

УДК 523.164.4

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РАДИОКАРТ НЕБА

M. E. Миллер

Предложен метод построения радиоизофот, сочетающий интерполяцию по частоте на основании двух оригинальных обзоров неба с коррекцией спектральных индексов по результатам проведенных абсолютных измерений. На основе радиообзоров на 38 МГц и 404 МГц построено пространственное распределение спектральных индексов β (38/404). Коррекция данного распределения проведена по результатам абсолютных измерений методом «черного» диска на частотах 210, 290 и 350 МГц и построены соответствующие радиокарты неба.

Длительное время в радиоастрономии и астрофизике исследуется распределенное космическое радиоизлучение. Особый интерес представляют такие его характеристики, как пространственное распределение яркостной температуры, спектр, поляризация. Знание этих характеристик важно как с точки зрения общих проблем строения и эволюции Галактики, так и при решении множества прикладных задач. К настоящему времени получены карты радиоизофот (распределения по небесной сфере яркостной температуры космического радиоизлучения) на различных длинах волн. Данные по некоторым радиообзорам дециметрового—метрового диапазона [1–13] представлены в табл. 1. Такие радиокарты используются при измерениях интенсивности радиоизлучения дискретных источников, когда необходимо учитывать неравномерность фонового радиоизлучения в районе источников и опорных областей [14–17]; для расчетов дифракционных поправок, обусловленных влиянием распределенного космического радиоизлучения при абсолютных измерениях по методу «черного» диска в дециметровом—метровом диапазоне длин волн [18, 19]; при измерениях некоторых параметров антенн радиоастрономическими методами [20]. Кроме того, они используются в космической связи с наземными приемными устройствами, где распределенное космическое радиоизлучение является ограничивающим фактором и должно учитываться при определении предельной чувствительности земных систем [21].

Из табл. 1 видно, что карты радиоизофот имеют существенно различное угловое разрешение и значительные погрешности абсолютной шкалы яркостных температур, на некоторых длинах волн они охватывают лишь отдельные участки неба. Сравнение радиоизофот на различных частотах показывает существенную частотную зависимость яркостной температуры $T_{\text{ярк}} \sim f^{-\beta}$, где β может изменяться от 2,3 до 2,8 в зависимости от диапазона волн и области на небесной сфере. В целом ряде работ исследовалась вариации спектрального индекса в диапазоне от сантиметровых до метровых длин волн [22–36], которые свидетельствуют о значительных пространственных и частотных изменениях β .

Таблица 1

f , МГц	Область неба	Угловое разрешение	Погрешность яркостной температуры	Источник
38	$-25^\circ < \delta < 70^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$7,5 \times 7,5^\circ$	Абс. $\pm 5\%$	[1]
55	$-90^\circ < \delta < 20^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$14 \times 14^\circ$	Абс. $\pm 15\%$	[2]
85	$-90^\circ < b'' < 90^\circ$ $0^\circ < l'' < 360^\circ$	$3,5 \times 3,8^\circ$	Отн. $\pm 10\%$	[3]
150	$-90^\circ < b'' < 90^\circ$ $0^\circ < l'' < 360^\circ$	$5 \times 1^\circ$ $2,2 \times 2,2^\circ$ $3,5 \times 3,8^\circ$	Абс. $\pm 7\%$ Нул. ур. ± 40 К	[4]
178	$-5^\circ < \delta < 90^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$0,2 \times 4,6^\circ$	Абс. $\pm 10\%$ Нул. ур. ± 15 К	[5]
200	$-90^\circ < b' < 90^\circ$ $0^\circ < l' < 360^\circ$	$17 \times 17^\circ$	Абс. $\pm 10\%$ Нул. ур. ± 40 К	[6]
400	$-32^\circ < \delta < 90^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$2,2 \times 1,7^\circ$	Абс. $\pm 15\%$ Отн. $\pm 5\%$ Нул. ур. ± 6 К	[7]
404	$-20^\circ < \delta < 90^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$7,5 \times 7,5^\circ$	Абс. $\pm 2,2$ К Нул. ур. $\pm 0,8$ К	[8]
408	$-90^\circ < \delta < 90^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$1 \times 1^\circ$	Абс. $\pm 10\%$ Нул. ур. ± 3 К	[9-12]
820	$-7^\circ < \delta < 85^\circ$ $0^\text{h} < \alpha < 24^\text{h}$	$1,2 \times 1,2^\circ$	Абс. $\pm 6\%$ Нул. ур. $\pm 0,6$ К	[13]

Поскольку радиокарты неба построены по результатам абсолютных и относительных измерений для ограниченного числа фиксированных частот, возникает задача интерполяции распределения яркостных температур на рабочую частоту f_0 (на которой проводятся вышеупомянутые антенные или радиоастрономические измерения) с исходного оригинального правила, выбирается карта спектрального индекса в этом диапазоне. При пересчете яркостных температур используется соотношение [37]

Таблица 2

f , МГц	K	Δ_1	Δ_2
350	$1,04 \pm 0,03$	0,27	$-0,018$
290	$1,06 \pm 0,03$	0,18	$-0,03$
210	$1,07 \pm 0,04$	0,1	$-0,04$

ногого обзора неба на частоте f_1 (как на ближайшей к f_0 частоте f_1) и данных о спектральном индексе в этом диапазоне. При пересчете яркостных температур используется соотношение [37]

$$T_{f_0} = T_{f_1} (f_1/f_0)^\beta, \quad (1)$$

где T_{f_0} и T_{f_1} — яркостные температуры соответственно на частотах f_0 и f_1 .

Имеющиеся к настоящему времени данные о пространственных и частотных вариациях спектрального индекса β неполны и иногда противоречивы, что обусловливает некоторый произвол при выборе среднего по небесной сфере значения спектрального индекса β . Очевидно, что при небольшом разносе частот f_0 и f_1 погрешности в выборе β существенно не увеличат абсолютную погрешность интерполированного распределения яркостных температур T_{f_0} по сравнению с исходной радиояркостью T_{f_1} . Нетрудно убедиться, что

$$\delta(T_{f_0}) = \delta(T_{f_1}) + \ln(f_1/f_0)\Delta(\beta), \quad (2)$$

где $\delta(T_{f_0}) = \Delta(T_{f_0})/T_{f_0}$, $\delta(T_{f_1}) = \Delta(T_{f_1})/T_{f_1}$, $\Delta(T_{f_0})$ и $\Delta(T_{f_1})$ — соответственно абсолютные погрешности яркостных температур T_{f_0} и T_{f_1} , $\Delta(\beta)$ — абсолютная погрешность спектрального индекса. Од-

нако на практике такая возможность далеко не всегда реализуется, и пересчитанная таким образом радиокарта может оказаться существенно неточной.

