

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА СОЛНЦЕ В ДИАПАЗОНЕ 2.3—2.7 см

В. М. Богод, А. Н. Коржавин

Приводятся результаты обработки наблюдений некоторых локальных источников на Солнце на волнах 2.3 и 2.7 см, сделанных в июле—сентябре 1972 г. Оценены яркостные температуры флоккулярной компоненты локальных источников. Показано, что в пятенной компоненте локальных источников, связанных с группами пятен, не превосходящими по площади 400 м. д. п., можно выделить две составляющие. Одна связана с излучением из областей над малыми пятнами и порами, другая — над крупными пятнами с хорошо выраженными тенью и полутенью. В исследуемом диапазоне длин волн преобладает первая составляющая, с которой можно связать действие теплового тормозного механизма в магнитных полях напряженностью 50—200 э. Излучение второй составляющей обусловлено магнитно-тормозным механизмом, причем излучающие области находятся в самом начале температурного скачка, образующегося над крупными пятнами.

Observational data processing results are presented for several local sources on the Sun. The data were obtained at 2.3 and 2.7 centimeter wavelengths during July—September, 1972. Brightness temperatures of the flocculae component of local sources are estimated. It is shown that in the spot component of local sources connected with the groups of spots whose areas do not exceed 400 millionths of visible hemisphere one can establish two components. One of them is caused by the radiation from the regions above small spots and pores; the other, by the radiation from the regions above large spots having well pronounced umbra and penumbra. The first component produced by thermal bremsstrahlung in magnetic fields with intensities between 50 and 200 Oe is predominant in the wavelength region investigated. The second component radiation is due to a gyro-magnetic mechanism, the emitting regions being at the very beginning of a temperature jump formed above large spots.

Введение

Особенности радиоизлучения локальных источников (л. и.) на Солнце в сантиметровом диапазоне волн в настоящее время связывают с действием нескольких механизмов радиоизлучения в атмосфере Солнца в активной области: теплового магнитно-тормозного в области сильных магнитных полей пятен, теплового тормозного излучения флоккул и корональной конденсации, нетеплового излучения из более высоких областей над пятнами (В. В. Железняков [1], Г. Б. Гельфрейх и др. [2], Е. Я. Злотник [3]). Появление пятен в активной области приводит к существенной перестройке атмосферы Солнца, что отражается в возникновении в сантиметровом диапазоне ярких компактных источников радиоизлучения. Это явление объясняется проникновением в корону сильных магнитных полей пятен 400—2000 э и генерацией радиоизлучения на низких гармониках гирочастоты. Согласно современным представлениям, магнитные поля пятен не могут быть меньше 1000 э [4], в то же время, чем больше пятно, тем большим в среднем магнитном поле оно обладает (Р. Н. Ихсанов [5], В. Аллен [6]). В соответствии с этим над малыми пятнами трудно

ожидать значений напряженности поля 2000 э, необходимых для эффективной генерации магнитно-тормозного излучения в диапазоне 2.5 см, однако для крупных пятен это вполне возможно. Таким образом, интересно получить данные наблюдений особенностей излучения л. и., связанных с различными по размерам пятнами в диапазоне длин волн 2—4 см.

Наблюдения проводились на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) на волнах 2.3 и 2.7 см с разрешением 0,75 и 0,90 соответственно (указан размер диаграммы БПР в центральном горизонтальном сечении при наблюдениях Солнца в июле—августе). Высокая разрешающая способность БПР на этих волнах дает дополнительные возможности для решения поставленной задачи, так как позволяет в некоторых случаях различать отдельные части л. и. Указанные волны были выбраны для заполнения интервала между используемыми на БПР радиометрами на волны 2.0 и 3.2 см [2]. Необходимость более детального представления спектра л. и. в диапазоне 2.0—3.2 см определяется тем, что в ряде случаев в этом диапазоне происходит существенное изменение свойств л. и. [2]. Так, в работах [7, 8] было показано, что на $\lambda=2$ см основной вклад в полный поток дает флоккулярная компонента, а на волнах более 3.2 см — пятенная.

Радиометры на волны 2.3 и 2.7 см были введены в строй на БПР в июле 1972 г. Эти радиометры, разработанные в САО АН СССР (В. М. Богод, Д. В. Корольков [9]), выполнены целиком на твердотельных элементах, включая гетеродин [10], имеют низковольтное питание (10 в) во всех элементах и обладают достаточно хорошей для многих задач чувствительностью около $0.2\text{--}0.4^\circ\text{K}$ при постоянной времени $\tau=1$ сек. Разработанные радиометры построены по супергетеродинной схеме без УВЧ, при этом с целью достижения приемлемой чувствительности применены широкополосные УПЧ на малощумящих транзисторах и смесители на диодах с барьером Шоттки. В данной работе приводятся результаты наблюдений на этих волнах нескольких л. и. на Солнце, сделанных в июле—сентябре 1972 г.

Методика обработки наблюдений

Для обработки наблюдений л. и. необходимы следующие условия: исследуемая область должна быть достаточно удалена от лимба Солнца, в пределы диаграммы антенны должен попадать только один л. и. Определение потоков и размеров л. и. производилось непосредственно по кривым наблюдений без предварительной их перестройки (изменение масштаба, вычитание уровня спокойного Солнца). Уровень спокойного Солнца на записях полной интенсивности и параметр Стокса I оценивались с использованием наблюдения Солнца 14 августа, в день с низким уровнем его активности. На записях параметра I выделялись пятенная и флоккулярная компоненты л. и. Флоккулярная компонента представляется в виде слабых протяженных источников, накладывающихся друг на друга и образующих почти непрерывную полосу по всему диску Солнца. Ввиду неопределенности проведения уровня спокойного Солнца ошибки в определении потока (точнее эксцесса потока) флоккулярной компоненты могут достигать двух раз. При определении средней яркостной температуры этой компоненты л. и. дополнительная неопределенность возникает из-за незнания второго размера источников. Пятенная компонента л. и. представляется в виде компактных образований размером $1\text{--}2'$, достаточно четко отделяющихся от флоккулярного фона, кроме случаев, когда эта компонента представляется несущественной. Определенные трудности встретились при выделении л. и. на записях круговой поляризации (параметр Стокса V), так как здесь сигнал отягощен различного рода пара-

зитными эффектами. Кросс-поляризация основного поля антенны БПР, которая особенно значительна в летние месяцы, не позволяет точно определять координаты и размеры л. и., а также распределение степени поляризации по л. и.; кросс-поляризация рассеянного поля антенны и паразитный сигнал, пропорциональный интенсивности, не позволяют выделять поляризованное излучение флоккулярной компоненты л. и. Ввиду этого производилась только оценка степени поляризации полного излучения пятенной компоненты л. и., как это делалось в работе [11].

