

## ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

*А. Н. Коржавин*

Методом оптического моделирования получены диаграммы направленности АПП для нескольких высот наблюдения в интервале от 0 до 90°, пригодные для непосредственного использования для обработки радиоастрономических наблюдений на радиотелескопах БПР и РАТАН-600. Для этой цели использованы радиальные фильтры переменной плотности, имитирующие реально измеренные законы распределения амплитуды поля в апертурах этих телескопов. Рассмотрен вопрос о коррекции измеренных диаграмм направленности, необходимой для учета различия вертикальных огибающих диаграмм направленности рассматриваемых радиотелескопов. Показано, что в пределах изменения высоты наблюдения  $\pm 5^\circ$  изменения диаграммы направленности АПП сводятся с точностью  $\leq 2\%$  к соответствующему ее сжатию или растяжению в вертикальном направлении. Проведенные измерения обработаны на ЭВМ и представлены в виде графиков, построенных с помощью графопостроителя «Атлас» и в виде цифровых таблиц, выведенных на АЦПУ.

The method of optical simulation is used to find the patterns of the VPA (variable profile antenna) for several altitudes in the range 0 to 90°. These can be used to treat observations made with the radiotelescopes LPR (Large Pulkovo Radiotelescope) and RATAN-600. To imitate the real laws of illumination of the antenna aperture special filters were made photographically. A problem of correction of the measured patterns which is necessary to allow for the difference in the vertical envelopes of the patterns of the telescopes considered is discussed. It is shown that a simple way of interpolation of the pattern may be used with a precision of  $\leq 2$  per cent within  $\pm 5^\circ$  of altitude. The results of measurements of the simulated antenna patterns are treated by computing technique and presented in the form of graphs and tables.

### Введение

В работах [1, 2] показано, что диаграммы направленности антенны переменного профиля (АПП) с достаточной точностью (1—2%) могут быть исследованы методом оптического моделирования. Таким образом, представляет интерес получить этим методом количественные данные о диаграмме АПП, пригодные для непосредственного использования для обработки радиоастрономических наблюдений на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) и РАТАН-600. Для этой цели достаточно провести эксперименты по оптическому моделированию диаграммы, обеспечив соответствие распределений поля в оптических и радиораскрывах.

В данной работе рассмотрены имеющиеся в настоящее время результаты экспериментальных измерений распределений поля в апертурах реальных АПП и для некоторых выбранных типов облучения апертуры методом оптического моделирования получены диаграммы АПП для нескольких высот наблюдения в интервале углов от 0 до 90°. Рассмотрен также вопрос об учете влияния на полученные результаты различия вертикальных огибающих диаграммы у оптических моделей и работающих радиотелескопов и вопрос о возможности интерполирования полученных данных для промежуточных значений высоты наблюдения.

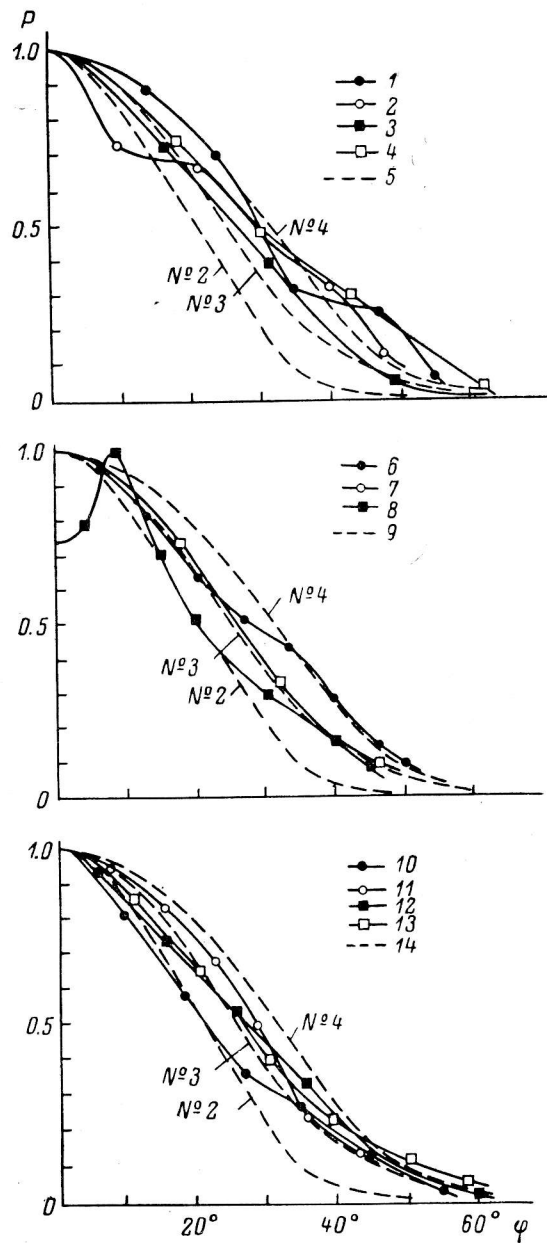


Рис. 1. Диаграммы облучения  $P(\varphi)$  комплекса первичный облучатель—вторичное зеркало по результатам измерений распределения мощности вдоль первичных отражателей БПР и РАТАН-600 на различных волнах (в см).

1 — 3.04, БПР [3, 7]; 2 — 3.04, БПР [3, 7]; 3 — 4.5 БПР [3, 7]; 4 — 3.2, БПР [3, 7]; 5 — тип облучения № 2 [2]; 6 — 0.85, БПР [5]; 7 — 3.9, РАТАН-600; 8 — 3.3, РАТАН-600; 9 — 3.2, БПР, тип облучения № 4 [2]; 10 — 4.0, БПР [4]; 11 — 6.6, БПР [6]; 12 — 4.4, БПР; 13 — 9.0, БПР; 14 — 6.6, БПР [6], тип облучения № 3 [2]. Распределение 7 предоставлено автору Д. В. Корольковым; 8 — А. А. Стопким; 9, 12 и 13 получены автором совместно с Ш. Б. Ахмедовым, В. Н. Боровик и Н. Г. Петеровой.

## Распределения поля в апертуре АПП и их имитация

Для измерения распределений амплитуды поля в апертурах АПП использовались различные методы. Результаты измерений представляют собой как двумерные распределения (при использовании зондов, перемещаемых по вертикали и по горизонтали вдоль отражающей поверхности АПП), так и одномерные (при измерении сигналов, отраженных от отдельных элементов АПП). Для удобства сравнения различных измерений будем двумерные распределения сводить к одномерным, а одномерные представлять в виде зависимости мощности в цилиндрической волне от азимута  $\varphi$  в горизонтальной плоскости, т. е. в виде диаграммы излучения комплекса: вторичное зеркало—первичный облучатель. Для получения последней зависимости учитывается конкретное положение при измерениях вторичного отражателя относительно первичного (для вычисления угла  $\varphi$  по номеру элемента  $N$ ) и принимается во внимание, что в области между первичным и вторичным отражателями (в цилиндрической волне) мощность падает пропорционально первой степени расстояния. Обработанные таким способом имеющиеся в настоящее время измерения распределений мощности в раскрывах АПП, приведенные в работах [3—7], и некоторые другие показаны на рис. 1.

Для экспериментов по оптическому моделированию были выбраны три типа облучения, показанные на рис. 1 пунктиром. Цифры около этих кривых соответствуют нумерации типов облучения, использованной в работе [2]. Как видно из рис. 1, к кривой 3 близка большая часть экспериментальных данных, в том числе распределения мощности, измеренные на волне 6.6 см на БПР и на волне 3.9 см на РАТАН-600. Типы облучения № 2 и № 4 представляют собой крайние случаи наиболее узкой кривой (№ 2) и наиболее широкой кривой (№ 4) распределения мощности вдоль поверхности АПП.

