

УДК 523.164.4

## РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКАЯ АБСОЛЮТНАЯ ШКАЛА ПОТОКОВ

(Обзор)

*В. П. Иванов, К. С. Станкевич*

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение
2. Абсолютные шкалы потоков
3. Метод относительных спектров
4. Выбор первичного стандарта и источников группы сравнения
5. Вторичные эталоны
6. Сравнение абсолютных измерений, выполненных методами эталонных диполей и «искусственной Луны»
7. Сравнение абсолютных измерений, выполненных методами эталонных рупоров и «искусственной Луны»
8. Сравнение абсолютной шкалы потоков, основанной на методе «искусственной Луны», с предшествующими абсолютными шкалами

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность радиоизлучения и ее 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 всем 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  $0,18 \cdot 10^{-26} \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{Гц}$  на длине волны 21 см. По-видимому, 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 измерений. 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 ее построении использовался метод относительных спектров, являющийся мощным средством для отбора эталонных спектров.

## 2. АБСОЛЮТНЫЕ ШКАЛЫ ПОТОКОВ

Впервые систематизация спектров дискретных источников была проведена Уитфильдом [3] в 1957 году. В этой работе содержались спектры 31 источника с потоками, измеренными относительно первичного стандарта — Кассиопеи А, спектр которой 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 требованиям, предъявляемым к первичному стандарту. Умеренной интенсивностью в данном случае считается интенсивность, на 1—2 порядка меньшая, 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 приемника, неизбежным при прямом сравнении более слабых источников с первичным эталоном. Вторичные стандарты выбираются равномерно распределенными по небу, что дает возможность при сравнении с ними других источников уменьшить перемещения луча антенны и возникающие при этом ошибки из-за изменения ее усиления. Кроме того, наблюдения могут проводиться в удобное время суток, исключающее воздействие Солнца.

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

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

Шкала СКЛ, опубликованная в 1963 году Конвеем, Келлерманом и Лонгом [4], получила быстрое и всеобщее признание. Первичным

стандартом служила Кассиопея А. Спектр ее 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 учетом равномерного по спектру векового убывания потока Кассиопеи А на 1% в год, согласно [5]. Полученный стандартный спектр в диапазоне частот  $38 \text{ МГц} \leq v \leq 3,2 \text{ ГГц}$  удовлетворял простому соотношению

$$S_v = S_1 v^{-\alpha} \quad (1)$$

или

$$\lg S_v = \lg S_1 - \alpha \lg v, \quad (1a)$$

где  $S_v$  — поток (Ян) на частоте  $v$ ,  $S_1$  — поток при  $v=1 \text{ МГц}$ ,  $v$  — частота ( $\text{МГц}$ ),  $\alpha$  — спектральный индекс. Значения параметров спектра Кассиопеи А в шкале CKL 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: 3С 123, 3С 161, 3С 196, 3С 348, 3С 353, 3С 380 и 3С 409. Их спектры были определены в диапазоне 38—1420 МГц относительно первичного стандарта — Кассиопеи А — и считались близкими к простым степенным (что впоследствии оказалось верным лишь частично). В целом работа содержит спектры 160 источников, главным образом, из каталогов 3С и 3СР; спектры получены путем 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 CKL и содержит измерения потоков 238 источников на пяти частотах: 475, 710, 958, 1420 и 2841 МГц; измерения проведены с помощью двухэлементного интерферометра. Абсолютная привязка шкалы К основана на спектре первичного стандарта Кассиопея А, идентичном принятому в CKL. В качестве вторичных эталонов было выбрано пять источников малой угловой протяженности: 3С 123, 3С 348, 3С 353, 3С 380 и 3С 409. При сравнении с первичным стандартом их спектры оказались близкими к степенным для частот  $38 \text{ МГц} \leq v \leq 1420 \text{ МГц}$ . Калибровочные процедуры шкал CKL и К имеют небольшое отличие. В обеих работах потоки вторичных эталонов определены на ряде частот  $v_i$ , где имелись точные сравнения их с первичным эталоном. В CKL именно эти значения потоков приняты в качестве стандартных на частотах  $v_i$ , 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  $v_i$  могут не совпадать с измеренными. Шкала К не отличается от CKL больше чем на 3% на каждой из частот.

В 1965 г. Баарсом, Мецгером и Вендкером опубликована шкала BMW [6], где в качестве стандартных в сантиметровом диапазоне предлагаются четыре сильнейших нетепловых источника: Кассиопея А, Тельца 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  $400 \text{ МГц} \leq v \leq 35 \text{ ГГц}$ .

Спектр Кассиопеи А строился на основе данных как абсолютных измерений различного вида, так и относительных измерений, редуцированных к эпохе 1964.4 с учетом векового уменьшения потока, принятого равным 1,1% в год. Полученный спектр состоит из двух прямых участков с изломом на частоте  $v=7 \text{ ГГц}$ . Спектры Лебедя А и Девы А были найдены путем сравнения с первичным эталоном (Телец А) в диапазонах  $320 \text{ МГц} \leq v \leq 14,5 \text{ ГГц}$  и  $400 \text{ МГц} \leq v \leq 14,5 \text{ ГГц}$  соответ-

ственno и играли роль вторичных эталонов. Вводилась тщательная коррекция в соответствии с угловыми размерами и поляризацией источников.

Шкала KPW [7] опубликована Келлерманом, Паулини-Тосом и Вильямсом в 1969 году. Спектр первичного стандарта — Кассиопеи А — строился по данным абсолютных измерений, выполненных разными методами, но с ошибкой меньше 5%, при наличии полного описания методики. Все измерения Кассиопеи А, а также сравнения с ней редуцированы к эпохе 1964. 4 в предположении, что поток этого источника уменьшается на 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  $\lg S_1 = 5,787$ . В качестве вторичных стандартов выбраны 3C 218 (Hyd A), 3C 274 (Vir A), 3C 348 (Нег A) и 3C 353, имеющие умеренно сильные потоки и спектры, близкие к степенным в диапазоне  $38 \text{ МГц} \leq v \leq 5 \text{ ГГц}$ . KPW содержит спектры почти всех источников 3C R-каталога (всего 315 источников); спектры определены относительно вторичных стандартов на частотах 38, 178, 750, 1400, 2695 и 5000 МГц. Точность взаимного сравнения источников в этой работе весьма высока благодаря тщательному учету их угловой структуры и поляризаций, совершенству приемной аппаратуры. Работы [8, 9] явились продолжением шкалы KPW на частоты 10,7 и 14,9 ГГц.

Но вскоре после появления шкалы KPW появились сообщения о том, что эта шкала, как и более ранние, существенно занижена на частотах ниже 750 МГц. Речь идет, 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 KPW, и на 8 и 12%, чем в шкалах K и CKL соответственно. В другой работе [54] Скоттом и Шейкшафтром приведены точные измерения тридцати источников относительно Кассиопеи А и Лебедя А на частоте 81,5 МГц, у которых потоки измерены абсолютно Паркером [10]. Сравнение показало, что шкала KPW 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, уточненную и определенную в более широком диапазоне частот, абсолютную шкалу потоков BH [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, привлеченных к построению стандартного спектра Кассиопеи А, к эпохе 1965.0 сделана с учетом частотной зависимости уменьшения ее 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 BH аппроксимируется степенной функцией с постоянными параметрами в диапазоне  $81,5 \text{ МГц} \leq v \leq 35 \text{ ГГц}$ , равными  $\alpha=0,787$ ,  $\lg S_1=5,864$ , на эпоху 1965.0.

Кроме Кассиопеи А шкала BH включает в себя спектры Тельца А, Лебедя А и Девы А; первые два построены как на основании данных абсолютных измерений, так и путем сравнения с Кассиопеей А. Спектр Девы А, являющейся вторичным стандартом, построен в диапазоне 400 МГц  $\leq v \leq 15$  Гц по 10 точным измерениям относительно остальных трех источников. Сравнение шкал KPW и BMW с BH показывает, что последняя дает более высокие потоки на частотах ниже 3000 МГц; выше 3000 МГц ситуация обратная. Шкала BH считается определенной в диапазоне 100 МГц  $\leq v \leq 20$  ГГц.

