

**Федеральное агентство по науке и инновациям
Федеральное государственное научное учреждение
«Научно-исследовательский радиофизический институт»**

Препринт № 501

**Эталонирование источников
с секундными угловыми размерами
в качестве стандартов современной
радиоастрономической шкалы потоков**

**Иванов В.П.
Ипатов А.В.
Рахимов И.А.
Смоленцев С.Г.
Станкевич К.С.
Финкельштейн А.М.**

Нижний Новгород – 2005

Иванов В.П.¹, Ипатов А.В.², Рахимов И.А.², Смоленцев С.Г.²,
Станкевич К.С.¹, Финкельштейн А.М.²

Эталонирование источников с секундными угловыми размерами в качестве стандартов современной радиоастрономической шкалы потоков. //Препринт № 501 – Нижний Новгород: ФГНУ «НИРФИ», 2005 – 16с.

УДК 523.164.4

Определены на эпоху 2002.0 спектры стандартных радиоисточников абсолютной шкалы потоков «искусственной луны», имеющих секундные угловые размеры, в диапазоне частот 0.1– 43ГГц.

¹ Федеральное государственное научное учреждение

«Научно-исследовательский радиофизический институт»

² Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

Работа поддержана грантом ведущей научной школы
РФ-112/001/804.

1. Введение

В астрофизических исследованиях важнейшую роль играют спектры радиоизлучения, определяемые в процессе наблюдений объектов с помощью радиотелескопов на основе шкал потоков. Радиоастрономические шкалы потоков представлены совокупностями источников радиоизлучения, спектры которых определены на заданном частотном интервале. Эти спектры служат стандартами для определения интенсивности радиоизлучения других объектов при сравнении путём относительных измерений. Стандартные и измеряемые источники должны иметь сравнимые мощности, поэтому источники – стандарты шкал потоков различны по интенсивности: от наиболее мощных до калибраторов глубоких обзоров неба. Стандартные источники должны иметь малые угловые размеры и излучение с минимальными изменениями во времени. Среди многих источников переменность не обнаружена только у радиогалактик Лебедь А и 3C295. Спектр наиболее мощного из стандартных источников, измеренный абсолютными методами, является первичным стандартом мощности излучения. Вторичные стандартные источники калибруются по первичному стандарту методом относительных измерений. Такова общая схема построения шкал потоков. Таким образом, при обработке данных наблюдений плотности потока и форма спектров источников существенно зависят от выбора шкалы потоков. Среди существующих аналогов, наибольшую точность имеет шкала потоков «искусственной луны». Из наблюдений следует, что источники со стабильным излучением являются редким исключением [1]. В случае переменности стандартных источников, с течением времени после эпохи измерений их спектров, точность шкалы потоков снижается. Для её сохранения требуются регулярные повторные измерения спектров переменных стандартных источников относительно постоянных стандартов. Предметом исследования настоящей работы является определение шкалы потоков «искусственной луны» на современную эпоху.

2. Шкала потоков «искусственной луны»

Шкала потоков «искусственной луны» имеет высокую точность благодаря методике её построения. Спектр первичного эталона шкалы потоков определяется на основе абсолютных измерений, выполненных только по методу «искусственной луны», обеспечивающему высокую точность на волнах дециметрового – миллиметрового диапазонов, при которых сравниваются антенные температуры источника и удаленного абсолютно черного тела (диска). В то же время, область определения шкалы потоков значительно шире интервала частот (0,5 – 15) ГГц, на которых проводились абсолютные измерения, что достигается применением метода относительных спектров [2]. Метод относительных спектров позволяет на основе точных относительных измерений группы источников в достаточно широком частотном диапазоне определить форму спектра каждого из них. Метод заключается в следующем. Если отношения плотностей потоков двух источников измерены в некотором частотном интервале, то логарифм отношения плотностей потоков представляет собой разность спектров этих источников, построенных в логарифмическом масштабе:

$$\log \left[\frac{S_{И1}(\nu)}{S_{И2}(\nu)} \right] = \log S_{И1}(\nu) - \log S_{И2}(\nu), \quad (1)$$