Данные обработки наблюдений л. и. на волнах 2.3 и 2.7 см приведены в таблице, там же даны номера групп пятен и их площади по бюллетеню «Солнечные данные» [12]. Копии участков записей некоторых л. и. показаны на рис 1—4 вместе с зарисовками групп пятен. Пунктиром на кривых параметра I показаны: уровень спокойного Солнца, разделение пятенной и флоккулярной компонент, разделение пятенной компоненты на составляющие части. Пунктир на копиях записей параметра V аппроксимирует ход паразитного сигнала от спокойного Солнца. На всех рисунках вертикальные отрезки означают масштабы кривых по антенной температуре, а горизонтальный отрезок — угловой масштаб. Записи на обеих волнах и рисунки пятен совмещены по угловой координате с ошибкой, не превышающей $10''$. Координаты пятен определялись по фотографиям Солнца с негативов, получаемых на Горной астрономической станции ГАО АН СССР. Так как снимки Солнца делаются на несколько часов раньше, чем радионаблюдения, то в измеренные координаты пятен вводились поправки, учитывающие вращение Солнца. Кросс-поляризонный сигнал значительно искажает запись параметра V (Г. В. Кузнецова, Н. С. Соболева [13]), поэтому без учета его влияния измерение координат л. и. поляризованного излучения будет ошибочным. Однако можно отметить, что в нашем случае записи правополяризованных л. и. оказываются смещенными к западу от истинного положения, а левополяризованных — к востоку от истинного положения, и чем выше степень поляризации, тем меньше это смещение. На рис. 1—4 л. и. с избытком излучения, поляризованного по правому кругу, изображаются участками кривых выше пунктирной линии, а в таблице отмечаются знаком «+».

В таблице приведены данные о л. и. на двух длинах волн. Методика обработки наблюдений Солнца, выполняемых на БПР, предполагает проведение на записях некоторого уровня излучения спокойного Солнца, при этом площадь фигуры, образованной этим уровнем, пропорциональна потоку излучения спокойного Солнца. Площадь, заключенная между записью прохождения Солнца и кривой спокойного Солнца, пропорциональна дополнительному потоку, обусловленному излучением л. и., находящимся в данный момент на Солнце. Непосредственно измеряемой величиной, характеризующей л. и., здесь является именно дополнительный поток над потоком участка спокойного Солнца, занимаемого этим л. и. Для получения полного потока л. и. необходимо к измеренному эксцессу потока л. и. добавить поток излучения этого участка спокойного Солнца. Некоторая неопределенность здесь возникает из-за того, что необходимо оценить размер л. и. по второй координате. Обычно эта оценка делается в предположении круговой симметрии структуры источника. В столбцах 8 и 14 таблицы приведены измеренные эксцессы потоков ($\Delta F_{\text{фл}}$) флоккулярных компонент л. и., а в столбцах 9 и 15 — полные яркостные температуры ($T_{\text{бфл}}$) этих компонент. Яркостные температуры определялись по формулам:

$$\Delta T_{\text{б фл}} = \frac{\Delta F_{\text{фл}} \lambda^2}{2k\Omega_{\text{л. и}}}, \quad (1)$$