Всего лишь через год, в 1973 году, опубликована еще одна работа Уиллса [14] (W) по калибровке потоков и определению спектров на радиочастотах. Построение шкалы в [14] не имеет принципиальных отличий от KPW, 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, измеренных методом «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:  $\alpha = 0,763 \pm 0,006$ ,  $\lg S_1 = -5,784 \pm 0,0043$ .

Для построения абсолютной шкалы потоки ряда источников, играющих в этой работе роль вторичных стандартов, были найдены на нескольких частотах из прямых сравнений с первичным эталоном — Кассиопеей А. Определив спектры этих же источников в подвергнутой предварительному сглаживанию шкале К [15], автор нашел 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, примененные в построении шкалы W, не привели к большим различиям от ее прообраза — шкалы К.

Все измерения, использованные в работе [14], корректировались с учетом углового разрешения источников и их поляризации. Шкала Уиллса охватывает диапазон частот  $81 \text{ МГц} \leq v \leq 8000 \text{ МГц}$ . Потоки, даваемые этой шкалой, существенно отличаются от KPW и ВН. Сравнение W и ВН показывает их сильное расхождение, зависящее к тому же от частоты:

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

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 неопределенность шкал [12, 14] может существенно превышать приведенные в них ошибки, а результат подтвержден воздействию способа селекции исходных данных.

В 1973—75 гг. в работах [1, 47, 30] сообщалось о новых экспериментальных данных измерений скорости уменьшения потока Кассиопеи А, из которых следует зависимость потока от частоты. Новые абсолютные измерения потоков Кассиопеи А и других источников были представлены в диапазоне  $0,5\text{--}10 \text{ ГГц}$  [1], а также на частоте  $22,285 \text{ ГГц}$  [24] и на  $26,3 \text{ МГц}$  [35].

Эти результаты нашли отражение в работе Баарса, Генцеля, Паулиси-Тоса и Витцеля [16], опубликованной в 1977 г., в которой построена новая абсолютная шкала потоков BGPW. Методика ее построения не имеет принципиальных отличий от аналогичных работ, опубликованных ранее. Первичный стандарт — Кассиопея А, спектр ее вновь был синтезирован по данным абсолютных измерений, выполненных разными методами в диапазоне от  $22 \text{ МГц}$  до  $31 \text{ ГГц}$ . В диапазоне  $0,3 \leq v \leq 31 \text{ ГГц}$  этот спектр оказался прямым.

Принято, что скорость уменьшения потока  $d$  зависит от частоты в виде

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

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

Параметры стандартного спектра на эпоху 1965.0 в диапазоне  $0,3 \text{ ГГц} \leq v \leq 31 \text{ ГГц}$  равны  $\alpha = 0,792 \pm 0,007$ ,  $\lg S_1 = 5,83 \pm 0,025$ . На эпоху 1980.0  $\alpha = 0,77 \pm 0,007$ ,  $\lg S_1 = 5,745 \pm 0,025$ . 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, 18], содержащих более протяженные участки спектра, чем, например, работа [19], используемая в BGPW. Основные мотивы, выдвинутые авторами для обоснования селекции, заключаются 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 BGPW 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 Лебедя А. Параметры этих спектров:

Телец А —

$$1 \text{ ГГц} \leq v \leq 35 \text{ ГГц}, \quad \alpha = 0,299 \pm 0,009, \quad \lg S_1 = 3,915 \pm 0,031;$$

Лебедь А —

$$2 \text{ ГГц} \leq v \leq 31 \text{ ГГц}, \quad \alpha = 1,244 \pm 0,014, \quad \lg S_1 = 7,161 \pm 0,053.$$

Ниже 2 ГГц спектр Лебедя А предполагается плавно загибающимся вниз.

Система вторичных стандартов, включающая 14 умеренно-сильных источников с простыми спектрами, определена в диапазоне  $400 \text{ МГц} \leq v \leq 31 \text{ ГГц}$ . До 31 ГГц определены спектры двух тепловых источников: DR 21 и NGC 7027, 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  $0,4 \text{ ГГц} \leq v \leq 22,285 \text{ ГГц}$  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  $\alpha_g \approx 3 \div 4$ ; 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, ее спектр, считающийся в BGPW степенным, определен в диапазоне  $400 \text{ МГц} \leq v \leq 25 \text{ ГГц}$ :  $\alpha = 0,856 \pm 0,01$  и  $\lg S_1 = 5,023 \pm 0,034$ . Угловые размеры вторичных стандартов в BGPW различны: от 1'' (3C48, 3C147, 3C286) до 50—200'' (3C218, 3C227, 3C348, 3C353).

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 BGPW. Вновь можно наблюдать существенные отличия новой шкалы от ее ближайших предшественников — ВН и W, выходящие за пределы ошибок. Для иллюстрации приведем табл. 7 из [18], здесь — это табл. 1.

Шкала BGPW сейчас наиболее широко применяется в радиоастрономических измерениях во всем мире.

Таблица 1

Частота, МГц	CKL	K	KPW	BMW	VH	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

Почти одновременно с BGPW, также в 1977 году, была опубликована работа Алтунина, Иванова, Станкевича [17]. Принципиальное отличие шкалы АИС [17] от других состоит в том, что спектры ее первичных стандартов основаны только на абсолютных измерениях методом «искусственной Луны».

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

На частотах  $25 \text{ МГц} \leq v \leq 10 \text{ ГГц}$  первичным эталоном являлась Кассиопея А. Параметры ее спектра были получены из абсолютных измерений, проведенных в диапазоне  $0,5-10 \text{ ГГц}$  методом «искусственной Луны» на Кара-Даге в 1973 году. Измеренный спектр оказался прямым, а его продолжение до частот декаметрового диапазона при неизменных параметрах  $\alpha$  и  $\lg S_1$  показало хорошее соответствие с результатами измерений на УТР-1 в Харькове [32]. Поэтому в работе [17] было принято, что спектр Кассиопеи А прямой в диапазоне частот  $25 \text{ МГц} \leq v \leq 10 \text{ ГГц}$  и удовлетворяет соотношению (1а) 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 Лебедю А, имеющему меньшие угловые размеры. Спектр его в диапазоне  $6 \text{ ГГц} \leq v \leq 20 \text{ ГГц}$  также считался линейным с параметрами  $\alpha=1,241$ ,  $\lg S_1 = 7,0833$ , полученными из абсолютных измерений методом «искусственной Луны» на Кара-Даге.

На частотах, превышающих  $20 \text{ ГГц}$ , первичным стандартом становился Юпитер, яркостная температура которого по данным абсолютных измерений методом «искусственной Луны» на Кара-Даге на частоте  $v=35 \text{ ГГц}$  составила  $137 \pm 5 \text{ К}$ .

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

- 1) постоянство потока во времени;
- 2) точно измеренный относительно первичного стандарта спектр;
- 3) достаточная интенсивность на частотах, где они применяются, как стандарты;
- 4) угловые размеры не превышают  $1'$ ;
- 5) степень линейной поляризации меньше 10%.

В результате проведенного 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 трех диапазонов частот.

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

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

На частотах выше  $6 \text{ ГГц}$  вторичными эталонами стали 5 источников с достаточно большой интенсивностью на  $v = 10 \text{ ГГц}$ . Это ЗС 123, ЗС 147, ЗС 218, DR 21, NGC 7027.

Во всех трех 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 CKL, KPW и BH 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  $v = 408 \text{ МГц}$  [17] выше CKL 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 не 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 путем многократных абсолютных измерений спектра Кассиопеи А методом «искусственной Луны». Как известно, метод основан на взаимном сравнении радиоизлучений источника и «черного» диска, радиопоток которого известен на любой частоте.

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

Начало исследований на Кара-Даге было положено в 1962 году. С 1969 года по настоящее время измерения спектров выполнялись регулярно через два года на 25 частотах, повторяемых во всех сериях и распределенных 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 совместности этих измерений между собой, поскольку спектральные индексы, полученные в однородных сериях измерений в широком диапазоне частот методом «искусственной Луны», отличаются от значений  $\alpha$  в синтезированных спектрах.