Повысить достоверность пересчитанного радиоизображения можно, используя достаточно простой способ интерполяции с двух оригинальных радиокарт на частотах f_1 и f_2 ($f_1 < f_0 < f_2$), имеющих одинаковое (или близкое) угловое разрешение [39]. Радиокарты оцифровываются и вводятся в память ЭВМ. Предварительно рассчитывается массив спектральных индексов в узлах координатной сетки с выбранным пространственным дискретом:

$$\beta_i = \lg(T_{f_1}^i / T_{f_2}^i) \lg^{-1}(f_2/f_1), \quad (3)$$

где $T_{f_1}^i$ и $T_{f_2}^i$ — яркостные температуры на частотах f_1 и f_2 в точке с координатами (α_i, δ_i) в экваториальной системе координат. После этого вычисляются значения яркостной температуры $T_{f_0}^i$:

$$T_{f_0}^i = T_{f_1,2}^i (f_{1,2}/f_0)^{\beta_i}. \quad (4)$$

По рассчитанному массиву $T_{f_0}^i$ выбираются уровни постоянных значений яркостной температуры (изофоты), координаты которых вычисляются по стандартной программе на ЭВМ и выводятся на графопостроитель.

Можно, к примеру, использовать обзоры Северного неба на $f_1 = 38$ МГц [1] и $f_2 = 404$ МГц [8]. Они охватывают одинаковые участки небосвода и построены с одним угловым разрешением $7,5^\circ$. Для этих радиокарт значения яркостных температур T_{38} и T_{404} определялись методом линейной интерполяции в узлах координатной сетки с дискретом по α и δ , равным 5° , и вводились в память ЭВМ БЭСМ-6 [39] (с учетом того, что в соответствие с выводами [40] нулевой уровень обзора на 404 МГц [8] завышен на 4 К). На основе этих данных рассчитывался массив спектральных индексов β_i с погрешностями $\Delta(\beta_i) \leq 0,06$. Проведенное таким образом сопоставление показало заметные пространственные вариации значений β_i , которые коррелируют с известными структурными образованиями Галактики. Карта распределения β_i , полученная на графопостроителе ЭВМ БЭСМ-6, приведена на рис. 1. На основе рассчитанного массива спектральных индексов β_i вычислялись яркостные температуры, первоначально для таких частот f_0 , на которых имеются оригинальные радиокарты ($f_0 = 150$ МГц [4], 178 МГц [5], 200 МГц [6]). Сопоставление интерполированных карт радиоизофот с оригинальными с учетом различий в угловом разрешении и в абсолютных погрешностях показало их достаточно хорошее соответствие.

При двухчастотной интерполяции радиокарт неба удается в определенной степени учесть пространственные изменения спектральных индексов фонового радиоизлучения, однако частотная зависимость радиояркости при этом предполагается постоянной во всем диапазоне (f_1, f_2) , что, вообще говоря, может не соответствовать действительности. Так, в [29, 32] отмечается плавное увеличение крутизны спектра с увеличением частоты в диапазоне 150—400 МГц (в [29] — 17,5—408 МГц), хотя не исключено некоторое увеличение скорости роста в высокочастотной части диапазона (возможно, на частотах ≥ 200 МГц). Увеличение крутизны спектра распределенного космического радиоизлучения с ростом частоты отмечается и в [36], где проводились наблюдения в диапазоне 200—350 МГц.

Очевидно, при интерполяции радиокарты неба с двух оригинальных обзоров [39] координаты радиоизофот, как линий постоянной интенсивности фонового радиоизлучения, определяются с достаточно высокой точностью, что обусловлено более высокой точностью относительных измерений и отражает пространственное распределение спектральных индексов. Однако сами абсолютные значения яркостных температур, простоявшие на изофотах, нуждаются в уточнении.

