

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ НАД БОЛЬШОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ 17–28 ФЕВРАЛЯ 1969 Г.

И. Н. ГАРЧИНСКАЯ

*Астрономическая обсерватория Вроцлавского Университета,  
Вроцлав, Польша*

**Абстракт:** Рассматривается прохождение через корону ударных волн, возникших после сильных хромосферных вспышек в большой активной области, прошедшей по диску Солнца с 17 по 28 февраля 1969 г. Связь частоты возникающего излучения в радиодиапазоне с электронной концентрацией среды, в которой это излучение возникает, дала возможность составить представление о распределении с высотой электронной концентрации в короне.

Параметры ударных волн были получены при обработке динамических спектров радиовсплесков II типа, наблюдавшихся после хромосферных вспышек. Так были получены изменения с расстоянием чисел Маха и скоростей для четырёх ударных волн. Две из них возникли после одной и той же хромосферной вспышки с небольшим временным интервалом, так что прохождение второй наблюдалось в среде, изменённой прохождением первой волны.

Полученные результаты могли бы наводить на мысль о существовании меньшего градиента электронной концентрации над активной областью чем те, которые следуют из ранее известных распределений.

Состояние короны над большой, быстро развивающейся активной областью в фотосфере в каждом отдельном случае может значительно отличаться от среднего. Изменения распределения электронной концентрации, а также температуры с высотой над активными фотосферными образованиями возникают также и на больших расстояниях от Солнца. Распределение электронной концентрации с высотой в короне над активной областью, данное в работе Ньюкирка (Newkirk, 1961), затем исправленное на множитель 2, использовалось Вейссом (Weiss, 1963). В цикле работ Пнеймана (Pneuman, 1968, 1969, 1970) структура короны над активной областью была представлена в виде корональных лучей и шлемов, простирающихся до расстояний нескольких солнечных радиусов. Представлена была также зависимость от расстояния отношений температур и электронных концентраций в лучах к соответствующим величинам в невозмущённой короне.

**Abstract:** In this paper the shock waves transitions throughout the solar corona are considered. Attention is paid to waves produced by chromospheric flares inside of an active region which was seen on the solar disc during the period from 17 up to 28 February 1969. The parameters of these waves were calculated using dynamical spectra of radio-bursts of type II. In particular the dependence of the Mach numbers and velocities of solar shock waves with a distance from the origins of solar flares were found. Two of those waves were seen in the same solar flare with a small time interval between. Therefore, the second one has travelled throughout a disturbed medium.

Using the dependence of frequency of radio emission of type II on the electron concentration in a medium a distribution with a distance of the later characteristics of the corona was found. The results suggest that for large distances the gradients of electron concentrations over an active area were weaker than those following from the Newkirk's model.

Об изменении значения концентрации электронов в корональных областях над активными районами фотосферы можно судить, наблюдая радиоизлучение этих областей, так наз. локальных источников либо источников медленно меняющейся составляющей радиоизлучения Солнца. Работы по исследованию этой составляющей указывают на тесную связь локальных источников с пятнами и факельными площадками над пятнами (Долгинова, Одинцова, 1967), а высота их, по определению некоторых авторов, использовавших наблюдения на различных частотах, колеблется в границах 20 000–1 000 000 км над поверхностью фотосферы (Christiansen and al., 1959, Riddle, 1969).

О физических условиях в таких областях можно судить, рассматривая динамические спектры радиовсплесков II типа. К II спектральному типу относятся мощные всплески солнечного радиоизлучения со «временем жизни» на фиксированной частоте порядка нескольких минут; эти всплески возникают

в основном на высоких частотах, а затем максимум излучения перемещается в сторону более низких частот со скоростью дрейфа около 1 МГц/сек. Всплески образуются во фронте бесстолкновительной ударной волны в плазме с достаточно сильным магнитным полем (Железняков, 1964; Зайцев, 1965).

Как показал Сагдеев (1964), магнитное поле во фронте ударной волны осциллирует, что вызывает дрейф электронов относительно ионов. При этом генерируются плазменные волны, которые затем, трансформируясь в электромагнитное излучение дают наблюдаемые радиовсплески II типа. Частота излучения при этом зависит от электронной концентрации среды, в которой это излучение возникает.

Зайцев (1968), используя характеристики всплесков II типа, определил параметры ударных волн, их вызывающих. Он показал, что эти волны в среднем слабые ( $M < 2$ ), а их интенсивность меняется с высотой. Скорость вначале уменьшается с высотой, а затем относительно медленно растёт.

