

## Радионаблюдения остатков сверхновых на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН

© В. П. Иванов, А. В. Ипатов, И. А. Рахимов,  
С. А. Гренков, Т. С. Андреева

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Измерены плотности потоков остатка сверхновой (ОСН) G21.5–0.9 на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН на частотах 4840 и 8450 МГц в 2013–2018 гг., с помощью повторных измерений выявлена переменность источника. Рассмотрена методика измерений и их точность. На основе опубликованных данных получены дополнительные данные о потоках радиоизлучения ОСН для более ранних эпох и на различных частотах, содержащих сравнения интенсивностей исследуемого и стандартных источников.

Литературные данные приведены в единую систему, общую с измерениями на РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, на основе стандартной шкалы потоков «искусственная луна» (ИЛ). Эта процедура существенно уточняет систему данных, спектр источника и его переменность. Определены параметры спектра. Показано, что излом в спектре G21.5–0.9 не связан с синхротронным высвечиванием релятивистских электронов. Предложены возможные причины обнаруженных изменений в спектре G21.5–0.9.

**Ключевые слова:** остаток сверхновой, радиотелескоп, спектр, стандартный источник, плотность потока, переменность.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.48.56-63>

### Введение

Начало исследованиям спектров радиоизлучения ОСН и их переменности на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» было положено в 2003 г., когда был измерен спектр ОСН 3C58 на 4 частотах: 1550, 2370, 4840, 8450 МГц [1]. В процессе выполнения программы наблюдений была выявлена нестационарная переменность радиоизлучения 3C58 [1]. В дальнейшем наблюдения ОСН были продолжены, список наблюдаемых объектов был существенно расширен. После получения данных о спектрах и переменности плерионов 3C58, G21.5–0.9 было продолжено изучение этих и ряда других ОСН. Методика измерений основана на сравнении радиоизлучения исследуемых и стандартных источников, калибровка потоков выполнена на основе наиболее точной шкалы потоков «Искусственная Луна» (ИЛ) [2–5]. Ниже представлены предварительные результаты исследований радиоизлучения ОСН G21.5–0.9.

G21.5–0.9 относится к числу крабоподобных остатков сверхновых, или плерионов. Это физический объект, связанный с пульсаром PSR J1833–1034 [6, 7]. По оценке, основанной на измерении скорости расширения остатка

сверхновой [8], возраст G21.5-0.9 менее 870 лет. Энергия излучения плерионов обеспечивается центральным пульсаром, инжектирующим в туманность релятивистские частицы и магнитные поля. G21.5-0.9 излучает в радио- и рентгеновском диапазонах. Диаметр источника  $\sim 1'$ , яркость возрастает к его центру. Оценка расстояния для G21.5-0.9 составляет  $\sim 5$  кpc [7, 9].

Согласно [10], радиоспектр источника в логарифмическом масштабе состоит из двух линейных участков разной крутизны, разделенных изломом. Ниже частоты излома спектр, полученный в [10] по опубликованным данным, имеет спектральный индекс  $\alpha = -0.05$ . Выше частоты излома, на волнах миллиметрового диапазона, для определения спектра использовались данные работы [11] и измерения по программе *Planck* [10], спектральный индекс  $\alpha = -0.55$  [10]. Данные измерений [10] и [11] находятся в пределах ошибок и в целом согласуются, хотя значение потока на верхней частоте [10] явно выходит за пределы общей зависимости. Это может быть следствием систематической погрешности из-за эффекта путаницы (*confusion*) не связанных с источником структур галактической плоскости, что обсуждается в работе. В [10] предполагается, что изменение спектрального индекса на 0.5 выше частоты излома  $f_b = 45$  ГГц является следствием потери энергии релятивистских электронов на синхротронное излучение [12, 13], что не согласуется с возрастом источника.

Измерения плотностей потоков G21.5-0.9 на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, а также сведение опубликованных данных в единую систему на основе шкалы потоков ИЛ существенно уточняют спектр этого источника и позволяют исследовать его динамику.

## Измерения на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН

Аппаратура и методика наблюдений остатков сверхновых подробно описаны в [5], а здесь приводятся лишь детали, относящиеся конкретно к наблюдениям G21.5-0.9.