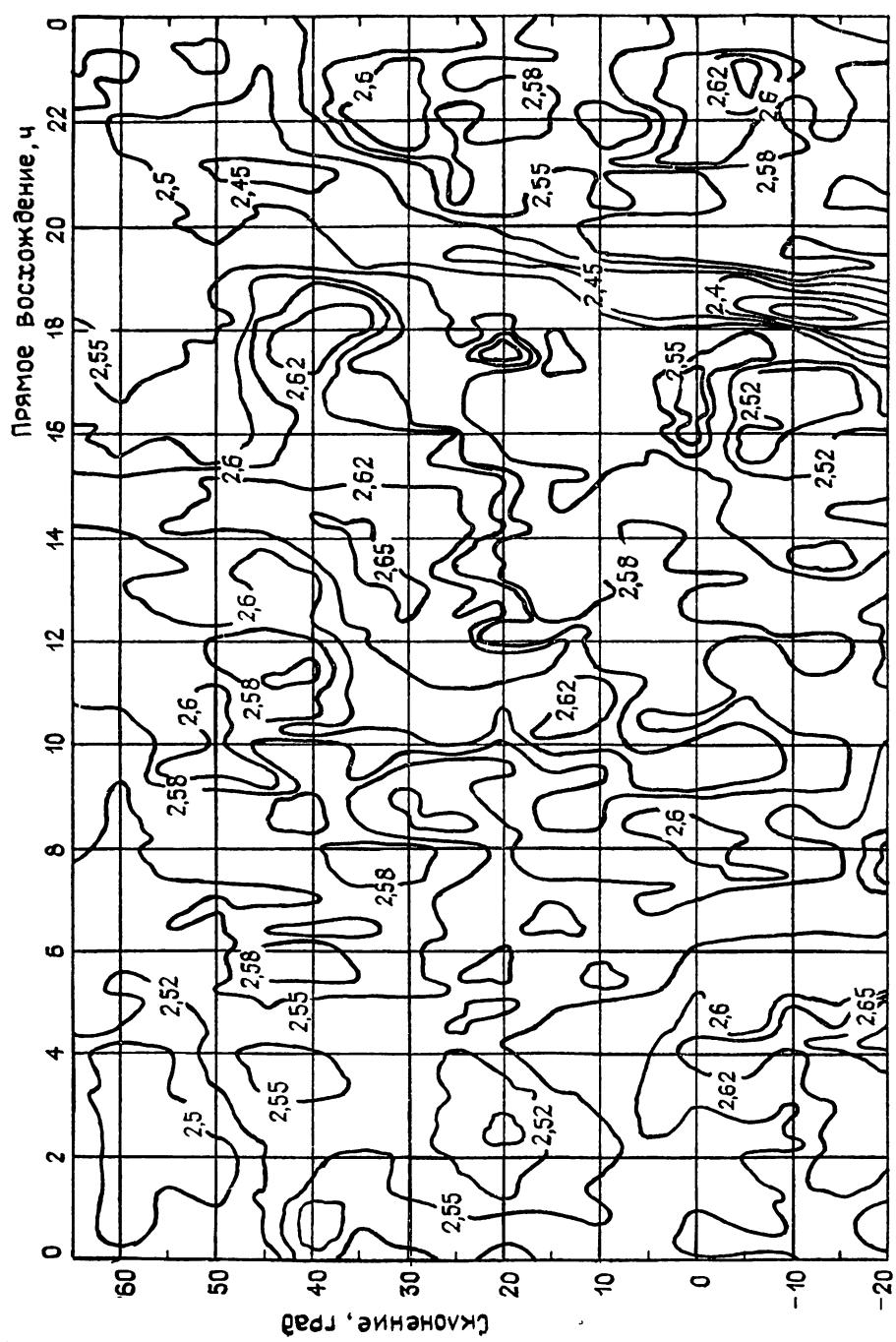


Рис. 1.

нении, поскольку содержат в себе абсолютные погрешности шкалы исходных радиокарт и возможные дополнительные ошибки, как отмечено выше, связанные с неучетом вероятных частотных вариаций спектральных индексов. Такое уточнение может быть произведено на основании прямых абсолютных измерений интенсивности распределенного космического радиоизлучения на рабочей частоте f_0 в различных областях небесной сферы, с привязкой шкалы яркостных температур к какому-нибудь калибровочному эталону радиоизлучения. Возможно использование при таких измерениях метода замещения «черным» диском, выполняющим роль первичного эталона радиояркости, с которым сравнивается интенсивность радиоизлучения экранируемых им областей космического фона [18]. За счет суточного вращения Земли в направлении «черного» диска проходят области неба с различной интенсивностью радиоизлучения, и, следовательно, на основании измеренного профиля $T_{\Phi, d}$ могут быть уточнены абсолютные значения радиояркости на различных уровнях интенсивности (изофотах) интерполированного радиоизображения. Это, в сущности, и означает учет возможных частотных вариаций спектральных индексов. Таким образом, если интерполированное значение радиояркости рассчитывается по соотношению (4), то истинное значение (полученное из прямых абсолютных измерений) можно представить в виде

$$T_{\Phi, d} = \tilde{T}_{f_0}^i = T_{f_0}^i K = T_{f_{1,2}}^i (f_{1,2}/f_0)^{\beta_i + \Delta_{1,2}}, \quad (5)$$

где K — коэффициент, выражающий различие между интерполированной $T_{f_0}^i$ и измеренной $\tilde{T}_{f_0}^i$ яркостными температурами, что обусловлено, главным образом, возможной частотной вариацией $\Delta_{1,2}$ спектрального индекса β_i на участках частот (f_1, f_0) и (f_0, f_2) . Согласно (5)

$$\Delta_{1,2} = \lg K / \lg (f_{1,2}/f_0). \quad (6)$$

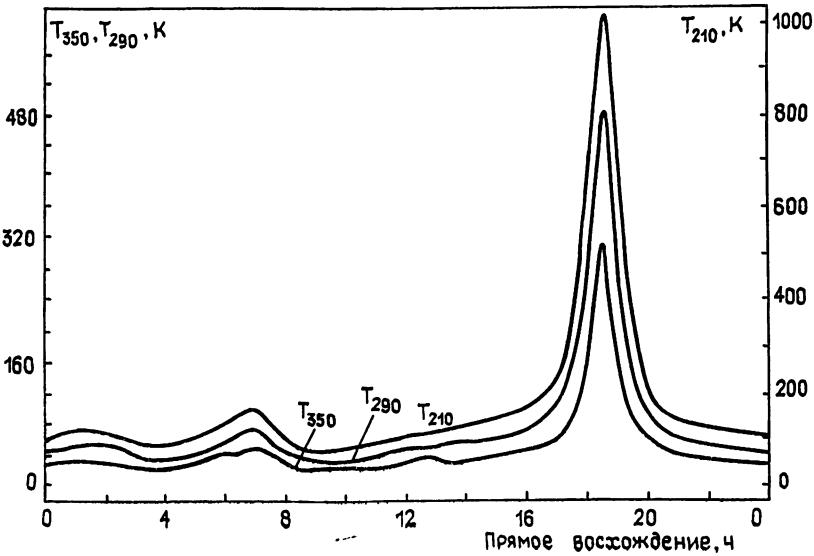


Рис. 2.