3. В [17] спектр Кассиопеи А измерен в короткий промежуток времени единым методом «искусственной Луны» в интервале частот 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 четких критерий, позволяющих оценить правильность спектров источников, составляющих абсолютную шкалу потоков.

### 3. МЕТОД ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ

Метод, позволяющий с высокой точностью определить спектры нескольких источников в широком диапазоне частот  $[v_{\min}, v_{\max}]$  по данным абсолютных измерений лишь в части этого диапазона и относительным измерениям этих источников во всем 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 декаметров 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].

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

$$\lg (S_{\text{н1}}/S_{\text{н2}}) = \lg S_{\text{н1}} - \lg S_{\text{н2}}. \quad (3)$$

Зависимость  $\lg (S_{\text{н1}}/S_{\text{н2}})$  от  $\lg v$  далее всюду называется относительным спектром.

Оба спектра сравниваемых источников можно представить в виде

$$\begin{aligned} \lg S_{\text{н1}} &= \lg S_{11} - \alpha_1 \lg v + f_1(\lg v), \\ \lg S_{\text{н2}} &= \lg S_{12} - \alpha_2 \lg v + f_2(\lg v), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_1(\lg v)$  и  $f_2(\lg v)$  — некоторые функции частоты.

Тогда

$$\lg \frac{S_{\text{н1}}}{S_{\text{н2}}} = \lg \frac{S_{11}}{S_{12}} - (\alpha_1 - \alpha_2) \lg v + [f_1(\lg v) - f_2(\lg v)]. \quad (5)$$

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

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

$$f_1(\lg v) = f_2(\lg v) \text{ при } v_1 \leq v \leq v_2, \quad (6)$$

то, как следует из (5), график зависимости  $\lg (S_{\text{н1}}/S_{\text{н2}})$  от  $\lg v$  будет прямой линией.

2. В общем случае выполнение условия (6) для случайно выбранной пары источников кажется маловероятным. Если в некотором интервале  $v_1 \leq v \leq v_2$  относительный спектр (5) изображается прямой, то почти всегда выполняется более жесткое, чем (6), условие

$$f_1(\lg v) = f_2(\lg v) = 0, \quad v_1 \leq v \leq v_2. \quad (7)$$

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

3. Один из источников в интервале  $v_1 \leq v \leq v_2$  имеет прямой спектр, а спектр второго источника, также всюду линейный, терпит излом в точке  $v=v_{\text{п}}$ , где у него скачком, на величину  $\Delta\alpha$ , меняется спектральный индекс.

Тогда

$$f_1 = \begin{cases} 0, & v_1 \leq v \leq v_{\text{п}} \\ -\Delta\alpha \lg \frac{v}{v_{\text{п}}}, & v_{\text{п}} \leq v \leq v_2 \end{cases}, \quad (8)$$

$$f_2 = 0.$$

Следовательно,

$$\lg S_{\text{и1}} = \begin{cases} \lg S_{11} - \alpha_1 \lg v, & v_1 \leq v \leq v_{\text{п}} \\ \lg S_{11} + \Delta\alpha \lg v_{\text{п}} - (\alpha_1 + \Delta\alpha) \lg v, & v_{\text{п}} \leq v \leq v_2 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lg S_{\text{и2}} = \lg S_{12} - \alpha_2 \lg v,$$

или

$$\lg \frac{S_{\text{и1}}}{S_{\text{и2}}} = \begin{cases} \lg \frac{S_{11}}{S_{12}} - (\alpha_1 - \alpha_2) \lg v, & v_1 \leq v \leq v_{\text{п}} \\ \lg \frac{S_{11}}{S_{12}} + \Delta\alpha \lg v_{\text{п}} - (\alpha_1 + \Delta\alpha - \alpha_2) \lg v, & v_{\text{п}} \leq v \leq v_2 \end{cases}. \quad (10)$$

Как ясно из (10), в этом случае относительный спектр, также оставаясь линейным, терпит излом и изменение спектрального индекса в точке  $v=v_{\text{п}}$  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 определенно, если в сравнении участвует не два источника, а значительно большее их количество.

Предположим, что построен график  $\lg(S_{\text{и1}}/S_{\text{и2}})$ , имеющий излом на той же частоте  $v_{\text{п}}$  и меняющий спектральный индекс на ту же величину  $\Delta\alpha$ , что и график  $\lg(S_{\text{и1}}/S_{\text{и3}})$ , тогда очевидно, что излом принадлежит спектру  $S_{\text{и1}}$ . Поскольку для каждого из источников группы сравнения характерны свои особенности спектра, появляющиеся на определенных для каждого источника частотах, то, повторяясь во всех спектрах отношений данного источника с другими, эти особенности выявляются вполне определенно. 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 возникающая в случае линейности части относительных спектров неопределенность выбора между пп. 1 и 2 в определении вида функции  $f_n$ .

Предположим теперь, что в некотором интервале частот  $v_1 \leq v \leq v_2$ , где  $v_1 \geq v_{\text{min}}$ , а  $v_2 \leq v_{\text{max}}$ , спектр одного источника из группы сравнения определен путем абсолютных измерений. Пусть, для определенности, это источник с номером 1 и в данном интервале частот его спектр является прямым (это условие не необходимо), т. е. известны параметры  $\alpha_1$  и  $\lg S_{11}$ . Тогда, зная функцию  $f_1$ , из анализа относительных спектров в интервале частот  $v_{\text{min}} \leq v \leq v_{\text{max}}$  можно аналитически продолжить спектр на весь частотный интервал  $[v_{\text{min}}, v_{\text{max}}]$  по известному уже закону, согласно выражению (4).

Поскольку полученный спектр является абсолютным, а абсолютные измерения в интервале  $[v_1, v_2]$  проведены каким-либо одним методом (например, методом «искусственной Луны»), то все абсолютные

измёрённый, выполненные разными методами и попадающие в интервал  $[v_{\min}, v_{\max}]$ , 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 единственным возможным.

#### 4. 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 Кассиопеи А; учитывая, что радиоизлучение Крабовидной туманности также переменно [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.

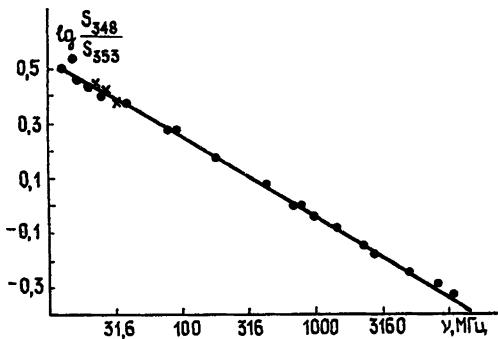


Рис. 1.

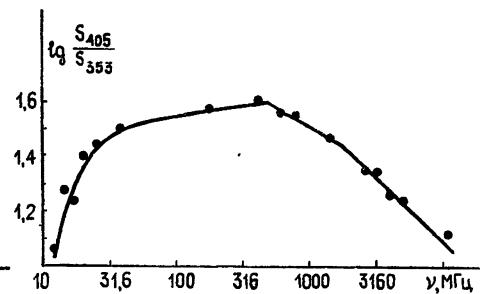


Рис. 2.

Поведение спектра Лебедя А в зависимости от частоты в диапазоне  $10 \text{ МГц} \leq v \leq 30 \text{ ГГц}$  определено методом относительных спектров. С этой целью была подобрана группа источников сравнения, в которую вошли 3C 123, 3C 218, 3C 274, 3C 348, 3C 353. У этих источников не замечена переменность, они чаще, чем другие, сравнивались между собой. Большим преимуществом 3C 123 является малая угловая протяжённость; 3C 218, 3C 274, 3C 348, 3C 353 — вторичные стандарты КРВ, где их спектры считались прямыми в диапазоне  $38 \text{ МГц} \leq v \leq 5000 \text{ МГц}$ . Отношения потоков пар, составленных из этих источников на разных частотах и в разных комбинациях, были найдены по данным работ [4, 8–8, 12, 24, 29, 31, 32, 43–61].

