

УДК 524.7-77:520.8.07:520.27

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЛИБРОВОЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ЧАСТОТАХ 22 И 37 ГГц НА РТ-22 КРАО РАН

© 2023 Ю. В. Сотникова^{1*}, Ю. А. Ковалев²,
А. Н. Ермаков², Л. Н. Вольвач³, А. Е. Вольвач³

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 117997 Россия

³Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

Поступила в редакцию 14 августа 2022 года; после доработки 27 декабря 2022 года;
принята к публикации 29 декабря 2022 года

Представлены результаты измерений спектральных плотностей потоков радиоизлучения 19 калибровочных объектов на полноповоротном телескопе РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории РАН на частотах 22.2 и 36.8 ГГц в 2017–2020 гг. Из них около половины относятся к общепринятым вторичным стандартам с периодически контролируруемыми значениями плотностей потоков на радиочастотах. Измерения проведены для уточнения калибровочных измерений на радиотелескопе РАТАН-600 на высоких частотах. Специфика меридианных наблюдений РАТАН-600 требует иметь «сетку» калибровочных объектов, распределенных по склонениям от -35° до $+90^\circ$, вместо одного – трех общепринятых калибраторов, которых достаточно при наблюдениях на разных высотах с полноповоротной антенной. Оценена переменность радиоизлучения объектов с учетом данных измерений, взятых из литературы, и выполнена интерполяция результатов на частоту 30 ГГц. Получено, что переменность радиоизлучения на 22 ГГц на временах порядка 20–30 лет превышает 10% для объектов 4С+16.09 и 3С309.1. Обсуждаются планы проверки на РТ-22 измерений калибраторов с помощью новой методики, использующей генератор шумового сигнала как индикатор относительной точности плотностей потока радиоизлучения калибраторов.

Ключевые слова: *методы: наблюдательные — телескопы — радиоконтинуум*

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема калибровочных радиоисточников (калибраторов) с надежными значениями спектральных плотностей потоков их излучения существует давно и для большинства радиотелескопов. Связана она с тем, что первичные калибраторы Кассиопея А, Лебедь А, Дева А, Крабовидная туманность (Baars et al. 1977, Perley and Butler 2017), плотности потоков которых в диапазоне 0.05–12 ГГц измерены с типичной погрешностью около 1%, — протяженные. Поэтому их далеко не всегда удобно использовать, а для больших антенн — практически невозможно.

Меридианный радиотелескоп РАТАН-600 (Parijskij 1993) является практически единственным отечественным радиоастрономическим инструментом коллективного пользования, работающим много лет, круглосуточно и круглогодично (Sotnikova 2020), с широкими возможностями измерений многочастотных (1.1, 2.3, 4.7, 8.2, 11.2,

22.3 и 30 ГГц) и одновременных (на масштабах 3–5 минут) радиоспектров с плотностями потоков излучения на уровне десятых долей Янского в разовом прохождении — до 100 объектов в сутки. Однако для измерений исследуемых радиоисточников с точностью 2–10% (Kovalev et al. 1999, Sotnikova et al. 2019) ему необходим набор до 20 квазиточечных калибровочных объектов в диапазоне склонений от -35° до $+90^\circ$, со спектрами, измеренными с максимально высокой точностью. Такой набор калибровочных объектов позволяет построить калибровочную зависимость, отражающую изменение эффективной площади антенны и атмосферного поглощения от высоты источников на коротких длинах волн при реальных абберациях из-за поперечного смещения первичных облучателей от электрической оси телескопа.

Из-за технических особенностей полноповоротным телескопам нужно в 5–10 раз меньше калибровочных объектов — достаточно пары надежных для того, чтобы построить зависимость изменений эффективной площади во всем интер-

*E-mail: lacerta999@gmail.com

вале рабочих высот или азимутов. В отличие от этого, инструменту меридианного типа необходима «сетка» многих калибраторов с хорошо известными и постоянными спектрами для калибровок многочастотных измерений плотностей потоков радиоизлучения. Но большинство из подходящих объектов имеет переменные спектры на временах больше или порядка года (Ott et al. 1994). Поэтому требуется периодический контроль за плотностями потоков их радиоизлучения, особенно на высоких частотах. Фактически, за предыдущие 40 лет только 5 работ были специально посвящены измерениям вторичных калибраторов в широком диапазоне частот, от 50 МГц до 50 ГГц, — на 100-м антенне в Эффельсберге (Германия), на антенной решетке VLA (США) и на 32-м антенне ИПА РАН (Россия) (Baars et al. 1977, Ivanov et al. 2018, Ott et al. 1994, Perley and Butler 2013; 2017).

Целями настоящей работы являются:

- 1) новые измерения калибровочных источников на РТ-22 КРАО РАН на частотах 22.2 и 36.8 ГГц;
- 2) анализ их радиоспектров для повышения надежности использования на радиотелескопе РАТАН-600 и на других телескопах в измерениях спектральных плотностей потоков излучения на высоких частотах.

2. ИССЛЕДУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ И ИХ НАБЛЮДЕНИЯ НА РТ-22

Список исследуемых калибровочных источников включает восемь вторичных стандартов: 3С 48, 3С 147, 3С 161, 3С 249.1, 3С 286, 3С 295, 3С 309.1, и NGC 7027 (Baars et al. 1977, Ott et al. 1994). Еще одиннадцать источников являются калибраторами РАТАН-600: PKS 0023–26, PKS 0237–23, 4С +16.09, 4С +76.03, 3С 138, PKS 1151–34, PKS 1245–19, 4С +12.50, 4С +62.22, В2 2050+36 и PKS 2127+04. Их использование подробно описано в работах Aliakberov et al. (1985), Kovalev et al. (1999), Udovitskiy et al. (2016).

Наблюдения исследуемых источников на радиотелескопе РТ-22 (Симеиз) проводились на частотах 22.2 и 36.8 ГГц с использованием модуляционных радиометров в режиме диаграммной модуляции (Volvach et al. 2008). Ширина главного лепестка диаграммы направленности РТ-22 на частотах 22.2 и 36.8 ГГц составляет 150 и 100 угловых секунд (по уровню 0.5 от максимума) соответственно (Volvach et al. 2000; 2019). Точность наведения и сопровождения инструмента с учетом систематических ошибок — несколько угловых секунд (Nesterov et al. 2000). Точность отражающей поверхности РТ-22 (СКО = 0.21 мм) позволяет проводить наблюдения вплоть до длины волны 2 мм. Эффективная площадь антенны составляет 220 м²

на длине волны 8.2 мм. Она уменьшается примерно на 7% при отклонении температуры окружающего воздуха на 10°С в ту и другую сторону от 17.5°С. На частоте 36.8 ГГц эффективная площадь антенны сохраняется с точностью 5% при переустановке от зенита до угла места 15° (Volvach and Nesterov 2010).