Выбранные кривые  $P(\varphi)$  пересчитывались в кривые пропускания  $P(s)$  радиальных фильтров для каждой из выбранных высот наблюдения. Приведем некоторые формулы, использовавшиеся при этих расчетах. На рис. 2 показаны проекция АПП на горизонтальную плоскость (рис. 2, а) и плоскость апертуры АПП (рис. 2, б) [8].  $\varphi$  — угол из фокуса в горизонтальной плоскости между направлениями на центральный  $N_0$  и данный  $N$  элемент АПП,  $\alpha$  — угол из центра антенны в горизонтальной плоскости между направлениями на те же самые элементы. Угол  $\varepsilon$  измеряется в плоскости апертуры из центра кривизны апертуры между направлениями на точки апертуры, соответствующие тем же самым элементам АПП.  $R$  — радиус исходной окружности АПП,  $r$  — радиус дуги апертуры,  $\rho$  — расстояние от фокуса до элементов АПП. Если  $b_0$  — расстояние между центрами соседних элементов АПП, то

$$\begin{aligned} \alpha &= \arcsin(b_0/R)(N - N_0), \\ y_a = y_r &= R \sin \alpha = \rho \sin \varphi = r \sin \varepsilon, \\ \rho &= R/(1 + \cos \theta_0 \cos \varphi). \end{aligned}$$

Угол  $\varphi$  определяется по углу  $\alpha$ :

$$\sin \varphi = \sin \alpha (1 + \cos \theta_0 \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \theta_0}) / (1 + \sin^2 \alpha \cos^2 \theta_0).$$

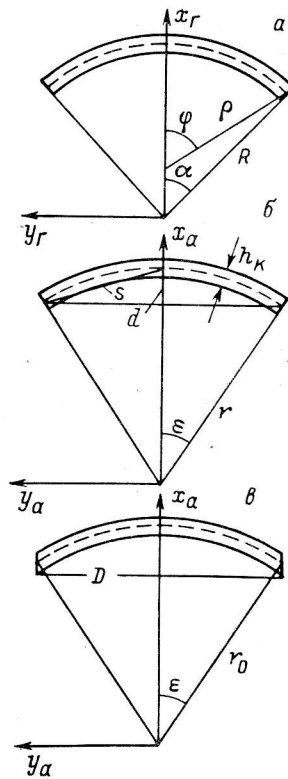


Рис. 2.

а — проекция АПП на горизонтальную плоскость, б — апертура АПП,  $\varepsilon$  — моделирующая апертура АПП.

Связь между углом  $\varphi$  и расстоянием  $s$  между точками апертуры, соответствующими центральному и данному элементам АПП, получается с учетом того, что (рис. 2)

$$d = r - r \cos \varepsilon, \quad s = \sqrt{y_0^2 + d^2};$$

отсюда

$$s = (R \sqrt{2} / \sin \theta_0) \sqrt{(1 - \cos \varphi) (1 - \cos \theta_0) / (1 + \cos \varphi \cos \theta_0)}.$$

Значения  $P(\varphi)$  умножаются на  $\rho_0 / \rho_N$  для учета изменения с расстоянием мощности в цилиндрической волне:

$$\rho_0 / \rho_N = (1 + \cos \theta_0 \cos \varphi_N) / (1 + \cos \theta_0).$$

Рассчитанные таким образом кривые пропускания  $P(s)$  радиальных фильтров для разных высот наблюдения и типа облучения № 3 показаны

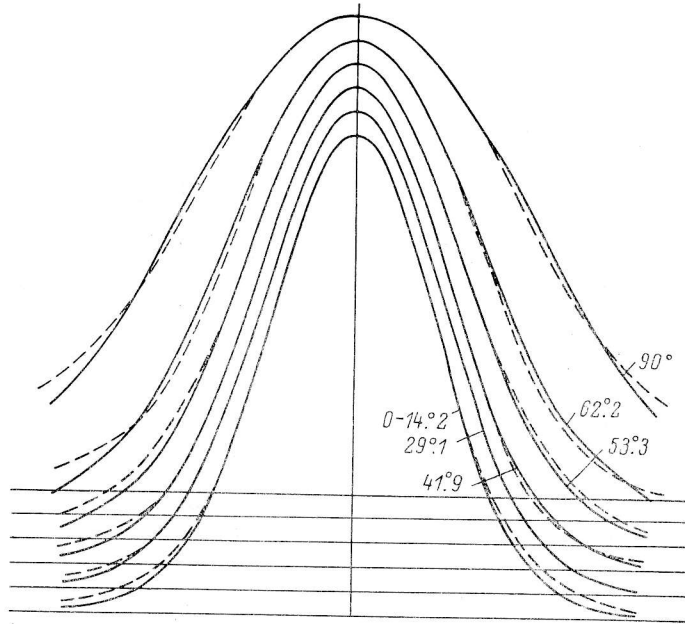


Рис. 3. Кривые пропускания  $P(s)$  радиальных фильтров для типа облучения № 3 и высот от 0 до  $90^\circ$ .

Сплошные линии — расчет, пунктир — измерения с помощью микрофотометра. Кривые смещены друг относительно друга по вертикали на  $0.05 P_{\max}$ .

на рис. 3 (сплошные кривые). Пунктиром показаны кривые пропускания изготовленных для экспериментов радиальных фильтров. Как видно, расхождение между рассчитанными и использованными кривыми не превосходит 5%.

Следует отметить, что расчет кривых пропускания радиальных фильтров, имитирующих распределения амплитуды поля в раскрыве  $E(\varepsilon) = \sqrt{P(\varphi)}$ , производился без учета поляризационных свойств АПП. Как известно [8], в этом случае следует рассматривать диаграммы направленности АПП отдельно для основной поляризации и для кросс-поляризации, которым соответствуют распределения поля в апертуре  $E(\varepsilon) \cos \varepsilon$  и  $E(\varepsilon) \sin \varepsilon$ . Однако, как легко показать, имитируемые в данных экспериментах распределения амплитуды поля  $E(\varepsilon)$  характерны для случаев, когда АПП используется для приема круговой поляризации — правой или левой [11].

## Результаты экспериментов

С использованием радиальных фильтров переменной прозрачности, имитирующих реальные режимы облучения апертуры АПП, на установке для оптического моделирования, подробно описанной в [2], были получены изображения диаграммы направленности АПП для типов облучения № 2—4 и для семи высот наблюдения: 0, 14.2, 29.1, 41.9, 53.3, 62.2, 90°. Математическая обработка фотоэлектрических измерений и способ их графического представления с помощью графопостроителя подробно описаны в работе [2].

Для иллюстрации на рис. 4 показаны фотографии дифракционных изображений, соответствующих типу облучения № 3 апертуры АПП, для высот от 0 до 90°. Фотографии сделаны с двумя выдержками, различающимися в 60 раз, чтобы показать центральные и далекие области диаграммы АПП. А на рис. 5 показаны результаты фотоэлектрических измерений для тех же случаев, что и на рис. 4. Подробное описание показанных на рис. 5, а—ж графиков дано в работе [2].

Относительные ширины колец раскрывов  $h_k/R$  различны как у реальных АПП (БПР и РАТАН-600), так и у наших моделей, неодинакова и их зависимость от высоты наблюдения. Все это приводит к различию размеров вертикальных огибающих диаграммы в каждом из таких случаев. Поэтому, чтобы практически воспользоваться результатами оптического моделирования, необходимо измеренные величины несколько скорректировать, так чтобы они соответствовали действительным размерам огибающих диаграммы БПР или РАТАН-600. В работе [8] показано, что диаграмма направленности АПП может быть представлена в виде произведения двух диаграмм, одна из которых зависит только от вида распределения поля в направлении поперек раскрыва (вертикальная диаграмма отдельного щита АПП), а другая, содержащая основную информацию о структуре диаграммы АПП, сводится к диаграмме бесконечно тонкой дуги, не зависящей от ширины кольца раскрыва.