Следовательно, при $K \neq 1$ величина $\Delta_{1,2}$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от участка частот, на котором корректируется спектральный индекс. После внесения соответствующих поправок на графопостроитель ЭВМ выводится скорректированное пространственное распределение яркостных температур радиофона, содержащее минимально возможные в данном случае

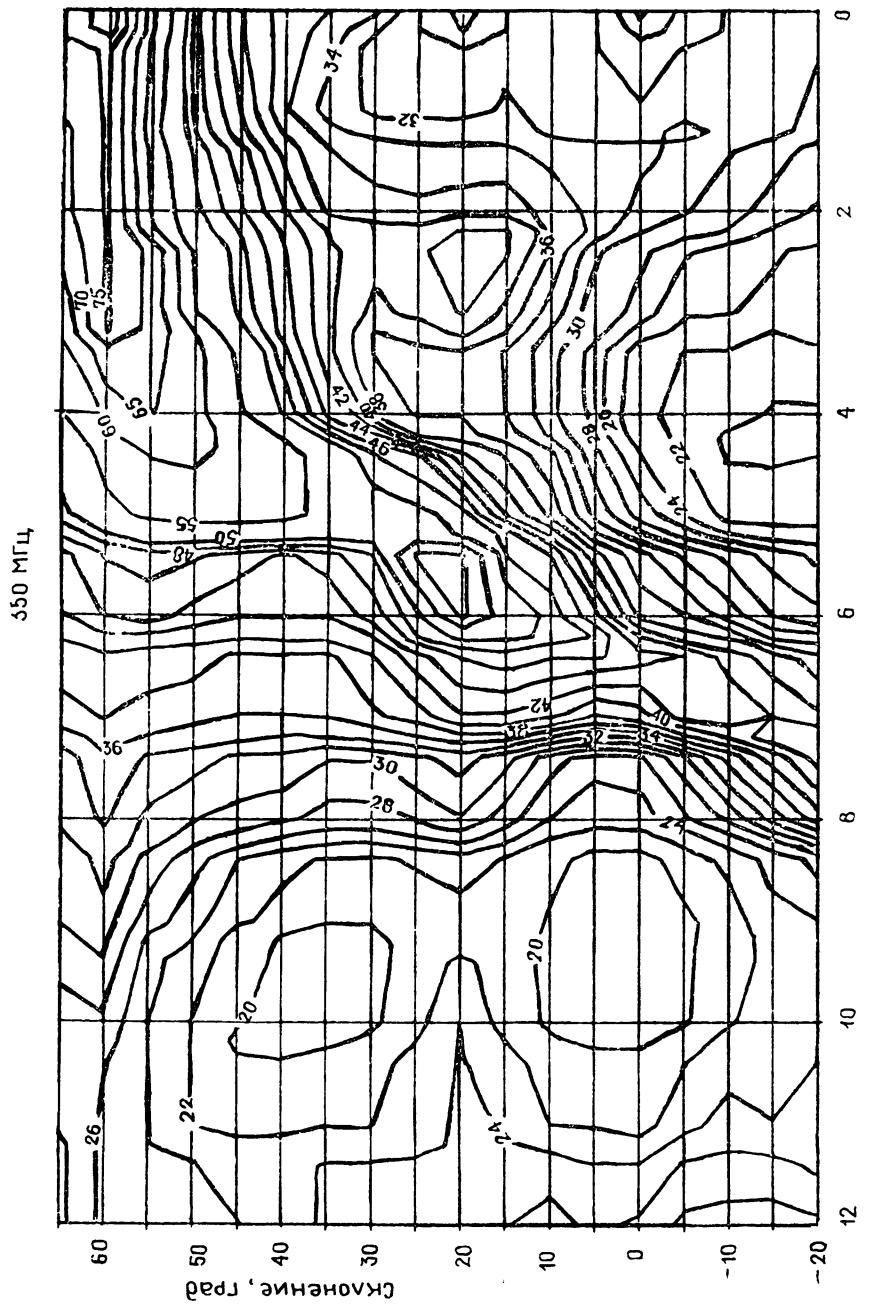


Рис. 3.

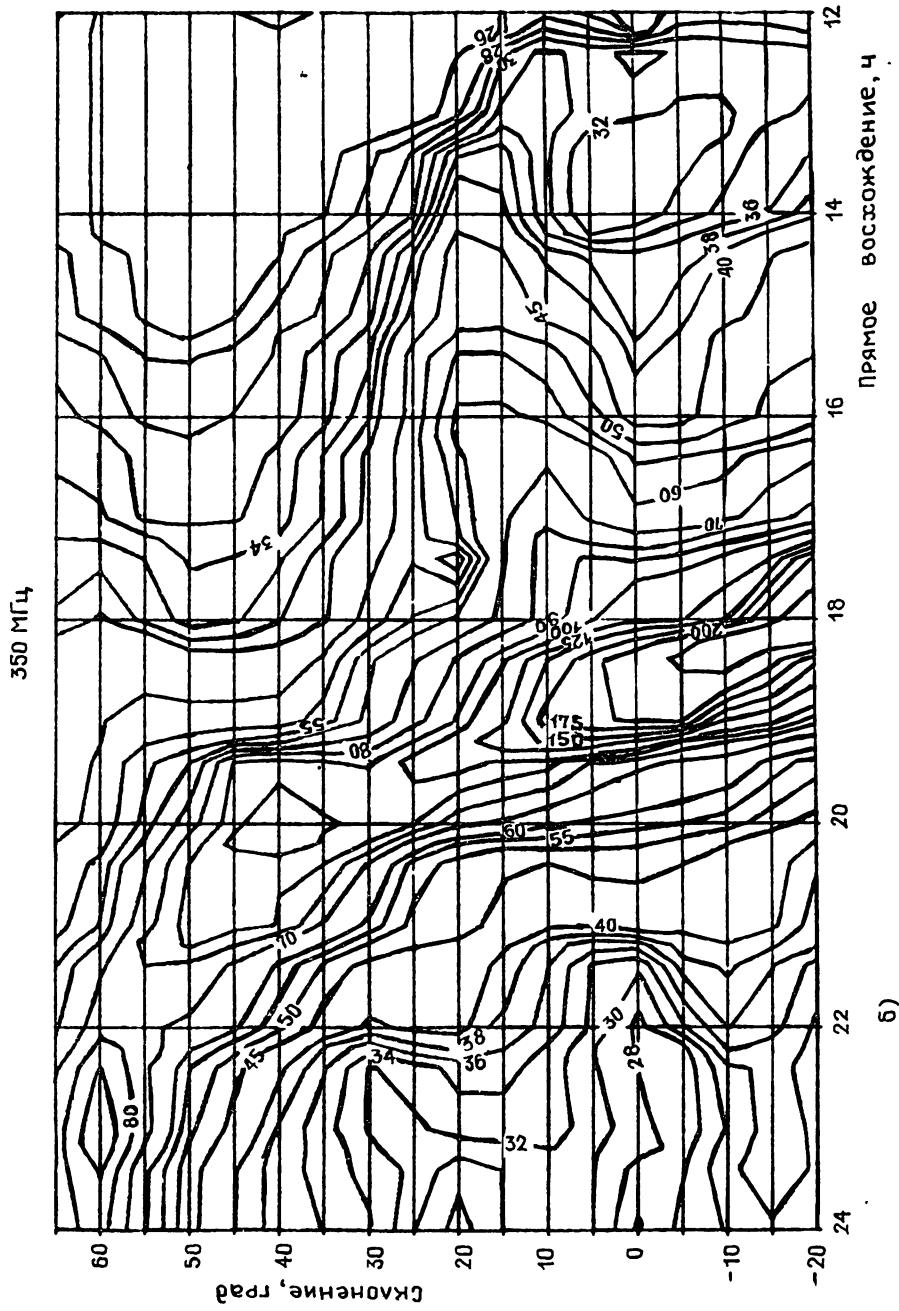


Рис. 3.