В наблюдениях на частоте 36.8 ГГц мы использовали модуляционный супергетеродинный радиометр с неохлаждаемым параметрическим усилителем на входе, разработанный и изготовленный в ИКИ РАН (Strukov and Skulachev 1986). Радиометр имеет флуктуационную чувствительность 0.01 К при постоянной времени 1 с. Для измерения спектральной плотности потока на частоте 22.2 ГГц использовался радиометр с мазером на входе и с флуктуационной чувствительностью 0.03 К при постоянной времени 1 с. Применялось переключение главного лепестка диаграммы направленности телескопа между двумя направлениями, разнесенными на 8' и 12'5 на частотах 36.8 и 22.2 ГГц соответственно, в азимутальной плоскости с помощью двух облучателей со взаимно-ортогональными плоскостями поляризации. Таким способом удавалось уйти от аномального спектра флуктуаций коэффициентов усиления усилителей вблизи нулевых частот. Как известно, использование модуляционного режима приема позволяет переместить спектр сигналов с нулевых частот на частоту переключений входных сигналов от двух входных рупоров, близкую к 10³ Гц (Volvach et al. 2017). Дополнительным преимуществом используемого способа приема было снижение уровня флуктуаций неоднородностей атмосферы, которые существенны на см-мм длинах волн.

Перед измерением спектральной плотности потока излучения положение источника уточнялось сканированием по прямому восхождению и склонению. Затем радиотелескоп устанавливался на источник поочередно одним и другим входными рупорами, имеющими взаимно-ортогональные линейные поляризации. Антенная температура отклика источника определялась как разность между усредненными в течение 30 секунд откликами радиометра в двух указанных положениях антенны. В зависимости от отношения S/N отклика радиои источника проводились серии из 30–60 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала и оценивалась его среднеквадратичная ошибка. Ортогональная поляризация лепестков позволяла измерять полную интенсивность излучения от источника, независимо от поляризации излучения. Шумовые сигналы от внутреннего генератора шума (ГШ) подавались на входы приемников для калибровки приемных трактов по температуре и контролю усиления. Поглощение излучения в атмосфере Земли учитывалось методом «разрезов

Таблица 1. Принятые значения спектральных плотностей потоков S_ν (в Ян) источников, использовавшихся для калибровки РТ-22

Частота, ГГц	S_ν , Ян			
	DR21	3C 274	Юпитер	Сатурн
36.8	18.3	14.3	158	148
22.2	19.5	21.5	138	128

атмосферы», при которых фиксировались различия антенных температур на фиксированных углах места.

Измеренные с помощью ГШ значения антенных температур, исправленные за поглощение излучения в атмосфере Земли, пересчитывались в спектральную плотность потока по данным наблюдений калибровочных источников DR21, 3C 274, Юпитер и Сатурн (таблица 1). Пересчет антенных температур от радиоисточников в спектральную плотность потока производился с учетом зависимости эффективной площади антенны $A_{\text{эфф}}$ от угла места h . Значения $A_{\text{эфф}}$, определенные по данным наблюдений калибровочных источников, использовались для нахождения зависимости эффективной площади от высоты, которая интерполировалась зависимостью с коэффициентами, вычисляемыми методом наименьших квадратов: $A_{\text{эфф}} = a \sin h + b \cos h + c$. Нестабильности коэффициентов усиления радиометров, шумы аппаратуры, ошибки наведения телескопа и измерений коэффициентов поглощения излучения в атмосфере учитывались используемой методикой оценки ошибок. Среднеквадратичная ошибка измерений спектральной плотности потока определялась ошибкой измерений антенной температуры σ_1 и ошибкой аппроксимации эффективной площади σ_2 . Типичные значения: $\sigma_1 = (2-4)\%$, $\sigma_2 = (3-6)\%$. Характерные ошибки измерений составляли величины (0.05–0.30) Ян в зависимости от потоков радиоисточников и суммарных ошибок наблюдений.

Результаты измерений вторичных стандартов и одиннадцати «ратановских» калибраторов представлены в таблицах 2 и 3. Для девяти калибраторов измерения получены на одну наблюдательную эпоху в 2020 году, для остальных — от двух до шести эпох.

3. РАДИОСПЕКТРЫ

Широкодиапазонные радиоспектры калибраторов строились с использованием новых измерений РТ-22 и литературных источников, в том числе заимствованных из базы данных

CATS¹ — Astrophysical CATalogs Support system (Verkhodanov et al. 2005; 2009; 1997). Основные каталоги и частоты привлеченных литературных данных приведены в таблице 4. Радиоспектры строились в системе обработки спектров штатного пакета FADPS (Verkhodanov et al. 1997) с использованием модуля *spg* (SPectral Graphics) в плоскости «логарифм частоты ν — логарифм плотности потока S_ν » и суммированы на рис. 1. Система позволяет строить графики спектров, устанавливать веса точек различными методами, аппроксимировать спектры набором кривых, задаваемых аналитически, рассчитывать значения спектральных индексов и спектральных плотностей потоков на заданных частотах.

Дополнительно рассчитывались спектральные плотности потоков калибраторов на 22, 30 и 37 ГГц из аппроксимаций их суммарных спектров полиномом первой степени. Диапазон частот аппроксимаций и полученные величины S_ν указаны в таблицах 2–3. Ошибки рассчитанных таким образом значений S_ν составляют 0.8–12% (медианное значение 3.5%).

4. ПЕРЕМЕННОСТЬ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Переменность радиоизлучения объектов была оценена на частотах вблизи 22 и 37 ГГц. Для этого привлекались все измерения, используемые для построения радиоспектров (рис. 1). Литературные данные из CATS и работ Aliakberov et al. (1985), Baars et al. (1977), Ott et al. (1994), Perley and Butler (2013; 2017) использовались на центральных частотах, лежащих в пределах ширины полосы (20%) от центральной частоты наблюдений на РТ-22.