Плотности потоков G21.5-0.9 измерены относительно источников — стандартов шкалы потоков ИЛ [2] на частотах 4840 и 8450 МГц. Основным стандартом шкалы потоков ИЛ является внегалактический источник 3C295. Его радиоизлучение на волнах длиннее 1 см стабильно, и угловые размеры малы:  $5'' \times 1''$  [14]. В шкале потоков ИЛ на частотах 1425–8450 МГц спектр 3C295 определяется соотношением:

$$\lg S(f) = \log(S_0) + \alpha \cdot \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) \quad (1)$$

где  $S(f)$ , Ян — плотность потока на частоте  $f$ , МГц;  $\alpha = -1.007$ ;  $S_0 = 8.249$  Ян на частоте  $f_0 = 3500$  МГц.

Стандартом шкалы ИЛ на частотах до 200 ГГц является Крабовидная туманность, ее спектр в диапазоне частот 100 МГц–200 ГГц определяется равенством (1) с параметрами:

$\alpha = -0.327 \pm 0.002$  и не зависит от времени;  $S_0 = 622 \pm 10$  Ян на частоте  $f_0 = 3500$  МГц на эпоху 1992.7;  $\frac{1}{S_0} \cdot \frac{dS_0}{dt} = -0.159 \pm 0.024$  %/год [15].

Измеренные на радиотелескопе РТ-32 плотности потоков корректировались за угловое разрешение и атмосферное поглощение. Методика коррекции представлена в [5].

Погрешности измерений включают среднеквадратичные отклонения от отношений пиковых антенных температур, которые на всех частотах не превышали 1.3 %, а также погрешности поправок за частичное разрешение G21.5-0.9 диаграммой направленности антенны. Источник — с угловым диаметром  $\sim 1'$  и распределением яркостной температуры по диаметру, близким к функции Гаусса. В случае G21.5-0.9 поправки за частичное разрешение малы, а их погрешность, максимальная для волны  $\lambda = 3.5$  см, не превысила 2 %.

Коррекция за атмосферное поглощение вводилась в виде множителя  $e^{\gamma}$ , где  $\gamma = A_{\lambda}/\sin(h)$ ,  $h$  — угол места (высота) антенны. Для волн 6.2 см и 3.5 см  $A_{\lambda}$  составляет 0.012 и 0.013 соответственно.

Поскольку поляризация облучателей РТ-32 круговая, а диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях равны по ширине, другие поправки не вводились.

Измерения плотностей потока G21.5-0.9 выполнены между апрелем 2013 г. и апрелем 2018 г. На волне  $\lambda = 3.5$  см измерения повторялись с целью выявления изменений в излучении источника. В совокупности с опубликованными данными, приведенными к шкале потоков ИЛ, они позволяют определить спектр ОСН G21.5-0.9, а также оценить его временную нестабильность.

## **Спектр ОСН G21.5–0.9**

Задача адекватного отображения изменений в спектрах исследуемых источников решается путем сведения всех имеющихся данных сравнения потоков излучения этих объектов со стандартами в единую систему на основе прецизионной шкалы потоков. Шкала потоков BGPW [16] для этой цели непригодна по ряду причин, обсуждаемых в работе [2], здесь следует отметить следующее.

Спектры стандартов шкалы BGPW строятся на основе системы данных о потоках на стандартных частотах. Данные на стандартных частотах аппроксимируются полиномами второй степени, формируя таким образом стандартные спектры. В [2] показано, что данные [16] на стандартных частотах содержат значительные систематические погрешности, а аппроксимация не соответствует реальной форме спектров. В результате у разных источников в интервалах между стандартными частотами возникают дополнительные погрешности, по-разному зависящие от частоты, и они значительны. Поэтому решение задачи возможно только на основе шкалы потоков ИЛ.

В настоящей работе спектр G21.5–0.9 исследовался на основе совокупности данных, размещенных в таблице, включающей измерения плотностей потоков на радиотелескопе РТ-32, и данных опубликованных работ, приведенных к шкале потоков ИЛ.