где $S_{И1}$ и $S_{И2}$ – плотности потока первого и второго источников, ν – частота. Зависимость $\log \left(\frac{S_{И1}}{S_{И2}} \right)$ от $\log \nu$ далее называется относительным спектром. Оба сравниваемых спектра можно представить в виде

$$\log S_{И1} = B_1 - \alpha_1 \cdot \log \nu + f_1(\log \nu), \quad (2a)$$

$$\log S_{И2} = B_2 - \alpha_2 \cdot \log \nu + f_2(\log \nu), \quad (2b)$$

где α – спектральный индекс, B – параметр, не зависящий от частоты, $f_1(\log \nu)$ и $f_2(\log \nu)$ – функции частоты ν , показывающие отклонения спектров источников 1 и 2 от линейного закона. С учётом (2a) и (2b), (1) запишется в виде:

$$\log\left(\frac{S_{H2}}{S_{H1}}\right) = (B_2 - B_1) - (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \log \nu + [f_2(\log \nu) - f_1(\log \nu)]. \quad (3)$$

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

$$f_1(\log \nu) = f_2(\log \nu) \text{ в интервале } \nu_1 \leq \nu \leq \nu_2, \quad (4)$$

то $\log\left(\frac{S_{H1}}{S_{H2}}\right)$ линейно зависит от $\log \nu$. Очевидно, что если в

частотном интервале $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$ относительный спектр (3) линеен, то всегда выполняется условие $f_1(\log \nu) = f_2(\log \nu)$. В общем случае выполнение условия (4) для нескольких случайных пар источников представляется маловероятным. Если сравнение нескольких источников даёт линейные относительные спектры, то обычно $f_1(\log \nu) = f_2(\log \nu) = f_i(\log \nu) = 0$.

В этом случае спектры источников удовлетворяют равенству

$$\log S = B - \alpha \cdot \log \nu \quad (5)$$

и являются степенными на данном частотном интервале.

Форму спектров источников можно определить по относительным спектрам. Пусть спектр одного из источников в интервале $\nu_1 \leq \nu \leq \nu_2$ линеен, а у второго источника состоит из двух линейных участков, разделённых изломом на частоте ν_b , где спектральный индекс меняется скачком на величину $\Delta\alpha$:

$$\begin{aligned} \log S_{H1} &= B_1 - \alpha_1 \cdot \log v, & f_1 &= 0, & v_1 \leq v \leq v_2; \\ \log S_{H2} &= B_2 - \alpha_2 \cdot \log v, & f_2 &= 0, & v_1 \leq v \leq v_b; \\ \log S_{H2} &= B_2 - \alpha_2 \cdot \log v - \\ & - \Delta\alpha \cdot \log \frac{v}{v_b}, & f_2 &= -\Delta\alpha \cdot \log \frac{v}{v_b}, & v_b \leq v \leq v_2. \end{aligned}$$

Тогда относительный спектр определяется выражениями

$$\log \left(\frac{S_{H2}}{S_{H1}} \right) = (B_2 - B_1) - (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \log v, \quad v_1 \leq v \leq v_b, \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{S_{H2}}{S_{H1}} \right) &= (B_2 - B_1) + \Delta\alpha \cdot \log v_b - \\ & - (\alpha_2 + \Delta\alpha - \alpha_1) \cdot \log v, & v_b \leq v \leq v_2. \end{aligned} \quad (6b)$$

Согласно (6a) и (6b), относительный спектр в этом случае состоит из двух линейных участков, разделённых изломом на частоте v_b , со скачком наклона $\Delta\alpha$. Из приведённого примера понятно, что излом в относительном спектре означает наличие в спектре одного из сравниваемых источников излома на частоте v_b со скачком наклона $\Delta\alpha$. Аналогичное соответствие существует и для других особенностей спектров. Сравнение нескольких источников позволяет определить форму спектра каждого из них. Задача упрощается, если среди сравниваемых источников имеется хотя бы один с линейным в заданном интервале частот спектром. Анализ на основе метода относительных спектров показал наличие одного и более линейных участков у подавляющего большинства спектров галактических и внегалактических источников. Так, для внегалактических источников с крутыми спектрами в диапазоне метровых – миллиметровых волн характерна форма спектра в виде двух – трёх линейных участков, разделённых изломами. На

частотах изломов спектральный индекс меняется скачком; преобладают спектры с возрастающей по мере роста частоты крутизной. Было показано [3], что частоты изломов зависят от красных смещений объектов и являются их эволюционными характеристиками.

