

**О ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ  
АНТЕННЫ ПЕРЕМЕННОГО ПРОФИЛЯ  
В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ  
САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

*В. М. Спитковский*

В статье описана методика расчета эффективной площади раскрыта антенны переменного профиля (АПП), учитывающая тип вторичного зеркала АПП, тип первичного облучателя и способ его установки. Получены расчетные формулы для идеализированной эффективной площади АПП (без учета качества отражающей поверхности и точности установки отражающих элементов) на всех углах места, являющейся верхним пределом эффективной площади антенны. Результаты расчета идеализированной эффективной площади Большого пулковского радиотелескопа сравниваются с экспериментальными данными исследования его отражающей поверхности на волне 8 мм.

A procedure of calculation of the aperture effective area of a variable profile antenna (VPA) is described, allowing for the type of the secondary mirror of a VPA, and the type of the primary feed and mode of its mounting. Calculation formulas for the idealized effective area of a VPA (without consideration of the quality of the reflecting surface and the accuracy of setting of reflecting elements) are obtained at all angles of elevation, the idealized effective area being the upper limit of the effective area of the antenna. The results of calculation of the idealized effective area of the Large Pulkovo Radio Telescope are compared with the experimental data on testing of its reflecting surface at 8-mm wavelength

Эффективную площадь  $S_e$  апертурных антенн принято выражать произведением геометрической площади  $S$  антенны на некоторый коэффициент  $p$  [1]

$$S_e = pS. \quad (1)$$

Коэффициент  $p$  в случае антенн переменного профиля (АПП) представляет собой произведение ряда парциальных коэффициентов. Учитывая только те факторы, которые характеризуют антенну переменного профиля с точки зрения ее конструктивных особенностей (включая схему облучения главного зеркала), можно записать

$$p = \eta_I \eta_{II} \eta_{III} \eta_{IV}, \quad (2)$$

где  $\eta_I$  обуславливается особенностями облучения в системе вторичное зеркало—отражатель переменного профиля,  $\eta_{II}$  определяется качеством отражающей поверхности зеркал, входящих в АПП,  $\eta_{III}$  характеризует взаимную юстировку отражающих элементов (щитов) главного зеркала, а также взаимную привязку вторичного и главного зеркал АПП,  $\eta_{IV}$  учитывает рассеяние на элементах крепления первичных облучателей и на других пассивных отражателях, попадающих в апертуру облучающего пучка.

Подставляя (2) в (1), получаем

$$S_p = S_{\text{эп}} \eta_{\text{II}} \eta_{\text{III}} \eta_{\text{IV}}, \quad (3)$$

где

$$S_{\text{эп}} = \eta_{\text{I}} S. \quad (4)$$

Величину  $S_{\text{эп}}$  мы назовем идеализированной эффективной площадью раскрыва АПП, поскольку мы полагаем ее не зависящей от механической точности отражающей поверхности и ошибок установки щитов АПП. Таким образом,  $S_{\text{эп}}$  является некоторым характерным параметром АПП, обусловленным схемой облучения главного зеркала, а также диаграммами направленности первичных облучателей.

ТАБЛИЦА 1

Значения коэффициента  $\eta_{\text{I}}$  для АПП

1) БПР с симметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	$\varphi = 0^\circ$	$\varphi = 35^\circ$	$\varphi = 40^\circ$	$\varphi = 45^\circ$
$0^\circ$	0.26	0.36	0.38	0.37
$30^\circ$	0.25	0.35	0.37	0.36
$60^\circ$	0.24	0.32	0.35	0.35
$90^\circ$	0.23	0.33	0.34	0.34

2) БПР с асимметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	Круглый волновод	Прямоугольный волновод	Квадратный волновод
$0^\circ$	0.42	0.35	0.34
$30^\circ$	0.41	0.34	0.33
$60^\circ$	0.39	0.32	0.32
$90^\circ$	0.39	0.32	0.31

3) РАТАН-60 с асимметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	Круглый волновод	Прямоугольный волновод	Квадратный волновод
$0^\circ$	0.49	0.41	0.44
$30^\circ$	0.48	0.40	0.43
$60^\circ$	0.46	0.37	0.41
$90^\circ$	0.44	0.36	0.40

Известно [2, 3], что для АПП

$$\eta_{\text{I}} = \eta_{\text{A}}^{\text{АПП}} \eta_{\text{P}}^{\text{АПП}} = \eta_{\text{A}}(\theta_0) \eta_{\text{P}}(\theta_0), \quad (5)$$

где  $\eta_{\text{A}}$  и  $\eta_{\text{P}}$  — апертурный коэффициент и коэффициент рассеяния соответственно,  $\theta_0$  — угол места.