$$T_{\text{б фл}} = \Delta T_{\text{б фл}} + T_{\text{б сп}\odot}, \quad (2)$$

1972 г.	Номер группы пятен	S _p , м. д. п.	λ = 2.3 см					λ = 2.7 см						
			ΔF _{изт.} , 10 ⁻²² Вт/м ² ·Гц	B ₀ , угл. мин.	T _{бизт.} , 10 ³ °К	P, %	ΔF _{фл.} , 10 ⁻²² Вт/м ² ·Гц	T _{бфл.} , 10 ³ °К	ΔF _{изт.} , 10 ⁻²² Вт/м ² ·Гц	B ₀ , угл. мин.	T _{бизт.} , 10 ³ °К	P, %	ΔF _{фл.} , 10 ⁻²² Вт/м ² ·Гц	T _{бфл.} , 10 ³ °К
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Июль	192	275	1.9	4.10	60	-37	3.5	16	2.5	0.9	138	-	4.6	20
10	203	230	1.25	0.75	81	-55	5.3	18	2.25	0.7	212	-	3.8	19
17	224	224	-	-	-	-	7.9	22	-	-	-	-	5.3	22
18	204	401	-	-	24	-	8.0	21	-	-	-	-	4.8	20
17	347	347	0.8	1.0	24	+100	5.3	22	-	-	-	-	4.8	26
18	212	113	0.75	4.3	43	+100	8.1	19	-	-	-	-	6.0	20
25		113	0.3	0.9	26	< 3	5.7	16	0.3	0.8	39	-	7.3	20
26		110	0.3	0.9	24	< 3	5.4	15	0.2	0.75	32	-	6.0	18
27		110	0.2	0.7	29	< 3	2.1	16	0.2	0.7	37	-	4.9	18
25	220	7	0.2	0.6	31	+22	5.0	15	0.3	0.6	52	-	7.5	19
26		72	0.6	0.8	41	+12	3.8	14	1.0	1.0	56	-	5.3	17
27		249	1.7	1.1	54	+5	5.2	14	1.6	1.25	56	-	4.3	16
Август	232	-	1.0	1.5	26	+3	6.0	14	0.9	1.5	31	+3	6.4	16
16		-	0.75	4.75	21	+1.5	4.4	14	4.1	4.8	29	+1.5	4.3	16
17		-	1.0	1.7	25	+3	3.9	14	1.7	1.5	43	+8	2.8	15
18	237	52	1.1	1.0	44	-5	6.0	14	4.1	4.0	58	-6	6.4	16
16		112	1.0	1.25	32	-3	4.1	14	1.4	1.4	44	-4	4.3	16
17		299	2.4	1.2	62	+8	3.9	14	3.1	1.25	94	+13	2.8	15
18		-	0.2	1.0	20	< 4	4.1	14	0.2	1.1	22	< 6	1.8	14
Сентябрь	269	22	0.6	1.4	21	+2	2.5	13	0.7	1.4	28	< 1.5	2.1	14
6		38	0.5	1.2	21	+2	2.2	12	0.7	1.3	29	+1.5	2.2	14
7		20	0.9	1.3	28	+4	4.7	13	4.0	1.5	31	+2.5	6.8	15
8		8	0.6	1.4	22	+3	7.0	13	0.8	1.6	26	+2.5	6.2	14
9		-	0.5	1.5	21	< 2	4.1	14	0.6	1.7	22	< 2	1.8	14
10	271	6	0.8	2.4	17	< 0.5	2.5	13	1.0	2.4	20	< 1	2.1	14
6		91	1.3	1.2	39	+5	2.2	12	2.2	1.2	71	+6	2.2	14
7		355	2.2	2.2	26	+6	4.7	13	2.6	2.0	40	+7	6.8	15
8		209	1.6	2.0	23	+3.5	7.0	13	2.2	1.9	38	+6	6.2	14

где $\Omega_{л.и.}$ — телесный угол л. и., $T_{бсп. \odot}$ — яркостная температура спокойного Солнца.

Угловые размеры флоккулярной компоненты л. и. составляли 5—10'. В графах 4 и 10 таблицы даны измеренные эксцессы потоков ($\Delta F_{пят}$) пятенных компонент л. и., в 5 и 11 — угловые размеры (B_0) этих компонент (уширение за счет ширины диаграммы антенны учтено), а в 6 и 12 — полные яркостные температуры ($T_{б пят}$) этих компонент. Яркостные температуры вычислялись по формулам, аналогичным (1) и (2). Степени поляризации излучения пятенных компонент л. и. приведены в графах 7 и 13 с указанием знака вращения «+» — правая, «-» — левая. Степени поляризации определялись по отношению площадей S_I и S_V участков записей л. и. по каналам I и V соответственно с поправкой на отличие эксцесса яркостной температуры $\Delta T_{б пят}$ от полной яркостной температуры $T_{б пят}$ пятенной компоненты л. и., т. е.

$$P = \frac{S_V \Delta T_{б пят}}{S_I T_{б пят}}$$

Величины потоков спокойного Солнца были получены интерполяцией между измеренными 14 августа 1972 г. полными потоками радиоизлучения Солнца по наблюдениям станций Службы радиоизлучения Солнца в Сагамор-хилле [14] и Тойокаве [15]. Причем данные этих станций были приведены к абсолютным значениям потока согласно рекомендациям Х. Танаки [16]. Таким образом, было принято, что поток излучения спокойного Солнца на волне 2.3 см составлял $470 \cdot 10^{-22}$ вт/м²·гц, а на волне 2.7 см — $365 \cdot 10^{-22}$ вт/м²·гц. Этим величинам потока соответствуют средние яркостные температуры спокойного Солнца 11 900 и 12 700° К на волнах 2.3 и 2.7 см соответственно (предполагается, что эффективный радиус Солнца равен $1.03 R_{\odot}$).

Результаты наблюдений

Как видно из таблицы, яркостные температуры флоккулярной компоненты л. и. превосходят яркостную температуру спокойного Солнца не более, чем в два раза, превышая ее иногда всего на 1000° К. Среднее по всем измерениям значение яркостной температуры флоккулярной компоненты составляет 15 900° К на $\lambda=2.3$ см и 17 600° К на $\lambda=2.7$ см, т. е. выше $T_{бсп. \odot}$ на 4000° К и 4900° К соответственно. Такое различие яркости спокойного Солнца и флоккул легко получить, если предположить, что во флоккулах значения распределений $N_e(h)$ и (или) $T_e(h)$ несколько выше, чем для спокойного Солнца. Различие в значениях $N_e(h)$ может составлять всего 10—30% в тех областях, где в основном генерируется излучение на волнах 2.3 и 2.7 см.

Рассмотрим теперь более подробно пятенную компоненту л. и. На рис. 1 показаны копии записей трех л. и., связанных с группами пятен №№ 192, 203, 204. Все три группы были класса Н с площадью 230—400 м. д. п., причем главное пятно составляло 70—100% всей площади. Хотя все три группы пятен очень похожи друг на друга, соответствующие им л. и. сильно различаются. Так, только для группы № 192 на записях интенсивности можно уверенно выделить соответствующий ей л. и. Этот л. и. имел размер 0.7—0.9, что близко к размеру пятна; яркостная температура была $\sim 70\,000^\circ$ К на $\lambda=2.3$ см и $160\,000^\circ$ К на $\lambda=2.7$ см (т. е. в 2.5 раза выше, чем на $\lambda=2.3$ см); излучение этого л. и. было сильно поляризовано ($p \approx 50\%$), знак поляризации соответствовал избытку излучения необыкновенной волны.

