

ИССЛЕДОВАНИЕ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ S-КОМПОНЕНТЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Н. Г. Петерова

Приводятся результаты исследований поляризованного по кругу радиоизлучения 75 источников S-компоненты по наблюдениям 1967—1970 гг. на Большом пулковском радиотелескопе на волне 4.4 см с разрешением ~ 1.8 угл. мин. Все источники принадлежали практически униполярным группам пятен, $\sim 80\%$ площади которых содержали магнитное поле одной полярности. Для обеспечения исследований собственной поляризации локальных источников (л. и.) рассматривались только определенные периоды из жизни указанных л. и., когда на поляризованное излучение л. и. не оказывали влияние условия распространения.

Оказалось, что во всех случаях (за исключением одного) степень поляризации P в этом диапазоне волн не превышает 40%, будучи в среднем равной 11%. Найдено, что с ростом площади пятен увеличивается и средняя степень поляризации, достигая $\sim 17\%$ у л. и., сопровождающих группы пятен площадью ~ 800 м. д. п., однако при дальнейшем росте площади (до 2000 м. д. п.) средняя степень поляризации падает до 10%. Получено, что степень корреляции плотности потока поляризованного излучения с площадью групп пятен несколько хуже, чем для неполяризованного излучения на той же волне. В большинстве случаев имеется направленность поляризованного излучения, иногда близкая к закону $P \sim \cos^3 L$ (L — гелиографическая долгота л. и. от центрального меридиана).

Результаты наблюдений объясняются в рамках гипотезы о магнитно-тормозном происхождении поляризованной составляющей излучения источников S-компоненты. Делаются некоторые выводы о градиенте температур в атмосфере Солнца над активной областью.

Results are presented of investigation of circularly polarized radio emission from 75 sources of the S-component using the observations of 1967—1970 with the Large Pulkovo Radio Telescope at a wavelength of 4.4 cm, with a dispersion of ~ 1.8 min of arc. All the sources practically belonged to unipolar spot groups, ~ 80 percent of the area of which contained a magnetic field of one polarity. To make possible the investigation of intrinsic polarization of local sources (LS), only those periods in the life of the indicated LS have been considered, within which the polarized radiation from the LS is not affected by propagation conditions.

It has turned out that in all the cases (but for one) the degree of polarization (P) in this wavelength region does not exceed 40 percent, being, on the average, equal to 11 percent. It is found that the degree of polarization increases with increasing area of spots, reaching ~ 17 percent for the LS accompanying the spot groups whose area is 800 millionths of visible hemisphere. However, at a further increase of the area (up to 2000 millionths of visible hemisphere), the mean degree of polarization drops to 10 percent. It is obtained that the degree of correlation between the polarized radiation flux density and the area of spot groups is somewhat worse than for unpolarized radiation at the same wavelength. In most of the cases there is the directivity of polarized radiation sometimes close to the law $P \sim \cos^3 L$ (L is the heliographic longitude of LS from the central meridian).

The results of observations are explained in the framework of the hypothesis on synchrotron origin of the polarized component of radiation from the S-component sources. Some inferences are made on the temperature gradient in the solar atmosphere above an active region.

Введение

Круговая поляризация S -компоненты радиоизлучения Солнца была впервые обнаружена по наблюдениям на волне $\lambda=10$ см [1]. В дальнейшем оказалось, что поляризация излучения характерна для S -компоненты во всем см- и мм-диапазоне волн [2—5]. Наблюдениями было установлено, что: 1) источники поляризованного излучения малы по своим размерам и приближаются к размерам отдельных пятен соответствующей им группы; 2) знак поляризации обычно соответствует преобладанию необыкновенной волны в излучении этих источников, хотя он может и меняться при перемещении активного центра по диску Солнца; 3) излучение локальных источников (л. и.) S -компоненты поляризовано частично, причем степень круговой поляризации в диапазоне 3 см больше, чем на волнах 7—10 см.

Первоначально поляризация см-излучения л. и. объяснялась в рамках теплового тормозного механизма излучения [6, 7]. Впоследствии поляризацию л. и., связанных с пятнами, стали интерпретировать на основе теории магнитно-тормозного механизма излучения тепловых электронов на гармониках гирочастоты в магнитном поле пятна [8]. Последний вариант интерпретации в настоящее время является наиболее распространенным.

Для выяснения природы излучения л. и. наибольшее значение имеет исследование частотного спектра S -компоненты, однако весьма полезными при этом могут оказаться и сведения о поляризации. При построении моделей л. и. всегда должны учитываться поляризационные данные, ибо с их помощью можно по крайней мере уменьшить неоднозначность интерпретации, главным образом при наличии особенностей (нарушение монотонности) в спектре л. и.

Для астрофизики исследование поляризации радиоизлучения л. и. интересно теми возможностями, которые оно открывает для изучения корональных магнитных полей активной области, пока мало доступных для других (оптических) методов измерения полей. Следует отметить, что важную роль при этом играет выбор механизма излучения. При магнитно-тормозной природе излучения л. и. поляризация в см-диапазоне волн является хорошим индикатором сильных магнитных полей. Спектральное исследование поляризации сможет дать довольно подробное распределение поля над активной областью в том случае, если при этом будет достаточно надежно измерена высота источника поляризованного излучения.