Аналитические выражения функций от угла места  $\theta_0$  для этих коэффициентов известны [3, 4] (при расчетах учитывается распределение поля на отражателе АПП). С использованием методики, изложенной в [2—4], нами были рассчитаны значения коэффициента  $\eta_{\text{I}}$  для Большого пулковского радиотелескопа (БПР) при работе с симметричным и асимметричным параболо-цилиндрическим вторичным зеркалом. Значения коэффициента  $\eta_{\text{I}}$  были рассчитаны также и для радиотелескопа РАТАН-600 при работе с основным типом вторичного зеркала. Результаты расчетов приведены в табл. 1, где  $\varphi$  — угол скоса открытого конца прямоугольного волновода.

Приведенные в [3] расчетные формулы не учитывают влияния перископичности антенной системы АПП на распределение поля на отражателе переменного профиля. Можно оценить погрешность в вычислениях  $\eta_{\text{I}}$ , обусловленную перископичностью, применив скалярную формулу Кирхгофа [5—7]. Путем численного интегрирования были получены значения амплитуд поля для трех контрольных точек (центр и оба края) каждого десятого отражающего элемента БПР. Отличие полученных значений амплитуды поля от соответствующих значений на аппроксимирующих кривых по [8] не превысило  $\pm 2\%$  на волне 3.04 см. Такая величина погрешности находится в пределах ошибок метода вычислений, а также в пределах точности аппроксимации распределения облучения на отражателе

кривыми третьего порядка [3]. Полученные расчетные данные хорошо согласуются с результатами эксперимента [9], где показано, что вычисления дают погрешность, не превышающую 5%, уже начиная с расстояний, в два раза больших максимального размера вторичного зеркала. Проведенные расчеты позволяют сделать вывод о пригодности значений  $\gamma_{\Gamma}$  из табл. 1 для использования в последующих вычислениях.

Вычислим теперь геометрическую площадь  $S$  раскрыва АПП в зависимости от угла места  $\theta_0$ . Пусть  $r$  — средний радиус кольцевого раскрыва,  $h$  — ширина кольца, тогда (см. [10])

$$r = R/\sin \theta_0, \quad h = H \cos (\theta_0/2), \quad (6)$$

где  $R$  — радиус исходной окружности,  $H$  — вертикальный размер щита. Введем в рассмотрение центральный угол кольцевой апертуры  $2\Phi$ , выражение для которого имеет вид [11]

$$\operatorname{tg} \Phi = \sin \psi \sin \theta_0 / [\cos \theta_0 (1 + \cos \theta_0 \cos \psi) + \cos \psi \sin^2 \theta_0]. \quad (7)$$

Здесь  $2\psi$  — угловой размер рабочей дуги отражателя переменного профиля, измеренный из фокуса.

Для площади апертуры, имеющей форму части кольца, из простых геометрических соображений получаем, учитывая (6) и (7),

$$\begin{aligned} S(\theta_0; \psi) &= RH \operatorname{cosec} (\theta_0/2) \operatorname{arctg} [\sin \psi \sin \theta_0 / (\cos \psi + \cos \theta_0)] = \\ &= RH \operatorname{cosec} (\theta_0/2) \operatorname{arctg} \Phi, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Phi$  в радианах.

