 10.7 GHz (2.8cm). - Astron.J., 1973, v.78, N 9, p.828 - 847.
9. Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K., Preuss E. and Witzel A. Measurements of the flux densities and spectra of discrete radio sources at centimeter wavelengths. V. The observations at 14.9 GHz (2cm). - Astron.J., 1976, v.81, N 12, p.1084 - 1088.
10. Parker E.A. Precise measurements of the flux densities of the radio sources Cas A and Cyg A at metre wavelengths. - Mon.Not. R.Astr.Soc., 1968, v.138, N 4, p.407 - 422.
11. Wyllie D.V. An absolute flux density scale at 408 MHz. - Mon. Not.R.Astr.Soc., 1969, v.142, N 2, p.229 - 240.

12. Baars J.W.M., and Hartsuijker A.P. The decrease of flux density of Cassiopeia A and absolute spectra of Cassiopeia A, Cyg - nus A and Taurus A. - *Astron. and Astrophys.*, 1972, v.17, N 2, p.172 - 181.
13. Scott P.F., Shakeshaft J.R., Smith M.A. Decrease of flux density of the radio source Cas A at 81.5 MHz. - *Nature*, 1969, v.223, N 5211, p.1139 - 1140.
14. Wills Beverly J. On the calibration of flux densities and the determinations of spectra at radio frequencies. - *Astrophys.J.*, 1973, v.180, N 2, p.335 - 350.
15. Kellermann K.I. Measurements of the flux density of discrete radio sources at decimeter wavelengths. - *Astron.J.*, 1964, v.69, N 2, p.205 - 215.
16. Baars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K. and Witzel A. The absolute spectrum of Cas A ; an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators. - *Astron. and Astrophys.*, 1977, v.61, N 1, p.99 - 106.
17. Алтунин В.И., Иванов В.П., Станкевич К.С. Эталонные источники для калибровки потоков и определения параметров антенн радио-астрономическими методами. - *Известия вузов - Радиофизика*, 1977, т. 20, № 7, с. 969 - 981.
18. Троицкий В.С., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М., Кротиков В.Д., Бондарь Л.Н., Стрежнёва К.М., Рахлин В.Л., Иванов В.П. Пелюшенко С.А., Зубов М.М., Самойлов Р.А., Титов Г.К., Порфирьев В.А., Чекалёв С.П. Эталонирование потоков Кассиопеи А и Лебедя А в диапазоне 300-9375 МГц. - *Астрон.ж.*, 1971, т.48, № 6, с.1150-1153.
19. Бондарь Л.Н., Зелинская М.Р., Каменская С.А., Порфирьев В.А., Рахлин В.Л., Родина В.М., Станкевич К.С., Стрежнёва К.М., Троицкий В.С. Абсолютные измерения интенсивности радиоизлучения дискретных источников Кассиопея А и Лебедь А на волнах 30-60 см. - *Известия вузов - Радиофизика*, 1969, т. 12, № 6, с. 807 - 812.
20. Encarnaz P.J., Penzias A.A., Wilson R.W. Flux of Cassiopeia A at 1415 MHz. - *Astrophys.J.*, 1970, v.160, N 3, p.1185 - 1186.
21. Findlay J.W. The flux density of Cassiopeia A at 1440 MHz and its rate of decrease. - *Astrophys.J.*, 1972, v.174, N 3(1), p.527 - 528.