В отличие от группы № 192 для групп пятен №№ 203 и 204 на кривых интенсивности отсутствуют соответствующие яркие компактные образо-

вания, а на записи параметра V только для группы № 204 имеется соответствующий л. и. Знак поляризации излучения этого л. и. здесь также соответствует избытку необыкновенной волны. Конечно, с группами пятен №№ 203 и 204 могут быть связаны относительно слабые л. и., выделение которых затруднено в связи с неравномерностью фонового излучения, образуемого окружающими их флоккулами. Так, для группы № 204 на записи интенсивности пунктиром показан л. и. в предположении, что его излучение было поляризовано на 100% (в соответствии с копией параметра V). Основываясь на кривой поляризации на $\lambda=2.3$ см и полагая,

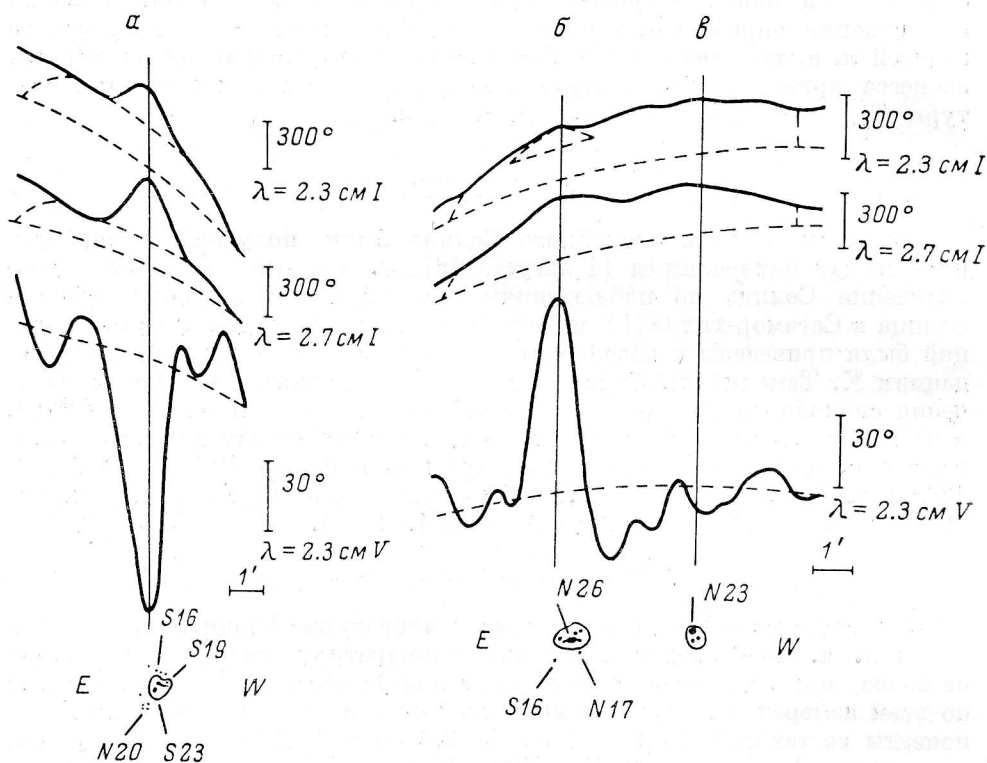


Рис. 1. Копии наблюдений на БПР л. и., связанных с группами пятен №№ 192, 203, 204.

а — № 192, 11 июля 1972 г.; б — № 204, 17 июля 1972 г. в — № 203, 17 июля 1972 г.

что размеры л. и. были близки оптическим (≈ 1.0 для группы № 204 и ≈ 0.6 для группы № 203), можно оценить величину $(T_{b.R} - T_{b.L})$, т. е. характеристику избытка необыкновенного излучения для л. и. этих групп. Для группы № 204 эта величина составляла $\sim (25-40) \cdot 10^3$ °К, а для группы № 203 была менее $25\,000$ °К. Средняя по двум поляризациям яркостная температура этих областей, по-видимому, не сильно отличалась от яркостной температуры окружающих флоккулов ($\sim 20\,000$ °К).

Группа № 212 по своим параметрам близка к описанным выше. Это — группа класса J (одиночное пятно с полутенью) площадью $S_P = 110$ м. д. п. На записях интенсивности удается выделить слабый л. и. (таблица), соответствующий этому пятну, с потоком $\Delta F_{\text{пят}} \approx 0.3 \cdot 10^{-22}$ Вт/м²·Гц и размером ≈ 0.8 , что примерно в 2.5 раза больше размера пятна. Излучение этого л. и. было не поляризовано ($p < 3\%$).

Группа пятен № 220 (рис. 2) появилась вблизи центра диска Солнца 25 июля 1972 г. По наблюдениям ГАС, сделанным за три часа до наблюдений на БПР, она состояла из двух пор и имела площадь 7 м. д. п. Соответствующий л. и. выделяется на кривых интенсивности еще слабо, но на записях поляризации виден четко. По положению он близок к поре северной полярности магнитного поля, а знак поляризации при таком отождествлении соответствует избытку излучения необыкновенной волны. Поре южной полярности, которая в дальнейшем превращается в наибольшее пятно группы, по-видимому, не дает вклада в радиоизлучение л. и.