Измерения для вторичных стандартов на частоте вблизи 22 ГГц, взятые из Aliakberov et al. (1985), Baars et al. (1977), Ott et al. (1994), сделаны в 1984, 1976 и 1989 гг. соответственно, то есть временная шкала переменности радиоизлучения калибраторов из этих обзоров — более 30 и 40 лет. Измерения из остальных литературных источников (таблица 5) сделаны в основном на временном масштабе от 20 до 30 лет.

Для количественной оценки переменности рассчитывался индекс переменности V_S (Aller et al. 1992):

$$V_S = \frac{(S_{\text{max}} - \sigma_{S_{\text{max}}}) - (S_{\text{min}} + \sigma_{S_{\text{min}}})}{(S_{\text{max}} - \sigma_{S_{\text{max}}}) + (S_{\text{min}} + \sigma_{S_{\text{min}}})}, \quad (1)$$

где S_{max} и S_{min} — максимальное и минимальное значения измеренной спектральной плотности потока; $\sigma_{S_{\text{max}}}$ и $\sigma_{S_{\text{min}}}$ — ошибки их измерения. Отрицательное значение V_S соответствует случаю, когда

¹<https://www.sao.ru/cats/>

Таблица 2. Результаты измерений восьми общепринятых вторичных калибраторов на РТ-22 в 2017–2020 гг.: колонки (1)–(3) — имя, унифицированное название в списке калибраторов и координаты радиоисточника; колонка (4) — эпоха наблюдений на РТ-22; колонки (5) и (6) — измеренные значения спектральных плотностей потоков S_ν и их погрешности σ (в скобках) на частотах 22.2 и 36.8 ГГц; колонка (7) — диапазон частот, в котором рассчитывалась аппроксимация спектра; колонки (8)–(10) — спектральные плотности потоков (в Ян) на 22, 30 и 37 ГГц, рассчитанные из аппроксимаций суммарных радиоспектров

Источник		RA, Dec 2000.0	Эпоха	$S_{22.2} (\sigma)$, Ян	$S_{36.8} (\sigma)$, Ян	$\Delta\nu$, ГГц	S_{22}	S_{30}	S_{37}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
3C 48	J0137+33	013741.3+330935	2017.04	1.25 (0.24)	0.70 (0.12)	3–60	1.22	0.90	0.73
			2017.10	1.24 (0.21)	0.71 (0.11)				
			2018.05	1.23 (0.19)	0.73 (0.11)				
			2018.11	1.22 (0.22)	0.73 (0.12)				
			2019.04	1.22 (0.21)	0.73 (0.14)				
			2020.03	1.22 (0.19)	0.73 (0.07)				
3C 147	J0542+49	054236.1+495107	2017.04	2.11 (0.31)	1.34 (0.13)	4–60	2.02	1.55	1.29
			2017.10	2.21 (0.28)	1.38 (0.12)				
			2018.05	2.04 (0.17)	1.31 (0.11)				
			2018.11	2.04 (0.28)	1.32 (0.14)				
			2019.11	2.04 (0.22)	1.30 (0.15)				
			2020.04	2.02 (0.17)	1.29 (0.09)				
3C 161	J0627–05	062710.1–055305	2020.04	1.69 (0.24)	1.05 (0.15)	5–60	1.48	1.10	0.90
3C 249.1	J1104+76	110413.7+765858	2020.04	0.10 (0.11)	0.16 (0.09)	1–40	0.13	0.09	0.07
3C 286	J1331+30	133108.3+303033	2020.04	2.53 (0.24)	1.73 (0.14)	4–60	2.56	2.05	1.77
3C 295	J1411+52	141120.5+521210	2020.04	0.87 (0.17)	0.39 (0.15)	4–60	0.96	0.64	0.49
3C 309.1	J1459+71	145907.6+714020	2020.05	1.00 (0.21)	0.71 (0.16)	1–60	1.31	1.07	0.94
NGC 7027	J2107+42	210701.5+421412	2017.10	5.35 (0.29)	4.95 (0.15)	9–50	5.56	5.33	5.18
			2018.05	5.36 (0.21)	5.00 (0.12)				
			2020.05	5.35 (0.18)	5.00 (0.09)				

ошибки измеряемых величин больше их разброса. Такой подход лучше учитывает влияние ошибок измерений на значения индекса переменности. Погрешность индекса переменности оценивалась по приближенной формуле (3), следующей из соотношения (2), которое было получено из выражения (1) по методу распространения средних ошибок в пренебрежении слагаемыми с произведением ошибок:

$$\Delta V_S = \frac{2S_{\min} \sqrt{\sigma_{S_{\max}}^2 + (S_{\max}/S_{\min})^2 \sigma_{S_{\min}}^2}}{(S_{\min} + S_{\max} + \sigma_{S_{\min}} - \sigma_{S_{\max}})^2}, \quad (2)$$

$$\Delta V_S \approx \frac{2S_{\min}(\sigma_{S_{\min}} + \sigma_{S_{\max}})}{(S_{\min} + S_{\max})^2}. \quad (3)$$

При переходе от (2) к (3) мы дополнительно

пренебрегли разностью ошибок в знаменателе (2) и приближенно заменили корень квадратный в (2) на сумму ошибок в (3). Впервые соотношение (3) было использовано Олегом Верходановым при разработке им первого комплекса программ обработки и анализа наблюдений на РАТАН-600 в 1980–1990-е годы.

Спектральный индекс α определен согласно степенному закону $S \sim \nu^\alpha$, где S_ν — спектральная плотность потока на частоте ν , а α — наклон спектра. Он вычислен по стандартной формуле:

$$\alpha = \frac{\lg S_2 - \lg S_1}{\lg \nu_2 - \lg \nu_1}, \quad (4)$$

где S_1 и S_2 — спектральные плотности потоков на частотах ν_1 и ν_2 соответственно.