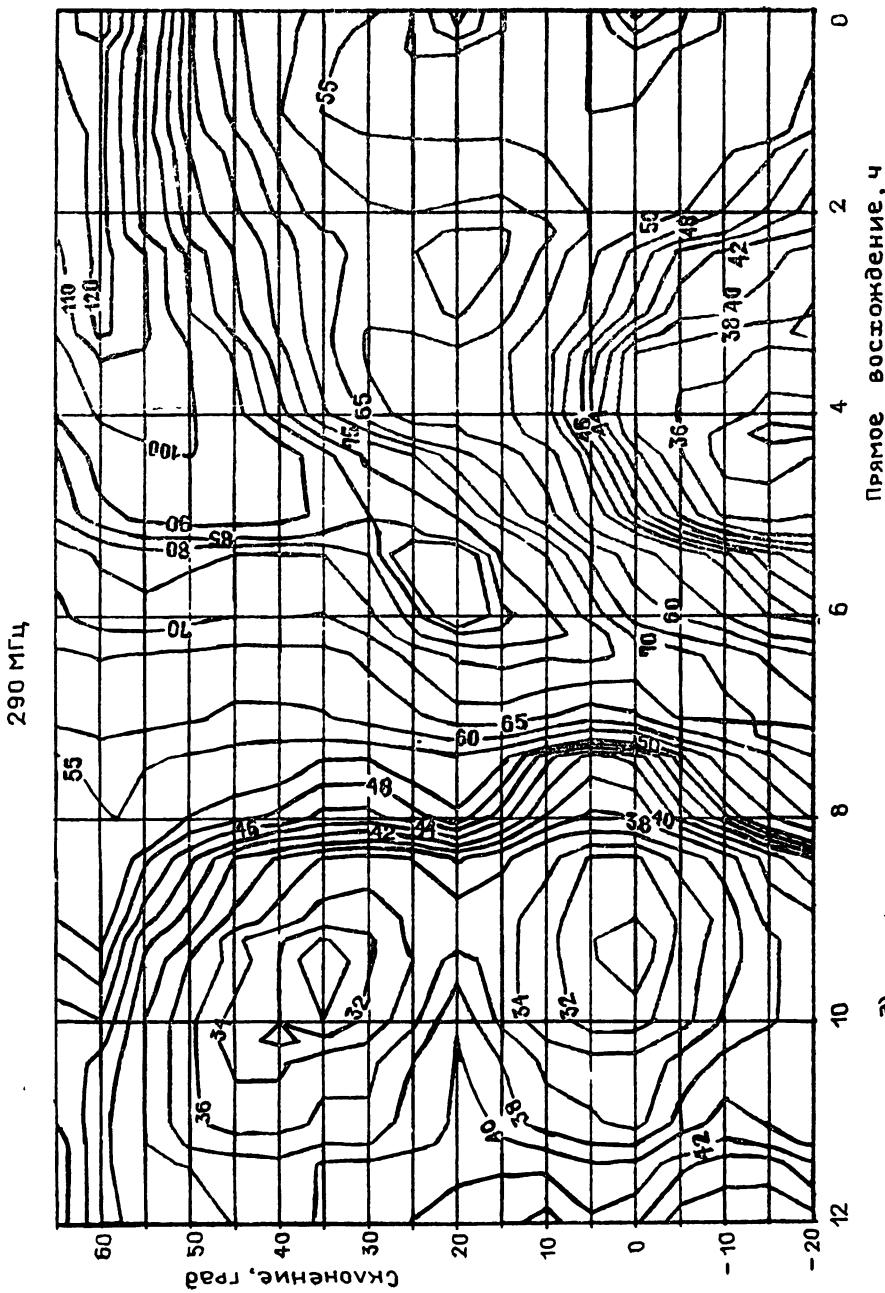


Рис. 4.