Приведем вывод соответствующего выражения для диаграммы АПП, несколько отличающегося от полученного в [8] видом выражения для вертикальной огибающей диаграммы. Если в соответствии с рис. 2, б  $x_a, y_a$  — координаты в плоскости апертуры, а  $x, y$  — прямоугольные угловые координаты на небесной сфере вблизи точки  $x=y=0$ , причем ось  $Ox$  параллельна горизонту, а ось  $Oy$  соответствует вертикальному направлению и  $E(x_a, y_a)$  представляет распределение поля в апертуре, то диаграмма направленности  $E(x, y)$  есть

$$E(x, y) = \iint_S E(x_a, y_a) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_a y + y_a x)} dx_a dy_a. \quad (1)$$

Интегрирование здесь выполняется по апертуре  $S$ . Для того чтобы явно выразить пределы интегрирования, слегка изменим форму концов раскрыва, как это показано на рис. 2, в. В этом случае интегрирование по  $y_a$  выполняется от  $-D/2$  до  $D/2$ , где  $D$  — размер хорды раскрыва, а границы области по  $x_a$  могут быть выражены как

$$x_{a1}(y_a) = \sqrt{(r_0 - h_k/2)^2 - y_a^2}, \quad x_{a2}(y_a) = \sqrt{(r_0 + h_k/2)^2 - y_a^2}, \quad (2)$$

где  $r_0 = R/\sin \theta_0$  — радиус средней линии раскрыва,  $h_k$  — ширина раскрыва. Тогда

$$E(x, y) = \int_{-D/2}^{D/2} \int_{x_{a1}}^{x_{a2}} E(x_a, y_a) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} (x_a y + y_a x)} dx_a dy_a. \quad (3)$$

В выражении (3) для каждого значения  $y_a$  должны вычисляться внутренние интегралы по  $x_a$ . Предположим сначала, что для каждого фиксированного  $y_a = y_{a0}$  функция  $E(x_a, y_{a0}) = \text{const} = E(y_{a0})$ , в этом случае

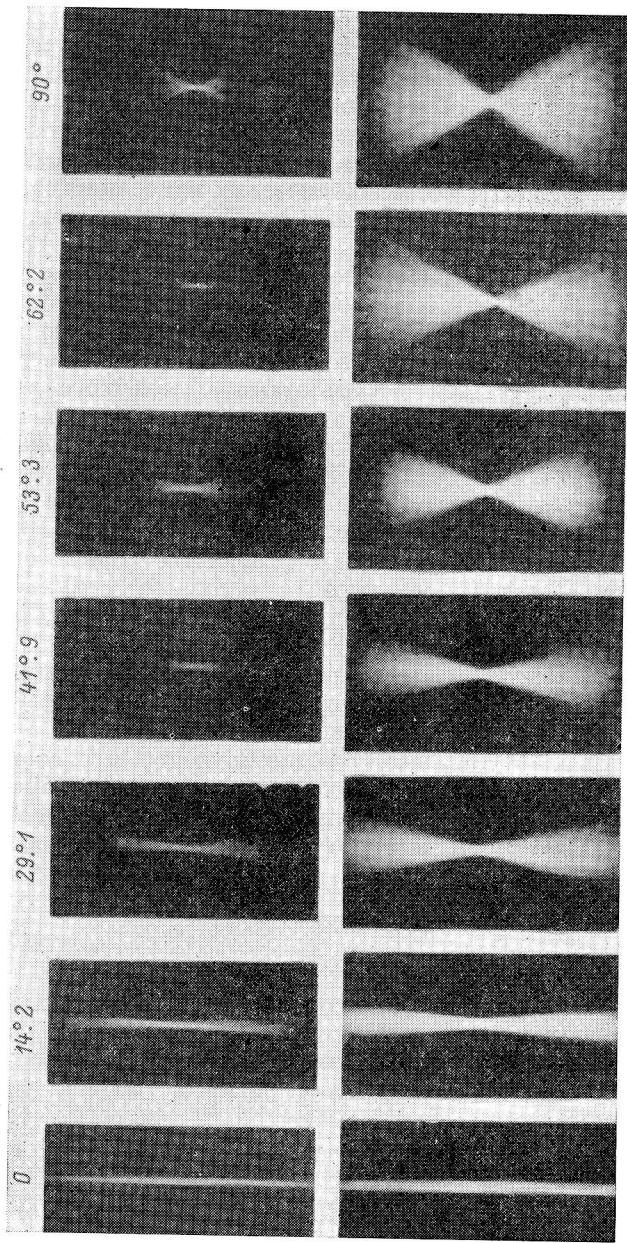


Рис. 4. Фотографические изображения диаграммы направленности АПЧ для семи высот наблюдения и типа облучения апертуры № 3.

Верхний ряд — снимки с выдержкой 1/60 сек., показывающие главный лепесток диаграммы; нижний — снимки с выдержкой 1 сек., показывающие боковые лепестки диаграммы.

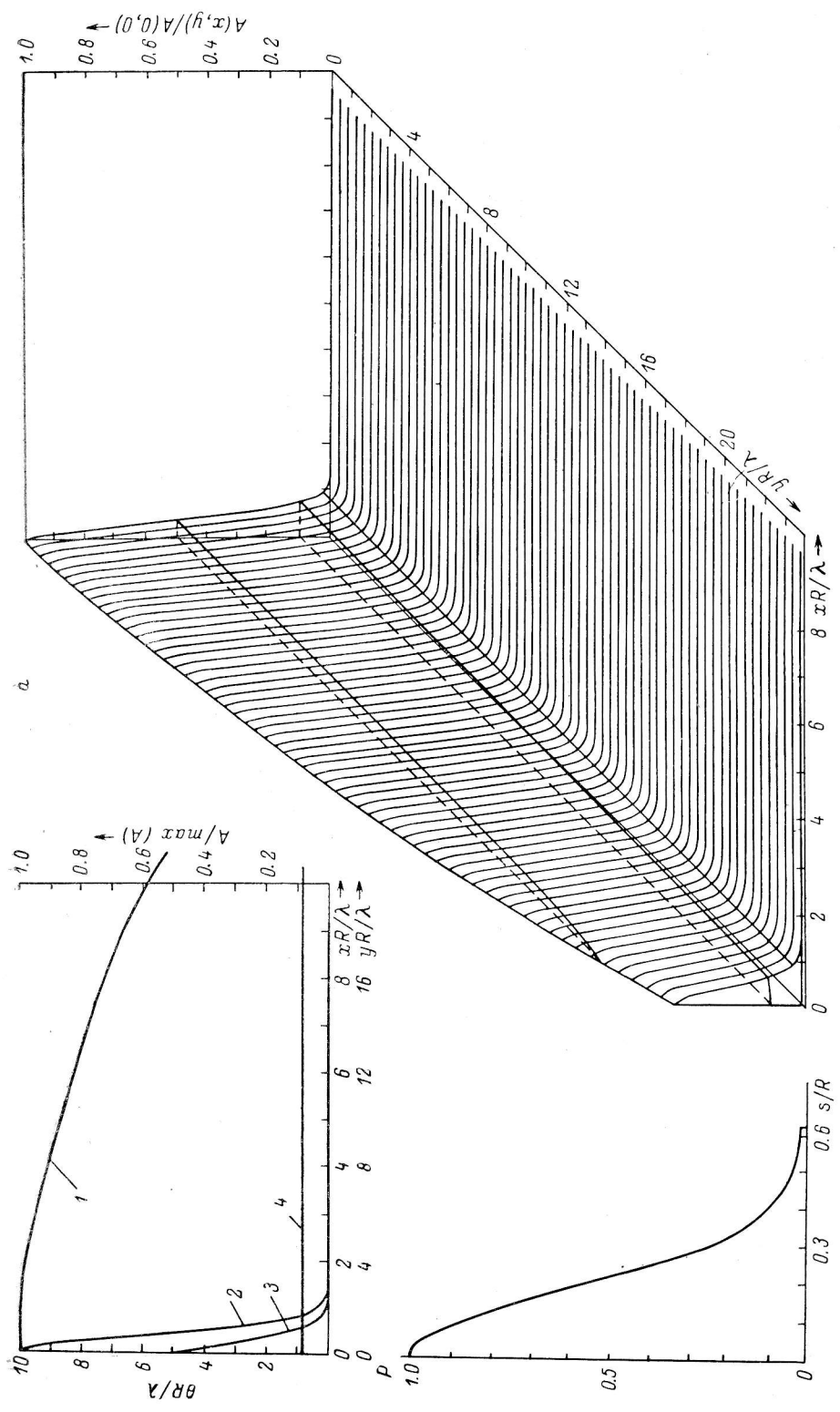


Рис. 5. Диаграмма направленности АПН (РАТАН-600) для семи высот наблюдения и типа облучения № 3.  
 $\theta_0$ , град.: а — 0, б — 14.2, в —  $\theta_0=29^\circ 4$ , г —  $\theta_0=41^\circ 9$ , д —  $\theta_0=53^\circ 3$ , е —  $\theta_0=62^\circ 2$ , ж —  $\theta_0=90^\circ 0$ .