Таблица 3. Результаты измерений 11 вторичных калибраторов РАТАН-600 на РТ-22 в 2017–2020 гг.: колонки (1)–(3) — имя, унифицированное название в списке калибраторов и координаты радиоисточника; колонка (4) — эпоха наблюдений на РТ-22; колонки (5)–(6) — измеренные значения спектральных плотностей потоков S_ν и их погрешности σ (в скобках) на частотах 22.2 и 36.8 ГГц; колонка (7) — диапазон частот, в котором рассчитывалась аппроксимация спектра; колонки (8)–(10) — спектральные плотности потоков (в Ян) на 22, 30 и 37 ГГц, рассчитанные из аппроксимаций суммарных радиоспектров

Источник		RA, Dec 2000.0	Эпоха	$S_{22.2}(\sigma)$, Ян	$S_{36.8}(\sigma)$, Ян	$\Delta\nu$, ГГц	S_{22}	S_{30}	S_{37}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
PKS 0023–26	J0025–26	002549.1–260213	2017.04	1.46 (0.29)	0.36 (0.08)	5–70	0.89	0.62	0.49
			2017.10	1.51 (0.21)	0.36 (0.09)				
			2018.05	1.51 (0.24)	0.36 (0.08)				
			2018.11	1.50 (0.19)	0.36 (0.09)				
			2020.05	1.41 (0.11)	0.36 (0.13)				
PKS 0237–23	J0240–23	024008.2–230916	2017.04	0.62 (0.25)	0.34 (0.12)	10–50	0.66	0.46	0.36
			2017.10	0.61 (0.23)	0.34 (0.10)				
			2018.05	0.61 (0.21)	0.34 (0.12)				
			2018.11	0.61 (0.23)	0.33 (0.12)				
			2020.04	0.68 (0.23)	0.36 (0.12)				
4C +16.09	J0318+16	031857.8+162833	2017.04	0.73 (0.25)	0.21 (0.08)	5–60	0.49	0.33	0.26
			2018.05	0.73 (0.23)	0.21 (0.09)				
4C +76.03	J0410+76	041045.6+765645	2017.10	1.19 (0.24)	0.7 (0.11)	5–60	1.10	0.89	0.77
			2018.11	1.19 (0.25)	0.71 (0.13)				
3C 138	J0521+16	052109.9+163822	2017.04	1.12 (0.27)	0.65 (0.11)	5–60	1.18	0.91	0.76
			2017.10	1.12 (0.22)	0.67 (0.12)				
			2018.05	1.11 (0.21)	0.65 (0.12)				
			2018.11	1.11 (0.22)	0.65 (0.11)				
			2020.04	1.12 (0.23)	0.71 (0.08)				
PKS 1151–34	J1154–35	115421.8–350529	2020.04	0.84 (0.23)	0.32 (0.16)	20–60	0.90	0.56	0.41
PKS 1245–19	J1248–19	124823.9–195919	2020.05	1.00 (0.21)	0.22 (0.17)	20–50	0.68	0.40	0.28
4C +12.50	J1347+12	134733.3+121724	2020.04	1.59 (0.14)	0.52 (0.09)	2–60	1.03	0.85	0.75
4C +62.22	J1400+62	140028.6+621039	2018.11	0.50 (0.21)	0.29 (0.12)	3–60	0.54	0.43	0.36
			2020.04	0.49 (0.18)	0.29 (0.15)				
B2 2050+36	J2052+36	205252.0+363535	2018.05	0.92 (0.19)	0.28 (0.13)	5–60	0.69	0.48	0.38
			2020.03	0.91 (0.19)	0.28 (0.13)				
			2020.05	0.59 (0.17)	0.28 (0.11)				
PKS 2127+04	J2130+05	213032.9+050217	2020.05	0.59 (0.17)	0.28 (0.11)	5–60	0.54	0.39	0.32

Таблица 4. Основные обзоры радиисточников, использованные при построении радиоспектров на рис. 1. В колонках указаны частота измерений в ГГц, литературная ссылка, название каталога, согласно CATS (при наличии)

Частота, ГГц	Ссылка	Каталог
1.4–22.2	Baars et al. (1977)	
1.4–43.2	Ott et al. (1994)	
0.96, 1.4, 2.3, 3.6, 3.9, 4.8, 7.7, 11.2, 21.7	Aliakberov et al. (1985)	
1–50	Perley and Butler (2013)	
0.05–50	Perley and Butler (2017)	
0.072–0.231	Hurley-Walker et al. (2017)	GLEAM
0.15	Intema et al. (2017)	TGSS
1.4	Condon et al. (1998)	NVSS
2–4	Lacy et al. (2020)	VLASS
4.8	Gregory et al. (1996)	GB6
8.4	Healey et al. (2007)	VLA
0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	Kovalev et al. (1999)	KOV97
4.6, 8.6, 18.4, 20	Murphy et al. (2010)	AT20G
2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	Mingaliev et al. (2001)	NCPMi
0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2	Mingaliev et al. (1998)	PMNMi
0.325, 0.608, 1.38, 1.63, 2.3, 2.69	Stanghellini et al. (1998)	GPSSSt
0.96, 2.3, 3.9, 7.7, 11.2, 21.7	Kiikov et al. (2002)	SRCKi
22.2, 36.8	Vol'vach et al. (2007)	SRCVV
43	VLA calibrators ^a	VLAC list

^a <https://science.nrao.edu/facilities/vla/observing/callist>

Значения индексов переменности радиоизлучения V_{22} и V_{37} на частотах вблизи 22 и 37 ГГц с погрешностью (3), выраженной в процентах, приведены в таблице 5. Прочерк соответствует отрицательному значению V_S ; обозначение «no data» соответствует случаям отсутствия любых измерений, кроме измерения РТ-22 на одну эпоху, согласно таблицам 2–3. В этом случае нельзя оценить индекс переменности.

В результате оценки переменности радиоизлучения с помощью (1) и (3) на частотах 22 и 37 ГГц с получено, что для большинства вторичных стандартов вариации спектральной плотности потока составляют несколько процентов или не превышают ошибок их измерений. Исключение составляют ЗС 295 и ЗС 309.1, для которых индекс переменности V_{22} порядка 10% и 22% соответственно. На частоте 37 ГГц для них получены отрицательные значения V_{37} . При этом квазар ЗС 309.1 в работе Ott et al. (1994) рекомендован к использованию для калибровки с учетом его долговременной переменности Klein and Stelzried (1976).

Для двух вторичных стандартов, ЗС 161 и

ЗС 249.1, переменность не оценена, так как имеются только новые данные РТ-22 на одну эпоху наблюдений.

Отрицательные значения V_{22} получены для трех из одиннадцати «ратановских» калибровочных источников — ЗС 138, J1154–35, 4С +62.22; для восьми объектов значения индекса переменности V_{22} оказались в пределах 0.03–0.11. Оценки переменности на 37 ГГц сделаны только для двух «ратановских» калибраторов — 4С +76.03 и ЗС 138.

У большинства радиисточников спектры на высоких частотах крутые, со спектральными индексами α_{22-37} от -0.7 до -1.3 . Для трех объектов (4С +76.03, 4С +12.50, ЗС 309.1) получены спектральные индексы $\alpha_{22-37} \sim -0.6$, что указывает на возможность переменного радиоизлучения и необходимость их систематического контроля на высоких частотах.

