

УДК 523.9—332

В. Д. Дьяконова, В. Ф. Чистяков

Угловой радиус Солнца по наблюдениям затмения 23 сентября 1987 г.

На основе фотографических наблюдений частного солнечного затмения 23 сентября 1987 г. определен видимый угловой радиус Солнца $R_{\odot} = 956.53 \pm 0.31''$ ($R_{\odot} = 959.99 \pm 0.31''$ — для расстояния 1 а. е.).

ANGULAR RADIUS OF THE SUN ACCORDING TO THE OBSERVATIONS OF THE ECLIPSE ON SEPTEMBER 23, 1987, by D'yakonova V. D., Chistyakov V. F.— The angular radius of the Sun $R_{\odot} = 956.53 \pm 0.31''$ ($R_{\odot} = 959.99 \pm 0.31''$ — for the distance of 1 a. u.) was determined from the photographic observations of the partial solar eclipse on September 23, 1987.

Определения углового радиуса Солнца R_{\odot} во время затмений и прохождений Меркурия и Венеры по солнечному диску имеют примерно двухвековую историю. Один из первых важных результатов таких исследований — установление того, что «затменный» радиус несколько меньше видимого радиуса Солнца [20]. Увеличение видимого радиуса приписывают действию иррадиации, которая является свойством человеческого глаза. Но некоторые исследователи [17] вводят также понятие «фотографической иррадиации». В настоящее время увеличение радиуса за счет иррадиации полагают равным $+1.55''$. Эта величина получена в [9] на основе примерно 20 тыс. измерений в 1873—1877 и 1880—1886 гг. и наблюдений прохождений Венеры по диску Солнца в 1874 и 1882 гг.

В 1813 г. Вурм [19] по результатам обработки шести солнечных затмений в 1778—1806 гг. установил, что поправка ΔR_{\odot} относительно эфемеридных значений изменяется от -5.0 до $+3.2''$. Заметим, что по его оценке аналогичная поправка для углового радиуса Луны R_{ζ} , определяемая из наблюдений покрытий звезд, составляет $-0.024''$. Современные оценки R_{\odot} по наблюдениям старых и близких к нашей эпохе затмений 1927 [6, 12, 17], 1912, 1914, 1927, 1934 [13], 1715, 1929, 1976, 1979, 1980 [11], 1925, 1980, 1981 гг. [15] также показывают вариации ΔR_{\odot} от затмения к затмению, но пределы изменений этой величины почти на порядок меньше: от -0.23 до $+0.62''$ [11] и от -0.35 до $+1.23''$ [13]. Причины изменений ΔR_{\odot} не известны. Есть основания полагать, что вариации ΔR_{\odot} зависят также от качества исходного наблюдательного материала и способа его обработки. Например, по результатам наблюдений затмения 29 июня 1927 г. в шести пунктах Европы (Лейден, Лейпциг, Краков, Пулково, Галливаре, Мальмергете) значения ΔR_{\odot} изменялись от -2.88 до $+0.08''$ [6, 12]. Разные значения ΔR_{\odot} получены из наблюдений контактов и частных фаз затмений 1927 и 1934 гг. [12, 14], а также по непосредственным измерениям R_{\odot} и ширине полосы затмения 1925 г. [15]. Возможно, что вариации ΔR_{\odot} обусловлены физическими пульсациями Солнца.

Многие работы по определению R_{\odot} проводились в целях обнаружения физических изменений размеров Солнца. В последнее время отмечается возрождение интереса к проблеме изменений R_{\odot} , что связано, по нашему мнению, с такими научными результатами: 1) обнаружением дефицита потока солнечных нейтрино в Брукхавенском эксперименте (см. [5]); 2) обнаружением 160-минутных колебаний R_{\odot} [18]; 3) созданием метода гелиосейсмологии [7].

Среди последних работ по данной проблеме можно отметить обнаружение в [16] небольшого линейного тренда R_{\odot} со скоростью

$-0.14 \pm 0.08''$ за 100 лет в интервале 1715—1973 гг. Заметим, что такое небольшое сжатие Солнца происходило на фоне прогрессивного векового увеличения солнечной активности после минимума Маундера (1645—1715 гг.). В [4] показана возможная обратная взаимосвязь изменений R_{\odot} с колебаниями солнечной постоянной и потока нейтрино. В [10] отмечается связь изменений R_{\odot} и потока солнечных нейтрино с 11-летним циклом солнечной активности. Все эти выводы нуждаются в проверке.