Относительные спектры приведены на рис. 1 и 2.

Анализ относительных спектров этих источников приводит к следующим результатам.

а) Спектр Лебедя А состоит из трех характерных участков. Обозначив через  $S_{v_i}$  — поток,  $v$  — частоту ( $MHz$ ),  $\alpha$  — спектральный индекс,  $i = 1, 2, 3, \dots$  — номер частотного интервала, можно выразить спектр на каждом участке с помощью следующих соотношений.

1)  $10 MHz \leq v \leq 463,5 MHz$  —

$$\lg S_{v_1} = \lg S_{11} - \alpha_1 \lg v - (\gamma/v)^{\delta}, \quad \gamma = 8,652 \text{ MHz}, \quad \delta = 2,167.$$

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

2)  $463,5 MHz \leq v \leq 1832,5 MHz$  —

$$\lg S_{v_2} = \lg S_{12} - \alpha_2 \lg v, \quad \alpha_1 - \alpha_2 = 0,327.$$

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

3)  $1832,5 GHz \leq v \leq 30 GHz$  —

$$\lg S_{v_3} = \lg S_{13} - \alpha_3 \lg v, \quad \alpha_3 - \alpha_2 = 0,193.$$

На частоте  $1832 MHz$  — излом, где  $\alpha$  меняется на 0,193, а выше спектр прямой до частот более  $30000 MHz$ .

Из четырех источников — вторичных стандартов КРВ — лишь один — ЗС 348 (Геркулес А) — имеет прямой спектр в диапазоне  $12,6 MHz \leq v \leq 10,7 GHz$ . Однако спектры оставшихся трех источников также достаточно просты и состоят из двух прямолинейных участков каждый.

Спектр ЗС 218 (Гидра А) имеет излом в точке  $v = 1880 MHz$ , где  $\alpha$  меняется на 0,124. Это случай, когда крутизна спектра уменьшается с ростом частоты.

Линейность спектра Девы А (ЗС 274) подчеркивалась во многих работах. Как уже отмечалось, в BGPW [16] этот спектр считается линейным в диапазоне  $0,4 GHz \leq v \leq 25 GHz$ . Тем более интересен результат, полученный в [25] методом относительных спектров: спектр Девы А состоит из двух прямолинейных участков, один — на частотах  $178 MHz \leq v \leq 1420 MHz$ , второй — в интервале  $2295 MHz \leq v \leq 22285 MHz$  (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  $1420 MHz \leq v \leq 2295 MHz$  нет. В целом, сложный характер спектра Девы А может быть объяснен комбинацией спектров гало и ядра источника, по данным работы BGPW [16].

ЗС 353 имеет спектр, состоящий в диапазоне  $12,6 MHz \leq v \leq 10,7 GHz$  из двух линейных участков с изломом на частоте  $v_p = 4615 MHz$ . 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 Лебедя А при малом угловом разрешении оказалась недостаточной, исключение составляет лишь результат на  $\lambda = 3 см$ . Поэтому при получении спектра Лебедя А в диапазоне  $0,9 GHz \leq v \leq 23 GHz$  применялось сравнение его при достаточно высоком угловом разрешении с Кассиопеей А, спектр которой измерялся в ту же эпоху методом «искусственной Луны» в диапазоне  $0,5 GHz \leq v \leq 10 GHz$ . Отношения потоков Лебедя А и Кассиопеи А были получены в работах, перечисленных в табл. 2. Поток на частоте  $9800 MHz$  — 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].

Таблица 2

Частота, МГц	$\frac{S_{\nu} \text{ Леб.}}{S_{\nu} \text{ Касс.}}$	$S_{\nu} \text{ Леб.,}$ 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	ВН [12]
2667	$0,5525 \pm 0,002$	721	1971.6	ВН [12]
8000	$0,356 \pm 0,002$	185,9	1969	Дент и др. [30]
9800	Абсолютные измерения	$147 \pm 2,5$	1971, 1979, 1980	н. р.
22285	$0,221 \pm 0,005$	52,6	1973	Джансен и др. [24]

График  $\lg S_{\nu} \text{ Леб.}$  в зависимости от  $\lg \nu$ , построенный в диапазоне  $2667 \text{ МГц} < \nu < 22285 \text{ МГц}$  по данным табл. 2, очень хорошо представляется прямой линией с незначительным разбросом экспериментальных точек. Тот факт, что этот источник на частотах выше  $\nu_{\text{п}} = 1832 \text{ МГц}$  должен иметь именно такую форму спектра, следует из анализа относительных спектров. В связи с этим следует отметить, что на частоте  $22285 \text{ МГц}$  поток Лебедя А определен из отношения  $S_{\nu} \text{ Леб.}/S_{\nu} \text{ Касс.}$  по данным [24] и по потоку Кассиопеи А, взятым из линейного продолжения спектра этого источника выше диапазона  $0,5 \text{ ГГц} < \nu < 10 \text{ ГГц}$ , где он был измерен в ту же эпоху методом «искусственной Луны»; правильность положения точек на спектре Лебедя А говорит о линейности спектра Кассиопеи А в 1973 году во всем диапазоне  $0,5 \text{ ГГц} < \nu < 22,285 \text{ ГГц}$ .

Абсолютный спектр Лебедя А в диапазоне  $10 \text{ МГц} < \nu < 30 \text{ ГГц}$  построен на основе относительных спектров и спектра по данным табл. 2, имеющего абсолютную привязку к методу «искусственной Луны». Параметры стандартного спектра Лебедя А приведены в табл. 3, спектр источника представлен на рис. 3.

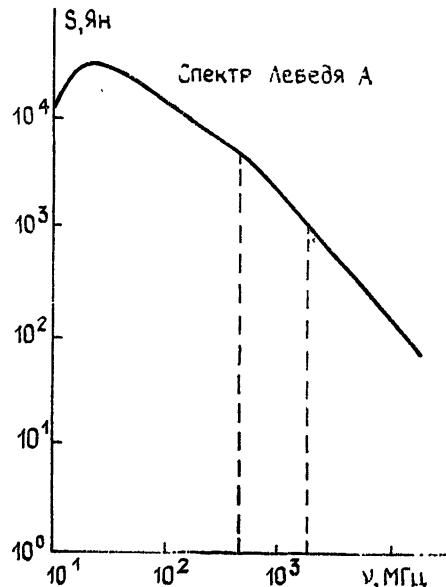


Рис. 3.

Таблица 3

Номер $i$ частотного ин- тервала	$\nu_{\text{min}}, \text{ МГц}$	$\nu_{\text{max}}, \text{ МГц}$	Спектраль- ный индекс $\alpha$	$\lg S_{\nu i},$ Ян	$\delta$	$\gamma, \text{ МГц}$
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	—	—

## 5. ВТОРИЧНЫЕ ЭТАЛОНЫ

Требования к источникам, применяемым в качестве вторичных эталонов, и список отобранных для этого источников приведены в работе [28]. 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 высокочастотного сравнения с первичным стандартом,
- 4) угловые размеры  $\leqslant 1'$ .
- 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 всем диапазоне. Однако на практике такие спектры встречаются достаточно редко, и случай линейного в диапазоне  $12,6 \text{ МГц} \leqslant v \leqslant 10,7 \text{ ГГц}$  спектра источника ЗС 348 (Геркулес А) представляется скорее исключением, чем обычным явлением. Отказ от требования линейности спектра во всем 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 жестко, чем в окончательной формулировке, и выглядели так:

- 3) поток на  $v = 1 \text{ ГГц}$ ,  $S_{(1 \text{ ГГц})} \geqslant 10 \text{ Ян}$ ,
- 4) угловые размеры  $\leqslant 1'$ .