По наблюдениям на РТ-22 КрАО в период 2017–2020 гг. не обнаружено значимой переменности спектральных плотностей потоков объектов.

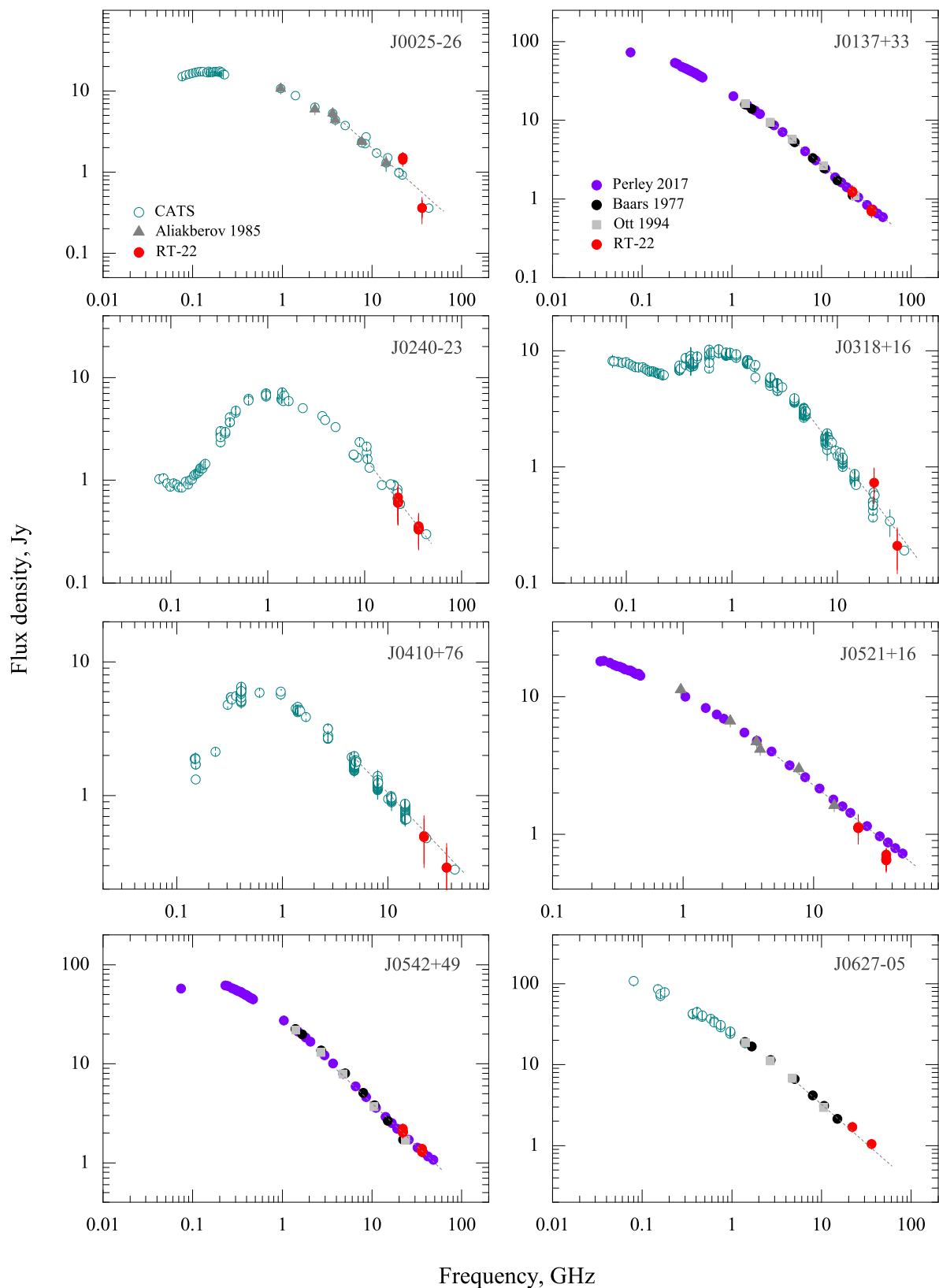


Рис. 1. Суммарные спектры калибровочных объектов. Пунктиром показана линейная аппроксимация (параметры приведены в колонке (7) таблицы 5). Измерения RT-22 показаны красными кружками, измерения Baars et al. (1977) и Ott et al. (1994) — черными кружками и серыми квадратами соответственно, данные из Aliakberov et al. (1985) — серыми треугольниками, фиолетовые кружки — спектральные плотности потоков из работ Perley and Butler (2013; 2017). Измерения из CATS показаны сине-зелеными пустыми кружками.