В настоящей работе представлены результаты определения R_{\odot} на основе фотографий частных фаз солнечного затмения 23 сентября 1987 г. Оно наблюдалось на Уссурийской солнечной станции с помощью фотогелиографа АФР-3. Описание телескопа и методика получения снимков даны в [8]. В наблюдениях участвовали Н. Ю. Андреев, Г. П. Воробьева, В. Д. Дьяконова, И. В. Смирнов, В. Ф. Чистяков. Всего было получено 19 снимков, в основном хорошего качества. В. Ф. Чистяков записывал моменты времени и температуру воздуха. Для регистрации времени использовались палубные часы «ЧП» (изготовлены Первым Московским часовым заводом им. С. М. Кирова) с диаметром циферблата 50 мм и ценой деления 0.2 с. Ход часов контролировался по сигналам времени радиомаяка накануне и в день затмения. В период с 21^h00^m 22 сентября по 16^h00^m 23 сентября (для перехода от местного летнего поясного времени к всемирному UT следует вычесть 11 ч) сделаны 17 отсчетов времени. На основе этих данных по методу наименьших квадратов вычислено линейное уравнение хода часов:

$$y = (48.0800 \pm 0.1525) - (5.1468 \pm 0.0163)T,$$

где y — разность показаний времени по часам «ЧП» и радиосигналам (в секундах); T — местное летнее поясное время (в часах). Для 00^h00^m 23 сентября $T=0$. Наблюденные моменты получения снимков исправлены путем вычитания величины y . Ошибка определения моментов времени не превышает 0.5 с.

Замеры температуры воздуха $t_{\text{в}}$ выполнялись с помощью термометра, помещенного на теневой стенке павильона телескопа на высоте 1.2 м над полом. Временной ход $t_{\text{в}}$ показан в табл. 1.

Таблица 1. Временной ход температуры воздуха 23 сентября 1987 г.

T	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	T	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	T	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	T	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	T	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$
8^h47^m	15.0	11^h00^m	19.6	12^h30^m	21.8	14^h00^m	21.7	15^h30^m	23.9
9 00	15.4	15	20.3	40	21.8	10	22.0	40	23.6
14	16.0	30	21.3	50	21.3	20	22.7	45	23.8
29	16.9	45	21.3	13 00	20.8	30	22.3	50	23.5
45	17.0	12 00	21.8	10	20.6	40	22.5	55	23.5
10 00	17.0	05	22.1	20	20.8	50	23.0	16 00	23.5
15	18.0	10	22.0	30	20.9	15 00	23.0	05	24.0
30	18.6	15	22.0	40	21.0	10	23.3	10	23.6
45	19.2	20	22.0	50	21.5	20	23.8		

Эфемериды затмения [3] дает для г. Владивостока следующие моменты: начала — 11^h50^m , середины — 13^h09^m , конца — 14^h31^m . С помощью табл. 1 можно проследить запаздывание депрессии $t_{\text{в}}$ относительно этих моментов. Наибольшее понижение $t_{\text{в}}$ в середине затмения составило -2.6°C . Максимальная фаза затмения $\Phi=0.57$.

В день затмения небо было голубое. В 9^h50^m — штиль, околосолнечный ореол белесый, диаметр 10° . В 12^h00^m — ореол белый, диаметр 4° . В 15^h40^m — небо синее, ореол белесый, диаметр $3-4^\circ$; сила ветра 2—3 балла по шкале Бофорта.

В задачу исследования входило определение на негативах линейных радиусов (в мм) Солнца r_{\odot} и Луны r_{ζ} . Для этого с помощью двухкоординатной измерительной машины «Аскорекорд-1» измерялись прямоугольные координаты x, y точек лимбов обоих светил. Координаты x, y записывались с точностью до 10^{-4} мм. При угловом масштабе снимка $M \approx 25''/\text{мм}$ такая точность является избыточной. При работе на «Аскорекорде» край изображения Солнца или Луны совмещался с центром квадрата («марки»), сторона которого равна $2.11 \pm 0.01''$. При этом ошибка наведения марки на край изображения солнечного диска по каждой координате не превышает $1/4$ стороны квадрата, или примерно $0.5''$. Все измерения координат x, y выполнены В. Д. Дьяконовой.