Результаты некоторых других авторов, напр. Кришнамурти (Krishnamurthi, 1965), Максвелла (Maxwell, 1962), указывают на торможение ударных волн на некоторой высоте. Анализ наблюдений 21 радиовсплеска II типа, проведённый Вейссом (Weiss, 1963), показал, что в ряде случаев скорость увеличивается с высотой. Противоречивые результаты о характере движения ударных волн получены также по измерениям в межпланетном пространстве. По наблюдениям семи вспышек солнечных космических лучей во время одновременного полёта космических аппаратов «Зонд-3», «Венера-2-4» были определены скорости ударных волн на различных участках пути (Любимов, 1968). Оказалось, что скорости ударных волн на участке Солнце — космический аппарат превышали значения скоростей для участка космический аппарат — Земля, что свидетельствует о замедлении движения ударных волн.

К противоположному выводу — ускорению движения ударных волн приводят результаты работы Слыша (1967), полученные по наблюдениям радиовсплеска II типа на частотах 2 и 0,2 на космическом аппарате «Зонд-3».

В ряде работ скорости ударных волн, вызывающих земные магнитные бури с внезапным началом, принимаются равными скоростям, определяемым по динамическим спектрам ра-

диовсплесков II типа (Моисеев, 1960; Гарчинска, 1965; Таьлор, 1969).

Все эти, по всей вероятности, реальные расхождения возникают из-за разницы условий в короне в различные времена наблюдений. В связи с этим представляет большой интерес проведение оценок параметров ударных волн, распространяющихся в короне и вызывающих радиовсплески II типа для нескольких радиовсплесков, возникающих в одной и той же корональной области. Параметры ударных волн могут быть получены при использовании динамических спектров радиовсплесков II типа при предположении существования в высокой короне магнитного поля. Затем эти параметры могут использоваться для определения физических условий в короне.

Зайцев (1968) и Фомичёв (1972) провели анализ, позволяющий связать параметры ударных волн с полученными характеристиками динамических спектров радиовсплесков II типа.

Интенсивность ударной волны  $\eta$  определяется отношением среднего значения электронной концентрации за фронтом ударной волны  $N^*$  к соответствующему значению перед фронтом —  $N_0$ .

$$\eta = \frac{N^*}{N_0}. \quad (1)$$

Интенсивность связана с числом Маха соотношением:

$$M^2 = \frac{\eta(\eta + 1)}{2}. \quad (2)$$

Плазменные волны, возникающие на фронте ударной волны, переходящие затем в электромагнитное излучение, имеют частоту, определяющуюся электронной концентрацией во фронте  $N^*$ , так что наблюдаемая на динамическом спектре частота основного тона радиовсплесков II типа выражается:

$$\frac{1}{2\pi} \left( \frac{4\pi e^2}{m_e} N_0 \eta \right)^{1/2} = f. \quad (3)$$

Соответствующая наблюдаемой частоте электронная концентрация перед фронтом ударной волны равна:

$$N_0 = \frac{\pi m_e f^2}{e^2 \eta}. \quad (4)$$

Динамический спектр радиовсплесков II типа характеризуется также мгновенной полосой частот  $\Delta f$ , величина которой зависит от перепада электронной концентрации при переходе

из области перед фронтом в область за фронтом

$$\Delta f \approx f - f_0, \quad (5)$$

где  $f$  и  $f_0$  — частоты, соответствующие средним концентрациям электронов за фронтом и перед фронтом.

Тогда зависимость интенсивности ударной волны от мгновенной полосы частот выражается:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Delta f}{f}\right)^{-2} \quad (6)$$

Скорость фронта ударной волны  $V$  зависит от числа Маха  $M$ , а также от плотности среды и величины магнитного поля «В» в тех областях, через которые проходит ударная волна.

Плотность среды  $\rho$  можно в приближении, при учёте условия зарядовой нейтральности плазмы, принять равной  $\rho = m_i N_0$ , где  $m_i$  — масса протона.