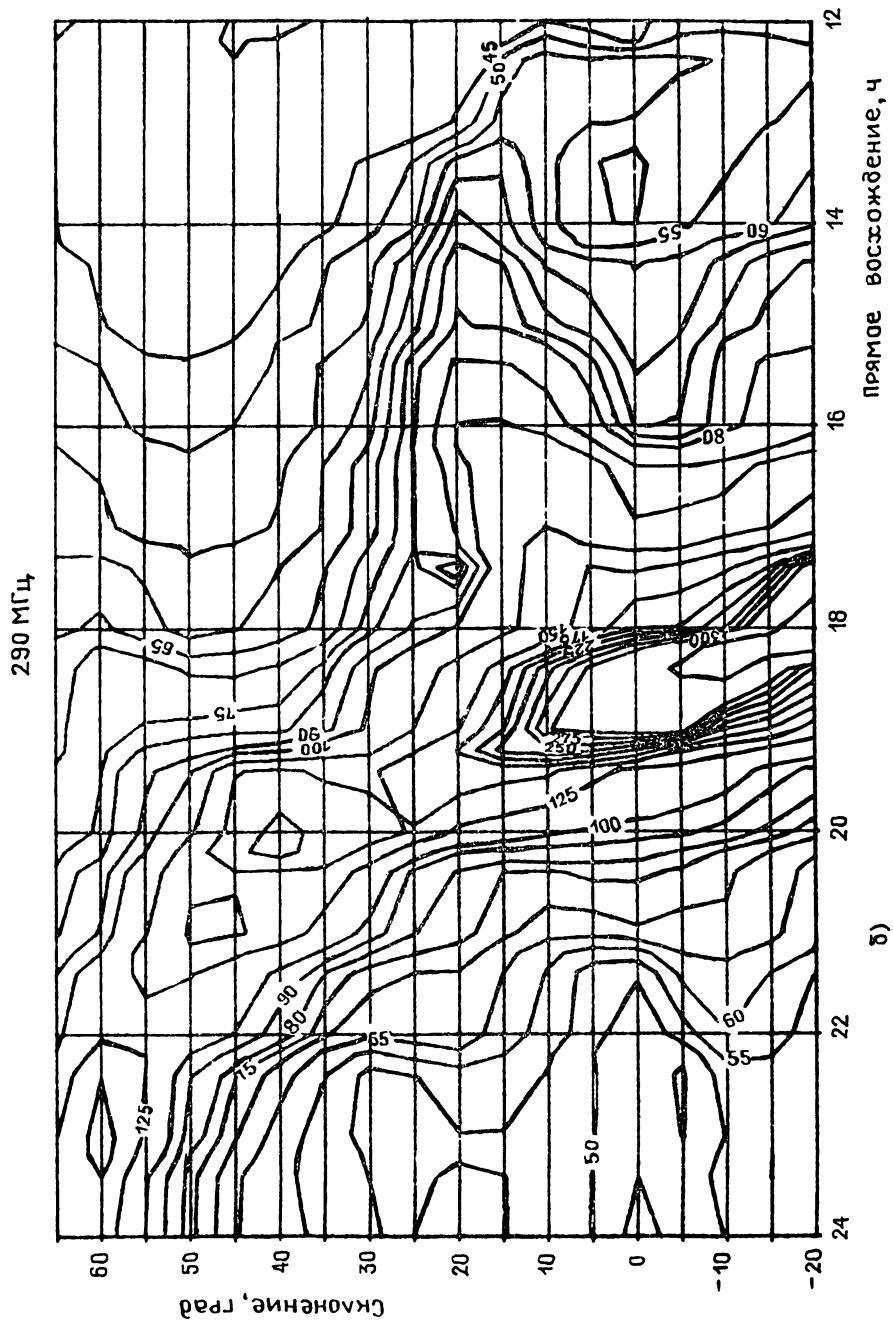
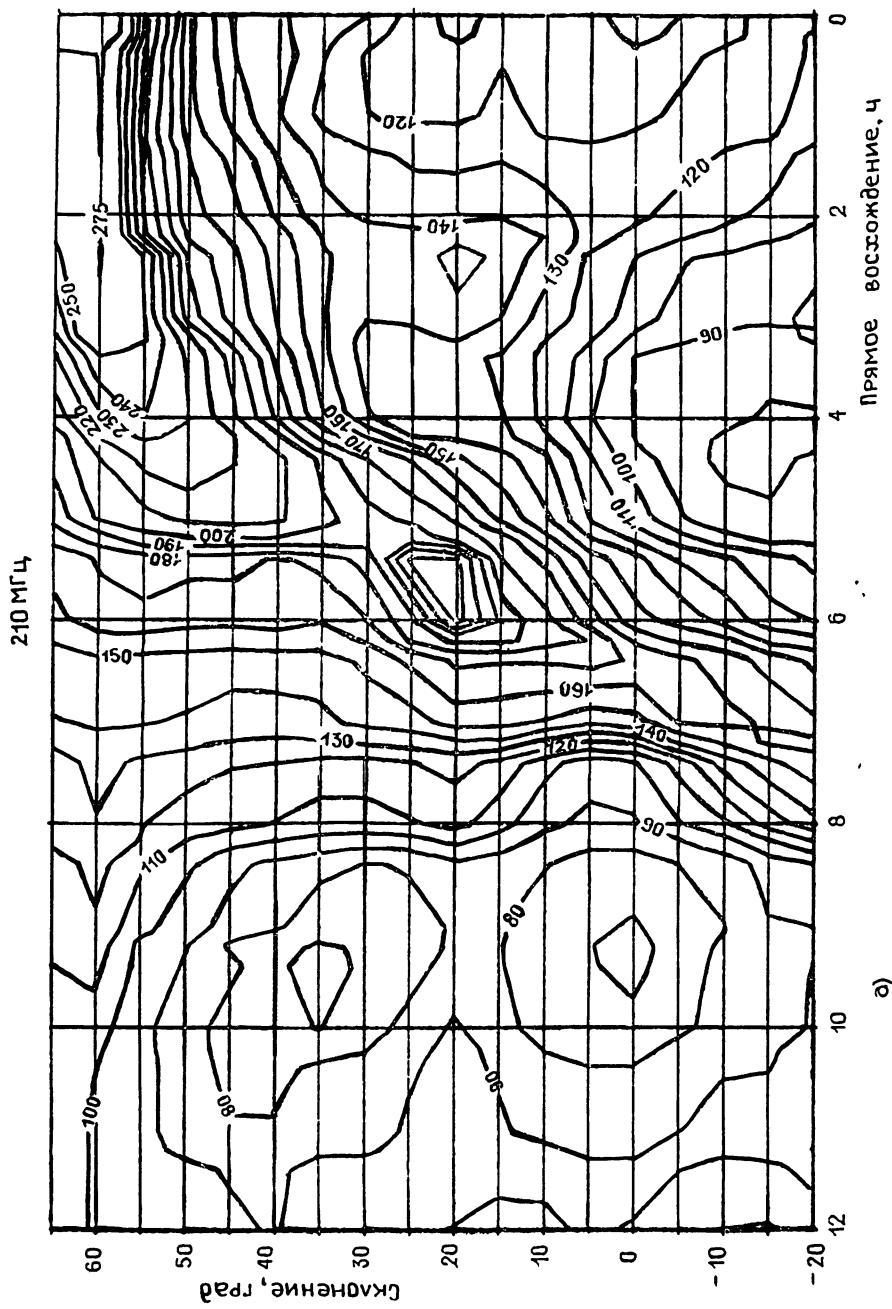


Рис. 4.

Рис. 5.