22. Medd W.J. Absolute flux density measurements at centimeter wavelengths. - *Astrophys.J.*, 1972, v.171, N 1, p.41 - 50.
23. Wrixon G.T., Gott J.R., and Penzias A.A. Absolute measurements of the flux of Cassiopeia A and Taurus A at 1.87 centimeters. - *Astrophys.J.*, 1972, v.174, N 2, p.399 - 400.
24. Janssen M.A., Golden L.M., and Welch W.J. Extension of the absolute flux density scale to 22.285 GHz. - *Astron. and Astrophys.*, 1974, v.33, N 3, p.373 - 377.
25. Иванов В.П. Первичный эталон радиоизлучения Лебедь А. Тезисы докладов XVI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам, Ереван, 1982, с. 392 - 393.
26. Иванов В.П. Вторичные эталоны и абсолютная шкала интенсивностей. Тезисы докладов XVI Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам, Ереван, 1982, с. 396 - 397.
27. Виняйкин Е.Н., Разин В.А. О вековом уменьшении плотностей потоков радиоизлучения остатков сверхновых Кассиопея А и Телец А на частоте 927 МГц. - *Астрон.ж.*, 1979, т. 56, № 5, с. 913 - 917.
28. Иванов В.П., Барабанов А.П., Станкевич К.С., Столяров С.П. Падение интенсивности Крабовидной туманности. - *Астрон.ж.*, 1982, т. 59, № 5, с. 963 - 964.
29. Иванов В.П., Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Изменение потока радиоизлучения молодых остатков сверхновых. - *Письма в Астрон. ж.*, 1982, т. 8, № 2, с. 83 - 85.
30. Dent W.A., Aller H.D., and Olsen E.T. The evolution of the radio spectrum of Cassiopeia A. - *Astrophys.J.*, 1974, v.188, N 1, p.111 - 113.
31. Wilson R.W., Penzias A.A. The flux density of six radio sources at 4.08 GHz. - *Astrophys.J.*, 1966, v.146, N 1, p.286 - 287.
32. Брауде С.Я., Жук И.Н., Лебедева С.М., Мень А.В., Рябов Б.П. Особенности спектров источников космического радиоизлучения в декаметровом диапазоне радиоволн. Доклады АН СССР, 1968, т.180, № 6, с. 1323 - 1326.
33. Bennett A.S. The revised 3C catalogue of radio sources. - *Memoirs Roy.Astron.Soc.*, 1962, v.68, part 5, p.163 - 172.

34. Edge D.O., Shakeshaft J.R., McAdam W.B., Baldwin J.E., and Archer S. A survey of radio sources at a frequency of 159Mc/s. - *Memoirs Roy Astron.Soc.*, 1959, v.68, pt.2, p.7-60.
35. Viner M.R. 26.3-MHz radio source survey.I.The absolute flux scale. - *Astron.J.* 1975, v.80, N2, p.83-92.
36. Adgie R., Smith F.G. The radio emission spectra of four discrete sources and of the background radiation. - *Observatory*, 1956, v.76, N894, p.181-187.
37. Little A.G. Gain measurements of large aeriels used in interferometer and cross-type radio telescopes. - *Austral.J.Phys.* 1958, v.2, N1, p.70-78.
38. Mac Rae D.A., and Seaquist E.R. Flux of Cas A and Cyg A at 320 mc/sec. - *Astron.J.* 1963, v.68, N2, p.77.
39. Findlay J.W., Hvatum H., and Waltman W.B. An absolute flux density measurements of Cassiopeia A at 1440 MHz. - *Astrophys.J.* 1965, v.141, N3, p.873-884.
40. Medd W.J., Ramana K.V.V. Absolute flux density measurements at 9.5 and 4.5 cm. - *Astron.J.* 1965, v.70, N5, p.327.
41. Broten N.W., Medd W.J. Absolute flux density measurements of discrete sources Cassiopeia A, Taurus A and Cygnus A at 3200 MHz. - *Astrophys.J.* 1960, v.132, N2, p.279-285.
42. Allen R.J., Barrett A.H. Absolute measurements of the radio flux from Cassiopeia A and Taurus A at 3.64 and 1.94 cm. - *Astrophys.J.*, 1967, v.149, N1, p.1-13.
43. Heesch D.S. Observations of radio sources at four frequencies - *Astrophys.J.*, 1961, v.133, N1, p.322-334.
44. Heesch D.S., and Meredith B.I. Observations of discrete sources at 10 cm and 40 cm wavelengths. - *Publications of the NRAO*, 1961, v.1, N8, p.121-128.
45. Dent W.A., Haddock F.T. The extension of non-thermal radio source spectra to 8000 Mc/s. - *Astrophys.J.*, 1966, v.144, N2, p.568-586.
46. Conway R.G., Daintree E.J., Long R.J. Observations of the radio sources at 612 and 1400 Mc/s. - *Mon.Not.R.Astr.Soc.* 1965, v.131, N2, p.159-171.
47. Станкевич К.С., Иванов В.П., Торхов В.А. Вековое уменьшение