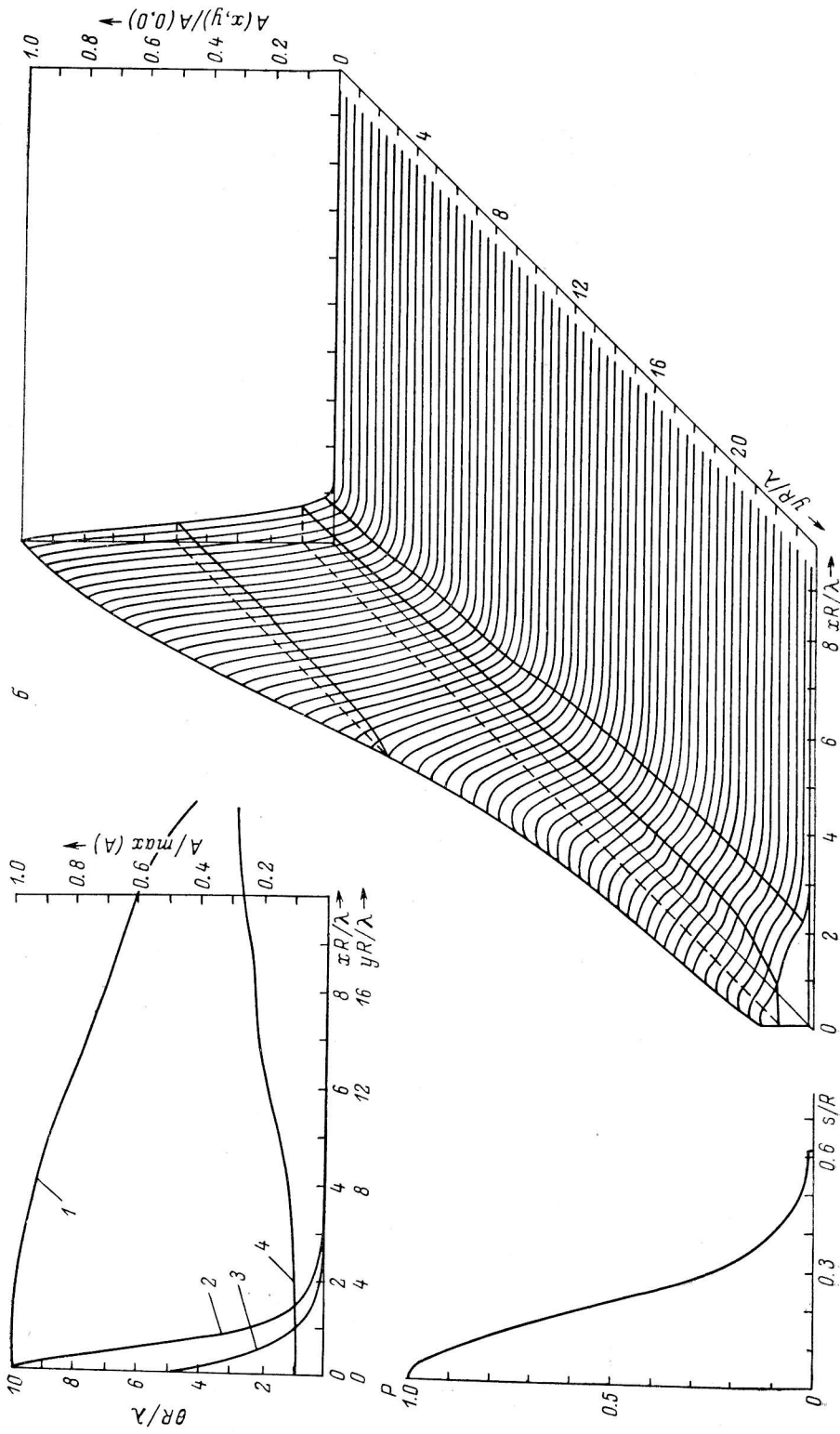


Рис. 5 (продолжение).



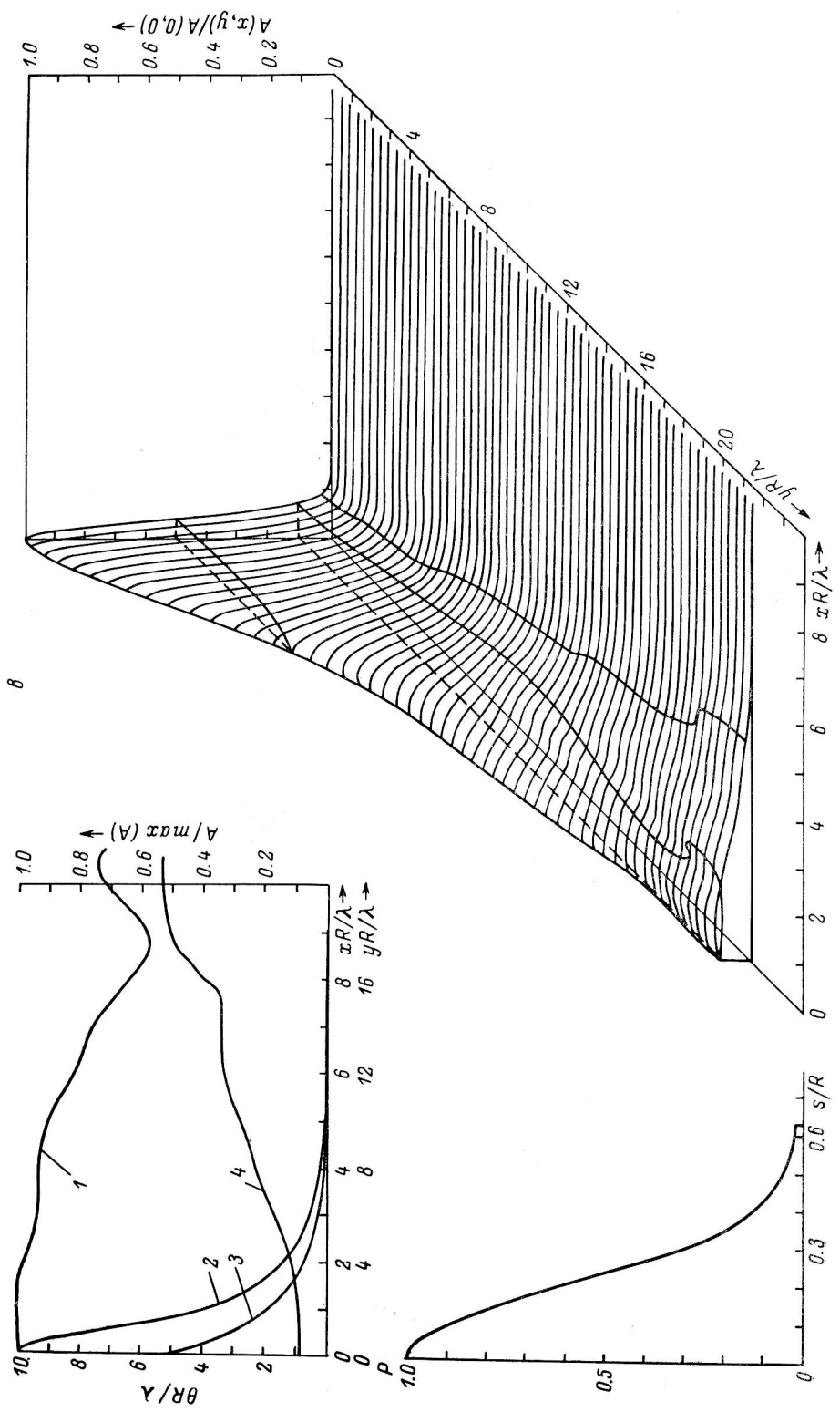


Рис. 5 (продолжение).