Для определения радиуса круга достаточно иметь прямоугольные координаты трех точек лимба. Пусть x_i, y_i — координаты i -й точки лимба, а x_0, y_0 — координаты центра круга. Тогда радиус круга равен

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = r^2. \quad (1)$$

Полагая i равным 1, 2 и 3, запишем формулу (1) три раза. После вычитания соседних формул, получим систему двух линейных уравнений, с помощью которой находим координаты центра круга

$$x_0 = (ed - bf)/(ad - bc); \quad y_0 = (af - ec)/(ad - bc),$$

где $a = 2(x_1 - x_2)$; $b = 2(y_1 - y_2)$; $e = (x_1^2 + y_1^2) - (x_2^2 + y_2^2)$; $c = 2(x_2 - x_3)$; $d = 2(y_2 - y_3)$; $f = (x_2^2 + y_2^2) - (x_3^2 + y_3^2)$. Величина r затем находится по формуле (1). Для повышения точности измерений r определяем координаты возможно большего числа ($n > 3$) точек лимба, а вычисление r ведем по способу наименьших квадратов.

Для Солнца в целях исключения влияния рефракции находился горизонтальный радиус. На каждой фотогелиограмме впечатывалось изображение тонкой капроновой нити, параллельной небесному экватору. Угол наклона γ нити к горизонту определялся по формуле

$$\sin \gamma = \cos \varphi \sin t_{\odot} / \sin z_{\odot},$$

где t_{\odot} — часовой угол; z_{\odot} — зенитное расстояние центра солнечного диска; φ — географическая широта места наблюдений. В пределах отклонения позиционного угла P до $\pm 20^\circ$ от горизонтального диаметра (при $z_{\odot} \leq 70^\circ$) искажение круговой формы диска Солнца за счет рефракции очень мало. Около обоих концов горизонтального диаметра

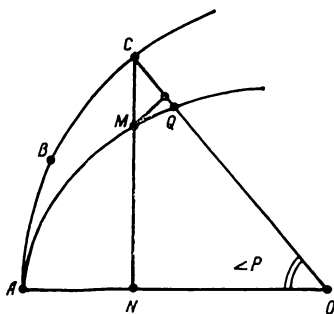


Схема для определения рефракционной поправки видимого углового радиуса Солнца: дуга ABC — истинный край солнечного диска; дуга AMQ — видимый лимб Солнца; AO — горизонтальный радиус солнечного диска

изображения Солнца обычно выполнялось по 9—10 измерений x, y с шагом $\Delta P = 5^\circ$ по позиционному углу. Для повышения точности измерений число точек можно увеличить при одновременном уменьшении ΔP .

Для получения более точного значения R_{\odot} необходимо учесть влияние рефракции, которая уменьшает вертикальный диаметр солнечного диска. Предположим, что диск Солнца из-за рефракции имеет форму эллипса с полуосями a и b , отношение которых $b/a = \cos \beta$. Величина $a = R_{\odot}$ — истинный угловой радиус Солнца, $b = a - R_f$, где R_f — уменьшение R_{\odot} из-за рефракции. Значение R_f можно найти по таблицам

рефракции, например в [1, 2]. Для вычисления поправки R_{\odot} за рефракцию рассмотрим рисунок. Дуга ABC окружности с центром O показывает край истинного изображения солнечного диска, а дуга эллипса AMQ — наблюдаемый лимб диска Солнца, искаженный рефракцией. Измеряя координаты x, y точки Q и находя ее удаление от центра, мы принимаем за величину солнечного радиуса отрезок OQ , тогда как истинный радиус окружности есть отрезок $OC=r$. Допускаемую при этом ошибку определения радиуса (отрезок CQ) можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$CQ = CM \sin P = (OC \sin P - MN) \sin P = r \sin^2 P (1 - \cos \beta).$$

Поскольку мы определяем девять значений r в пределах $-20^{\circ} \leq P \leq +20^{\circ}$ с шагом 5° , то нам необходимо вычислить среднее значение CQ . Поправки R_{\odot} за рефракцию в период затмения малы и составляют $0.04-0.02''$. Поэтому учет рефракции выполнен нами на конечном этапе вычислений.