Форма спектров стандартных источников, в том числе первичного стандарта, определяется методом относительных спектров по данным относительных измерений во всем частотном диапазоне шкалы потоков. Информация о спектре является полной, если плотности потока первичного стандарта измерены абсолютными методами, хотя бы на двух частотах внутри диапазона, где известна форма его спектра. Поэтому оказалось возможным определить спектр Лебедя А в диапазоне частот 0,01 – 22,285 ГГц, в то время как абсолютные измерения по методу «искусственной луны» проводились на частотах 0.5 – 15 ГГц. Сравнение вторичных стандартов между собой и с Лебедем А позволило на основе метода относительных спектров определить шкалу потоков «искусственной луны» в диапазоне частот 0,1 – 43 ГГц. Независимое определение формы спектров является важным отличием шкалы потоков «искусственной луны» от других шкал потоков. Шкала потоков «искусственной луны» представлена двумя десятками стандартных источников: первичным стандартом Лебедь А и вторичными, среди которых радиогалактика 3C295 играет особую роль, вследствие отсутствия переменности излучения. Стандартные источники равномерно распределены по северному небу и предназначены для калибровки измерений плотностей потоков, распределённых в широком динамическом диапазоне: различие плотностей потоков стандартных источников превышает 3 порядка.

Угловые размеры стандартных источников 3C48, 3C138, 3C147, 3C286, 3C295 не превышают нескольких секунд дуги, они не разрешаются большими антеннами при работе на коротких волнах, а в области частот $\nu \geq 15$ ГГц шкала потоков «искусственной луны» представлена спектрами этих источников. Они выделены в отдельную группу, как

универсальные стандарты плотностей потока для калибровки антенн, в том числе больших синтезированных апертур, в широком диапазоне частот.

Из сравнения шкал потоков следует, что в шкалах BGPW [4] и её более позднем варианте Ott et al. (1994) [1] плотности потоков на разных частотах дециметрового и сантиметрового диапазонов по-разному (от 0 до 15%) завышены, что деформирует спектры. Ошибки обусловлены методикой построения: спектр первичного стандарта шкалы потоков BGPW был синтезирован из совокупности данных абсолютных измерений разными методами и разной точности, а форма спектров стандартных источников отдельно не проверялась. Среди существующих аналогов, только шкала потоков «искусственной луны» свободна от этого недостатка, вследствие специфики построения. На её основе возможно исследовать особенности спектров, теряемые в других шкалах потоков. К их числу относятся изломы в спектрах внегалактических источников, характеризующие их эволюционное состояние [3]. Спектры тех же источников в шкалах потоков BGPW[4] и Ott et al. (1994) [1] представлены в виде полиномов второй и третьей степеней без изломов.

Большинство внегалактических источников, используемых в шкале потоков «искусственной луны» как вторичные стандарты, слабо переменны [1]. Их спектры в [2 и 5] получены на основе данных наблюдений конца 60-х – начала 70-х годов, и за прошедшие десятилетия замечены изменения в спектрах, достигающие нескольких процентов. Поэтому для сохранения точности шкалы потоков, спектры стандартных источников должны своевременно обновляться на основе современных данных наблюдений. Современные спектры стандартных источников получены в процессе их наблюдений с помощью радиотелескопа РФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН в диапазоне частот 1550 – 8450 МГц с привлечением приведённых к шкале потоков «искусственной луны» данных VLA Calibrator Manual [6 и 1], полученных в близкие эпохи.

3. Наблюдения на радиотелескопе РТФ–32

Плотности потока источников радиоизлучения 3C48, 3C138, 3C147, 3C286, 3C295 были измерены в течении нескольких наблюдательных сессий в 2002-2003гг. на радиотелескопе РТФ–32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН [7] на волнах 19,4см, 13см, 6,2см, 3,5см относительно первичного стандарта шкалы потоков «искусственной луны» Лебедь А (3C405). Погрешность измерений на всех частотах не превышает $\pm 2\%$. Особенности методики наблюдений обусловлены требованиями к точности; можно отметить следующие из них:

1. Вследствие большого различия по мощности Лебеда А и других источников, измерения проводились в два этапа: источники сравнивались с 3C274 (Дева А), который, в свою очередь, калибровался по Лебедю А. Во всех случаях плотности потока сравниваемых источников отличались друг от друга не более чем на порядок, что позволило в полной мере реализовать чувствительность радиотелескопа.