8

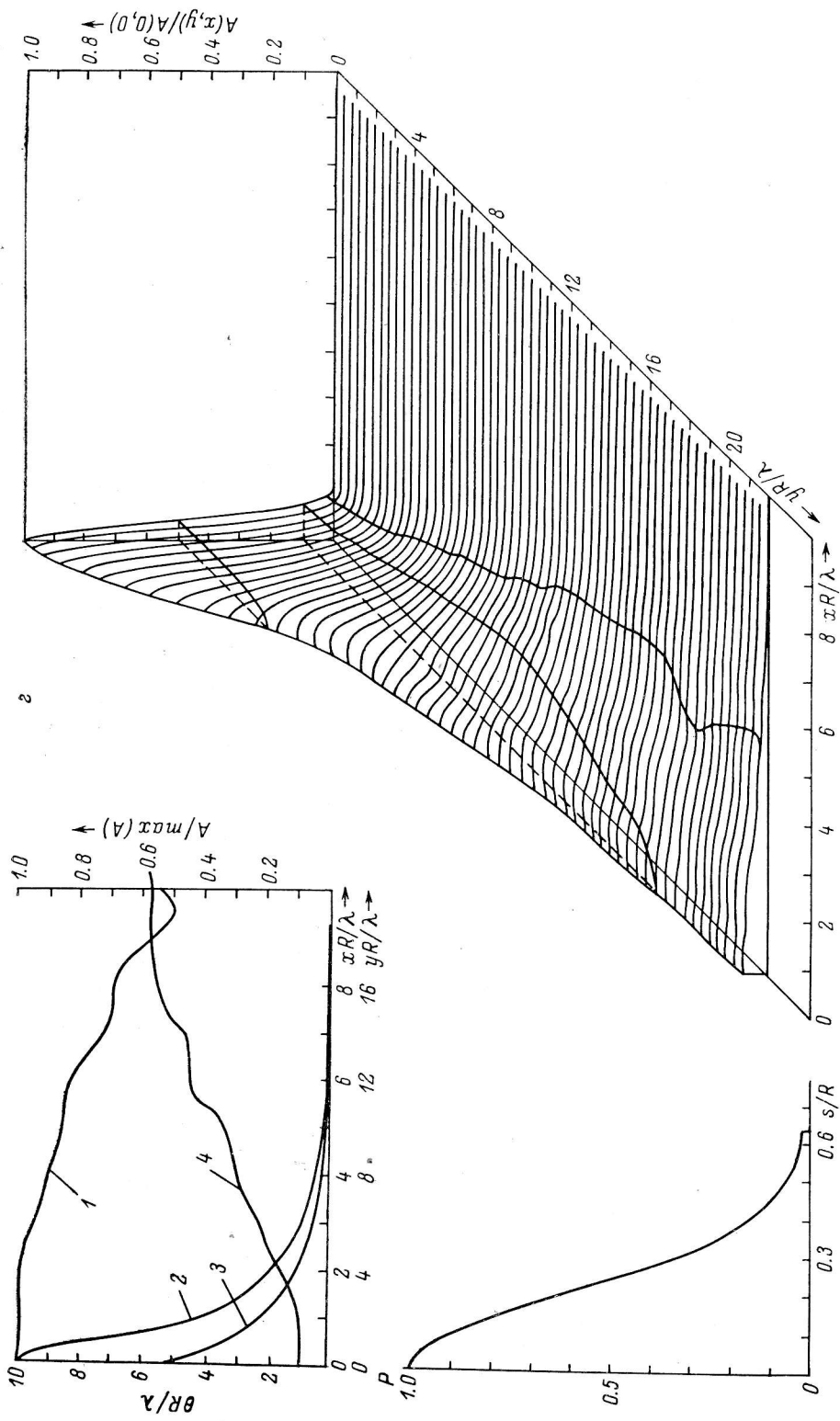


Рис. 5 (продолжение).

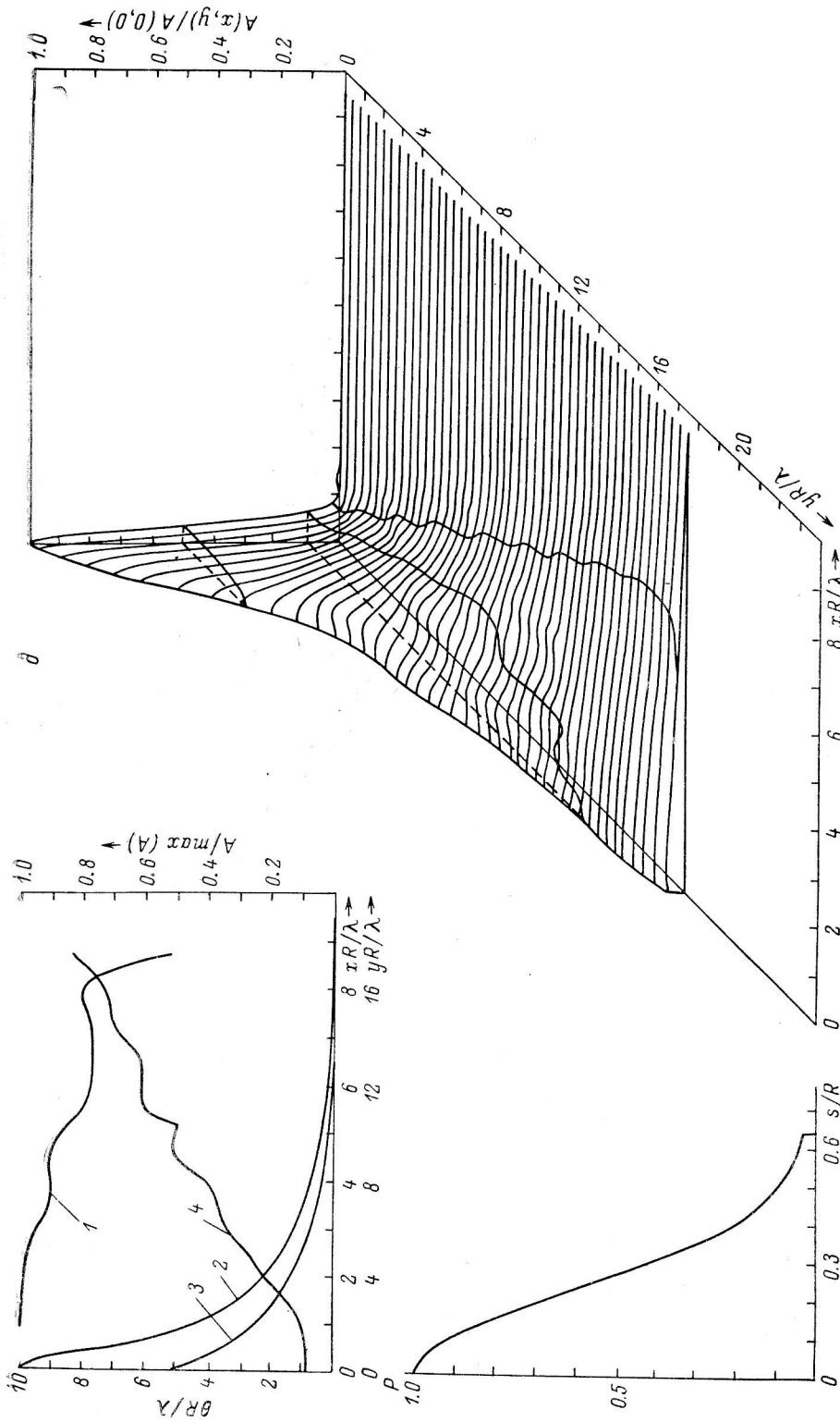


Рис. 5 (продолжение).