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

Как известно, каталог ЗСР полон для источников с потоками  $S_{(178 \text{ мГц})} \geqslant 8 \text{ Ян}$ , т. е. это каталог наиболее сильных нетепловых радиоисточников со склонениями  $\delta \geqslant -5^\circ$ . Следовательно, выборка из этого каталога гарантирует полноту отбора «сильных» вторичных эталонов, пригодных для калибровки на широтах  $\phi \geqslant 40^\circ$ . Около 30% источников ЗСР имеют угловые размеры меньше  $1'$ , и у них не было обнаружено переменности потока [17]. Из них были отобраны сильные — с потоками  $S_{(1 \text{ ГГц})} \geqslant 10 \text{ Ян}$  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 сопоставлении разных измерений источника ЗС 20, возникли соображения об его переменности, и он был исключен 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  $1'$ , а также высокочастотные стандарты DR 21 и NGC 7027 с потоками на  $1 \text{ Гц}$   $S_v < 10 \text{ Ян}$ . Список вторичных стандартов содержит 14 источников, достаточно равномерно распределенных 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:  $S_i$  — поток в Ян,  $\alpha_i$  — спектральный индекс,  $i = 1, 2, 3$  — номер участка спектра, на  $i$ -м участке спектральные параметры сохраняются.

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 искривленные, с плавной кривизной. Представляемые здесь результаты свидетельствуют, что такая форма спектров встречается значительно реже, чем это предполагалось в упомянутых работах, преобладают спектры в форме ломанных линий. Характерный пример — спектр Лебедя А, в котором имеется два излома и два прямых участка: искривлен лишь низкочастотный участок 1.

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

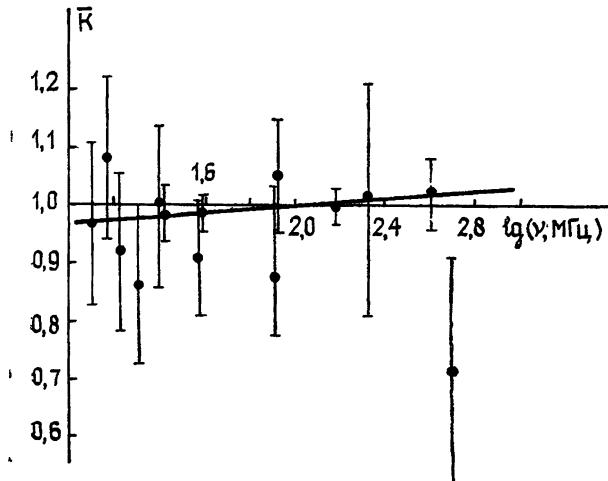


Рис. 4.

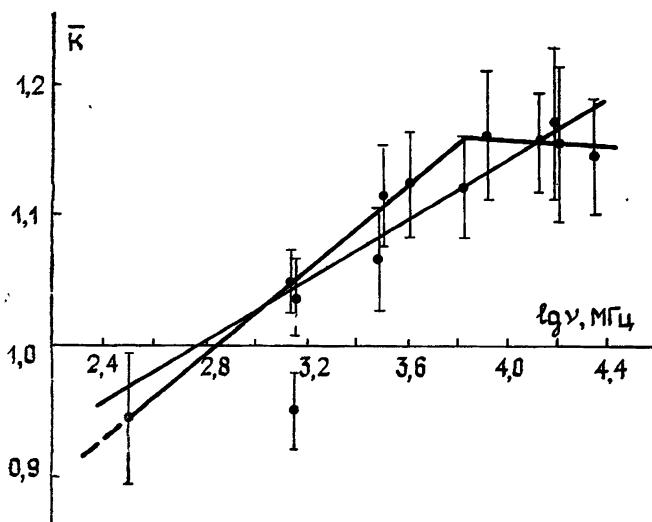


Рис. 5.

Очевидный интерес представляет сравнение результатов абсолютных измерений, проводившихся с эталонными диполями или рупорами и потоками, соответствующими методу «искусственной Луны» на тех же частотах. Такое сравнение содержится в табл. 5 и 6 и рис. 4 и 5.

Таблица 4

Источник	Диапазон I частот, МГц	$\alpha_1$	$\lg S_{11}$	Диапазон II частот, МГц	$\alpha_2$	$\lg S_{12}$	Диапазон III частот, МГц	$\alpha_3$	$\lg S_{13}$
3C 119	38—459	0,143	1,552	459—1483	0,571	2,693	1483—10700	0,745	3,243
123	178—1073	0,7414	3,98	1073—9905	0,846	4,295	9909—14900	1,294	6,087
138	178—1400	0,493	2,489	2295—4036	0,493	2,424	4036—10700	0,809	3,566
147	178—1071	0,502	2,947	1071—2695	0,881	4,095	5000—10700	0,881	4,126
161	85,5—1213	0,657	3,322	1213—8000	0,835	3,872	—	—	—
196	100—1660	0,8393	3,7574	1660—9120	0,9635	4,1573	9120—14900	1,361	3,7312
218	85,5—1880	1,002	4,746	1880—10700	0,878	4,339	—	—	—
274	178—1420	0,8376	4,944	2295—22285	0,8357	4,9032	—	—	—
295	178—1000	0,672	3,468	1000—9030	0,98	4,392	9030—14900	1,616	6,909
348	12,6—4615	1,0694	4,9881						
353	12,6—1415	0,7716	4,1458	4615—10700	0,8148	4,3038	—	—	—
409	178—876	0,848	3,828	876—10700	1,163	4,754	—	—	—
433	178—521	0,75	3,472	521—10700	0,926	8,95	10700—15000	1,194	5,03
DR 21	—	—	—	—	—	—	7000—31000	0,122	1,77
NGC 7027	—	—	—	—	—	—	10000—31000	0,127	1,28

Потоки, соответствующие методу «искусственной Луны», получены из спектров табл. 3 и 4, а также спектров Кассиопеи А и Крабовидной туманности.

Таблица 5

Частота, МГц	Эпоха измерений	$\left\langle \frac{S_{\text{в.а}}}{S_{\text{и.л}}} \right\rangle$	$\left\langle \frac{S_{\text{в.а}}}{S_{\text{и.л}}} \right\rangle - 1, \%$	$\Delta S_{\text{в.а}}, \%$	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 [40]
81,5	1955	0,876	- 12,4	10	405	Эджи, Смит [36]
81,5	1966,9	1,005	+ 0,5	3,1	405	Паркер [40]
85,7	1956	1,05	+ 5	10	144, 218, 348	Литтл [37]
152	1966,5	0,996	- 0,4	3	405	Паркер [40]
210	1955	1,013	+ 1,3	20	405	Эджи, Смит [36]
408	1967	1,019	+ 1,9	6	161, 218	Уайли [41]
500	1955	0,71	- 29	20	405, 461	Эджи, Смит [36]

Таблица 6

Частота, МГц	Эпоха измерений	$\left\langle \frac{S_{\text{в.а}}}{S_{\text{и.л}}} \right\rangle$	$\left\langle \frac{S_{\text{в.а}}}{S_{\text{и.л}}} \right\rangle - 1, \%$	$\Delta S_{\text{в.а}}, \%$	Источники ЗС	Ссылка
320	1962	0,944	- 5,6	5	405	Мак Рей, Сиквейст [38]
1415	1969,5	1,05	+ 5	2,5	461	Энкреназ и др. [20]
1440	1960— —1964	1,038	+ 3,8	3	461	Финдлей и др. [59, 21]
3150	1964,4	1,069	+ 6,9	3	144, 405, 461	Медд, Рамана [40]
3200	1959	1,117	+ 11,7	4	144, 405, 461	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, Рамана [40]
8250	1965,9	1,164	+ 16,4	5	144, 461	Аллен, Барретт [42]
13490	1969,9	1,162	+ 16,2	3	461	Медд [22]
15500	1966,1	1,175	+ 17,5	5,9	144, 461	Аллен, Барретт [42]
16043	1970,6	1,158	+ 15,8	6	144, 461	Уриксон и др. [23]
22285	1973,5	1,149	+ 4,9	4,5	144, 274, 405, 461	Джанссен и др. [24]

Табл. 5 и 6 содержат: в третьей колонке — средние отношения  $\bar{k}$  потоков  $S_{\text{в.а}}$ , измеренных с эталонной антенной, к потокам  $S_{\text{и.л}}$  «искусственной Луной»; в четвертой — среднюю относительную разность потоков в процентах; в пятой — приведенную авторами ошибку абсолютных измерений в процентах.