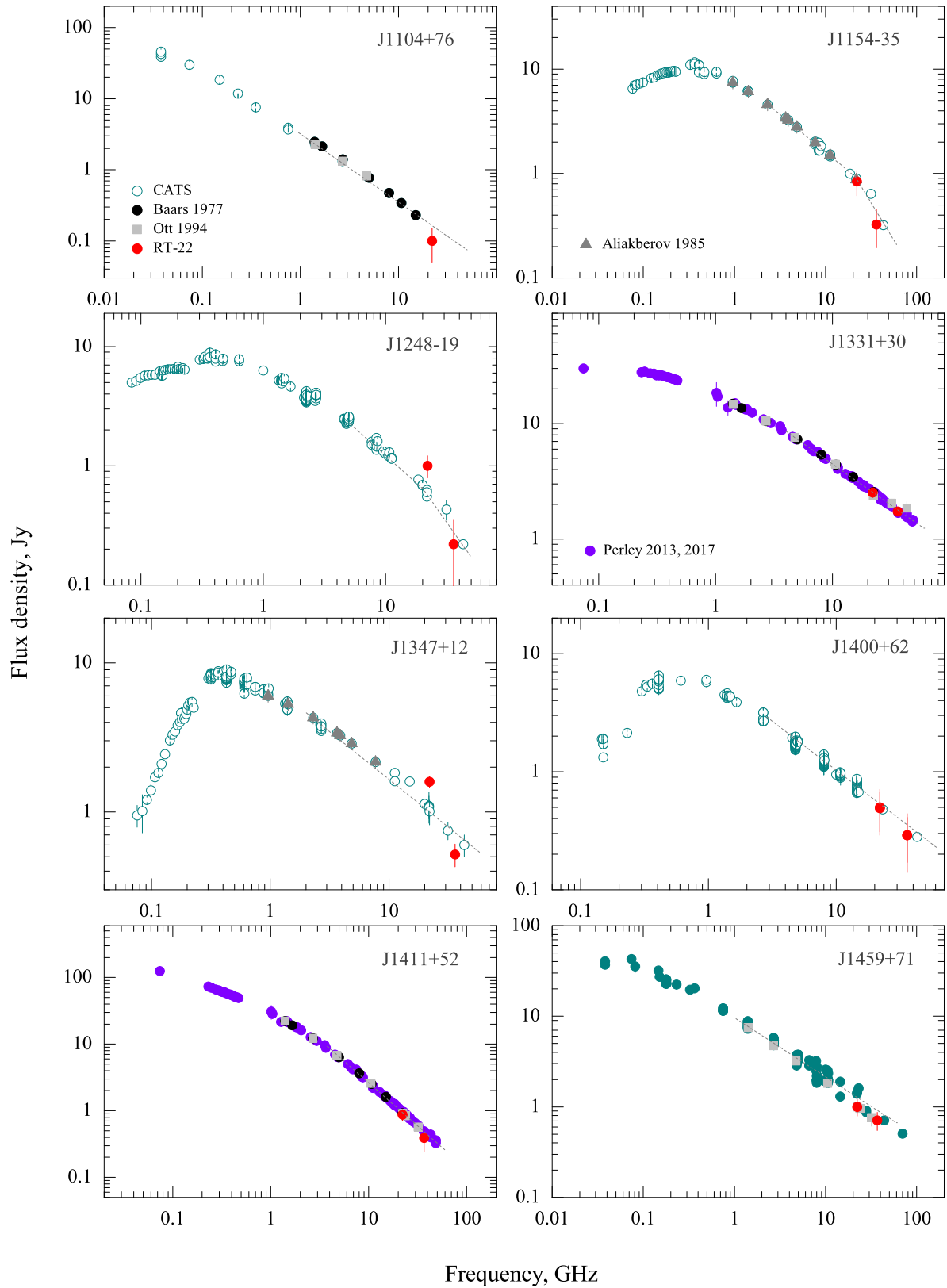


Рис. 1. Продолжение.

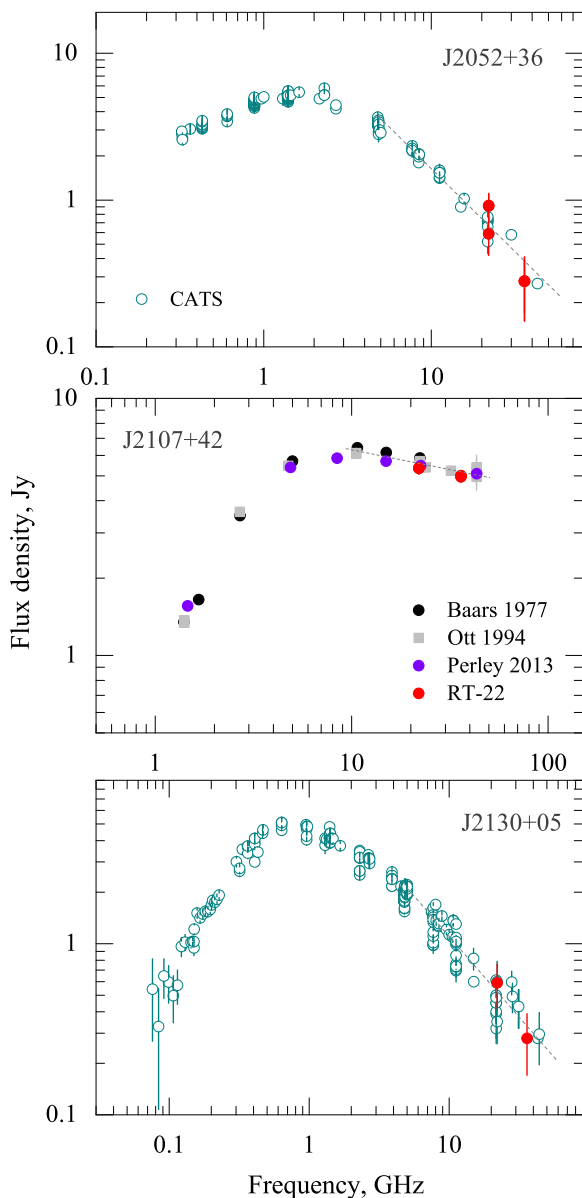


Рис. 1. Продолжение.

5. О ПРОВЕРКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки достоверности (оценки точности) измеренных плотностей потоков калибраторов мы рассмотрели выше совокупность наших результатов и измерений, собранных в базе данных CATS, и привели в таблице 5 расчетные значения, полученные из аппроксимации спектров в диапазоне 5–40 ГГц. В будущем для аналогичных целей можно воспользоваться также новой методикой. Она предложена и апробирована по данным четырехлетнего мониторинга калибровок в трех диапазонах космического телескопа (КРТ) проекта «РадиоАстрон», проведенного по первичным астрономическим калибраторам по потоку и внутренним

генераторам шумового сигнала (ГШ) КРТ в работе Kovalev et al. (2020).

Методика была отлажена при анализе калибровок КРТ по Кассиопее-А и Крабовидной туманности и привела к необходимости коррекций некоторых измерений, выполнявшихся в общепринятой шкале Baars et al. (1977) в процессе полета КРТ. По-видимому, реальная известная «вековая» переменность радиоизлучения этих калибровочных источников в течение 40 лет шла со скоростью, отличающейся от общепринятой, экстраполированной. Две новые шкалы плотностей потока, предложенные Perley and Butler (2017) и Vinyaikin (2007; 2014), корректирующие прежнюю, оказались точнее (Kovalev et al. 2022).

Та же методика будет «работать» при условии постоянства эффективной площади антенны, как у КРТ. Для полноповоротной антенны это условие проще всего может быть выполнено при наблюдениях калибровочных объектов на одной высоте. В данном случае методика сводится к сравнению калибровок ГШ на РТ-22 по всем калибровочным источникам РАТАН-600, при учете результатов их измерений на РТ-22 на одной высоте. Если эти калибровки ГШ одинаковы в пределах погрешности, значит, калибраторы согласованы друг с другом по спектральной плотности потока излучения. Таким образом, калибровочные ГШ РТ-22 могут использоваться не только для обычной калибровки телескопа, но и как индикаторы относительной точности плотностей потоков самих калибровочных источников при некоторых условиях.