Таблица

$f$ , МГц	$S_{ил}$ , Ян	Err, Ян	$S_p$ , Ян	Source	k	Epoch	Reference
80	8.8	0.9	8	Sample	1.102	1973	[17]
330	7.25	0.4	9.3	3C286	0.78	1987.9	[18]
4840	5.2	0.1	5.19	3C295	1	2017.97	[н.р.]
4865	6.15	0.3	6.7	3C286	0.917	1985.9	[8]
5000	6.4	0.3	7.1	Sample	0.9	1975	[19]
8450	6.0	0.2	5.96	3C295	1	2013.34	[н.р.]
8450	6.04	0.2	6.04	3C295	1	2014.93	[н.р.]
8450	6.1	0.15	6.09	3C295	1	2015.49	[н.р.]
8450	4.8	0.1	4.82	3C295	1	2018.35	[н.р.]
10600	6.0	0.7	6.9	3C218	0.87	1974.2	[20]
32000	4.2	0.2	5.64	Crab	0.74	1983.5	[21]
70000	3.4	0.5	4.3	Crab	0.8	2010	[10]
84200	2.68	0.5	3.94	3C58	0.68	1985.9	[11]
100000	2.0	0.4	2.7	Crab	0.73	2010	[10]
143000	2.1	0.3	3	Crab	0.71	2010	[10]

Обозначение данных в таблице:

$f$  — частота измерений;

$S_{ил}$  — плотность потока G21.5–0.9 в шкале потоков ИЛ;

Err — абсолютная погрешность измерения потока;

$S_p$  — опубликованное значение плотности потока G21.5–0.9;

Source — источник-калибратор, если стандартных источников несколько — Sample;

k — множитель перехода к шкале ИЛ;

Epoch — эпоха измерений;

Reference — ссылка на первоисточник, где ссылка [н. р.] соответствует измерениям на радиотелескопе РТ-32 ИПА РАН

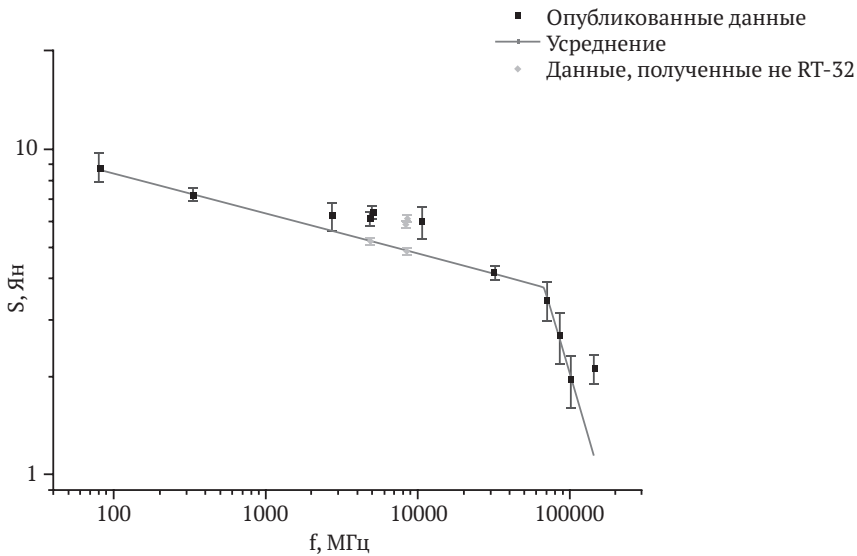


Рис. 1. Плотности потоков OCN G21.5–0.9 по данным таблицы

Спектр G21.5–0.9 по данным таблицы изображен на рис 1. Частотное распределение плотностей потока не аппроксимируется единым степенным законом. В логарифмическом масштабе спектр состоит из двух линейных участков разной крутизны, их разделяет излом. Участок ниже частоты излома представлен в таблице плотностями потоков на частотах от 80 до 32000 МГц. Данные в интервале длин волн  $6 \text{ см} \leq \lambda \leq 3 \text{ см}$  имеют разброс, существенно превышающий пределы погрешностей, что указывает на переменность источника с локальными отклонениями формы его спектра от степенной зависимости. Однако часть точек, измеренных на РТ-32, формирует вместе с данными вне этого интервала степенную зависимость потока от частоты в виде (1) с параметрами:

$$\alpha = -0.124 \pm 0.003; S_0 = 5.408 \pm 0.021 \text{ Ян на частоте } f_0 = 3500 \text{ МГц.} \quad (2)$$