Тогда:

$$V = M \cdot V_A, \quad (7)$$

$$V_A = \frac{B}{(4\pi\rho)^{1/2}}, \quad (8)$$

$$V = M \frac{B}{(4\pi N_0 m_i)^{1/2}}. \quad (9)$$

Предполагая, что скорость передвижения фронта ударной волны за время  $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$  равна средней скорости  $V_{kcp} = \frac{V_{k+1} - V_k}{2}$ , можно подсчитать последовательно пути  $\Delta R_k$ , преодолеваемые фронтом за время  $\Delta t_k$ :

$$\Delta R_k = V_{kcp} \cdot \Delta t_k. \quad (10)$$

Последующее суммирование даёт расстояние от фронта до места вспышки для различных моментов времени  $R$ :

$$R_k = \sum_{k=1}^n \Delta R_k. \quad (11)$$

Начальное расстояние  $R_1$  для момента  $t_1$  бралось при учёте распределения  $N_0 \times$  Ньюкирк, как высота возникновения частоты  $f_1$ .

Величины электронной концентрации, интенсивности волн, чисел Маха, скоростей фронта, пути, пройденного ударными волнами, связаны со спектральными характеристиками следующими формулами соответственно: (4), (6), (2), (9), (11).

В настоящей работе рассматривалось про-

хождение по диску Солнца большой активной области, наблюдавшееся с 17. 11 по 28. 11. 1969 г. Область включала в себя несколько групп солнечных пятен, обозначенных на картах Солнца, издаваемых Фраунгоферовским Институтом, как 941, 943, 946, а в «Солнечных данных» — как 52, 53, 56. Протяжённость области по долготе была в границах 30 — 60°. Из материалов, опубликованных в «Солнечных данных», следует, что перед появлением области на диске над восточным краем Солнца наблюдалось повышенное значение излучения зелёной линии короны. На записи медленно меняющейся составляющей радиоизлучения на  $\lambda = 6$  см на расстоянии 10 см от края диска Солнца находится локальный источник.

Структура магнитных полей этой области была очень сложна, взаимное положение полюсов отдельных групп было таково, что все они составляли как бы одну общую систему магнитных полей с ведущим южным полюсом.

Во время прохождения области по диску класс входящих в неё групп пятен быстро менялся, наблюдалось при этом большое количество хромосферных вспышек. Так, субвспышек за время прохождения произошло 21, вспышек класса I — 11, класса II — 4. Вспышки локализовались, в основном вблизи большого волокна. Относительно высокий процент вспышек сопровождался радиовсплесками II типа, которые наблюдались после следующих вспышек: 23-го февраля 04<sup>h</sup>42<sup>m</sup>, 24-го — 23<sup>h</sup>05<sup>m</sup>, 26-го — 04<sup>h</sup>16<sup>m</sup>, 27-го — 13<sup>h</sup>48<sup>m</sup>. Это были, в основном, вспышки класса II, сопровождающиеся также и радиовсплесками III типа, ионосферными и магнитными бурями.

Использованные в работе динамические спектры для явлений 23-го, 24-го, и 26-го февраля, зарегистрированные в CSIRO, показывают, что в исследуемые периоды после соответствующих вспышек были зарегистрированы радиовсплески II и III типов. Некоторые всплески II типа имели тонкую структуру спектра так наз. «рыбий хребёт», свидетельствующую об убегании быстрых электронов из фронта ударной волны. После вспышки 26-го февраля на спектре видны два всплеска II типа с временным интервалом между ними несколько минут, что соответствует прохождению через корону последовательно двух ударных волн. Вторая волна перемещалась в среде, возмущённой первой волной.

При использовании приведённых ранее рас-

суждений были подсчитаны параметры ударных волн, вызвавших всплески радиоизлучения: интенсивность  $\eta$ , число Маха  $M$  и скорость фронта  $V_k$ , а также электронная концентрация  $N_{ок}$  короны.

$$\eta_k = \left(1 - \frac{\Delta f_k}{f_k}\right)^2,$$

$$M_k^2 = \frac{\eta_k (\eta_k + 1)}{2},$$

$$V_k = M_k \frac{B}{(4\pi N_{ок} m_i)^{1/2}},$$

$$N_{ок} = \frac{\pi m_e f_k^2}{e^2 \eta_k}.$$

Все эти параметры соответствуют излучению, возникающему на расстоянии  $R_k$  от места вспышки

$$R_k = \sum_{k=1}^n V_{kcp} \Delta t_k.$$

Числовые значения частоты радиоизлучения  $f_k$ , мгновенной полосы частот  $\Delta f_k$  сняты с динамических спектров для моментов  $t_k$ , момент первого отсчёта —  $t_1$ .