2. На коротких волнах угловые размеры источников 3C274 и 3C405 сравнимы с шириной ДН антенны. Поэтому при переходе от пиковых антенных температур к плотностям потока этих источников необходимо вводить поправки за их частичное угловое разрешение. Для определения корректирующих множителей по уширению ДН в азимутальной и угломестной плоскостях были выполнены сканы через источники. Профили антенных температур, соответствующие сканам, на всех частотах удовлетворительно аппроксимируются гауссианами. Угловая ширина профиля на уровне $0,5 T_A^{\max}$

$$\theta_r = (\theta_B^2 + \theta_S^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

где T_A^{\max} – антенная температура в максимуме профиля, θ_r – ширина профиля на уровне $0,5 T_A^{\max}$, θ_B – ширина диаграммы направленности антенны по мощности на уровне $0,5P$, θ_S – ширина эквивалентного распределения яркостной температуры источника вдоль направления скана при аппроксимации его

функцией Гаусса на уровне $0,5 T_B^{\max}$. Корректирующие множители C_g определялись, в соответствии со стандартной методикой (аналогично, в частности, [1]), после определения θ_S путем сканирования источников:

$$C_g^2 = \left[1 + \left(\frac{\phi_S}{\phi_B} \right)^2 \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{\theta_S}{\theta_B} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где ϕ и θ – угловые координаты в азимутальном и угломестном сечениях.

3. Основным режимом наблюдений выбран накопительный режим ("on-off"). В этом случае серия измерений состоит из нескольких наведений на источник и чередующихся по знаку отведений в две опорные области, симметрично удаленные от источника по азимуту на одной с ним высоте.

4. КИП антенны может меняться с изменением угла места. Для устранения ошибок, связанных с этим эффектом, сравнение любых двух источников проводилось при углах места, одинаковых для обоих источников в пределах $\pm 5^\circ$ от среднего положения; дополнительно, на волнах 3,5 и 6,2 см данные наблюдений корректировались с учетом зависимости усиления от угла места.

В измеренных в интервале частот 1.55 – 8.45 ГГц спектрах зависимость плотности потока от частоты близка к степенной:

$$\lg S(\nu) = \lg S_0 - \alpha \lg \nu / \nu_0, \quad (9)$$

где $S(\nu)$ (ян) – плотность потока на частоте ν (МГц), S_0 – плотность потока на частоте ν_0 .

4. Результаты

Многократные абсолютные измерения методом «искусственная луна» в диапазоне частот 0,5 – 15 ГГц не обнаружили изменений в спектре радиогалактики Лебедь А (3С405) в течении, по крайней мере, 30 лет. На основе этих

данных и применения метода относительных спектров он определён в диапазоне частот 10МГц – 22,285ГГц [2] и состоит из трёх степенных участков, разделённых изломами

1. $10 \text{ МГц} \leq \nu \leq 460 \text{ МГц}$,

$$\lg S_1 = \lg S_{01} - \alpha_1 \cdot \lg \frac{\nu}{\nu_{01}} - \left(\frac{\nu_c}{\nu} \right)^{2.167}, \quad \nu_c = 8.652 \text{ МГц}; \quad (10a)$$

2. $460 \text{ МГц} \leq \nu \leq 1880 \text{ МГц}$,

$$\lg S_2 = \lg S_{02} - \alpha_1 \cdot \lg \frac{\nu}{\nu_{02}}, \quad \alpha_2 - \alpha_1 = 0.327; \quad (10b)$$

3. $1880 \leq \nu \leq 22285 \text{ МГц}$,

$$\lg S_3 = \lg S_{03} - \alpha_1 \cdot \lg \frac{\nu}{\nu_{03}}, \quad \alpha_3 - \alpha_2 = 0.193; \quad (10c)$$

где S_i – плотность потока, α_i – спектральный индекс, S_{0i} – параметр, равный плотности потока на частоте ν_{0i} , если

$$\left(\frac{\nu_c}{\nu} \right)^{2.167} = 0, \quad i=1,2,3 \text{ – номер частотного интервала.}$$

В табл. 1 приведены значения параметров стандартного спектра Лебеда А в каждом из трёх частотных интервалов.