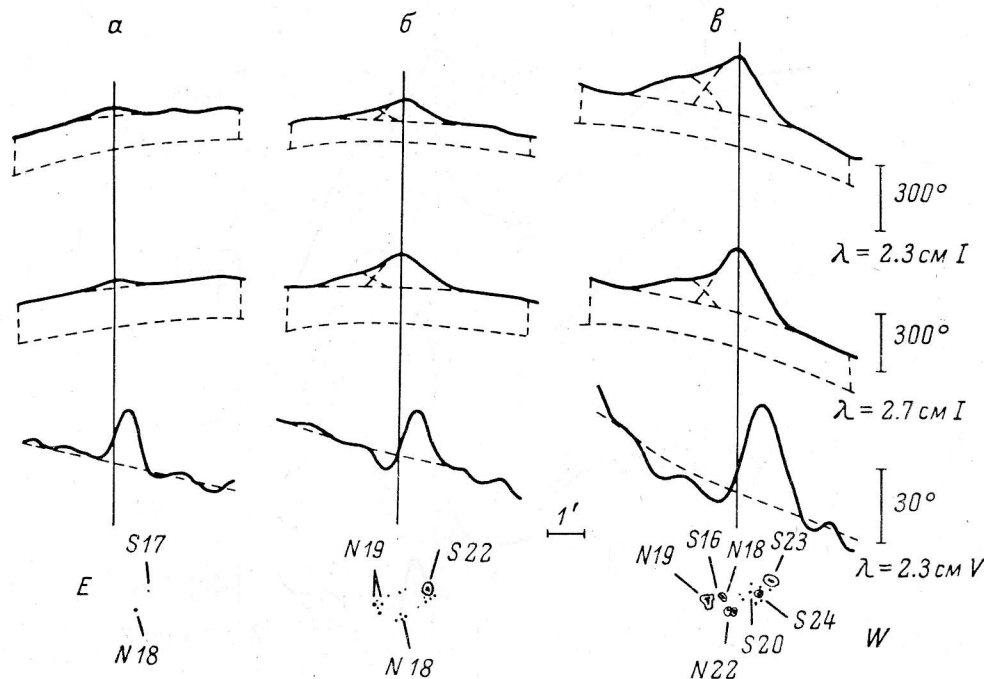


Рис. 2. Копии наблюдений на БПР л. и., связанного с группой пятен № 220.
а — 25 июля 1972 г.; б — 26 июля 1972 г.; в — 27 июля 1972 г.

26 июля 1972 г. площадь группы пятен № 220 составляла 72 м. д. п., площадь главного пятна — 48 м. д. п. Общее излучение л. и. также значительно возросло, причем распределение радиояркости по источнику было неравномерным, так что удалось разделить его на две части: главную, по положению соответствующую порам северной полярности в хвостовой части группы пятен, и последующую часть, более слабую, излучение которой, по-видимому, не поляризовано и которая по положению выходит за пределы крайних хвостовых пятен группы № 220. В таблице приведены данные только о главной части этого л. и.

27 июля 1972 г. площадь группы пятен возросла до 249 м. д. п., поток излучения л. и. также увеличился, максимум излучения л. и. по-прежнему приходился на одно из пятен северной полярности в хвостовой части группы, имелся избыток излучения, поляризованного по правому кругу. Однако степень поляризации упала до 5%, т. е. более чем в 4 раза по сравнению с 25 июля. Во все дни главное пятно группы № 220 южной полярности не давало существенного вклада в излучение л. и. Из таблицы видно, что яркостная температура л. и. ($T_{\text{б пят}}$) изменилась незначительно, так что рост потока л. и. был обусловлен в основном ростом его размера. Разность право- и левополяризованных составляющих потока также ме-

нялась незначительно, так что падение степени поляризации было связано в основном с появлением неполяризованных частей л. и.

На кривых, соответствующих группе пятен № 237 за 16 и 18 августа 1972 г. (рис. 3), виден еще один л. и., который, возможно, связан с областью, где находилась группа № 232. Эта группа в последний раз в оптическом диапазоне была зарегистрирована 16 августа 1972 г. и состояла из нескольких пор северной полярности. Группа № 232 находилась в южном полушарии Солнца, а группа № 237 — в северном.

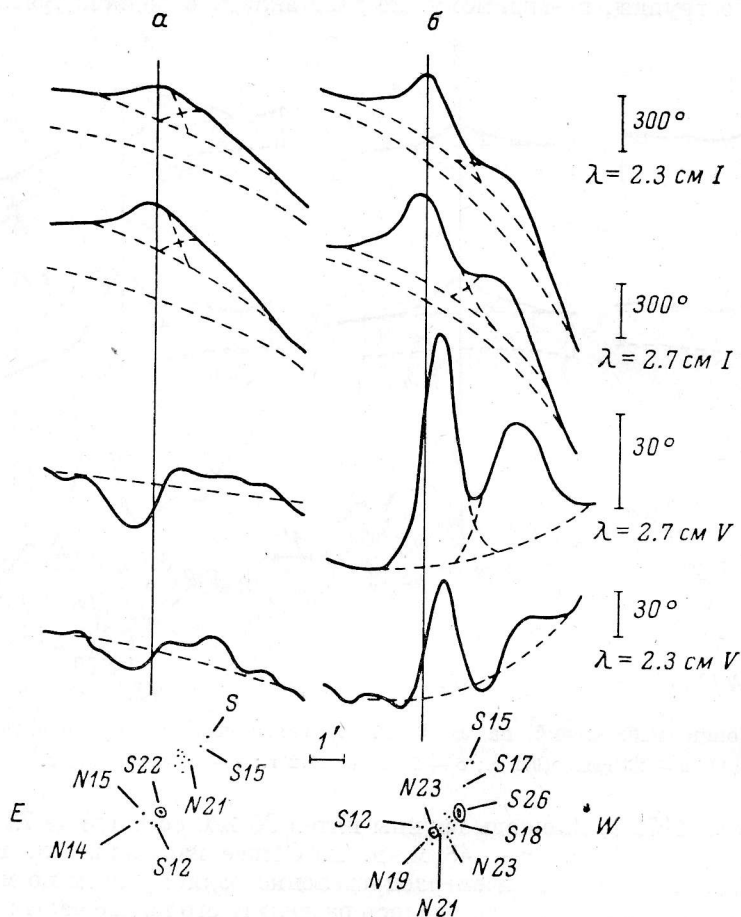


Рис. 3. Копии наблюдений на БПР л. и., связанного с группой пятен № 237.

а — 16 августа 1972 г.; б — 18 августа 1972 г.