Покажем это. Пусть для каждого i -го калибратора РАТАН-600 на РТ-22 измерена его спектральная плотность потока $F_{s,i}$ (при $i = 0, \dots, n$, где n — максимальный номер калибратора РАТАН-600, а $i = 0$ — номер самого точного из них или из калибраторов РТ-22). Тогда известным способом можно получить i -е значение $F_{ns,i}$ эквивалентной спектральной плотности потока F_{ns} излучения ГШ (Kovalev et al. 1999):

$$F_{ns,i} = F_{s,i}(U_{ns}/U_{s,i}) = F_{s,i}C_{s,i}, \quad (5)$$

$$F_{ns} = 2kT_{ns}/A_{eff} = G_a T_{ns}. \quad (6)$$

Здесь F_{ns} — эквивалентная спектральная плотность потока излучения генератора шума (ГШ или ns), F_s — спектральная плотность потока излучения калибровочного источника, T_{ns} — антенная температура генератора шума, A_{eff} и G_a — эффективная площадь и «усиление» антенны, U_{ns} — амплитуда отклика на ГШ в вольтах, U_s — амплитуда отклика на источник в вольтах (скорректированная на его угловые размеры, поляризацию и поглощение атмосферы при необходимости).

Таблица 5. Параметры переменности радиоизлучения и спектров калибраторов. Обозначения колонок: (1) и (2) — имя и унифицированное название в списке калибраторов; (3), (5) — значения индексов переменности радиоизлучения V_{22} и V_{37} вблизи частот 22 и 37 ГГц с их погрешностью в скобках; (4) — временной масштаб переменности радиоизлучения на частоте 22 ГГц; (6) — спектральный индекс на частотах 22–37 ГГц и ошибка его определения в скобках, обозначение «no data» соответствует отсутствию измерений для оценки переменности; (7) — коэффициенты прямых a и b из аппроксимации спектра полиномом $\lg(S_\nu) = a + b \lg(\nu)$, где S_ν и ν даны в Ян и ГГц соответственно; (8) — тип калибровочного источника: «s» — вторичный, «r» — «ратановский»

Источник		$V_{22} (\sigma), \%$	$t, \text{ лет}$	$V_{37} (\sigma), \%$	$\alpha_{22-37} (\sigma)$	Коэффициенты a, b	Тип калибратора
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
PKS 0023–26	J0025–26	6.85 (0.13)	23	–	–1.14 (0.01)	4.93, –1.14	r
3C 48	J0137+33	–	> 40	–	–0.98 (0.01)	4.37, –0.98	s
PKS 0237–23	J0240–23	0.30 (0.15)	23	–	–1.16 (0.05)	4.89, –1.16	r
4C +16.09	J0318+16	11.20 (0.16)	21	–	–1.24 (0.02)	5.09, –1.24	r
4C +76.03	J0410+76	1.65 (0.09)	19	4.71 (0.10)	–0.62 (0.04)	2.78, –0.62	r
3C 138	J0521+16	–	23	11.06 (0.06)	–0.84 (0.05)	3.74, –0.84	r
3C 147	J0542+49	5.68 (0.07)	> 40	1.03 (0.04)	–0.85 (0.02)	4.03, –0.85	s
3C 161	J0627–05	no data	–	no data	–0.96 (0.07)	4.36, –0.96	s
3C 249.1	J1104+76	no data	–	no data	–1.16 (0.07)	4.16, –1.16	s
PKS 1154–34	J1154–35	–	35	–	–1.51 (0.04)	6.51, –1.51	r
PKS 1245–19	J1248–19	4.64 (0.12)	23	–	–1.70 (0.03)	3.89, –0.94	r
3C 286	J1331+30	1.52 (0.06)	> 40	–	–0.71 (0.01)	3.49, –0.71	s
4C +12.50	J1347+12	6.48 (0.10)	23	–	–0.63 (0.03)	2.75, –0.63	r
4C +62.22	J1400+62	–	8	–	–0.79 (0.02)	3.17, –0.79	r
3C 295	J1411+52	9.87 (0.02)	> 40	–	–1.28 (0.01)	5.57, –1.28	s
3C 309.1	J1459+71	21.46 (0.03)	> 30	–	–0.63 (0.02)	2.88, –0.63	s
B2 2050+36	J2052+36	8.87 (0.14)	14	–	–1.13 (0.04)	4.77, –1.13	r
NGC 7027	J2107+42	0.83 (0.02)	> 40	–	–0.14 (0.02)	1.34, –0.14	s
PKS 2127+04	J2130+05	6.63 (0.17)	23	–	–0.98 (0.05)	4.01, –0.98	r

Теперь из (5)–(6) запишем отношение измеренных T_{ns} по i -му калибратору к T_{ns} по «основному» калибратору:

$$T_{\text{ns},i}/T_{\text{ns},0} = (F_{s,i}/F_{s,0})(C_{s,i}/C_{s,0}) \quad (7)$$

Благодаря тому, что наблюдение ведется на одной высоте, величина A_{eff} удачно сокращается. В результате, можно без труда найти, что измеренное отношение (7), откалиброванное по каждому калибратору относительно «основного калибратора», должно быть равно единице. Отклонение каждого из этих отношений от единицы в пределах погрешности измерений будет характеризовать согласованность калибраторов по потоку с основным калибратором. Иначе — их рассогласованность, так как, согласно (5–7), калибровка стабильного ГШ по любому точному калибратору спектральной плотности потока должна оставаться постоянной

при постоянной эффективной площади антенны и неизменном атмосферном поглощении.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

На радиотелескопе РТ-22 КрАО РАН проведены измерения 19 калибровочных источников на частотах 22.2 и 36.8 ГГц в период 2017–2020 гг. Их целью являлось уточнение высокочастотных спектров радиоисточников, используемых для калибровки измерений по спектральной плотности потока на РАТАН-600 или других инструментах. По результатам анализа радиоспектров калибраторов предложены значения их спектральных плотностей потоков на частотах 22, 30 и 37 ГГц. Для 13 калибраторов оценен индекс переменности на частоте 22 ГГц на временной шкале 14–40 лет. Показано, что для четырех из них (PKS 0237–23, 4C 76.03, 3C 286, NGC 7027) он не превышает 2%,