Таблица 1

| Номер частотного интервала i | ν_{\min} , МГц | ν_{\max} , МГц | ν_{0i} , МГц | Спектральный индекс α_i | S_{0i} , Ян |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1 | 10 | 460 | 100 | 0,703±0.01 | 14223±250 |
| 2 | 460 | 1880 | 1000 | 1,051±0.007 | 2152,8±30 |
| 3 | 1880 | 22285 | 10000 | 1,233±0.004 | 141,6±2 |

Стандартные источники шкалы потоков «искусственной луны»: 3С48, 3С138, 3С147, 3С286, 3С295, принадлежат к числу внегалактических источников с крутыми спектрами. Благодаря малым угловым размерам, они не разрешаются при

наблюдениях с помощью 100-метрового Боннского телескопа, а также VLA, на волнах $\lambda \geq 0.7 \text{ мм}$. Спектры определены до верхней частоты 43 ГГц на основе данных измерений с помощью радиотелескопа РТФ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, и данных [1 и 6], приведённых к шкале потоков «искусственной луны». Параметры спектров приведены в таблице 2.

Таблица 2

| Источ ник | Номер частот. интерв. i | ν_{\min} , МГц | ν_{\max} , МГц | ν_{0i} , МГц | Спектраль- ный индекс α_i | S_{0i} , Ян |
|--------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---|-------------------|
| 3C48 | 1 | 178 | 774 | 400 | $0,595 \pm 0,01$ | $35,3 \pm 0,4$ |
| | 2 | 774 | 8792 | 2370 | $0,86 \pm 0,01$ | $9,11 \pm 0,1$ |
| | 3 | 8792 | 43000 | 15000 | $1,186 \pm 0,01$ | $1,566 \pm 0,02$ |
| 3C138 | 1 | 178 | 717 | 400 | $0,457 \pm 0,01$ | $15,1 \pm 0,2$ |
| | 2 | 717 | 8915 | 2370 | $0,647 \pm 0,01$ | $5,33 \pm 0,05$ |
| | 3 | 8915 | 43000 | 15000 | $0,998 \pm 0,01$ | $1,347 \pm 0,015$ |
| 3C147 | 1 | 178 | 803,5 | 400 | $0,489 \pm 0,01$ | $43,7 \pm 0,5$ |
| | 2 | 803,5 | 8704 | 2370 | $0,813 \pm 0,01$ | $12,9 \pm 0,1$ |
| | 3 | 8704 | 43000 | 15000 | $1,112 \pm 0,01$ | $2,445 \pm 0,025$ |
| 3C286 | 1 | 178 | 753 | 400 | $0,307 \pm 0,01$ | $22,4 \pm 0,3$ |
| | 2 | 753 | 8867 | 2370 | $0,538 \pm 0,01$ | $9,97 \pm 0,1$ |
| | 3 | 8867 | 43000 | 15000 | $0,869 \pm 0,01$ | $3,103 \pm 0,03$ |
| 3C295 | 1 | 100 | 987 | 400 | $0,57 \pm 0,01$ | $49,4 \pm 0,05$ |
| | 2 | 987 | 8429 | 2370 | $1,007 \pm 0,01$ | $12,2 \pm 0,1$ |
| | 3 | 8425 | 32000 | 15000 | $1,473 \pm 0,01$ | $1,456 \pm 0,015$ |

Источники малых угловых размеров имеют существенные преимущества в качестве широкодиапазонных стандартов

потока при измерениях с помощью антенн, включая большие синтезированные апертуры. Спектр каждого из пяти источников на частотах выше 178 МГц состоит из трёх линейных участков в виде (9b,c), разделённых изломами. На частотах изломов наблюдается скачок спектрального индекса, возрастающего с ростом частоты. Ниже 178 МГц спектры имеют кривизну.

В табл. 3 приведены данные об изменениях плотностей потока стандартных источников относительно начальной эпохи 1970.0 на частотах 1550, 8450, 15000 МГц. Они получены на основе данных настоящей работы, а также [1, 6, 8], в виде отношений S_{i1}/S_{i0} , где S_{i0} – плотность потока на эпоху 1970.0, $j=1,2$, S_{i1} и S_{i2} – плотности потока на эпохи 1990.8 и 2002.0, соответственно.