После проведения расчётов с четырьмя возможными величинами магнитного поля ( $B=0.5; 1; 2; 4$  гс), входящего в формулу скорости, и сравнения результатов с ранее известными распределениями  $N_{ок}$ , за наиболее

В первом столбце помещены даты вспышек, во втором — моменты возникновения радиоизлучения, в третьем — его частота. В столбцах от 4 до 6 даны подсчитанные параметры ударных волн, в столбце 7 — расстояние фронта ударной волны от места вспышки, а в столбце 8 — электронная концентрация в солнечной короне перед фронтом волны.

Сопоставление подсчитанных величин характеристик ударных волн с подсчитанными же расстояниями сделано на рисунках. Распределение чисел Маха с высотой, как видно из рисунка 1, для всех четырёх ударных волн подобно, величины  $M$  осциллируют вблизи некоторых постоянных значений, не очень отличающихся для различных волн. На рисунке 2 даётся зависимость скоростей ударных волн от высоты; можно заметить, что характер зависимости одинаков для всех четырёх волн. Во всех рассматриваемых случаях наблюдается ускорение волн. Возмущение 26-го февраля состоит из двух волн, вторая волна, идущая после небольшого перерыва за первой в возмущенной короне, имеет то же ускорение, но меньшие абсолютные значения скорости. Самое большое ускорение имеет волна 23-го февраля, но оно является также и наименее уверенным из-за сравнительно небольшого числа точек наблюдения.

На рисунке 3 нанесены значения электронной концентрации в зависимости от высоты для четырёх ударных волн. Предположение

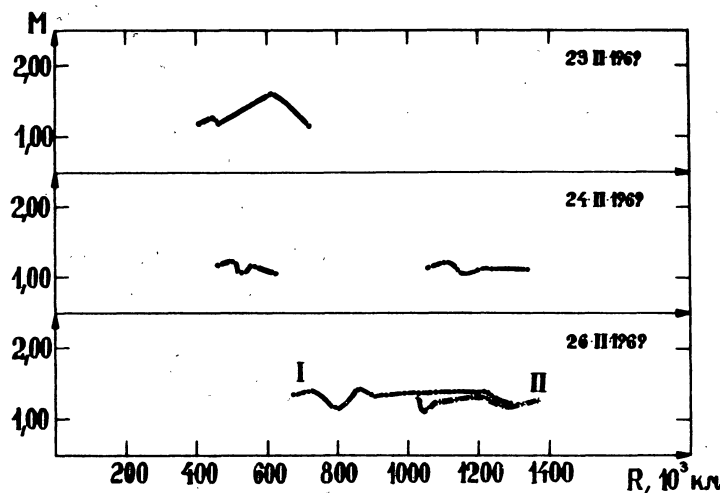


Рис. 1. Распределение чисел Маха с высотой в короне.

правдоподобное было выбрано значение  $B=2$  гс и только для этого значения даны окончательные результаты, помещённые в таблице 1.

стабильности короны в рассматриваемой области за время между 17—28. 2, позволяет поместить все точки на одном рисунке. В ре-