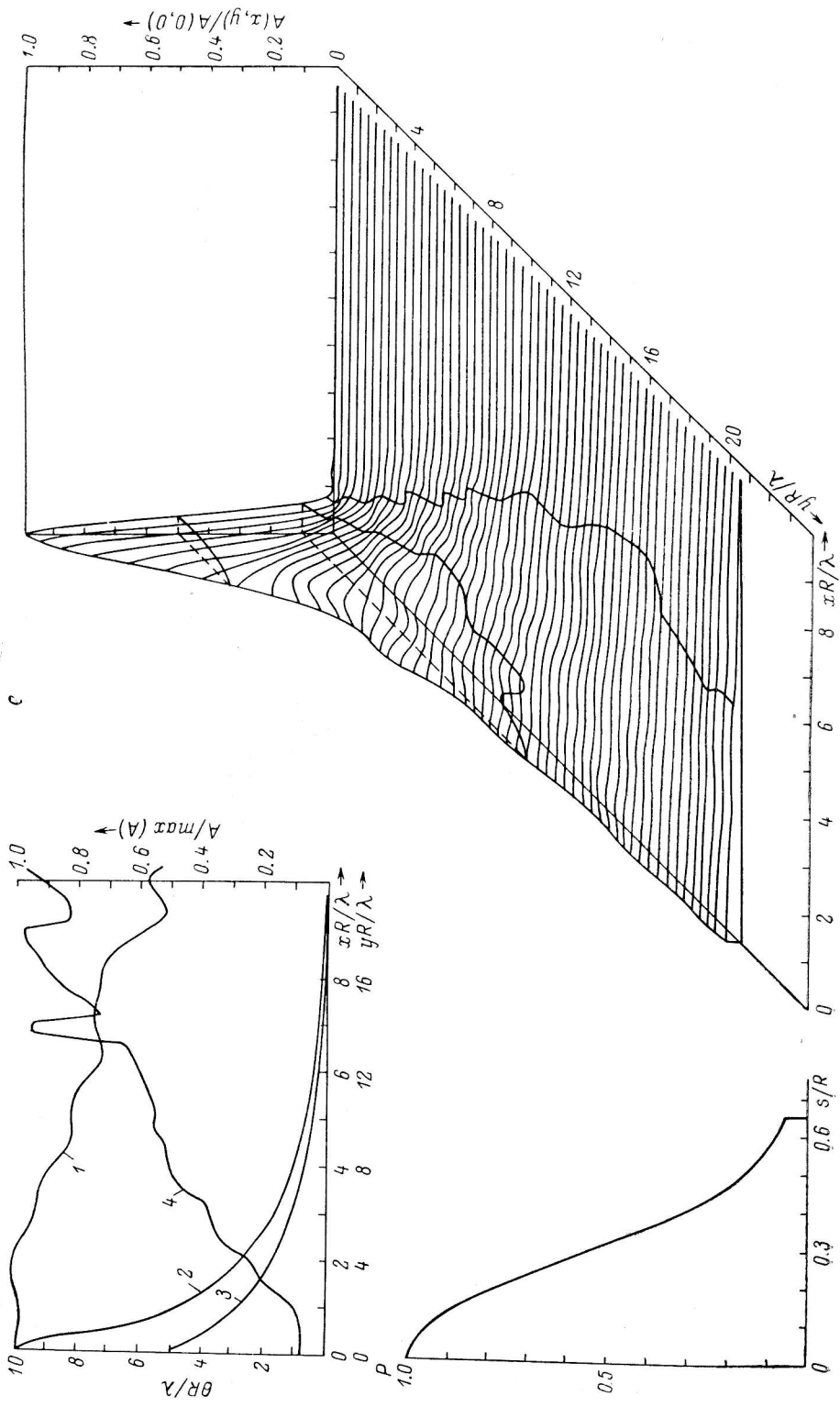


Рис. 5 (продолжение).

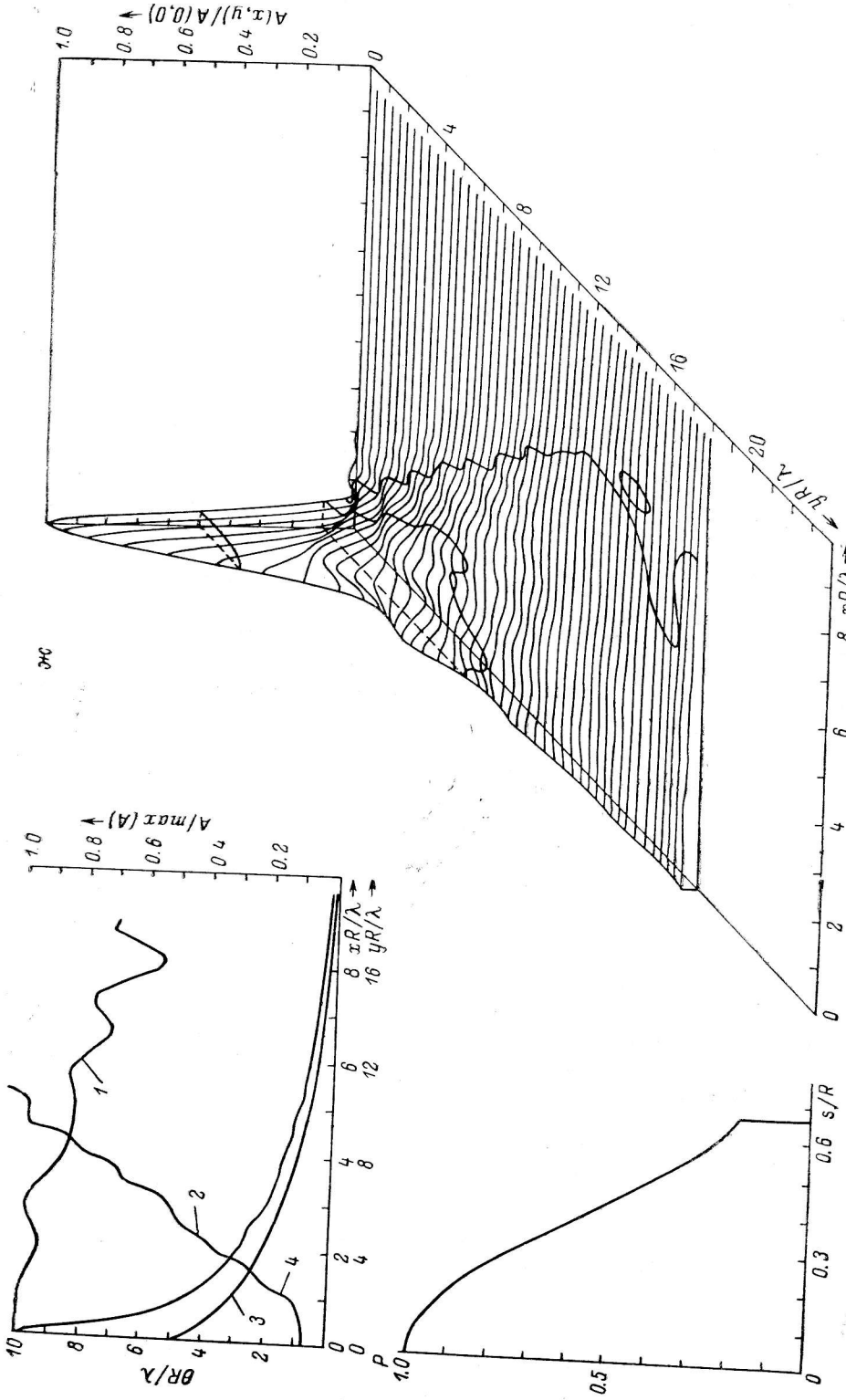


Рис. 5 (продолжение).

$$E(x, y) = \int_{-D/2}^{D/2} E(y_a) \{ \sin [\pi (x_{a2} - x_{a1}) y / \lambda] / [\pi (x_{a2} - x_{a1}) y / \lambda] \} \times \\ \times (x_{a2} - x_{a1}) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{x_{a2} + x_{a1}}{2} y + y_a x \right)} dy_a. \quad (4)$$

Переходя к полярным координатам в плоскости апертуры

$$x_a = r \cos \varepsilon, \quad y_a = r \sin \varepsilon$$

и учитывая, что  $h_k/2 \ll r_0$ , получим

$$x_{a2}(y_a) - x_{a1}(y_a) \approx h_k / \cos \varepsilon, \\ x_{a2}(y_a) + x_{a1}(y_a) / 2 \approx r_0 \cos \varepsilon,$$

отсюда

$$E(x, y) = \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} E(\varepsilon) \{ \sin (\pi y h_k / \lambda \cos \varepsilon) / (\pi y h_k / \lambda \cos \varepsilon) \} \frac{h_k}{\cos \varepsilon} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_0 (x \sin \varepsilon + y \cos \varepsilon)} r_0 \cos \varepsilon d\varepsilon. \quad (5)$$

В соответствии с (5) диаграмму направленности АПП можно рассматривать как диаграмму направленности решетки, составленной из линейных элементов длиной  $h_k / \cos \varepsilon$ , параллельных оси  $Ox$  (рис. 2, *б*), и центры которых расположены вдоль средней линии раскрыва АПП. Вертикальная диаграмма направленности отдельного линейного элемента в (5) получена нами в явном виде (ввиду предположения  $E(x_a, y_a) = E(y_a)$ ) и представляет собой кривую типа  $\sin x/x$ , ширина которой обратно пропорциональна величине  $h_k / \cos \varepsilon$ . В общем случае форма и размеры диаграммы каждого линейного излучателя будут различными. Так как нас интересует только область главного лепестка этой диаграммы, можно полагать, что в зависимости от  $h_k / \cos \varepsilon$  будет меняться в основном его ширина. Тогда в общем случае (5) преобразуется к виду

$$E(x, y) = \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} E(\varepsilon) E_k(h_k / \cos \varepsilon, y) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_0 (x \sin \varepsilon + y \cos \varepsilon)} d\varepsilon, \quad (6)$$