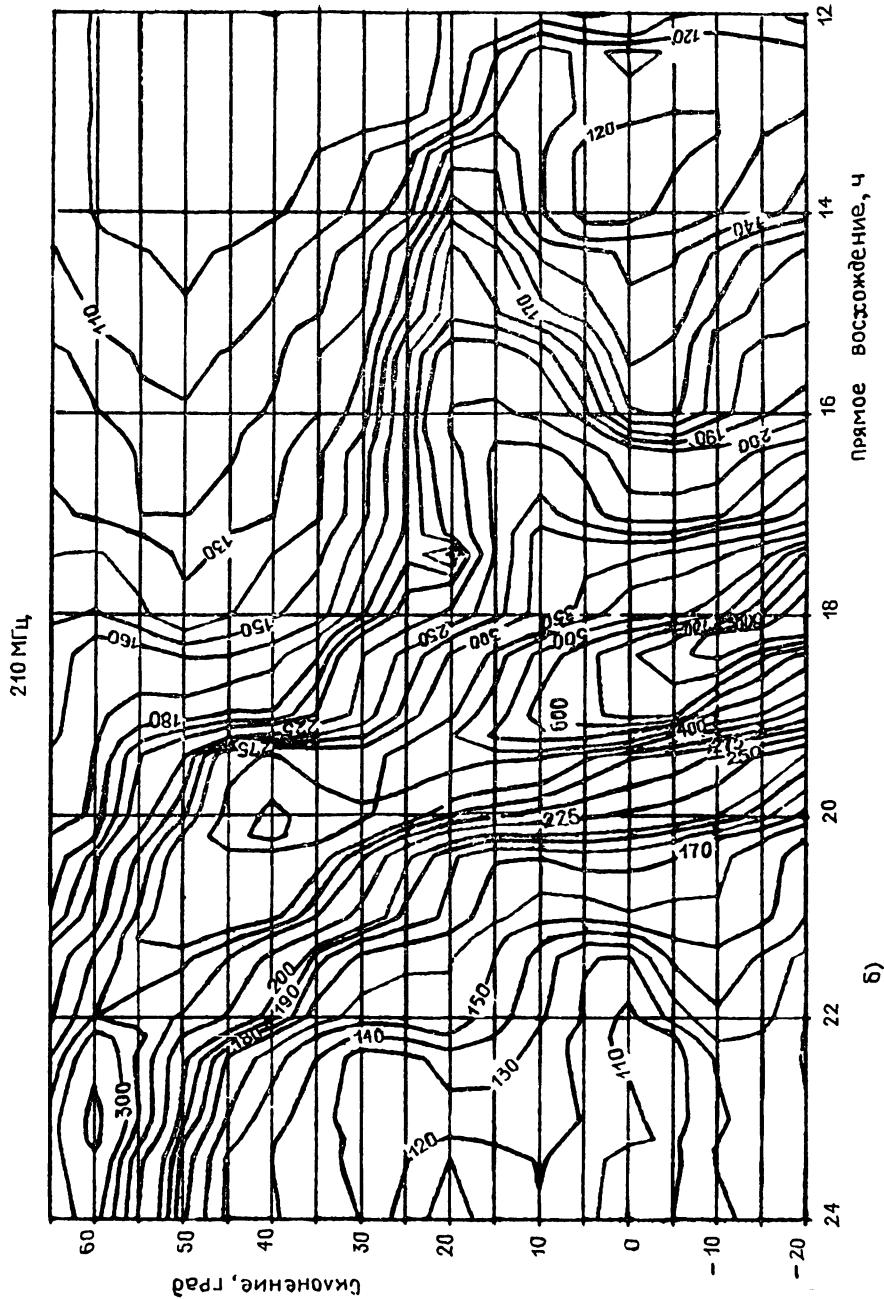


Рис. 5.

абсолютные погрешности. Подобные измерения могут быть проведены за короткий срок (несколько дней) и позволяют получить достоверную радиокарту неба на используемой рабочей частоте f_0 (известно, что построение оригинальных радиообзоров неба требует весьма сложных и длительных наблюдений и обработки результатов, занимающих, в ряде случаев, не один год [^{4, 8, 9-12}]).

Экспериментальные измерения проводились на радиоастрономическом комплексе в составе 12-метрового радиотелескопа РТВС-12, 5-метрового «черного» диска и комплекта автоматизированной на базе микро-ЭВМ радиометрической аппаратуры. Методика измерений и обработки результатов полностью аналогичны описанным в [^{18, 36}]. Наблюдения проводились на рабочих частотах 210, 290 и 350 МГц для участка радиофона с координатами $\delta = \delta_{\text{диск}} = -6,5^\circ$, $\alpha = 00^\text{h} - 24^\text{h}$. Измеренные сканы $T_{\Phi, d}$, соответствующие пространственному разрешению порядка 7° (телесный угол, занимаемый диском), построены на рис. 2. Погрешность яркостных температур составляет по всему рабочему диапазону примерно 10–15% на уровнях радиояркости $T_{\Phi, d} \sim 150 - 1000$ К, в то время как на уровнях $T_{\Phi, d} \sim 30 - 130$ К погрешность несколько выше ($\sim 15 - 20\%$). Из сопоставления результатов измерений на рабочих частотах (рис. 2) с интерполированными значениями радиояркости (рис. 1; формулы (3), (4)) получаются параметры коррекции, приведенные в табл. 2.

При расчетах коэффициента K использовались все данные за исключением данных с участка галактической плоскости ($\alpha \sim 17^\text{h}40^\text{m} - 19^\text{h}40^\text{m}$), где поправочный коэффициент отличается от среднего уровня на 0,1–0,2. Это связано, главным образом, с невысокой точностью оцифровки исходных радиообзоров (особенно на 38 МГц [¹]) в области с резко неоднородным фоном. Поскольку вне этой области значения K имеют незначительный разброс, что свидетельствует в пользу достаточно точного учета пространственных вариаций спектрального индекса, коррекция $\Delta_{1,2}$ применяется ко всей рассматриваемой области радионеба. Радиоизофоты, построенные на основании распределения спектрального индекса β_i (рис. 1) с учетом найденных по результатам проведенных абсолютных измерений параметров коррекции $\Delta_{1,2}$ (табл. 2), приведены на рис. 3–5 для рабочих частот 350, 290 и 210 МГц соответственно. Погрешности полученных радиоизображений, слагающиеся из нескольких составляющих (ошибки исходных радиокарт, погрешности оцифровки, погрешности интерполяции по частоте, ошибки используемых для корректировки экспериментально измеренных сканов и т. д.), несколько различаются на разных частотах и различных уровнях радиояркости, однако не превышают, по оценкам, $\pm 15\%$, что существенно меньше погрешностей, к которым приводила бы интерполяция на основе выражения (1).