Таблица 1. Параметры ударных волн

Дата, класс, коорд. всп.	$t_k$	$f_k$	$\eta_k$	$M_k$	$V, \text{ km/sek}$	$R \times 10^3 \text{ km}$	$N_0 \times 10^7 \text{ el/cm}^3$
1N	50 <sup>m</sup> 15 <sup>s</sup>	60 MHz	1,234	1,174	592,0	496,008	3,617
23,II	50 45	58	1,351	1,260	1674,0	529,998	3,088
1969	51 00	55	1,260	1,194	1057,0	550,480	2,977
09W12N	52 30	52	1,874	1,610	495,0	620,320	1,789
04 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup>	54 10	45	1,205	1,152	1062,0	698,170	2,084
2 B	17 30	35	1,197	1,147	783,9	775,000	1,269
24 II	18 00	34	1,283	1,210	668,5	796,800	1,117
1969	18 30	33	1,133	1,099	1535,0	832,244	1,192
23 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup>	19 00	31	1,141	1,106	1028,0	870,689	1,044
31W12N	19 30	31	1,141	1,142	1028,0	901,544	1,044
	20 30	28	1,156	1,116	1933,0	990,374	0,841
II гарм.	12 00	95	1,248	1,185	662,7	610,000	2,242
	12 30	90	1,330	1,245	1092,0	636,322	1,887
	13 00	90	1,094	1,071	529,3		2,297
	13 30	92	1,259	1,193	647,6	688,510	2,084
	14 00	87	1,098	1,074	1964,8	727,696	2,137
	14 30	85	1,074	1,056			2,085
2B	27 30	55	1,490	1,362	1789,8	540,000	2,517
26 II	28 00	53	1,516	1,381	1311,1	586,482	2,298
1969	31 15	51	1,229	1,170	698,2	782,379	2,624
04 <sup>h</sup> 18 <sup>m</sup>	32 00	48	1,594	1,438	878,1	817,848	1,945
46W12N	32 30	46	1,466	1,345	631,2	840,486	2,030
	33 00	45	1,480	1,355	445,1	856,629	1,930
	33 30	44	1,502	1,371	620,8	872,619	1,598
	34 00	42	1,524	1,387	577,7	890,595	1,435
	34 30	41	1,543	1,401	231,8	902,739	1,351
	35 00	41	1,543	1,404	231,8	909,693	1,351
	35 50	40	1,562	1,415	1884,3	962,593	1,270
	36 00	34	1,472	1,349	2349,0	983,760	0,974
	36 30	32	1,316	1,234	1188,8	1036,827	0,733
II Волна	39 00	54	1,506	1,374	272,4	545,000	2,401
	39 30	47	1,194	1,145	1535,0	572,111	2,294
	40 00	45	1,335	1,248	1091,1	611,496	1,881
	40 30	42	1,362	1,268	944,0	642,023	1,606
	41 00	41	1,451	1,333	724,7	667,052	1,436
	41 30	39	1,397	1,294	1255,0	696,746	1,351
	42 00	36	1,264	1,197	2054,6	746,390	1,270
	42 30	33	1,294	1,218	1963,0	806,654	1,044
	43 00	32	1,306	1,231	1194,4	854,018	0,972

зультате получается распределение электронной концентрации с высотой в короне. На том же рисунке нанесено распределение электронной концентрации, предложенное Ньюкиркком, исправленное на множитель 2. Из сравнения этих двух распределений видно, что градиент  $N_0$  для исследуемой области в короне меньше градиента  $N_0$  средней короны над активной областью. В данном случае можно представить себе изолированную область, вытянутую над активным фотосферным районом, в которой плотность уменьшается медленнее с высотой,

чем в окружающей среде так, что разница плотностей на некоторой высоте может оказаться большой. Величина магнитного поля в короне не была точно известна для исследуемого периода, она была взята как величина, при которой получается распределение, по порядку близкое ранее известным. В связи с тем, что поле входит в выражение для расстояния как постоянный множитель, то изменение его величины влияет только на масштаб расстояний в распределении  $N_0$ . Характер распределения остаётся постоянным. Постоянство маг-

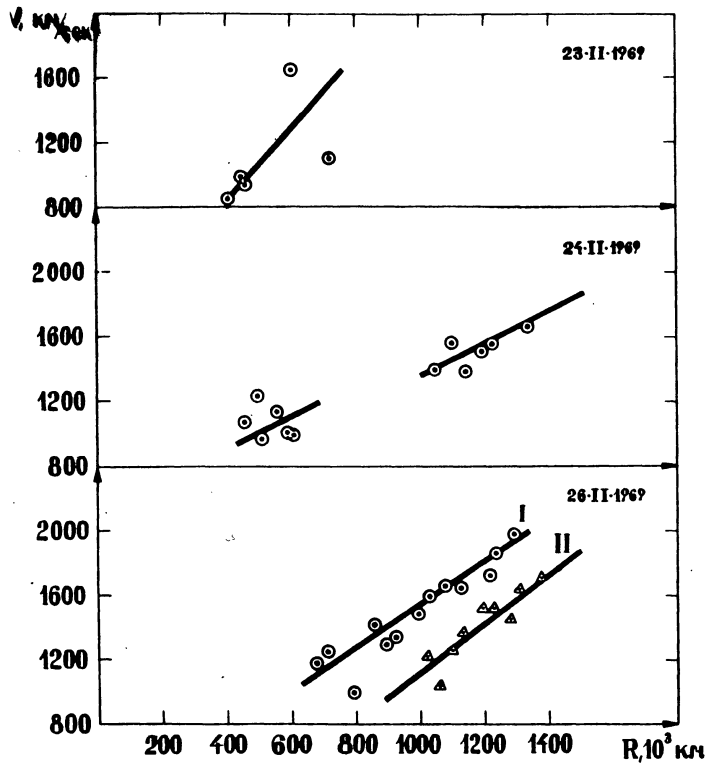


Рис. 2. Изменение скорости ударного фронта с высотой в короне.