Группа № 237 находилась в стадии развития. 16 августа ее площадь была 52 м. д. п., 18 августа — 299 м. д. п. В соответствии с этим поток л. и. увеличивался с $1 \cdot 10^{-22}$ вт/м²·гц до $3 \cdot 10^{-22}$ вт/м²·гц. Степень поляризации излучения этого л. и. была небольшой (3—10%); интересной особенностью этого л. и. явилась смена знака поляризации, которая произошла с 17 на 18 августа (см. таблицу). Из рис. 3 видно, что 16 августа максимум излучения этого л. и. по положению соответствовал наибольшему пятну группы № 237, имевшему южную полярность магнитного поля. В излучении л. и. наблюдался избыток левополяризованной составляющей. 18 августа максимум излучения л. и. переместился к востоку и совпал с одним из пятен северной полярности в хвостовой части группы. В соот-

ветствии с этим в излучении л. и. стал преобладать избыток правополяризованной составляющей. Роль главного пятна южной полярности, составляющего более 50% общей площади группы, стала незначительной. Таким образом, знак круговой поляризации все время соответствовал избытку необыкновенного излучения, а смена знака определялась перестройкой излучающей области, так что роль главного пятна в излучении л. и. падала, хотя его площадь значительно возросла. В то же время полное излучение л. и. росло в соответствии с увеличением общей площади группы пятен. 18 августа 1972 г. этот л. и. стал очень похожим на л. и. группы № 220 за 27 июля 1972 г.

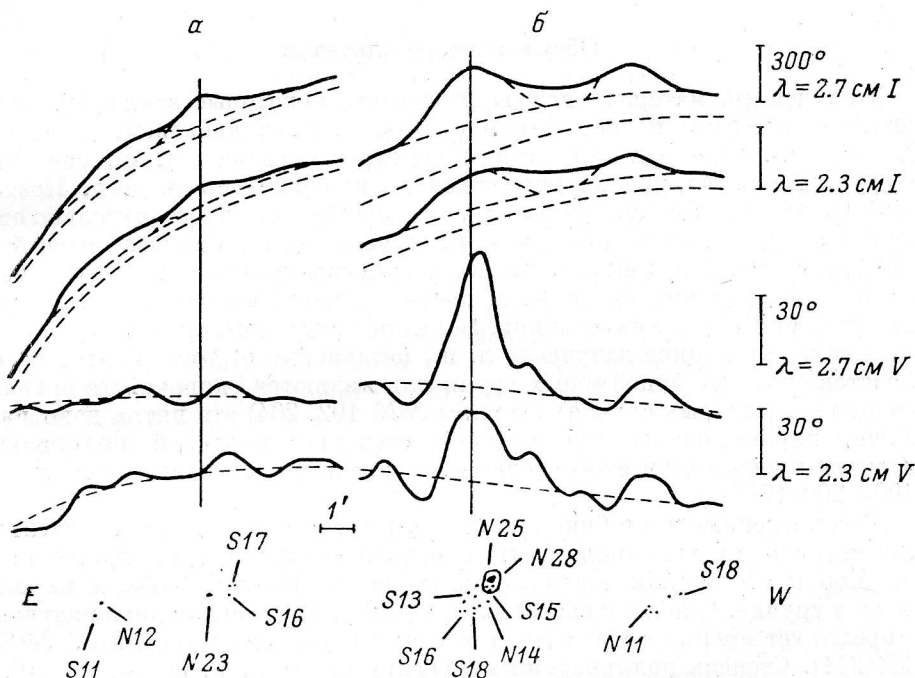


Рис. 4. Копии наблюдений на БПР л. и., связанных с группами пятен № 269 и 271.

а — № 271 (слева), № 269 (справа), 7 сентября 1972 г.; б — № 271 (слева), № 269 (справа), 9 сентября 1972 г.

Локальный источник остатка группы № 232 имел размер 1.5—1.8, яркостная температура его превышала среднюю яркостную температуру окружающих флоккулов примерно в 2 раза, степень поляризации была ~3%, знак поляризации (правый) соответствовал избытку излучения необыкновенной волны из области с северной полярностью магнитного поля. 18 августа произошла некоторая активизация этого л. и. на волне 2.7 см: поток увеличился в 2 раза, степень поляризации возросла до 8%.

Группы пятен № 269 и № 271 появились на диске 7 сентября 1972 г. (рис. 4), однако слабые л. и., соответствующие этим группам пятен, были зарегистрированы еще 6 сентября 1972 г. Эти л. и. были, по-видимому, отражением локальных уярчений флоккулов в местах будущего появления пятен. Яркостная температура этих л. и. была ~ (20—23) · 10³ °К, т. е. в 1.7 раза выше окружающего фона. Группа № 269 состояла из нескольких пор с максимальной площадью, не превосходящей 40 м. д. п. С появлением этих пор яркостная температура л. и. возросла незначительно (в 1.5 раза), появился небольшой избыток правополяризованного излучения ($P=1.5-4\%$).

Группа пятен № 271 быстро развивалась и 9 сентября имела максимальную площадь 355 м. д. п., причем главное пятно северной полярности составляло 80% всей площади. Но как видно из рис. 4, максимум излучения л. и. смещен к востоку от этого пятна, в сторону хвостовых пятен южной полярности, т. е. в радиоизлучении доля этого пятна незначительна. Из записи параметра V видно, что имеется избыток правополяризованного излучения, по положению также соответствующий хвостовым пятнам. Таким образом, в данном случае знак поляризации соответствует избытку излучения обыкновенной волны. Степень поляризации излучения достигла 9 сентября 6—7%.

Обсуждение результатов

Полученный материал позволяет сделать некоторые заключения относительно природы пятенной компоненты л. и. в диапазоне длин волн 2.3—2.7 см. Отметим, что нами рассмотрены только л. и., связанные с группами пятен, не превышающими по площади 400 м. д. п. Поэтому обнаруженные здесь некоторые закономерности могут значительно отличаться от закономерностей для л. и., связанных с группами пятен больших размеров. Следует прежде всего отметить различную роль в излучении л. и. больших пятен (т. е. пятен с хорошо выраженными тенью и полутенью) и мелких пятен и пор. Большие пятна часто не дают существенного вклада в полное излучение л. и., независимо от того, входят ли они в состав сложных биполярных групп или являются одиночными пятнами. Только в некоторых случаях (группы №№ 192, 204) эти пятна дают излучение, характеризующееся высокой степенью круговой поляризации (десятки процентов) и относительно высокими яркостными температурами ($100—200 \cdot 10^3$ К).