Перепишем формулу (8) в несколько иной форме

$$S(\theta_0; \psi) = RH f(\theta_0; \psi), \quad (9)$$

здесь

$$f(\theta_0; \psi) = \operatorname{arctg} [\sin \psi \sin \theta_0 / (\cos \psi + \cos \theta_0)] \cos (\theta_0/2) \quad (10)$$

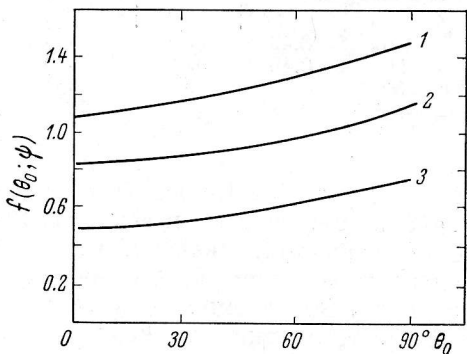


Рис. 1. Характеристическая функция площади кольцевого раскрыва АПП. 1 —  $2\psi=120^\circ$ , 2 —  $2\psi=90^\circ$ , 3 —  $2\psi=60^\circ$ .

есть некоторая характеристическая функция, одинаковая для всех АПП. Графики этой функции от угла места как аргумента и углового размера рабочей дуги отражателя переменного профиля как параметра приведены на рис. 1.

Далее, удобно ввести для АПП понятие габаритного параметра  $q$ , которым назовем произведение радиуса исходной окружности антенны на вертикальный размер щита, так что

$$q = RH, \quad (11)$$

а геометрическая площадь кольцевого раскрыва может быть записана в виде

$$S(\theta_0; \psi) = qf(\theta_0; \psi). \quad (12)$$

Значение параметра  $q$  для антенн переменного профиля, реализация которых представляет практический интерес, составляет 100 и более. Например, для БПР  $q=300$ , для РАТАН-600  $q=2220$ . Используя (12), легко построить графики или составить таблицы геометрических площадей раскрыва антенны при различных значениях параметра  $q$  и угла облуче-

ния  $\psi$  в функции от  $\theta_0$ . Рассчитанные размеры площади раскрыва радиотелескопов БПР и РАТАН-600 представлены графически на рис. 2.

Площадь раскрыва АПП при установке для наблюдений на горизонт может быть просто вычислена, если учесть, что в этом случае щиты отражателя устанавливаются по параболе с фокусным расстоянием  $R/2$ .

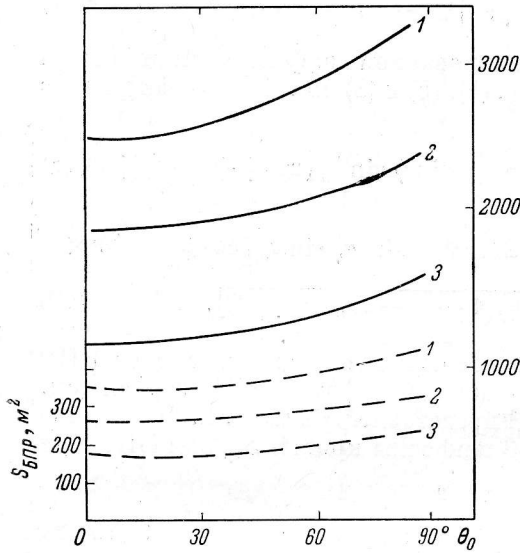


Рис. 2. Геометрическая площадь раскрыва антенны радиотелескопов РАТАН-600 (сплошная линия) и БПР (штриховая линия).

1 —  $2\psi=120^\circ$ , 2 —  $2\psi=90^\circ$ , 3 —  $2\psi=60^\circ$ .

При этом имеем

$$S(0; \psi) = 2RH \operatorname{tg}(\psi/2) = 2q \operatorname{tg}(\psi/2). \quad (13)$$

При наблюдении источника радиоизлучения с использованием  $N$  щитов отражателя геометрическая площадь раскрыва может быть получена из выражения

$$S(\theta_0; \psi_N) = RH \operatorname{cosec}(\theta_0/2) \operatorname{arctg} \left\{ \sin \varphi_N \sin \theta_0 \left[ \cos \varphi_N - \frac{1}{r_0} (1 - F + \cos \theta_0 \sqrt{(1 - F)(1 - F - 2r_0 \cos \varphi_N)}) \right] \right\}, \quad (14)$$