## 6. СРАВНЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ МЕТОДАМИ ЭТАЛОННЫХ ДИПОЛЕЙ И «ИСКУССТВЕННОЙ ЛУНЫ»

На рис. 4 представлен график, где по оси абсцисс отложен логарифм частоты, а по оси ординат —  $\bar{k} = \langle S_{\text{в.а}}/S_{\text{и.л}} \rangle$  — 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 единицы 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 изме-

ренного потока от представляющей шкалы меньше 1,5 %. Прямая, найденная методом наименьших квадратов для аппроксимации точек рис. 4 в виде

$$\bar{k} = p \lg v + q \quad (11)$$

без учета результатов [36], имеет параметры

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

Отсюда следует, что частотной зависимости отношения потоков  $\langle S_{\text{э.а}} / S_{\text{и.л.}} \rangle$ , 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.

## 7. СРАВНЕНИЕ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ МЕТОДАМИ ЭТАЛООННЫХ РУПОРОВ И «ИСКУССТВЕННОЙ ЛУНЫ»

Принципиально иная ситуация наблюдается для абсолютных измерений с эталонными рупорами.

На графике рис. 5 изображена зависимость  $\bar{k} = S_{\text{э.а}} / S_{\text{и.л.}}$  от логарифма частоты для рупорных антенн по данным табл. 6. Ошибки, как и на рис. 4., — это ошибки абсолютных измерений.

График не содержит ни одной точки, отличающейся от единицы меньше, чем на ошибку. Все точки располагаются на графике, следуя явно видимой закономерности: в интервале  $320 \text{ МГц} \leq v \leq 8250 \text{ МГц}$   $\bar{k}$  возрастает пропорционально  $\lg v$ , выше  $8 \text{ ГГц}$  сохраняется на уровне  $\bar{k} \approx 1,162$ . Интересно сравнить, как представлена эта зависимость  $\bar{k}(\lg v)$  в аналогичных работах двух разных групп исследователей. Обе группы, каждая на своей антенне, выполняли абсолютные измерения на нескольких частотах. Измерения на частотах  $1415 \text{ МГц}$  [20],  $4080 \text{ МГц}$  [31] и  $16 \text{ ГГц}$  [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 трех точек не ложатся на одну прямую. Прямая, проходящая через точки  $v = 1415 \text{ МГц}$  и  $v = 4080 \text{ МГц}$ , описывается выражением

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

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

В работе Медда [22] представлены абсолютные измерения на частотах  $3150$ ,  $6660$  и  $13490 \text{ МГц}$ , 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

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

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

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

что совпадает с (12).

Как уже отмечалось, в диапазоне  $8250 \text{ МГц} \leq v \leq 22285 \text{ МГц}$  разброс значений  $\bar{k}$  мал, среднее значение  $\bar{k} = 1,162$  при максимальных отклонениях  $(\Delta k)_{\max} = 0,013$ . Метод наименьших квадратов с таким же, как и в (14), учетом весов дает в этом диапазоне следующую линейную зависимость:

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

Таким образом, наилучшее представление зависимости для рупорных антенн — это две прямые (14) и (15), пересекающиеся в точке  $v = 8270 \text{ МГц}$ .

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

$$\bar{k} = [0,119 \pm 0,023] \lg v + [0,671 \pm 0,082]. \quad (16)$$

Следует отметить, что все точки табл. 6 в пределах ошибок согласуются с (16).

Установленная для абсолютных измерений с рупорами зависимость  $\bar{k} (\lg v)$  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  $k (\lg v)$  близка в этом случае к линейной, если  $k \approx 1$ . В рассматриваемом случае шкала, основанная на методе «искусственной Луны», построена с учетом анализа относительных спектров, и излом в графике  $\bar{k} (\lg v)$  означает, что абсолютные измерения с рупорами в совокупности не согласуются с методом относительных спектров. Абсолютные измерения с рупорами образуют два прямых участка графика рис. 5. По этим данным с помощью (14)–(16) можно построить абсолютные шкалы, не противоречащие методу относительных спектров. Рассмотрим эти шкалы и их согласованность с разными видами абсолютных измерений.

*a) Рупорная шкала 1.* В шкале, полученной с помощью абсолютных измерений с рупорами в диапазоне  $320 \text{ МГц} \leq v \leq 8270 \text{ МГц}$ , спектральные индексы источников на  $\Delta\alpha = 0,069$  меньше, чем в шкале, полученной методом «искусственной Луны». На краях диапазона  $10 \text{ МГц} \leq v \leq 30 \text{ ГГц}$  между этими двумя шкалами возникают значительные расхождения. Так, на частотах  $v = 12,6; 38$  и  $178 \text{ МГц}$  рупорная шкала 1 соответственно на  $30, 20$  и  $10\%$  ниже шкалы «искусственной Луны» и не согласуется с дипольными абсолютными измерениями и, наоборот, на частотах  $v = 6 \text{ ГГц}$  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 превышает ошибки этих измерений.

*b) Рупорная шкала 2.* Эта шкала основана на абсолютных измерениях с рупорами в диапазоне  $8250 \text{ МГц} \leq v \leq 22285 \text{ МГц}$ . 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  $v < 3 \text{ ГГц}$ , так и эталонных диполей и методом «искусственной Луны», оказываются ниже рупорной шкалы 2 далеко за пределами ошибок.

в) *Рупорная шкала 3*. Основана на совокупности всех абсолютных измерений табл. 6 в диапазоне  $320 \text{ МГц} \leq v \leq 22285 \text{ МГц}$ . Согласуется 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  $v = 12,6, 38$  и  $178 \text{ МГц}$  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  $v = 4080, 8250$  и  $22285 \text{ МГц}$  соответственно на  $10, 13,5$  и  $18,5\%$  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 трех 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  $k(\lg v)$ . Это дает 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  $n(v)$ , позволяющие найти истинные значения потоков по потокам, определенным 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. 6, где по оси ординат отложен корректирующий множитель  $n = S_{\text{ил}}/S_{\text{шк}}$ , по оси абсцисс в логарифмическом масштабе — частота.

Корректирующие множители табл. 7 для всех шкал, кроме BMW и BH, являются результатом усреднения отношений  $S_{\text{ил}}/S_{\text{шк}}$  по многим, в большинстве случаев точечным, источникам. Множители для шкал BMW и BH можно вычислить лишь по трем источникам — ЗС 144, ЗС 274 и ЗС 405, угловые размеры которых значительны.

Из табл. 7 и рис. 6 следует, что шкалы CKL и KPW в метровом диапазоне значительно занижены: на частоте  $38 \text{ МГц}$  соответственно на  $20$  и  $18\%$ , на  $178 \text{ МГц}$  — на  $10$  и  $8\%$ .

В диапазоне  $408 \text{ МГц} \leq v \leq 3200 \text{ МГц}$  шкала CKL завышена в среднем на  $7 \pm 4\%*$  без сколько-нибудь заметного наклона графика  $n(\lg v)$ .

Аналогична ситуация для шкалы K, равномерно завышенной на всех содержащихся в ней частотах на  $6,5 \pm 3,5\%$ . Отсюда следует, что в диапазоне  $0,4 \text{ ГГц} \leq v \leq 3 \text{ ГГц}$  спектральные индексы источников в шкалах CKL и K в среднем даны верно. Этот вывод следует сопоставить с тем фактом, что спектральный индекс первичного эталона шкал CKL и K — Кассиопеи A — равен 0,77, что значительно меньше, чем по данным метода «искусственной Луны» в этом диапазоне.

\* Здесь и далее даны максимальные отклонения от среднего.