Рассмотренные нами биполярные группы пятен обладали значительной асимметрией: их хвостовые части в основном состояли из малых пятен или пор и составляли незначительную долю (10—30%) общей площади пятен в группе. Однако в связанных с ними л. и. основная доля излучения коррелирует именно с хвостовыми частями групп пятен (группы №№ 220, 237, 271). Степень поляризации излучения таких л. и. невысока (10% и менее), яркостные температуры не превышают $100\,000$ К. Л. и., соответствующие группам, состоящим из пор (группа № 269), также имеют невысокую степень поляризации (5% и менее), а яркостные температуры не превышают $40\,000$ К. По-видимому, имеется непрерывный переход к л. и., связанным с областями флоккул, где уже были пятна, или с флоккулами перед появлением пятен (группы №№ 269, 271 на начальной стадии, № 232 — на конечной). У этих л. и. степень поляризации излучения еще ниже, яркостные температуры еще меньше. Большие пятна в начальной стадии своего развития в некоторых случаях дают радиоизлучение (группа № 237), а в некоторых не дают его (группа № 220).

Из опыта наблюдений л. и. на БПР на более длинных волнах (например, наблюдения Н. Г. Петеровой круговой поляризации на $\lambda=4.4$ см [11, 17]) следует, что знак поляризации у асимметричных биполярных групп пятен коррелирует со знаком магнитного поля наиболее крупных пятен в группе, иначе говоря, на этой волне доминирует радиоизлучение из областей над главными пятнами группы. Как видно, на волнах ~ 2.5 см знак поляризации может определяться порами, а не главным пятном, и для асимметричных биполярных групп пятен может быть противоположным тому, который следует ожидать, исходя из опыта наблюдений на волнах ~ 4.5 см. Указанные особенности излучения л. и. отражают, по-видимому, различие в строении солнечной атмосферы в областях над

большими и малыми пятнами. Над большими пятнами, очевидно, следует ожидать наиболее сильных магнитных полей, и поэтому естественно предположить здесь действие магнитно-тормозного теплового излучения. Ниже приведены напряженности магнитного поля в эрстедах для различных гармоник гирочастоты s .

Номер гармоник	$\lambda = 2.3$ см	$\lambda = 2.7$ см
1	4650	3920
2	2320	1960
3	1550	1310
4	1160	980

Очевидно, трудно ожидать даже в очень больших пятнах таких величин магнитных полей, которые соответствовали бы первой гармонике гирочастоты [5]. Напряженности магнитного поля, соответствующие второй гармонике гирочастоты, вполне могут быть в областях над крупными пятнами. Наконец, поля, соответствующие $3\omega_H$ и $4\omega_H$, могут быть над большинством пятен и даже пор. Оценки показывают, что уровни четвертой гармоники гирочастоты чаще всего весьма прозрачны, хотя в некоторых случаях излучение этих слоев должно учитываться. Так, благодаря тому что оптическая толщина уровня $4\omega_H$ пропорциональна кубу электронной температуры (см. формулы в [3]), при $T_e \geq 5 \cdot 10^6$ К оптическая толщина этого уровня может достигать $\tau = 0.01 - 0.1$, а яркостная температура — несколько сотен тысяч градусов. В дальнейшем, для простоты, мы будем считать, что основную роль в излучении играют уровни $2\omega_H$ и $3\omega_H$, для которых наиболее вероятно сочетание условий, когда они являются оптически толстыми.

Особенности радиоизлучения больших пятен можно понять, предполагая наличие над ними резкого температурного скачка (от фотосферных значений до корональных) и учитывая расположение этого скачка относительно гирорезонансных уровней. Например, оба уровня (второй и третий) могут оказаться ниже начала подъема температуры. В этом случае оба уровня «холодные» и имеют примерно одинаковую температуру. Разность температур этих уровней менее $25 \cdot 10^3$ К (см. оценки для группы № 203). Можно даже предположить, что средняя яркостная температура этой области ниже яркостной температуры окружающих флоккулов. Другой случай, когда уровень $3\omega_H$ находится в начале температурного скачка: при этом средняя яркостная температура источника еще невелика, а разность температур уровней уже достаточна для того, чтобы давать заметное поляризованное излучение (группа № 204). Наконец, оба уровня попадают в область резкого роста температуры; яркость источника значительна (сотни тысяч градусов), степень поляризации высока (группа № 192). Для большинства рассмотренных нами групп, содержавших крупные пятна с площадями 100—300 м. д. п., реализовывалась первая возможность.

Для областей над малыми пятнами и порами можно рассматривать действие как магнитно-тормозного механизма, так и тормозного теплового с учетом магнитного поля. В первом случае эта часть л. и. должна представляться состоящей из маленьких ярких образований, соответствующих каждому пятну (поре), так как трудно представить, что гирорезонансы всех этих пятен образуют единую поверхность. При этом яркостная температура каждой детали должна в несколько раз превышать полученные нами оценки средних яркостных температур для всего л. и. (т. е. достигать сотен тысяч градусов). Области с необходимыми напряженностями магнитного поля находятся невысоко над этими пятнами, очевидно, значительно ниже, чем над крупными пятнами. Наличие в этих областях таких относительно высоких температур означает, что здесь должен

иметь место значительный температурный градиент, и как следствие этого — степень поляризации радиоизлучения должна быть высокой. Однако, по нашим измерениям, степень поляризации излучения этих источников редко превышает 10%.