Данные таблицы 3 показывают, что наблюдавшиеся изменения плотностей потока стандартных источников внутри интервала времени 32 года существенны – до 15% у 3C138 на частоте 1550 МГц. Изменения в разных промежутках времени могут отличаться по знаку и величине: рост плотности потока сменяется падением, на разных частотах они различны. Характерные временные масштабы и амплитуда этих процессов должны быть определены из дальнейших наблюдений.

Таблица 3

| Источник | ν , ГГц | S_{i1}/S_{i0} | S_{i2}/S_{i0} |
|----------|-------------|-----------------|-----------------|
| 3C48 | 1,55 | 1,01 | 1,0 |
| | 8,45 | 1,05 | 1,02 |
| | 15,0 | 1,06 | 0,99 |
| 3C138 | 1,55 | | 0,87 |
| | 8,45 | | 0,92 |
| | 15,0 | | 0,91 |
| 3C147 | 1,55 | 0,95 | 0,96 |
| | 8,45 | 0,99 | 1,04 |
| | 15,0 | 0,99 | 1,0 |
| 3C286 | 1,55 | 0,98 | 0,99 |
| | 8,45 | 1,04 | 1,04 |
| | 15,0 | 0,96 | 0,98 |

5. Заключение

Поскольку в результате многолетних наблюдений обнаружена переменность потоков стандартных источников, то для сохранения точности шкалы потоков необходимы её повторные калибровки. В связи с такой необходимостью абсолютная шкала потоков «искусственной луны» определена на современную эпоху. Её отличительные особенности:

а) Спектр первичного стандарта получен на основе наиболее точных абсолютных измерений,

б) Форма спектров стандартных источников определена с высокой точностью по относительным измерениям.

Имеют место существенные отличия шкалы потоков «искусственной луны» от BGPW, а также от Ott et al.(1994), наиболее значимы различия в представлении формы спектров.

На эпоху 2002.0 определены спектры стандартных источников с секундными угловыми размерами: 3C48, 3C138, 3C147, 3C286, 3C295 в диапазоне 0,1– 43ГГц. Они основаны на данных наблюдений с помощью радиотелескопа РФ-32 обсерватории Светлое ИПА РАН, а также близких по времени наблюдений данных [6], приведённых к шкале потоков «искусственной луны». Благодаря отсутствию углового разрешения, эти источники могут применяться, как универсальные стандарты плотностей потока для калибровки антенн, в том числе больших синтезированных апертур, в широком диапазоне частот.

Выполнено сравнение спектров стандартных источников шкалы потоков «искусственной луны» для различных эпох, показавшее наличие существенных изменений плотностей потока стандартных источников во времени. Изменения в разных промежутках времени могут отличаться по знаку и величине: рост плотности потока сменяется падением, на разных частотах они различны. Характерные временные масштабы и амплитуда этих процессов должны быть установлены дальнейшими наблюдениями. Информация о параметрах переменности стандартных источников необходима для

определения оптимального интервала между повторными калибровками шкалы потоков.

Работа поддержана грантом ведущей научной школы РИ-112/001/804.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T.P., Standke K.J., Schalinski C.J., Hummel C.A. //Astron. Astrophys., 1994, v.284, p.331.
2. Иванов В.П., Станкевич К.С. //Изв. Вузов, Радиофизика, 1986, т.29, с.3.
- 3.Иванов В.П //Тез. докл. конференции ВАК-2004.Москва, 2004, с.106
4. Baars J.W.M., Genzel R., Pauliny-Toth I.I.K., Witzel A.//Astron. Astrophys., 1977, v.61, p.99.
5. Иванов В.П., Шарова О.И. //Изв. Вузов, Радиофизика, 2002, т.45, с.101.
6. // <http://www.aoc/nrao.edu/gtaylor/calib.html> (VLA Calibrator Manual)
7. Рахимов И.А., Ахмедов Ш.Б., Зборовский А.А., Иванов Д.В., Ипатов А.В., Смоленцев С.Г., Финкельштейн А.М. //Всерос. Астрон. Конф. Тез. докл. Санкт-Петербург, 2001, с.152.
- 8.Kuhr H.,Witzel A., Pauliny-Toth I.I.K., Nauber U. //Astron. Astrophys., S.S.,1981, v.45, p.367.