Таблица 7

Шкала	CKL								[4]
$\nu, M\Gamma\zeta$	38	178	240	408	412	710	958	1420	3200
$n$	1,2	1,1	1,1	0,91	0,95	0,97	0,94	0,89	0,95
Шкала	K								[15]
$\nu, M\Gamma\zeta$					475	710	958	1420	2841
$n$					0,9	0,946	0,968	0,923	0,942
Шкала	BMW								[6]
$\nu, M\Gamma\zeta$	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	
$n$	1,055	1,013	0,959	0,901	0,874	0,854	0,842	0,847	
Шкала	KPW								[7]
$\nu, M\Gamma\zeta$	38	178	750	1400	2695	5000	10700	14900	
$n$	1,18	1,08	0,98	0,95	0,91	0,9	0,91	0,92	
Шкала	BH								[12]
$\nu, M\Gamma\zeta$	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	
$n$	1	0,98	0,965	0,904	0,889	0,878	0,871	0,864	
Шкала	W								[14]
$\nu, M\Gamma\zeta$	468	635	960	1410	2650	2700	5000	5009	
$n$	0,93	0,91	0,92	0,91	0,86	0,89	0,91	0,91	
Шкала	BGPW								[16]
$\nu, M\Gamma\zeta$	408	750	1400	2700	5000	8000	10700	15000	22235
$n$	0,985	0,95	0,93	0,89	0,91	0,91	0,93	0,92	0,93
Шкала	AIS								[17]
$\nu, M\Gamma\zeta$	178	408	750	960	1400	2695	5000	8000	10000
$n$	0,75	0,88	0,965	0,995	1,004	0,985	0,982	1,11	1,11

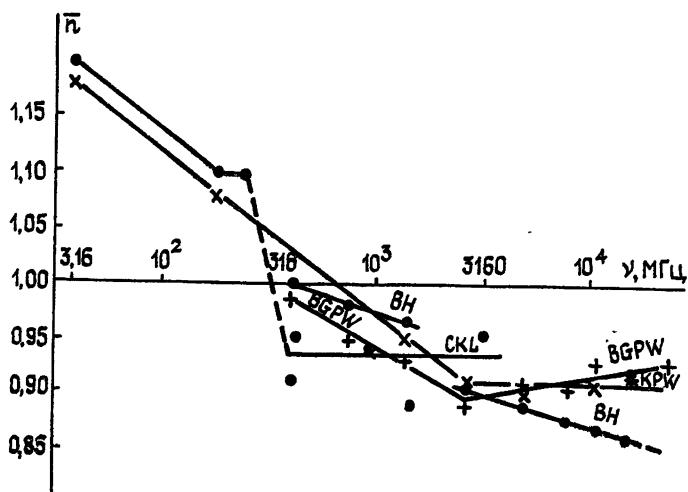


Рис. 6.

Шкала W близка по поведению к шкале K, с которой она связана генетически. Она также равномерно завышена, но на  $9 \pm 2\%$  (без учета частоты  $2650 M\Gamma\zeta$ , 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  $450 M\Gamma\zeta \leq \nu \leq 5000 M\Gamma\zeta$ , хотя для первичного стан-

дарта Кассиопеи А приводится сильно заниженный спектральный индекс  $\alpha=0,763$ . Как уже отмечалось, в шкалах CKL, 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 BH [12], BGPW [16] и др., неправильно.

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

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

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

Как следует из анализа зависимости  $n(\lg v)$ , в шкале BGPW на частотах от 408 МГц до 2,4 ГГц все спектральные индексы занижены на 0,053, а выше  $v=2,4 \text{ ГГц}$  — 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  $v=2,4 \text{ ГГц}$  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  $0,96 \text{ ГГц} \leq v \leq 6 \text{ ГГц}$ . На частотах выше 6 ГГц шкала АИС занижена на 11% и более, поскольку спектр ее первичного эталона в этом диапазоне — источника Лебедь А — был получен из прямых абсолютных измерений методом «искусственной Луны» на антенных 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 вторичных эталонов. В действительности спектр Кассиопеи А, представленный в [17] прямым от сантиметровых до метровых волн, имеет излом на частоте 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.

В заключение сформулируем основные результаты, вытекающие из проведенного обзора радиоастрономических абсолютных шкал.

1. Абсолютные спектры группы источников в широком диапазоне частот могут быть построены, даже если абсолютные измерения интен-

сивности 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 определенного 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 разных методов абсолютных измерений, даже при сильном различии по частотам.

3. Шкала потоков, построенная на основе анализа относительных спектров и абсолютных измерений методом «искусственной Луны», представленная первичным эталоном Лебедь А и 15 вторичными стандартами, имеет точность не хуже  $\pm 5\%$  в диапазоне  $38 \text{ MHz} \leq v \leq 31 \text{ GHz}$  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 трех 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 дает основание предположить, что рупорные абсолютные измерения содержат частотно-зависимую ошибку, достигающую 16%.

Анализ шкал потоков, обсуждавшихся в обзоре, показывает ошибки их построения, обусловленные двумя главными причинами:

1) несовместимостью абсолютных измерений, основанных на применении эталонных рупоров, со всеми другими видами абсолютных измерений при построении спектра первичного стандарта,

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

Новая абсолютная шкала отличается большей точностью определения потоков и поэтому может быть использована для изучения переменности в радиоизлучении источников умеренной интенсивности. Динамический диапазон шкалы охватывает от 1 до  $10^3$  е. п. на частоте 1 ГГц. В глубоких обзорах измеряются потоки слабых источников, менее 0,01 е. п., и естественно, что для их калибровки нужны эталоны меньшей мощности. Поэтому предполагается дальнейшее развитие шкалы на третичные и, возможно, более высокого порядка эталонные источники [64].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Станкевич К. С., Иванов В. П., Пелющенко С. А., Торхов В. А., Иванникова А. Н. — Изв. вузов — Радиофизика, 1973, 16, № 5, с. 786.
2. Барабанов А. П., Иванов В. П., Станкевич К. С., Торхов В. А. — Письма в Астрон. журн., 1977, 3, № 7, с. 302.
3. Whitfield G. R. — Mon. N. R. Astr. Soc., 1957, 117, № 6, p. 680.
4. Conway G. R., Kellermann K. I., Long R. J. — Mon. N. R. Astr. Soc., 1963, 125, № 3—4, p. 261.
5. Högbom J. A., Shakeshaft J. R. — Nature, 1961, 189, № 4764, p. 561.
6. Baars J. W. M., Mezger P. G., Wendker H. — Astrophys. J., 1965, 142, № 1, p. 122.
7. Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K., Williams P. J. S. — Astrophys. J., 1969, 157, № 1, p. 1.
8. Kellermann K. I., Pauliny-Toth I. I. K. — Astron. J., 1973, 78, № 9, p. 828.
9. Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Preuss E., Witzel A. — Astron. J., 1976, 81, № 12, p. 1084.
10. Parker E. A. — Mon. N. R. Astr. Soc., 1968, 138, № 4, p. 407.