В заключение необходимо отметить, что построенные по выше описанной методике радиокарты области Северного неба на частотах 210, 290 и 350 МГц, отвечающие угловому разрешению $\sim 7^\circ$, в свою очередь могут использоваться в качестве исходных радиообзоров при интерполяции по частоте в пределах диапазона 200–350 МГц. Предложенный здесь метод, безусловно, не решает проблему построения оригинальных прецизионных обзоров неба на возможно большем количестве частот радиодиапазона, но может быть весьма полезен при необходимости быстрого получения достаточно точных радиокарт, используемых как в прикладных целях, так и при проведении радиоастрономических исследований различных компонент космического радиоизлучения.

Автор благодарен Л. Р. Семеновой и В. Н. Бубкиной за помощь в проведении расчетов на ЭВМ и Н. М. Цейтлину за внимание к работе и полезные обсуждения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Milogradov-Turin J., Smith T. G. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1973. V. 161. № 3. P. 269.
2. Rohan P., Soden L. B. // Austral. J. Phys. 1970. V. 23. № 2. P. 223.
3. Yates K. W. // Austral. J. Phys. 1968. V. 21. № 2. P. 167.
4. Landecker T. L., Wielebinski R. // Austral. J. Phys. Astrophys. Suppl. 1970. № 16. P. 1.
5. Turtle A. J., Baldwin J. E. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1962. V. 124. № 6. P. 459.
6. Dröge F., Priester W. // Z. Astrophys. 1956. V. 40. № 40. P. 236.
7. Seeger C. L., Westerhout G., Conway R. G., Hoekema T. // Bull. Astr. Inst. Netherl. 1965. V. 18. P. 11.
8. Pauliny-Toth I. I. K., Shakeshaft J. R. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1962. V. 124. № 1. P. 61.
9. Haslam C. G. I., Guigley M. J. S., Salter C. J. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1970. V. 147. № 4. P. 405.
10. Haslam C. G. T., Wilson W. E., Graham D. A., Hunt G. C. // Astron. Astrophys. Suppl. 1974. V. 13. P. 359.
11. Haslam C. G. T., Klein U., Salter C. J. et al. // Astron. Astrophys. 1981. V. 100. № 2. P. 209.
12. Haslam C. G. T., Salter C. J., Stoffel H., Wilson W. E. // Astron. Astrophys. Suppl. 1982. V. 47. № 1. P. 1.
13. Вегхниусен Е. М. // Astron. Astrophys. 1971. V. 14. № 3. P. 359.
14. Цейтлин Н. М., Дмитренко Л. В., Дмитренко Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19. № 8. С. 1106.
15. Миллер М. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 7. С. 934.
16. Миллер М. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. 1. 27. № 11. С. 1468.
17. Дугин Н. А., Миллер М. Е., Семёнова Л. Р. Тезисы докладов XVIII Всесоюзной конференции «Радиотелескопы и интерферометры». — Иркутск: СиБИЗМИР, 1986. С. 76.
18. Миллер М. Е., Цейтлин Н. М. Тезисы докладов XVII Всесоюзной конференции по аппаратуре и методам радиоастрономических измерений. — Ереван: АН АрмССР, 1985. С. 353.
19. Цейтлин Н. М., Миллер М. Е., Пелошенко С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 10. С. 1147.
20. Цейтлин Н. М. Антennaя техника и радиоастрономия. — М.: Сов. радио, 1976.
21. Taylor R. E. // Proc. IEEE. 1973. V. 61. № 4. P. 469.
22. Lawson K. D., Mayer C. J., Osborne J. L., Parkinson M. L. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1987. V. 225. № 2. P. 307.
23. Webber W. R. // Austral. J. Phys. 1968. V. 21. № 6. P. 845.
24. Reich P., Reich W. // Astron. Astrophys. Suppl. 1988. V. 74. № 1. P. 7.
25. Gruber G. M. // Astron. Astrophys. 1969. V. 2. P. 369.
26. Howell T. F. // Astrophys. Lett. 1970. V. 6. № 1. P. 45.
27. Stankevich K. S., Wielebinski R., Wilson W. E. // Austral. J. Phys. 1970. V. 23. P. 529.
28. Разин В. А. Диссертация. Горький, Гос. ун-т, 1971.
29. Sironi G. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1974. V. 166. P. 345.
30. Webster A. S. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1974. V. 166. P. 355.
31. Беляев П. П., Тарасов А. Ф., Токарев Ю. В., Юрищев М. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 9. С. 1047.
32. Bridle A. H. // Mont. Not. Roy. Astr. Soc. 1967. V. 136. P. 219.
33. Howell T. F., Shakeshaft J. R. // Nature. 1967. V. 216. P. 753.
34. Антонов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 5. С. 759.
35. Wielebinski R., Smith D. H., Garzon Cardenas X. // Austral. J. Phys. 1968. V. 21. № 2. P. 185.
36. Миллер М. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 5. С. 665.
37. Brown R. H., Hazard C. // Phil. Mag. 1953. V. 44. № 7. P. 939.
38. Токарев Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12. № 2. С. 161.
39. Миллер М. Е. Статья депонирована в ВИНИТИ, пер. № 4219-85. Деп. от 14 июля 1985 г.
40. Price R. M. // Austral. J. Phys. 1970. V. 23. № 2. P. 227.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
21 мая 1987 г.

THE METHOD OF BUILDING OF THE SKY RADIO MAPS

M. E. Miller

A method is suggested for building of radio isophotes combining the frequency interpolation on the basis of two original sky survey with the spectral index correction over the results of absolute measurements. On the basis of radio surveys at 38 MHz and 404 MHz the spatial distribution of the spectral indices (38/404) has been built. The correction of the given distribution is carried out over the absolute measurement results by the method of «black» disk at 210, 290, and 350 MHz and the corresponding radio maps of the sky have been built.