В случае тормозного механизма можно представить, что излучает некий объем плазмы над пятнами, по размерам соответствующий л. и. и целиком пронизанный магнитным полем значительно более умеренной напряженности, чем это требуется для магнитно-тормозного излучения. Для оценки возможной величины напряженности поля воспользуемся формулой, недавно полученной Г. Б. Гельфрейхом [18], для степени поляризации излучения, выходящего из слоя неизотермической плазмы в магнитном поле:

$$P = n \frac{f_H}{f},$$

где n — логарифмический наклон спектра яркостных температур на частоте наблюдения f , f_H — гирочастота.

Отсюда для волн 2.3 и 2.7 см имеем соответственно:

$$H = \frac{4650}{n} P$$

и

$$H = \frac{3920}{n} P.$$

Наклон спектра легко определить по данным таблицы. Оказывается, что для рассматриваемого типа л. и. наклон спектра n в среднем не превышает 2 (что характерно вообще для теплового тормозного излучения). Так, для л. и. группы № 237 за 16 августа $H=115$ э южной полярности, за 18 августа $H=190-250$ э северной полярности; для л. и. группы № 269 $H=50-90$ э, для л. и. группы № 232 $H=60-160$ э. С точки зрения сохранения магнитного потока полученные величины, по-видимому, легко согласуются со значениями напряженностей магнитного поля на уровне фотосферы. Средние яркостные температуры этих л. и. в 4—8 раз выше яркостной температуры спокойного Солнца. Так как коэффициент поглощения тормозного излучения $\kappa \sim N_e^2 T_e^{-3/2}$, то это означает, что N_e в этих источниках должно быть в 3—6 раз выше, чем на соответствующих уровнях спокойной атмосферы.

На более длинных волнах ($\lambda > 3$ см) в радиоизлучение л. и. вносят вклад как области атмосферы Солнца над большими пятнами, так и над порами. Соответствующие этим волнам гирорезонансные слои ($s=2; 3$) крупных пятен находятся в области температурного скачка, причем ввиду быстрого роста T_e яркостная температура этой области может легко достигать значений $\sim 10^6$ К. Над порами температура, по-видимому, растет значительно медленнее, так что на этих волнах их яркость оказывается ниже яркости областей над крупными пятнами, которые потому и оказываются доминирующими в общем излучении л. и.

Таким образом, из сказанного выше следует, что в областях атмосферы Солнца над мелкими пятнами и порами в диапазоне длин волн ~ 2.5 см основную роль играет тормозной тепловой механизм радиоизлучения. Это подтверждается и тем, что существует непрерывный переход от л. и., связанных с хвостовыми порами биполярных групп пятен, к л. и., связанным с группами, состоящими только из пор, далее к флоккулярным образованиям, в которых были или должны появиться пятна, и затем, вероятно, к более слабым флоккулярным полям, входящим в состав активных областей на Солнце. В этом ряду яркостные температуры меняются

от 10^5 К до $20 \cdot 10^3$ К и ниже, степени поляризации излучения этих областей также падают от 10 до 1% и менее, что соответствует напряженностям магнитного поля от сотен до десятков эрстед. Однако, когда образуется достаточно крупное пятно с хорошо выраженными тенью и полутенью, атмосфера над ним существенно перестраивается. Области с корональными температурами опускаются над пятном на небольшую высоту, и возникает резкий переход от фотосферных значений температуры к корональным. Вследствие этого радиоизлучение этой области существенно отличается от радиоизлучения соседних, менее возмущенных областей.

Конечно, полностью исключить роль магнитно-тормозного излучения в диапазоне 2.5 см из областей над малыми пятнами и порами нельзя. По крайней мере в некоторых группах пятен имеются поры и малые пятна с напряженностью магнитного поля на уровне фотосферы, достигающей 2000—2500 э. Для таких пятен уровни $2\omega_D$ и $3\omega_D$ при некоторых условиях могут оказаться в областях с достаточно высокой температурой. Кроме того, по-видимому, существуют переходные стадии от поры к большому пятну. Наблюдение таких стадий особенно интересно, так как поможет понять, как и почему та или иная пора превращается в крупное пятно. Ответить на эти вопросы можно будет только после наблюдений со значительно более высоким разрешением, чем на БПР. В этом смысле мы возлагаем большие надежды на наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600.

В заключение авторы благодарят В. М. Макарова за дополнительные данные по группе № 220, М. Н. Гневышева за снимки Солнца, Г. Б. Гельфрейха и Д. В. Королькова за постановку задачи и постоянное внимание к работе.

Литература

1. В. В. Железняков. Радиоизлучение Солнца и планет. М., «Наука», 1964.
2. Г. Б. Гельфрейх и др., Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 185, 167, 1970.
3. Е. Я. Злотник, Астрон. ж., 45, 310, 1968; 45, 585, 1968.
4. Н. В. Стещенко, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 37, 21, 1967.
5. Р. Н. Иксанов, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 180, 41, 1966.
6. С. W. Allen. Astrophys. Quantities. London, 1955, p. 149.
7. V. G. Nagnibeda. Structure and Development of Solar Active Regions. Ed. K. O. Kiepenhener, Dordrecht—Holland, 1968.
8. В. Г. Нагнибеда. Канд. дисс., ЛГУ, 1970.
9. В. М. Богод, Д. В. Корольков, Изв. вузов, радиофизика, XVI, № 5, 691, 1973.
10. В. М. Богод, И. А. Ипатова, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 6, 155, 1974.
11. Г. Б. Гельфрейх, Н. Г. Петерова, Астрон. ж., 47, 689, 1970.
12. Солнечные данные, №№ 7—9, 1972.
13. Г. В. Кузнецова, Н. С. Соболева, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, № 172, 122, 1964.
14. Solar—Geophysical Data, Boulder, No. 327, p. 1, 1972.
15. Monthly Report of Solar Radio Emission, August 1972. Toyokawa, Japan.
16. Н. Такака, W. G. Report, Commission 5, URSI. Warsaw, 1972.
17. Н. Г. Петерова, А. В. Темирова, Солнечные данные, № 7, 103, 1970.
18. Г. Б. Гельфрейх, Астрон. цирк., № 699, 1972.