где  $\varphi_N$  — азимут центра крайнего щита АПП из центра исходной окружности,  $r_0$  — относительное расстояние от центра исходной окружности до центра щита,  $F$  — относительное фокусное расстояние горизонтального сечения АПП. Формула (14) получается из (8) простыми преобразованиями, после подстановки в последнюю вместо  $\psi$  соответствующего выражения для  $\varphi_N$  [11]:

$$\psi \sim \varphi_N = \operatorname{arctg} \left\{ \sin \varphi_N / \left[ \cos \varphi_N - (1 - F)/r_0 \right] \right\}. \quad (15)$$

Величины  $r_0$  и  $F$  в свою очередь зависят от относительного параметра  $P$  горизонтального сечения АПП. Эти зависимости известны [11], и мы приводим их, чтобы выражение (14) имело законченный вид, а расчеты по нему могли быть доведены до численных значений

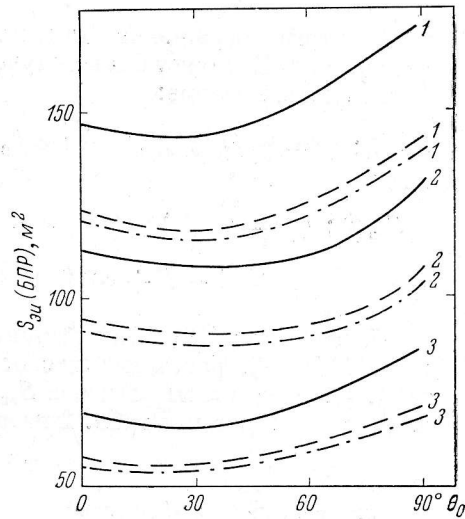


Рис. 3. Идеализированная эффективная площадь антенны БПР, работающей с основным типом вторичного зеркала (параболический полуцилиндр) при различных типах первичных облучателей (круглый волновод — сплошная линия, прямоугольный волновод — штриховая линия, квадратный волновод — штрихпунктирная линия) на разных углах места.

1 —  $2\psi=120^\circ$ , 2 —  $2\psi=90^\circ$ , 3 —  $2\psi=60^\circ$ .

$$r = \{(1 - P - \cos^2 \theta_0) \cos \varphi_N + \sqrt{P^2 - [(1 - P)^2 - \cos^2 \theta_0] \sin^2 \varphi_N}\} : (1 - \cos^2 \theta_0 \cos^2 \varphi_N), \quad F = P/(1 + \cos \theta_0). \quad (16)$$

В частности, для БПР

$$P = 1 - 0.0734351 \cos \theta_0, \quad |\psi_N| = 27' + (N - 1) 54'. \quad (17)$$

В итоге выражение для идеализированной эффективной площади раскрыва АПП может быть получено из (4), (5) и (8) или (14) соответственно в следующей форме:

$$S_{\text{эп}}(\theta_0; \psi) = \eta_A(\theta_0) \eta_P(\theta_0) q \operatorname{cosec}(\theta_0/2) \operatorname{arctg}[\sin \psi \sin \theta_0 / (\cos \psi + \cos \theta_0)] \quad (18)$$

или

$$S_{\text{эп}}(\theta_0; \psi_N) = \eta_A(\theta_0) \eta_P(\theta_0) q \operatorname{cosec}(\theta_0/2) \operatorname{arctg} \left\{ \sin \varphi_N \sin \theta_0 / [\cos \varphi_N - 1/r \times \right. \\ \left. \times (1 - F + \cos \theta_0 \sqrt{(1 - F)(1 - F - 2r_0 \cos \varphi_N)})] \right\}. \quad (19)$$

По формуле (18) были выполнены расчеты для радиотелескопов БПР и РАТАН-600, работающих с основными типами вторичных зеркал (см. табл. 1). Результаты расчетов  $S_{\text{эп}}$  в  $\text{м}^2$  представлены в табл. 2. В качестве иллюстрации данных табл. 2 на рис. 3 показаны кривые  $S_{\text{эп}}$  для БПР при