где  $E_k(h_k / \cos \varepsilon, y)$  — некоторая функция  $y$ , ширина главного лепестка которой обратно пропорциональна величине  $h_k / \cos \varepsilon$ , и

$$E(\varepsilon) = E(y_a) = \int_{x_{a1}}^{x_{a2}} E(x_a, y_a) dx_a.$$

Так как  $\cos \varepsilon$  меняется в незначительных пределах ( $\varepsilon_0 \leq 45^\circ$ ), то величину  $h_k / \cos \varepsilon$  можно заменить ее средним значением. При этом надо учесть, что наиболее существенны те значения  $h_k / \cos \varepsilon$ , которые соответствуют наибольшим значениям  $E(\varepsilon)$ :

$$\bar{h}_k = h_k \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} E(\varepsilon) / \cos \varepsilon d\varepsilon \left/ \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} E(\varepsilon) d\varepsilon \right., \quad (7)$$

отсюда

$$E(x, y) = E_k(\bar{h}_k, y) \int_{-\varepsilon_0}^{\varepsilon_0} E(\varepsilon) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_0 (x \sin \varepsilon + y \cos \varepsilon)} d\varepsilon \quad (8)$$

или

$$E(x, y) = E_k(\bar{h}_k, y) E_0(x, y), \quad A(x, y) = A_k(\bar{h}_k, y) A_0(x, y). \quad (9)$$

Здесь  $E_0(x, y)$  обозначает диаграмму направленности бесконечно тонкой дуги радиуса  $r_0$  с центральным углом  $2\varepsilon_0$ , а  $E_k(\bar{h}_k, y)$  близка к вертикальной диаграмме отдельного элемента АПП.

Возвращаясь к результатам оптического моделирования, отметим, что в качестве  $E_k$  в (9) можно взять ее явное выражение из (5), но с величиной  $\bar{h}_k$ , определяемой по (7), так как необходимое для этого условие  $E(x_a, y_a) = E(y_a)$  практически выполняется. При обработке фотоэлектрических измерений вычисляются вертикальные интегральные диаграммы [2] — кривые  $I$  на рис. 5, а—ж:

$$A(y) = \int_{x_1}^{x_2} A(x, y) dx.$$

В соответствии с (9)

$$A(y) = A_k(y) \int_{x_1}^{x_2} A_0(x, y) dx = A_k(y) A_0(y). \quad (10)$$

Сравнивая кривые  $A_k(y)$  или  $A(y)$  для оптических моделей и действующих АПП, легко получить поправочные коэффициенты

$$K(y) = A_k^{\text{рад}}(y)/A_k^{\text{опт}}(y) = A^{\text{рад}}(y)/A^{\text{опт}}(y)$$

для пересчета измеренных методом оптического моделирования диаграмм  $A(x, y)$  к диаграммам действующих вариантов АПП

$$A^{\text{рад}}(x, y) = K(y) A^{\text{опт}}(x, y).$$

На рис. 6 показана кривая  $A(y)$  для высоты  $\theta_0 = 48^\circ 23'$ , построенная нами по материалам наблюдений источника ЗС-273 на волне 3.9 см на РАТАН-600 (материалы предоставил автору Б. С. Минченко). С использованием этой кривой были найдены коэффициенты  $K(y)$ , позволившие привести результаты оптических измерений к условиям радиотелескопа РАТАН-600. Эти результаты (диаграмма направленности РАТАН-600) и показаны на рис. 5.

Рассмотрим теперь вопрос о возможности использования построенных нами для нескольких значений высоты диаграмм направленности АПП для случая промежуточного значения высоты. Обратимся с этой целью к формуле (6). Используя ее для близких высот  $\theta_{01}$  и  $\theta_{02}$  и приравняв аргументы при экспоненте, имеем

$$\frac{R}{\sin \theta_{01}} (x_1 \sin \varepsilon_1 + y_1 \cos \varepsilon_1) = \frac{R}{\sin \theta_{02}} (x_2 \sin \varepsilon_2 + y_2 \cos \varepsilon_2). \quad (11)$$

Переходя в (11) к углу  $\varphi$  по формулам (взятым из работы [8])

$$\sin \varepsilon = \sin \varphi \sin \theta_0 / (1 + \cos \varphi \cos \theta_0), \quad \cos \varepsilon = (\cos \varphi + \cos \theta_0) / (1 + \cos \varphi \cos \theta_0), \quad (12)$$

имеем отдельно для координат  $x$  и  $y$

$$x_2 = x_1 (1 + \cos \varphi \cos \theta_{02}) / (1 + \cos \varphi \cos \theta_{01}) \approx x_1, \quad (13)$$

$$y_2 = y_1 \sin \theta_{02} (1 + \cos \varphi \cos \theta_{02}) (\cos \varphi + \cos \theta_{01}) / \sin \theta_{01} (1 + \cos \varphi \cos \theta_{01}) \times \\ \times (\cos \varphi + \cos \theta_{02}) \approx y_1 \sin \theta_{02} / \sin \theta_{01}. \quad (14)$$

В соответствии с (13) и (14) при переходе от одной высоты наблюдения к другой диаграмма направленности АПП в первом приближении сжимается или растягивается по вертикали обратно пропорционально величине  $\sin \theta_0$  и не изменяется в горизонтальном направлении. Точность данного утверждения ограничивается как приближенностью самих выражений (13) и (14),

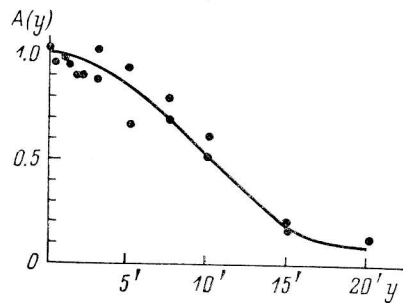


Рис. 6. Вертикальная интегральная диаграмма РАТАН-600 на высоте  $48^\circ 23'$  по наблюдениям источника ЗС-273 на волне 3.9 см.

так и тем, что при изменении высоты наблюдения сильно меняется распределение поля  $E(\epsilon)$  по апертуре АПП. Последнее иллюстрируется, например, кривыми на рис. 3.

Для оценки возможных пределов изменения углов  $\theta_0$ , где (13) и (14) справедливы, обратимся к результатам оптических измерений (рис. 5, а—ж). На рис. 7 приведены горизонтальные сечения диаграммы АПП для шести высот.

Как видно из рис. 7, формы приведенных сечений достаточно похожи на всех высотах, а их изменение с высотой заключается в некотором перераспределении энергии, так что на малых высотах она сконцентрирована в основном вблизи оси  $Oy$  ( $x \approx 0$ ), а на больших — часть энергии переходит в боковые лепестки, более удаленные от этой оси. Амплитуда сечений,

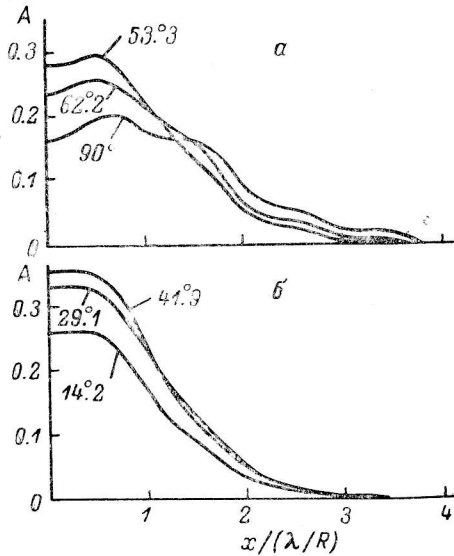


Рис. 7. Горизонтальные сечения диаграммы направленности АПП по оптическим измерениям для различных высот. а — 53°3, 62°2, 90°0; б — 14°2, 29°1, 41°9. Для каждой высоты  $\theta_0$  показано сечение, отстоящее от оси  $x$  на расстоянии  $y = (4.2/\sin \theta_0)\lambda/R$ .