При измерении r_{ζ} рефракция не учитывалась. Возникающая при этом ошибка находится в пределах точности измерений и не может существенно повлиять на величину углового масштаба снимка, который определен ранее по фотографии звездного скопления Плеяды:

$$M = 25.2733 \pm 0.1361''/\text{мм}. \quad (2)$$

Однако, учитывая то, что величина M может несколько изменяться со временем, в настоящей работе она определена заново по фотографиям затмения. При этом предполагалось, что физический радиус Луны (как твердого тела) остается постоянным, равным 1738.0 км, а радиус Солнца может пульсировать.

Таблица 2. Результаты определения радиуса Луны и углового масштаба снимка

Но- мер сним- ка	УТ	r_{ζ} , мм	ρ	R_{ζ}	L	R'_{ζ}	$M, ''/\text{мм}$	n
3	1.004 250 ^h	35.9754 ± 0.0087	61.974 76	906.892''	61.381 82	915.652	25.452 18	22
4	1.156 194	35.9690 ± 0.0086	61.971 69	906.940	61.377 13	915.725	25.458 72	29
7	1.676 583	36.2062 ± 0.0046	61.960 55	907.102	61.315 66	916.642	25.317 22	45
8	1.834 722	36.1228 ± 0.0049	61.957 48	907.151	61.302 99	916.836	25.381 09	47
9	2.005 389	36.2511 ± 0.0063	61.953 64	907.205	61.289 97	917.028	25.296 55	48
10	2.165 667	36.2971 ± 0.0048	61.950 19	907.255	61.279 04	917.191	25.268 99	48
11	2.329 750	36.3361 ± 0.0074	61.946 73	907.306	61.269 05	917.341	25.246 00	49
12	2.499 000	36.3508 ± 0.0056	61.943 28	907.359	61.260 11	917.477	25.239 53	46
13	2.654 444	36.3588 ± 0.0050	61.939 83	907.407	61.252 73	917.586	25.236 96	44
15	3.003 111	36.4591 ± 0.0052	61.932 54	907.516	61.240 55	917.770	25.172 59	35
16	3.181 694	36.3229 ± 0.0101	61.928 70	907.572	61.236 31	917.833	25.268 72	27
17	3.436 444	36.2771 ± 0.0060	61.923 33	907.651	61.232 94	917.884 60	25.302 03	28

Примечание: r_{ζ} — линейный радиус Луны; ρ — расстояние между центрами Земли и Луны; R_{ζ} — геоцентрический угловой радиус Луны; L — удаление наблюдателя от центра Луны; $R'_{\zeta} = R_{\zeta} \rho / L$ — угловой радиус Луны для наблюдателя; $M = R'_{\zeta} / r_{\zeta}$; n — число точек лимба Луны, использованных для определения r_{ζ} . Величины ρ и L выражены в долях экваториального радиуса Земли (6378.140 км).

Результаты определения представлены в табл. 2. Необходимые для вычисления R_{ζ} и экваториального горизонтального параллакса Луны π_{ζ} формулы приведены в [1]. Величины π_{ζ} и ρ связаны соотношением $\rho \sin \pi_{\zeta} = 1$. Для вычислений по формулам, указанным в «Астрономическом ежегоднике», необходимо знать динамическое время DT , связанное с УТ соотношением $DT = UT + \Delta T$. Для 1987 г. поправка по-

лагалась равной $\Delta T = +55.7^s$ [2]. Для определения величины L сначала вычислялись ее прямоугольные компоненты:

$$L_x = \rho \cos \pi_{\zeta} - R_{\oplus} \cos t_{\zeta} \sin(\varphi - \delta_{\zeta}) \cos \delta_{\zeta};$$

$$L_y = R_{\oplus} \cos(\varphi - \delta_{\zeta}) \sin t_{\zeta} \cos \delta_{\zeta}; \quad L_z = R_{\oplus} [1 - \sin(\varphi - \delta_{\zeta})],$$

где δ_{ζ} и t_{ζ} — склонение и часовой угол Луны, а экваториальный радиус Земли полагался равным $R_{\oplus} = 1$. Компоненты L_x и L_z расположены в плоскости, проходящей через центр Луны и ось вращения Земли.