- потока остатков сверхновых Кассиопея А и SN-1572. - *Астрон.ж.*, 1973, т. 50, № 3, с. 645 - 646.
48. Бондарь Л.Н., Кротиков В.Д., Станкевич К.С., Цейтлин Н.М. Спектры некоторых остатков сверхновых в дециметровом диапазоне. - *Известия вузов - Радиофизика*, 1965, т. 8, № 3, с. 437 - 440.
49. Klein M.J., and Stelzried C.T. Calibration radio sources for radio astronomy: precision flux density measurements at 2295 MHz.-*Astron.J.*, 1976, v.81, N12, p.1078-1083.
50. Fomalont E.B., and Moffett A.T. Positions of 352 small-diameter radio sources.-*Astron.J.*, 1972, v.76, N1, p.5-11.
51. Fomalont E.B. Two-dimensional structures of 76 extragalactic radio sources at 1425 MHz.-*Astron.J.* 1971, v.76, N6, p.513-524.
52. Wills B.J. Accurate spectra of 300 radio sources from the Parkes catalogue: observational results.-*Austral.J.Phys.*, *Astrophys.Suppl.*, 1975, N38, p.1-65.
53. Guidice D.A. Spectra of nine discrete radio sources in the 20-40 Mc/s range.-*Nature*, 1966, v.211, N5044, p.57-59.
54. Scott P.F., Shakeshaft J.R. The flux density scale for radio sources at 81.5 MHz.-*Mon.Not.R.Astr.Soc.* 1971, v.154, N4, p.19p-23p.
55. Horton P.W., Conway R.G., and Daintree E.J. Measurements of the spectrum of 387 radio sources at centimeter wavelengths.-I.-*Mon.Not.R.Astr.Soc.* 1969, v.143, N3, p.245-271.
56. Mezger P.G., Schraml J. Brightness temperature distribution flux density ratios and polarization of the strongest nonthermal radio sources at $\lambda = 1.95$ cm wavelength.-*Astron.J.* 1966, v.71, N9, p.864.
57. Sloanaker R.M., and Nichols J.H. Positions, intensities and sizes of bright celestial sources at a wavelength of 10.2 cm. - *Astron.J.* 1960, v.65, N3, p.109-116.
58. Braude S.Ya., Megn A.V., Sokolov K.P., Tkachenko A.P., and Sharykin N.K. Source catalogue in the range of declinations 0° to 10° . - *Astrophys.Space Sci.*, 1979, v.64, N1, p.73-126.
59. Westerhout G. A survey of continuous radiation the galactic system at a frequency of 1390 Mc/s.-*Bull.Astron.Inst.Netherl.*

1958, v.14, N488, p.215-263.

60. Seeger C.L., Westerhout G., van de Hulst H.C. The flux density of some radio sources at 400 Mc/s.-Bull Astron.Inst.Netherl., 1956, v.13, N472, p.89-99.
61. Mills B.Y., Slee O.B., Hill E.R. A catalogue of radio sources between declinations $+10^{\circ}$ and -20° .-Austral.J.Phys.1958, v.11, N3, p.360-387.
62. Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М., Виноградова Л.В., Гиттерман Х.Ф. Абсолютные измерения интенсивности излучения Кассиопеи А, Лебеда А и Тельца А в диапазоне волн 3 - 15 см. - Известия вузов - Радиофизика, 1970, т. 13, № 6, с. 823 - 829.
63. Виноградова Л.В., Дмитренко Д.А., Цейтлин Н.М. Абсолютные измерения интенсивности излучения Кассиопеи А, Лебеда А и Тельца А в диапазоне волн 15 - 30 см. - Известия вузов - Радиофизика, 1971, т. 14, № 1, с. 157 - 159.

Дата поступления статьи
' 8 июня 1984 г.

Валерий Павлович Иванов
Казимир Станиславович Станкевич

РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ АБСОЛЮТНАЯ ШКАЛА ПОТОКОВ

Подписано в печать 03.10.84 г. МЦ 01888. Формат 60 x 84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 3,02 усл. печ. листа
Тираж 120. Заказ 4086. Бесплатно.

Отпечатано на ротационте НИРФИ