ТАБЛИЦА 2

Идеализированные эффективные площади АПП для различных значений угла  $2\psi$

1) БПР с симметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	$\varphi = 0^\circ$			$\varphi = 35^\circ$			$\varphi = 40^\circ$			$\varphi = 45^\circ$		
	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
$0^\circ$	42	70	90	58	96	125	62	102	132	60	99	129
$30^\circ$	41	68	89	57	95	124	61	100	131	59	98	127
$60^\circ$	43	88	94	58	90	125	63	99	137	63	99	137
$90^\circ$	50	77	102	72	110	147	72	110	147	75	113	151

2) БПР с асимметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	Круглый волновод			Прямоугольный волновод			Квадратный волновод		
	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
$0^\circ$	68	112	146	57	94	122	55	91	118
$30^\circ$	66	110	143	55	91	118	54	88	115
$60^\circ$	71	111	154	59	92	127	58	90	125
$90^\circ$	85	130	173	70	107	142	69	105	140

3) РАТАН-600 с асимметричным вторичным зеркалом

$\theta_0$	Круглый волновод			Прямоугольный волновод			Квадратный волновод		
	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$120^\circ$
$0^\circ$	590	970	1270	490	810	1060	530	870	1140
$30^\circ$	570	930	1210	480	790	1030	520	850	1110
$60^\circ$	610	960	1330	490	770	1070	550	850	1190
$90^\circ$	720	1100	1460	590	900	1200	660	1000	1330

работе с различными первичными облучателями. Слабо выраженный минимум на графиках  $S_{\text{эп}}$  объясняется тем, что с ростом угла места падает коэффициент использования площади, а геометрическая площадь раскрыва

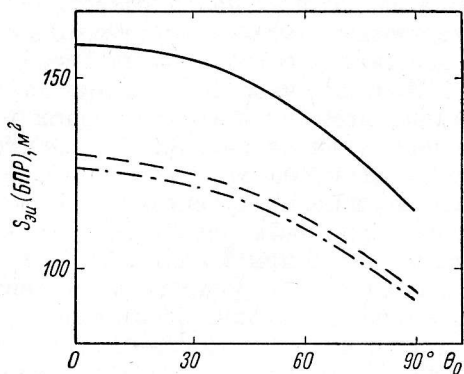


Рис. 4. Идеализированная эффективная площадь антенны БПР при установке всех щитов ( $N=90$ ) отражателя на источник радиоизлучения на всех углах места.

Вторичное зеркало и первичные облучатели те же, что и на рис. 3.

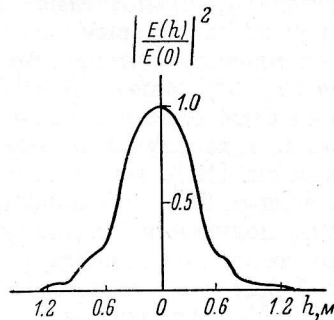


Рис. 5. Распределение поля по мощности по вертикали вблизи щита.

ста используется постоянное число щитов, то ход  $S_{\text{эп}}$  определяется также характером изменения угла  $\psi$  с высотой и расчет следует производить по формуле (19). Результаты вычислений в этом случае для БПР, работающего с 90 щитами отражателя переменного профиля, показаны на рис. 4.

Для примера рассчитаем идеализированную эффективную площадь БПР для условий работы, соответствующих экспериментальному исследованию антенны на волне 8 мм [10]. Исходными данными для расчетов являются форма и размеры вторичного зеркала (в рассматриваемом случае — симметричный параболический цилиндр, см. табл. 1), тип первичного облучателя (открытый конец круглого волновода) и распределение поля по мощности вдоль вертикального размера щита (см. рис. 5, заимствованный нами из [10]). Как видно из рис. 5, при заданной конструкции и габаритах вторичного зеркала использовалась центральная полоса отражателя шириной около 2.2 м, что соответствует габаритному параметру  $q=220 \text{ м}^2$ . Учитывая тип первичного облучателя, а также то обстоятельство, что практически отсутствует компонента поля, рассеиваемая за верхние и нижние кромки щитов, можно рассчитать теоретическую кривую для  $S_{\text{эп}}$ . Эта кривая показана на рис. 6 сплошной линией. При рас-