11. Wyllie D. V. — Mon. N. R. Astr. Soc., 1969, 142, № 2, p. 229.
12. Baars J. W. M., Hartsuijker A. P. — Astron. Astrophys., 1972, 17, № 2, p. 172.
13. Scott P. F., Shakeshaft J. R., Smith M. A. — Nature, 1969, 233, № 5211, p. 1139.
14. Wills Beverly J. — Astrophys. J., 1973, 180, № 2, p. 335.
15. Kellermann K. I. — Astron. J., 1964, 69, № 2, p. 205.
16. Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A. — Astron. and Astrophys., 1977, 61, № 1, p. 99.
17. Алтунин В. И., Иванов В. П., Станкевич К. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 7, с. 969.
18. Троицкий В. С., Станкевич К. С., Цейтлин Н. М., Кротиков В. Д., Бондарь Л. Н., Стрежнева К. М., Раухлип В. Л., Иванов В. П., Пельшенко С. А., Зубов М. М., Самойлов Р. А., Титов Г. К., Порфириев В. А., Чекалев С. П. — Астрон. журн., 1971, 48, № 6, с. 1150.
19. Бондарь Л. Н., Зелинская М. Р., Каменская С. А., Порфириев В. А., Раухлип В. Л., Родина В. М., Станкевич К. С., Стрежнева К. М., Троицкий В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1969, 12, № 6, с. 807.
20. Епстеген Р. І., Penzias A. A., Wilson R. W. — Astrophys. J., 1970, 160, № 3, p. 1185.
21. Findlay J. W. — Astrophys. J., 1972, 174, № 3(1), p. 527.
22. Medd W. J. — Astrophys. J., 1972, 171, № 1, p. 41.
23. Wrixon G. T., Gott J. R., Penzias A. A. — Astrophys. J., 1972, 174, № 2, p. 399.
24. Janssen M. A., Golden L. M., Welch W. J. — Astron. and Astrophys., 1974, 33, № 3, p. 373.
25. Иванов В. П. — Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. — Ереван, 1982, с. 392.
26. Иванов В. П. — Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам. — Ереван, 1982, с. 396.
27. Виняйкин Е. Н., Разин В. А. — Астрон. журн., 1979, 56, № 5, с. 913.
28. Иванов В. П., Барабанов А. П., Станкевич К. С., Столяров С. П. — Астрон. журн., 1982, 59, № 5, с. 963.
29. Иванов В. П., Бубукин И. Т., Станкевич К. С. — Письма в Астрон. журн., 1982, 8, № 2, с. 83.
30. Dent W. A., Aller H. D., Olsen E. T. — Astrophys. J., 1974, 188, № 1, p. L11.
31. Wilson R. W., Penzias A. A. — Astrophys. J., 1966, 146, № 1, p. 286.
32. Брауде С. Я., Жук И. Н., Лебедева С. М., Мень А. В., Рябов Б. П. — ДАН СССР, 1968, 180, № 6, с. 1323.
33. Bennett A. S. — Memoirs R. Astr. Soc., 1962, 68, pt. 5, p. 163.
34. Edge D. O., Shakeshaft J. R., McAdam W. B., Baldwin J. E., Archer S. — Memoirs R. Astr. Soc., 1959, 68, pt. 2, p. 7.
35. Viner M. R. — Astron. J., 1975, 80, № 2, p. 83.
36. Adgie R., Smith F. G. — Observatory, 1956, 76, № 894, p. 181.
37. Little A. G. — Austral. J. Phys., 1958, 2, № 1, p. 70.
38. MacRae D. A., Seaquist E. R. — Astron. J., 1963, 68, № 2, p. 77.
39. Findlay J. W., Hvatum H., Waltman W. B. — Astrophys. J., 1965, 141, № 3, p. 873.
40. Medd W. J., Ramana K. V. V. — Astron. J., 1965, 70, № 5, p. 327.
41. Brotan N. W., Medd W. J. — Astrophys. J., 1960, 132, № 2, p. 279.
42. Allen R. J., Barrett A. H. — Astrophys. J., 1967, 149, № 1, p. 1.
43. Heeschen D. S. — Astrophys. J., 1961, 133, № 1, p. 322.
44. Heeschen D. S., Meredith B. I. — Publications NRAO, 1961, 1, № 8, p. 121.
45. Dent W. A., Haddock F. T. — Astrophys. J., 1966, 144, № 2, p. 568.
46. Conway R. G., Daintree E. J., Long R. J. — Mon. N. R. Astr. Soc., 1965, 131, № 2, p. 159.
47. Станкевич К. С., Иванов В. П., Торхов В. А. — Астрон. журн., 1973, 50, № 3, с. 645.
48. Бондарь Л. Н., Кротиков В. Д., Станкевич К. С., Цейтлин Н. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1965, 8, № 3, с. 437.
49. Klein M. J., Stelzried C. T. — Astron. J., 1976, 81, № 12, p. 1078.
50. Fomalont E. B., Moffett A. T. — Astron. J., 1971, 76, № 1, p. 5.
51. Fomalont E. B. — Astron. J., 1971, 76, № 6, p. 513.
52. Wills B. J. — Austral. J. Phys., Astrophys. Suppl., 1975, № 38, p. 1.
53. Guidice D. A. — Nature, 1966, 211, № 5044, p. 57.

54. Scott P. F., Shakeshaft J. R.—Mon. N. R. Astr. Soc., 1971, 154, № 4, p. 19p.  
 55. Horton P. W., Conway R. G., Daintree E. J.—Mon. N. R. Astr. Soc., 1969, 143, № 3, p. 245.  
 56. Mezger P. G., Schraml J.—Astron. J., 1966, 71, № 9, p. 864.  
 57. Sloanaker R. M., Nichols J. H.—Astron. J., 1960, 65, № 3, p. 109.  
 58. Braude S. Ya., Megn A. V., Sokolov K. P., Tkachenko A. P., Sharikin N. K.—Astrophys. Space Sci., 1979, 64, № 1, p. 73.  
 59. Westerhout G.—BAN, 1958, 14, № 488, p. 215.  
 60. Seeger C. L., Westerhout G., Van de Hulst H. C.—BAN, 1956, 13, № 472, p. 89.  
 61. Mills B. Y., Slee O. B., Hill E. R.—Austral. J. Phys., 1958, 11, № 3, p. 360.  
 62. Дмитренко Д. А., Цейтлин Н. М., Виноградова Л. В., Гиттерман Х. Ф.—Изв. вузов — Радиофизика, 1970, 13, № 6, с. 823.  
 63. Виноградова Л. В., Дмитренко Д. А., Цейтлин Н. М.—Изв. вузов — Радиофизика, 1971, 14, № 1, с. 157.  
 64. Шарова О. И.—Тезисы докладов XIV Всесоюзной радиоастрономической конференции по аппаратуре, антеннам и методам.—Ереван, 1982, с. 394.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
16 мая 1985 г.

### Аннотации депонированных статей

УДК 551.510.535

## ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И РАЗВИВАЮЩИЕСЯ СПОРАДИЧЕСКИЕ СЛОИ $E$ В ИОНОСФЕРЕ СРЕДНИХ ШИРОТ

З. С. Шарадзе, Г. Г. Зазашвили, Г. Б. Киквилашвили,  
З. Л. Лиадзе, Н. В. Мосашвили, О. В. Чухрукидзе

Приводятся результаты экспериментального исследования внутренних гравитационных волн (ВГВ), наблюдаемых в ионосфере в периоды наличия развивающихся спорадических слоев  $E$  ( $E_{ss}$ ) в виде квазипериодических вариаций параметров:  $f_b E_{ss}$ ,  $\Delta f E_{ss}$  и  $f_0 F2$ .

ВГВ в нижней термосфере, сопровождающиеся появлением слоев  $E_{ss}$  в районе г. Тбилиси, исследовались с помощью трех ионосферных станций, расположенных в вершинах измерительного треугольника с базой  $\sim 50$  км. Крупномасштабные ВГВ, наблюдавшиеся на высотах  $F$  области в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), захватывающие при своем развитии область  $E$  и приводящие к возникновению слоев  $E_{ss}$ , были изучены по квазипериодическим вариациям  $f_0 F2$ , регистрируемым над девятью далеко разнесенными советскими среднеширотными ионосферными станциями, образующими измерительные треугольники с базой  $\sim 900$  км и более.

Показано, что ВГВ, приводящие к возникновению или модуляции ионизации слоев  $E_{ss}$ , преимущественно распространяются в юго-восточном или юго-западном направлениях. Наиболее значительные волнообразные вариации электронной концентрации и диапазона прозрачности слоев  $E_{ss}$  ВГВ вызывают вблизи 100 км. ВГВ вблизи турбопаузы, регистрируемые в виде квазипериодических вариаций  $\Delta f E_{ss}$ , преимущественно перемещаются днем в юго-западном, а ночью в зональном или в северном направлениях; наиболее вероятные значения скоростей и периодов этих волн лежат в интервалах:  $25 \div 100$  м/с,  $\sim 12 \div 17$  мин и  $\sim 40 \div 120$  мин соответственно; преобладают ВГВ с горизонтальными размерами  $25 \div 100$  км.

Статья депонирована в ВИНИТИ,  
регистр. № 8207—В 85. Деп. от 27 ноября 1985 г.