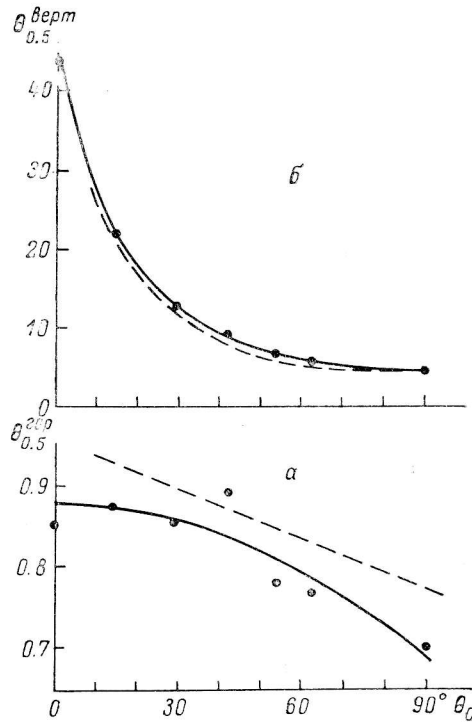


Рис. 8.

а — зависимость ширины  $\theta_{0.5}^{\text{гор}}$  центрального горизонтального сечения от высоты  $\theta_0$ , б — зависимость ширины  $\theta_{0.5}^{\text{верт}}$  центрального вертикального сечения от высоты  $\theta_0$ . Точки и сплошные линии — результаты оптических измерений, пунктир — результаты расчета из [10].

показанных на рис. 7, б ( $\theta_0 < 45^\circ$ ), последовательно уменьшается с уменьшением  $\theta_0$ , так как эти сечения по положению ( $y = (6 \div 17) \lambda/R$ ) соответствуют склонам вертикальной огибающей диаграммы. Если исправить амплитуды этих сечений в согласии с ходом огибающей, то расхождения между ними станут не более 3%. Высота сечений, показанных на рис. 7, а ( $\theta_0 > 45^\circ$ ), мало зависит от влияния вертикальной огибающей диаграммы, так как они по положению ( $y = (4 \div 5) \lambda/R$ ) находятся вблизи вершины огибающей. Различия этих сечений целиком обусловлены перестройкой самой диаграммы направленности. Наибольшие расхождения (до 10%) имеются между кривыми для  $\theta_0 = 62.2$  и  $90^\circ$ . Таким образом, из проведенного выше анализа можно сделать вывод, что в расчете на интервал изменения высоты  $\Delta \theta_0 = 5^\circ$  расхождения между соответствующими сечениями будут меньше или равны 2%. Иначе говоря, каждая из диаграмм АПП, показанных на рис. 5, а—ж, может быть пересчитана на другую высоту в пределах  $\Delta \theta_0 = \pm 5^\circ$  с точностью не менее 1—2% путем соответствующего (по формулам (13)



и (14) сжатия или растяжения по вертикали. Однако здесь необходимо учитывать, что вертикальная огибающая диаграммы при этом остается неизменной.

Отметим, что еще в первых работах по теории АПП [8, 9] указывалось, что ширина диаграммы направленности АПП в вертикальном направлении пропорциональна  $1/\sin \theta_0$ , что является следствием соответствующего изменения размера стрелки дуги раскрыва. Эта пропорциональность нарушается вблизи горизонта (малые значения  $\theta_0$ ), когда размер стрелки становится равным или меньше размера (высоты) отдельных элементов АПП. На рис. 8 показаны зависимости размеров диаграммы АПП (РАТАН-600) в центральном горизонтальном (рис. 8, а) и вертикальном (рис. 8, б) сечениях от высоты  $\theta_0$ , построенные по результатам оптического моделирования диаграммы для типа облучения апертуры № 3 (см. рис. 5). Здесь же пунктиром показаны размеры диаграммы направленности АПП (БПР), полученной методом расчета в работе [10]. Как видно, размеры горизонтального сечения по данным оптического моделирования на 3—5% меньше, чем по данным расчетов. Величина и знак этого расхождения легко объясняются, если учесть, что диаграммы направленности АПП, полученные методом оптического моделирования, соответствуют распределениям поля в раскрыве, рассчитанным без учета поляризационных свойств АПП. При расчетах диаграмм направленности АПП [10] эти свойства учитывались. Таким образом, можно сделать вывод, что размеры диаграммы направленности АПП, определенные обоими методами, хорошо согласуются между собой.

### Заключение

Методом оптического моделирования получены количественные данные о диаграмме направленности АПП для семи высот наблюдения от 0 до 90°, пригодные для непосредственного использования для обработки радиоастрономических наблюдений на радиотелескопах БПР и РАТАН-600. Эти данные представлены как в виде графиков, построенных с помощью графопостроителя, так и таблиц, выведенных из ЭВМ на АЦПУ. При выполнении оптических экспериментов использовались радиальные фильтры переменной плотности, имитирующие законы распределения амплитуды поля, реально измеренные на действующих АПП. Законы облучения апертуры выбраны на основе анализа имеющихся экспериментальных измерений распределения мощности вдоль поверхности этих радиотелескопов.

Для приведения результатов оптических измерений к условиям БПР или РАТАН-600 используется то обстоятельство, что с достаточно хорошим приближением диаграмму направленности АПП можно представить в виде произведения двух диаграмм: диаграммы направленности бесконечно тонкой дуги, содержащей информацию о тонкой структуре диаграммы АПП, и диаграммы, которая близка к вертикальной диаграмме отдельного отражающего элемента АПП. Необходимость такой коррекции оптических измерений вызвана тем, что относительные ширины раскрывов  $h_k/R$  различны как у обоих радиотелескопов, так и у оптических моделей.

Рассмотрен вопрос о возможности интерполирования измеренных диаграмм направленности на промежуточные значения высоты. Показано, что в пределах изменения высоты  $\Delta\theta_0 = \pm 5^\circ$  интерполирование сводится с точностью около 2% просто к соответствующему сжатию или растяжению диаграммы в вертикальном направлении.

В заключение автор благодарит Г. Б. Гельфрейха за постоянное внимание при выполнении данной работы, а также Д. В. Королькова, А. А. Стоцкого и Б. С. Минченко, любезно предоставивших необходимые материалы.

### Литература

1. Гельфрейх Г. Б., Коржавин А. Н. Оптическое моделирование антенн СВЧ с отражателем переменного профиля. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, с. 1176—1189.

2. К о р ж а в и н А. Н. Исследование методом оптического моделирования зависимости диаграммы направленности антенны переменного профиля от закона облучения апертуры. — Наст. сб., с. 53—70.
3. Б о р о в и к В. Н., П е т е р о в а Н. Г., С п и т к о в с к и й В. М. и др. Экспериментальное исследование распределения облучения на отражателе переменного профиля Большого пулковского радиотелескопа радиотехническими методами. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1972, № 188, с. 226—230.
4. Г е л ь ф р е й х Г. Б. Радиоастрономический способ юстировки антенн переменного профиля. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1972, № 188, с. 139—148.
5. Г е л ь ф р е й х Г. Б., Г о л ь н е в В. Я., З в е р е в Ю. К. и др. Исследование электрических характеристик Большого пулковского радиотелескопа на волне 8 мм. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1970, № 185, с. 202—218.
6. Г е л ь ф р е й х Г. Б., С п и т к о в с к и й В. М. Распределение облучения на главном зеркале антенны переменного профиля по данным радиоастрономической юстировки отражающих элементов. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1970, 1, с. 82—90.
7. С п и т к о в с к и й В. М. Распределение облучения на вторичном зеркале и элементах отражателя антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1970, 1, с. 68—81.
8. Е с е п к и н а Н. А., К а й д а н о в с к и й Н. Л., К у з н е ц о в Б. Г. Исследование характеристик излучения АПП. — Радиотехника и электроника, 1961, 6, с. 1947—1960.
9. Х а й к и н С. Э., К а й д а н о в с к и й Н. Л., Е с е п к и н а Н. А. Большой пулковский радиотелескоп. — Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 1960, № 164, с. 3—26.
10. Б а х в а л о в Н. С., В а с и л ь е в а Л. Г., Е с е п к и н а Н. А. и др. Поляризационные характеристики антенны переменного профиля. — Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 1973, 5, с. 135—149.
11. К о р ж а в и н А. Н. К вопросу об измерении круговой поляризации на антенне переменного профиля. — Сообщ. САО, 1976, № 16.

Декабрь 1975 г.