Высокочастотный участок спектра в таблице представлен данными на частотах 70, 100 и 143 ГГц [10] и на частоте 84.2 ГГц [11]. Точка на частоте 143 ГГц существенно отклоняется от степенной зависимости, которой следуют плотности потоков на частотах 70, 84.2 и 100 ГГц. В этой связи следует обратить внимание на комментарий авторов [10] относительно некоторых проблем, возникших при измерениях спектра G21.5–0.9: «Источник теряется в наложении (путанице) несвязанных с ним структур галактической плоскости на 30–44 ГГц и на частотах 217 ГГц и выше». Хотя данные на частоте 143 ГГц в [10] приводятся, они могут иметь неучтенную систематическую ошибку, и в нашей работе не учитывались. Тогда участок спектра на частотах (70–100) ГГц описывается соотношением (1) с параметрами:

$$\alpha = -1.543 \pm 0.113; S_0 = 2.569 \pm 0.046 \text{ Ян на частоте } f_0 = 85000 \text{ МГц.} \quad (3)$$

Сравнение (2) и (3) указывает на наличие излома спектра на частоте  $f_b = 66535$  МГц с изменением спектрального индекса на  $\Delta\alpha = -1.418$ , что сильно отличается от значения  $-0.5$  в случае синхротронного высвечивания. Как уже отмечалось, в работе [10] выше частоты излома было получено значение спектрального индекса  $\alpha = 0.55$  с учетом точки на частоте 143 ГГц, а приращение спектрального индекса в точке излома составило величину  $-0.5$ . Однако для частот 70, 84.2 и 100 ГГц спектральный индекс, вычисленный непосредственно по данным работ [10, 11], равен  $-1.24$ . Таким образом, излом в спектре G21.5–0.9 не связан с потерями энергии релятивистских электронов на синхротронное излучение, что противоречило бы предполагаемому возрасту остатка менее 870 лет.

На рис. 1 видны значительные отклонения потоков на волнах 6–3 см от среднего спектра. Отношения измеренных плотностей потоков  $S$  и вычисленных в соответствии с (2)  $S_c$  на частотах 4840 и 8450 МГц в зависимости от времени представлены на рис. 2.

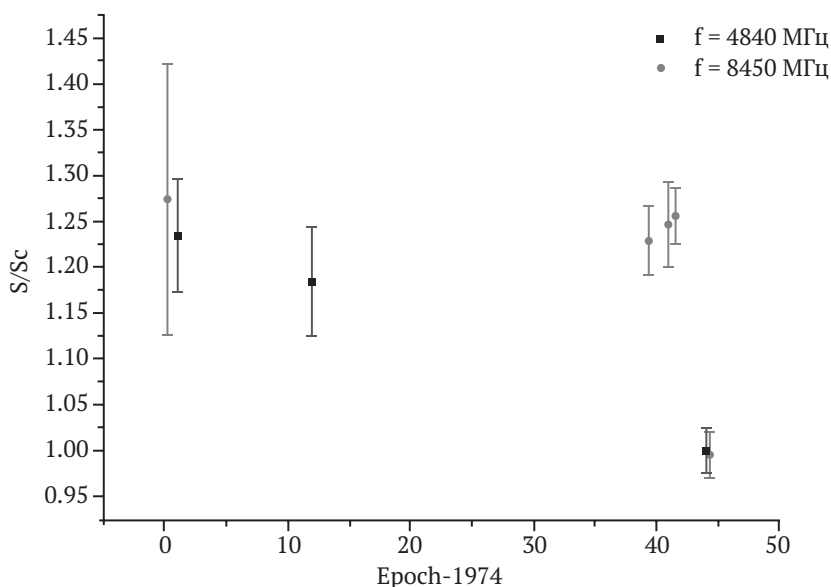


Рис. 2. Отношения  $S/S_c$  в зависимости от времени;  $S$  и  $S_c$  — измеренные и вычисленные в соответствии с (2) плотности потоков на частотах 4840 и 8450 МГц соответственно