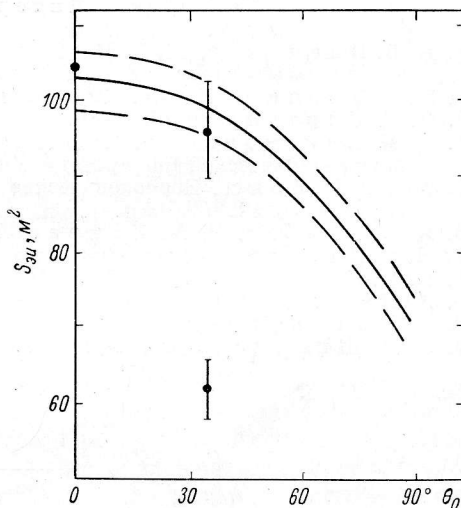


Рис. 6. Сравнение результатов расчета  $S_{\text{эп}}$  с экспериментальными данными на волне 8 мм при  $N=76$  мм.

чете учитывалось, что при экспериментальных исследованиях измерения проводились при работающих 76 щитах отражателя. Принимая во внимание величину погрешности аппроксимации распределения поля по отражателю ( $\pm 2\%$  [8]), а также искажение распределения поля в апертуре из-за перископичности антенны в меридиональной плоскости ( $\pm 2\%$ ) и учитывая, что эти погрешности независимы, можно определить область значений  $S_{\text{эл}}$ , обусловленную погрешностями метода вычислений (на рис. 6 ограничена штриховыми линиями). Измеренное в [10] значение эффективной площади антенны по наземному источнику в направлении горизонта ( $\theta_0=0^\circ$ ) равно  $105 \text{ м}^2$  (показано точкой на рис. 6). Эта величина должна быть близка к теоретическому значению  $S_{\text{эл}}$ , так как установка щитов в этом случае производилась по максимуму сигнала (подробнее об этом см. [10]). Измеренное значение  $S_{\text{эл}}$  по наблюдениям Венеры оказалось равным  $62 \pm 4 \text{ м}^2$  (нижняя точка на рис. 6 при  $\theta_0=35^\circ$ ). Это значение  $S_{\text{эл}}$  для получения величины  $S_{\text{эл}}$  необходимо редуцировать за ошибки отражающей поверхности радиотелескопа и ошибки, связанные с установкой щитов на угол места источника радиоизлучения — Венеры, равный  $35^\circ$ . Коэффициент редукиции известен [10] и равен 0.595. В итоге имеем

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{эл}} \eta_{\text{ред}} = 0.595 S_{\text{эл}}. \quad (20)$$

Полученное с учетом (20) значение  $S_{\text{эл}}$  также показано на рис. 6 (верхняя точка при  $\theta_0=35^\circ$ ).

Итак, мы видим, что наблюдается практически полное совпадение результатов расчета и эксперимента при определении величины  $S_{\text{эл}}$ , являющейся верхним пределом эффективной площади антенны в коротковолновой части сантиметрового диапазона и ограниченной особенностями схемы облучения отражателя переменного профиля.

#### Литература

1. И. В. Вавилова, К. И. Могильникова. В сб.: Современные проблемы антенно-волноводной техники. Изд-во «Наука», 1967, стр. 64.
2. Н. А. Есепкина и др., Радиотехника и электроника, № 12, 1947, 1961.
3. В. М. Спитковский, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 2, 174, 1970.
4. В. М. Спитковский, Тезисы докладов XVIII украинской республиканской научно-технической конференции, посвященной Дню радио, Киев, 1968, стр. 134.
5. А. М. Покрас. Перископические антенны и беспроводные линии передачи. Связьиздат, 1963.
6. Б. Е. Кинбер, А. М. Покрас, Радиотехника, № 7, 12, 1957.
7. Б. Е. Кинбер, Радиотехника и электроника, № 6, 973, 1962.
8. В. М. Спитковский, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 2, 159, 1970.
9. A. Vaanen et al., J. Phys., No. 2, 166, 1956.
10. Г. Б. Гельфрейх и др., Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 185, 202, 1970.
11. О. Н. Шиврис и др., Изв. Глав. астр. obs. в Пулкове, № 188, 40, 1972.

Декабрь 1970 г.