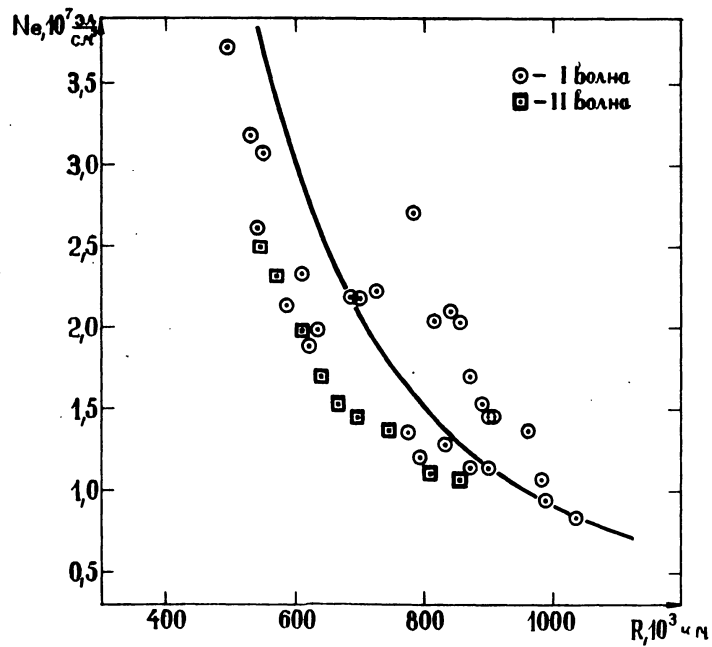


Рис. 3. Изменение электронной концентрации с высотой в короне над активной областью.

нитного поля по высоте, принятое для всей рассматриваемой области, на больших расстояниях может нарушаться, что привело бы к изменению распределения  $N_0$ . В исследуемом случае постоянство магнитного поля является возможным.

Описанная здесь корональная область подобна известным ранее структурам типа открытый шлем, имеющим повышенную плотность

по сравнению с окружающей средой и вытянутым до расстояний нескольких солнечных радиусов.

Выражаю глубокую благодарность работникам Солнечной Обсерватории в Кульгоре (Австралия) за присылку динамических спектров радиовсплесков II типа, что позволило провести расчёты в этой работе.

## Литература

- CHRISTIANSEN, W. N., MATHEWSON, D. S. (1959): Symposium on Radio Astronomy, p. 108. Stanford, Stanford University Press.
- DOLGINOVA, Yu. N., ODINCOVA, I. N. (1967): Geomagn. Aeron., VII, 6.
- FOMICHEV, V. V. (1972): Astron. Zh., 49, 348.
- GARCZYŃSKA, I. N. (1965): Acta Astron., 15, 1.
- KRISHNAMURTHI, M., SASTRY, G. S., RAO, T. S. (1965): Aust. J. Phys., 18, 473.
- LYUBIMOV, G. P. (1968): Astron. Tsyrkular, 488, 6.
- MAXWELL, A., THOMPSON, A. K. (1962): Appl. J., 135, 138.
- MOISEEV, I. G. (1960): Izvest. Krymsk. Astr. Observ., 24, 3.
- NEWKIRK, G. A. (1961): Appl. J., 133, 983.
- PNEUMAN, G. W. (1968): Solar Phys., 3, 4.
- PNEUMAN, G. W., KOPP ROGER, A. (1970): Solar Phys., 13, 1.
- RIDDLE, A. C. (1969): Solar Phys., 6.
- SAGDEEV, R. Z. (1964): In: Voprosy teorii plazmy. Moscow, Atomizdat.
- SLYSH, V. J. (1967): Astron. Zh., 44, 94.
- TAYLOR, H. E. (1969): Solar Phys., 6, 320.
- WEISS, A. A. (1963): Aust. J. Phys., 16, 2.
- ZAITSSEV, U. V. (1965): Astron. Zh., 42, 740.
- ZAITSSEV, U. V. (1968): Astron. Zh., 45, 765.
- ZHELEZNYAKOV, V. V. (1964): Radioizluchenie Solntsa i Planet. Moscow, Nauka.
- Fraunhofer Institut, Map of the Sun, 1969.
- Quarterly Bulletin on Solar Activity, 1969.
- Solnechnye Dannye, 1969, 2.