На рис. 2 представлены как данные опубликованных работ, приведенные к шкале потоков ИЛ, так и данные измерений на радиотелескопе РТ-32 обсерватории «Светлое» ИПА РАН, на временном интервале более 40 лет. На волнах  $\lambda \approx 3$  см между эпохами 1974.2 и 2015.5 измеренные потоки превышали средний спектр на 23–27 %, а между 2015.5 и 2018.35 (менее 3 лет) плотность потока упала до нормального значения. Похожая ситуация наблюдалась на волне  $\lambda \approx 6$  см: между эпохами 1975 и 1985.9 избыток потока по сравнению со средним спектром составлял 19–24 %. До 2018.0 данные отсутствуют, в 2018.0 по нашим данным поток соответствовал норме. Таким образом, данные измерений интенсивности радиоизлучения G21.5–0.9 на радиотелескопе РТ-32

обсерватории «Светлое» ИПА РАН и опубликованные данные, приведенные к шкале потоков ИЛ, указывают на наличие в радиоизлучении ОСН G21.5–0.9 компоненты с быстрой и нестационарной переменностью.

## Заключение

Плерионы Крабовидная туманность, 3C58 и G21.5–0.9 принадлежат к одному классу объектов. Анализ данных измерений показал, что спектры этих источников испытывают локальные нестационарные изменения [5, 15]. Быстрая и нестационарная переменность радиоизлучения ОСН G21.5–0.9 может найти объяснение на основе особенностей активности пульсара PSR J1833-1034.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП/УНУ «Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО».

## Литература

1. Иванов В. П., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г., Станкевич К. С., Финкельштейн А. М. Нестационарность радиосветимости остатка сверхновой 1181 г. (3C58) // Письма в Астрон. журн. — М.: Наука, 2004. — Т. 30, №4. — С. 277–284.

2. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Гренков С. А., Андреева Т. С. Спектры стандартных радиоисточников на современную эпоху // Астрономический журнал. — МАИК Наука, 2018. — Т. 95, №9. — С. 609–618.

3. Иванов В. П., Станкевич К. С. Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков // Изв. вузов. Радиофизика. — Издание Горьковского университета и научно-исследовательского радиофизического института, 1986. — Т. 29, № 1. — С. 3–27.

4. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Смоленцев С. Г., Станкевич К. С., Финкельштейн А. М. Эталонирование источников с секундными угловыми размерами в качестве стандартов современной радиоастрономической шкалы потоков // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2006. — Вып. 14. — С. 20–33.

5. Иванов В. П., Ипатов А. В., Рахимов И. А., Андреева Т. С. Аномалия спектра остатка сверхновой 3C58 // Астрофизический бюллетень. — МАИК Наука, 2019. — Т. 74, № 2. — С. 138–150.

6. Gupta Y., Mitra D., Green D. A., Acharyya A. The discovery of PSR J1833-1034 : the pulsar associated with the supernova remnant G21.5–0.9 // Current Science. — Indian Academy of Sciences, 2005. — Vol. 89. — P. 853–856.

7. Camilo F., Ransom S. M., Gaensler B. M., Slane P. O., Lorimer D. R., Reynolds J., Manchester R. N., Murray S. S. Discovery of the Central Young Pulsar in the Supernova Remnant G21.5–0.9 // Astrophysical Journal. — The American Astronomical Society, 2006. — Vol. 637, no. 1. — P. 456–465.

8. Bietenholz M. F., Bartel N. The expansion and radio spectral index of G21.5–0.9: is PSR J1833-1034 the youngest pulsar? // Mon. Not. R. Astron. Soc. — Oxford Academic, 2008. — Vol. 386, no. 3. — P. 1411–1416.

9. Davelaar J., Smith A., Becker R. H. X-ray spectral observations of the crab-like supernova remnants G21.5–0.9 and 3C 58 // Astrophysical Journal, Part 2 — Letters to the Editor. — The American Astronomical Society, 1986. — Vol. 300, no. 2. — P. L59–L62.