Из табл. 2 следует, что величины M для снимков 3 и 4 значительно отклоняются от среднего. Поэтому они были опущены. Величины M для снимков 7—13, 15—17 хорошо согласуются между собой. Для этих десяти снимков получены среднее значение $M = 25.2730''/\text{мм}$, стандартная ошибка $\sigma_M = 0.0557''/\text{мм}$, ошибка среднего результата $S_M = 0.0176''/\text{мм}$. Найденная здесь величина M хорошо согласуется со значением из [3], но точность определения ее в настоящей работе на порядок выше.

Таблица 3. Результаты определения радиуса и зенитного расстояния Солнца

Номер снимка	n	$r_{\odot} \pm \delta r_{\odot}$, мм	$R_{\odot} \pm \delta R_{\odot}$	z_{\odot}
0	18	37.8233 ± 0.0118	955.907 ± 0.298''	78°03'12''
1	17	37.8145 ± 0.0106	955.685 ± 0.268	66 56 21
2	18	37.8332 ± 0.0054	956.157 ± 0.136	52 45 58
3	18	37.8370 ± 0.0034	956.253 ± 0.086	51 27 32
4	14	37.8711 ± 0.0062	957.116 ± 0.157	50 20 24
7	25	37.7825 ± 0.0013	954.877 ± 0.033	47 16 41
8	35	38.1413 ± 0.0078	963.944 ± 0.197	46 26 26
9	34	37.9206 ± 0.0040	958.366 ± 0.101	45 44 02
10	31	37.6319 ± 0.0043	951.070 ± 0.109	45 07 03
11	14	37.8550 ± 0.0085	956.708 ± 0.215	44 35 05
12	22	37.8627 ± 0.0048	956.903 ± 0.121	44 08 27
13	22	37.8347 ± 0.0050	956.195 ± 0.126	43 50 08
15	23	37.8877 ± 0.0049	957.535 ± 0.124	43 30 00
16	18	38.0325 ± 0.0071	961.194 ± 0.179	43 31 22
17	23	37.8836 ± 0.0052	957.431 ± 0.131	43 46 57
18	21	37.7929 ± 0.0073	955.139 ± 0.184	44 00 28

Результаты вычислений радиуса Солнца (линейного на негативе r_{\odot} и видимого углового $R_{\odot} = r_{\odot} M$) даны в табл. 3. Здесь также приведены n — число точек лимба изображения Солнца, использованных для определения r_{\odot} , и z_{\odot} — зенитное расстояние центра солнечного диска. На снимках 7—10 для определения r_{\odot} использованы только точки восточного лимба изображения Солнца, в остальных случаях — восточного и западного лимбов. В этой таблице 13 значений R_{\odot} хорошо группируются около простого среднего: $\bar{R}_{\odot} = 956.489''$; $\sigma_R = 1.000''$; $S_R = 0.277''$. Величины R_{\odot} для снимков 8, 10 и 16 дают значительное отклонение от \bar{R}_{\odot} , превышающее $3\sigma_R$. Измерения по этим снимкам исключены из обработки. Средневзвешенное значение δR_{\odot} , вычисленное по данным табл. 3, равно $0.1434''$. По правилу сложения дисперсий исправленное значение S_R будет составлять $0.312''$. Окончательно для 23 сентября 1987 г. получим следующее значение углового радиуса Солнца: $R_{\odot} = 956.49 \pm 0.31''$. После внесения поправок за рефракцию получим $R_{\odot} = 956.53 \pm 0.31''$. Эта величина несколько превышает эффективное значение $R_{\odot} = 956.19''$ [1].

Для среднего момента времени определения R_{\odot} динамическое время $DT = 1.757^h$. С помощью [1] находим удаление Земли от Солнца, равное $1.003\ 612\ 2$ а. е. Для расстояния 1 а. е. угловой радиус Солнца

составляет $R_{\odot} = 959.99 \pm 0.31''$. Заметим, что среднее значение углового радиуса Солнца по [9], используемое для вычислений затмений, равно $959.63''$.

Авторы благодарят Н. Ю. Андреева, Г. П. Воробьеву, И. В. Смирнова за помощь в наблюдениях.