для семи калибраторов переменность радиоизлучения варьируется от 2 до 10% и для двух (4C + +16.09, 3C 309.1) она равна 11 и 21% соответственно. Для восьми объектов с переменностью, превышающей 5%, необходим контроль потока радиоизлучения на высоких частотах. Представляется важным продолжить эти исследования и в дальнейшем оценить точность и взаимную согласованность результатов с помощью описанной методики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны сотрудникам отдела радиоастрономии КрАО РАН за участие в измерениях и М. Г. Ларионову за помощь в работе. Авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и рекомендации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках национального проекта «Наука» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2020-778.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. D. Aliakberov, M. G. Mingaliev, M. N. Naugolnaya, et al., *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **19**, 60 (1985).
2. M. F. Aller, H. D. Aller, and P. A. Hughes, *Astrophys. J.* **399**, 16 (1992).
3. J. W. M. Baars, R. Genzel, I. I. K. Pauliny-Toth, and A. Witzel, *Astron. and Astrophys.* **61**, 99 (1977).
4. J. J. Condon, W. D. Cotton, E. W. Greisen, et al., *Astron. J.* **115** (5), 1693 (1998).
5. P. C. Gregory, W. K. Scott, K. Douglas, and J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **103**, 427 (1996).
6. S. E. Healey, R. W. Romani, G. B. Taylor, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **171** (1), 61 (2007).
7. N. Hurley-Walker, J. R. Callingham, P. J. Hancock, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (1), 1146 (2017).
8. H. T. Intema, P. Jagannathan, K. P. Mooley, and D. A. Frail, *Astron. and Astrophys.* **598**, id. A78 (2017).
9. V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rakhimov, et al., *Astronomy Reports* **62** (9), 574 (2018).
10. S. O. Kiiikov, M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, and M. S. Stupalov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 5 (2002).
11. M. J. Klein and C. T. Stelzried, *Astron. J.* **81**, 1078 (1976).
12. Y. A. Kovalev, A. N. Ermakov, V. I. Vasilkov, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (3), 360 (2022).
13. Y. A. Kovalev, I. Vasil'kov, V. A. N. Ermakov, et al., *Transactions IAA RAS* **54**, 32 (2020) [in Russian].
14. Y. Y. Kovalev, N. A. Nizhelsky, Y. A. Kovalev, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **139**, 545 (1999).
15. M. Lacy, S. A. Baum, C. J. Chandler, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **132** (1009), id. 035001 (2020).
16. M. G. Mingaliev, A. M. Botashev, and V. A. Stolyarov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **46**, 28 (1998).
17. M. G. Mingaliev, V. A. Stolyarov, R. D. Davies, et al., *Astron. and Astrophys.* **370**, 78 (2001).
18. T. Murphy, E. M. Sadler, R. D. Ekers, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402** (4), 2403 (2010).
19. N. S. Nesterov, A. E. Volvach, and I. D. Strepka, *Astronomy Letters* **26**, 204 (2000).
20. M. Ott, A. Witzel, A. Quirrenbach, et al., *Astron. and Astrophys.* **284**, 331 (1994).
21. Y. N. Parijskij, *IEEE Antennas and Propagation Magazine* **35**, 7 (1993).
22. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **204** (2), article id. 119 (2013).
23. R. A. Perley and B. J. Butler, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (1), article id. 7 (2017).
24. Y. V. Sotnikova, in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 32–40 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020).
25. Y. V. Sotnikova, Y. A. Kovalev, and A. K. Erkenov, *Astrophysical Bulletin* **74** (4), 497 (2019).
26. C. Stanghellini, C. P. O'Dea, D. Dallacasa, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **131**, 303 (1998).
27. I. A. Strukov and D. P. Skulachev, *Itogi Nauki i Tekhniki Seriya Astronomiia* **31**, 37 (1986) [in Russian].
28. R. Y. Udovitskiy, Y. V. Sotnikova, M. G. Mingaliev, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 496 (2016).
29. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **58**, 118 (2005).
30. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, H. Andernach, and V. N. Chernenkov, *Data Science Journal* **8**, 34 (2009).
31. O. V. Verkhodanov, S. A. Trushkin, and V. N. Chernenkov, *Baltic Astronomy* **6**, 275 (1997).
32. E. N. Vinyaikin, *Astronomy Reports* **51** (7), 570 (2007).
33. E. N. Vinyaikin, *Astronomy Reports* **58** (9), 626 (2014).
34. A. Volvach, N. Nesterov, and L. Petrov, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement* **3**, 43 (2000).
35. A. E. Vol'vach, N. S. Kardashev, M. G. Larionov, et al., *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* **23** (3), 122 (2007).
36. A. E. Volvach, M. G. Larionov, L. N. Vol'vach, and G. M. Larionov, *Astronomy Reports* **61** (11), 954 (2017).
37. A. E. Volvach and N. S. Nesterov, *Bull. Crimean Astrophys. Obs.* **106** (1), 99 (2010).

38. A. E. Volvach, L. N. Vol'Vach, N. S. Kardashev, and M. G. Larionov, *Astronomy Reports* **52** (6), 429 (2008).
39. A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, et al., *Cosmic Research* **57** (2), 85 (2019).

Study of Calibration Sources at 22 and 37 GHz Frequency Bands with RT-22 CrAO RAS

Yu. V. Sotnikova¹, Yu. A. Kovalev², A. N. Ermakov², L. V. Volvach³, and A. E. Volvach³

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

³Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

We present the measurement results for the spectral flux densities of 19 calibration sources observed with the RT-22 single-dish telescope of the Crimean Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences at 22.2 and 36.8 GHz in 2017–2020. About half of them belong to the commonly accepted secondary standards with periodically monitored flux densities at radio frequencies. The observations were carried out to refine the calibration measurements of the RATAN-600 radio telescope at high frequencies. The specificity of RATAN-600 meridian observations requires a “grid” of calibration objects distributed over declinations from -35° to $+90^\circ$ instead of 1–3 conventional ones which are sufficient for observations at different heights with a single-dish antenna. The radio variability of the objects was estimated taking into account the literature measurements, the results were interpolated to a frequency of 30 GHz. It was found that radio variability at 22 GHz at time scales of about 20–30 years exceeds 10% for the calibrators 4C +16.09 and 3C 309.1. We discuss a possibility of verifying the calibration sources at the RT-22 by a new method that uses a noise signal generator as an indicator of their relative flux density accuracy.

Keywords: *methods: observational—telescopes—radio continuum*