10. Planck Collaboration: Arnaud M., Ashdown M., Atrio-Barandela F., Aumont J., Bacigalupi C.; Banday A. J., Barreiro R. B., Battaner E., Benabed K. and 153 coauthors. Planck intermediate results. XXXI. Microwave survey of Galactic supernova remnants // Astronomy and Astrophysics. — EDP sciences, 2016. — Vol. 586, id. A134. — 21 p.

11. Salter C. J., Reynolds S. P., Hogg D. E., Paine J. M., Rhodes P. J. 84 gigahertz observations of five Crab-like supernova remnants // Astrophysical Journal. — The American Astronomical Society, 1989. — Vol. 338, no. 1. — P. 171–177.

12. *Kardashev N. S.* Nonstationariness of spectra of young sources of nonthermal radioemission // *Sov. Astron.* — P. K. Shternberg State Astronomical Institute, 1962. — Vol. 6, no. 3. — P. 317–327.

13. *Reynolds S. P.* Synchrotron-Loss Spectral Breaks in Pulsar-Wind Nebulae and Extragalactic Jets // *Astrophysical Journal*. — The American Astronomical Society, 2009. — Vol. 703, no. 1. — P. 662–670.

14. *Ott M., Witzel A., Quirrenbach A., Krichbaum T. P., Standke K. J., Schalinski C. J., and Hummel C. A.* An updated list of radio flux density calibrators // *Astronomy and Astrophysics*. — EDP sciences, 1994. — Vol. 284. — P. 331–339.

15. *Иванов В. П., Станкевич К. С., Столяров С. П.* Вековые и нестационарные изменения в радиоспектре Крабовидной туманности // *Астрономический журнал*. — МАИК Наука, 1994. — Т. 71. №5. — С. 737–747.

16. *Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A.* The absolute spectrum of CAS A — an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators // *Astronomy and Astrophysics*. — EDP sciences, 1977. — Vol. 61. — P. 99–106.

17. *Slee O. B., Higgins C. S.* Culgoora-2 list of radio source measurements at 80 MHz // *Austral. J. Phys. Astrophys. Suppl.* — CSIRO Australia, 1975. — no. 36. — P. 1–60.

18. *Kassim N. E.*, 330 MGz VLA observations of 20 galactic supernova remnants // *Astronomical Journal*. — The American Astronomical Society, 1992. — Vol. 103, no. 3. — P. 943–952.

19. *Wilson A. S., Weiler K. W.* G 21.5–0.9. A supernova remnant resembling the Crab Nebula // *Astronomy and Astrophysics*. — EDP sciences, 1976. — Vol. 53, no. 1. — P. 89–92.

20. *Becker R.H., Kundu M.R.* Observations of nine supernova remnants at 10.6 GHz // *Astronomical Journal*. — The American Astronomical Society, 1975. — Vol. 80, no. 9. — P. 679–682.

21. *Morsi H. W., Reich W.* 32 GHz radio continuum observations of four plerionic supernova remnants // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. — EDP sciences, 1987. — Vol. 69, no. 3. — P. 533–540.

## Radio Observations of Supernova Remnants Using the RT-32 Radio Telescope at the “Svetloe” Observatory of the IAA RAS

**V. P. Ivanov, A. V. Ipatov, I. A. Rahimov, S. A. Grenkov, T. S. Andreeva**

The flux densities of supernova remnants (SR) spectra G21.5–0.9 were measured at 4840 and 8450 MHz frequencies with the RT-32 radio telescope at the “Svetloe” Observatory in 2013–2018, and repeated measurements revealed the source variability. The measurement technique and accuracy are discussed. Additional data on SR radio emission fluxes for earlier epochs and at various frequencies were obtained on the basis of published data containing comparisons of the intensities of the studied and standard sources. The literature data are presented as a consistent system, including the measurements with RT-32 of the “Svetloe” Observatory of the IAA RAS, based on the “Artificial Moon” flux scale standards. This procedure essentially improves the data system, the spectrum of the source and its variability. The parameters of the spectrum are determined. It is shown that the kink in the spectrum of G21.5–0.9 is not associated with the synchrotron emission of relativistic electrons. The possible causes of the changes detected in the spectrum of G21.5–0.9 are discussed.

**Keywords:** radio emission spectra of supernova remnants, radio telescope, spectrum, standard source, flux density, variability.