1. *Астрономический ежегодник СССР*...—Л.: Наука, 1985.—Т. 66: на 1987 год.—691 с.
2. *Астрономический ежегодник СССР*...—Л.: Наука, 1987.—Т. 68: на 1989 год.—608 с.
3. *Астрономический календарь: Ежегодник. Переменная часть 1987*.—М.: Наука, 1986.—288 с.
4. *Воробьева Г. П., Чистяков В. Ф.* Результаты фотографических наблюдений радиуса Солнца в 1976—1986 гг. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Физика Солнца», Алма-Ата, 22—26 июня 1987 г.—Алма-Ата, 1987.—С. 114—115.
5. *Дэвис Р., Эванс Дж.* Доклад о Брукхавенском эксперименте по солнечным нейтрино // VI Междунар. семинар, Ленинград, 19—21 авг. 1974 г.—Л.: Изд. физ.-техн. ин-та, 1974.—С. 91—107.
6. *Куликов К. А.* Определение диаметров Луны и Солнца по фотографиям солнечного затмения 29 июня 1927 г. // *Астрон. журн.*—1935.—12, вып. 6.—С. 577—582.
7. *Лейбахер Д. У., Нойс Р. У., Тумпе Ю., Ульрихс Р. К.* Гелиосейсмология // *В мире науки.*—1985.—№ 11.—С. 4—14.
8. *Чистяков В. Ф.* Инструкция для фотографических наблюдений Солнца // *Астрон. календарь: Ежегодник. Постоянная часть.*—М.: Наука, 1981.—С. 314—323.
9. *Auwers A.* Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtung an der Heliometer der deutschen Venus-Expedition // *Astron. Nachr.*—1891.—128, N 3068.—С. 361—376.
10. *Davis R., Jr., Cleveland B. T., Rowley J. K.* Variations in the solar neutrino flux // 20th Intern. Cosmic Ray Conf., Moscow, 2—15 Aug., 1987.—Moscow, 1987.—4.—P. 328—331.
11. *Fiala A. D., Dunham D. W., Dunham J. B.* Detection of variations Baily's beads at the edge of the part of totality // *Proc. Nat. Acad. Sci., India.*—1982.—A 48, N 3.—P. 70—74.
12. *Ishii S.* On the positions and the semidiameters of the Moon and Sun, with special reference to the results of observations of recent solar eclipses // *Jap. J. Astron. and Geophys.*—1933.—11, N 1.—P. 37—66.
13. *Ishii S.* On the positions and the semidiameters of the Moon and Sun, with special reference to the results of observations of recent solar eclipses (second paper) // *Ibid.*—1936.—13, N 3.—P. 161—182.
14. *Ishii S., Kubokawa K., Tarro M.* On the semidiameter of the Moon and Sun, derived from observations of the solar eclipse of February 13—14 1934 // *Ibid.*—1935.—12, N 2.—P. 121—150.
15. *Parkinson J. H.* New measurements of the solar diameter // *Nature.*—1983.—304, N 5926.—P. 518—520.
16. *Parkinson J. H., Morrison L. V., Stephenson F. R.* The constancy of the solar diameter over the past 250 years // *Ibid.*—1980.—288, N 5791.—P. 548—551.
17. *Perpelkin E. J.* Photographische Bestimmung der Korrektion des Mondortes während der Sonnenfinsterniss 1927 Juni 29 // *Astron. Nachr.*—1928.—232, N 5551.—С. 127—132.
18. *Severny A. B., Kotov V. A., Tsap T. T.* Observations of solar pulsations // *Nature.*—1976.—259, N 5539.—P. 87—89.
19. *Wurm J. F.* Versuch die Verbesserung des Sonnen- und Mond-Halbmesser // *Monatliche Correspondenz zur Beförderung der Erd- und Himmels-Kunde, herausgegeben F. von Zach.*—Gotha, 1813.—27.—С. 44—48.
20. *Wurm J. F.* Der wahre und scheinbare Sonnendurchmesser, nach Prof. Enkes neusten Untersuchungen // *Astron. Nachr.*—1825.—3, N 65.—С. 287.

Уссурийская солнечная станция
Дальневосточного отд-ния
Ин-та космофиз. исслед.
и распространения радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию 08.06.88,
после доработки 21.09.88