Несмотря на всю ценность исследований поляризации л. и., следует признать, что до сих пор они развиты недостаточно. Обусловлено это значительными трудностями поляризационных измерений, связанных прежде всего с требованием большой разрешающей способности наблюдений. В силу этого основные сведения о поляризации л. и. были получены во время солнечных затмений. Однако хорошо известно, что затменные наблюдения эпизодичны и потому непригодны для статистических исследований, а также для исследования динамических процессов. В настоящее время установлено [9], что характеристики л. и. очень разнообразны и довольно сильно меняются со временем. В связи с этим возникает необходимость регулярных наблюдений, на основе которых в будущем может быть построена динамическая модель л. и. Именно такой интерес представляют собой регулярные наблюдения Солнца, ведущиеся на БПР с 1964 г. Разрешающая способность этого инструмента в см-диапазоне волн далеко уступает затменной, однако с его помощью могут быть получены интегральные характеристики л. и., которые, по всей вероятности,

позволяют судить об основных особенностях строения атмосферы над активной областью.

Методика наблюдений и их обработка

Наблюдения Солнца в диапазоне 4.4 см с анализом круговой поляризации проводятся на БПР, начиная с января 1967 г. Как известно [10], диаграмма БПР обладает сложными поляризационными характеристиками, затрудняющими исследование круговой поляризации. Для учета и компенсации паразитных эффектов этого инструмента было предложено несколько способов, при наблюдениях на 4.4 см использовались два из них. Первый является расчетным, и основан он на введении поправок при обработке наблюдений [11]. В случае солнечных измерений строгое применение расчетной компенсации паразитной поляризации сопряжено с целым рядом трудностей, связанных с тем, что Солнце является протяженным источником со сложным распределением яркости, которое нам неизвестно. Поэтому специально для Солнца был предложен упрощенный вариант редуцированного учета паразитных эффектов БПР [12], который позволяет по известной записи интенсивности рассчитать диаграммный паразитный сигнал канала круговой поляризации. Предлагаемый метод базируется на том обстоятельстве, что паразитная поляризационная диаграмма БПР по полю является производной от основной [13]. Можно показать, что с точностью до членов второго порядка малости это выполняется и для диаграммы по мощности, т. е.

$$D^{VI} = k \frac{d}{dx} D^{II*}, \quad (1)$$

где D^{II} — обычная диаграмма направленности антенны (отклик на неполяризованный точечный источник), D^{VI} — паразитная диаграмма по параметру Стокса V (круговая поляризация), k — коэффициент пропорциональности, полученный расчетным путем для центрального сечения горизонтальной диаграммы направленности БПР [14] и редуцированный для других сечений на основе экспериментального исследования паразитных свойств БПР по слабо поляризованным л. и. униполярных солнечных пятен, а также некоторым дискретным источникам.**

В этом случае паразитный сигнал канала круговой поляризации $V_{\text{пар}}(x)$ можно найти, дифференцируя запись интенсивности $I(x)$ и приводя ее к соответствующему масштабу.

В другом методе, использованном при наблюдениях на волне 4.4 см, паразитная кросс-поляризационная составляющая поля, возникающая в раскрыве БПР, устранялась поляризационным фильтром (сетка из искривленных проводов), помещаемым между облучателем и отражателем антенны [14].

Анализ поляризации на волне 4.4 см выполнялся с помощью двухканального поляриметра [7], который осуществлял одновременную регистрацию параметров Стокса I и V . Волноводная система поляриметра несколько менялась при переходе от одного метода компенсации паразитной поляризации к другому: в первом случае использовался круглый облучатель, во втором — система из двух прямоугольных облучателей с ортогональными плоскостями поляризации. Параметры облучателей

* Выражение (1) справедливо только для л. и., который можно считать точечным для вертикальной диаграммы БПР. Паразитный сигнал, обусловленный спокойным Солнцем, учитывался чисто эмпирически.

** Наблюдения дискретных источников были выполнены автором на волне 4.0 см с помощью высокочувствительного радиометра [15].

были выбраны так, что переход от круглого к прямоугольному облучателю не сопровождался изменением диаграммы направленности БПР на этой волне.

Приемник поляриметра был супергетеродинным модуляционного типа, шумовая чувствительность (σ) которого в канале интенсивности I составляла 2° К при $\tau=2$ сек. Чувствительность этого приемника позволяла по наблюдениям на БПР регистрировать довольно слабые л. и., плотность поляризованного потока излучения которых составляла $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ от полного потока Солнца. Гораздо больший вклад в погрешность поляризационных измерений на БПР вносили другие источники ошибок. К ним прежде всего следует отнести: 1) наличие в канале круговой поляризации сигнала, пропорционального I ; 2) некоторую неоднозначность выделения л. и. на фоне более протяженных источников; 3) паразитный диаграммный эффект, который в присутствии первых двух источников ошибок также приводил к появлению погрешности измерений плотности поляризованного потока излучения. Анализ всех перечисленных ошибок показал, что при расчетной компенсации паразитных эффектов суммарную степень поляризации л. и. на волне 4.4 см можно измерить с точностью 0.5—1.0%. При использовании сеточной компенсации паразитной поляризации БПР нам удалось реализовать примерно такую же точность измерений.

После учета паразитной поляризации наблюдения обрабатывались методами [16], обычными для инструментов с «ножевой» диаграммой направленности. Особенности обработки наблюдений на волне 4.4 см были изложены ранее в [17] при исследовании неполяризованного излучения л. и. на этой волне.

В настоящей работе использовались поляризационные наблюдения Солнца на волне 4.4 см 1967—1970 гг. Для уменьшения некоторой недостаточности разрешающей способности БПР при исследовании поляризации потребовался особый отбор наблюдательного материала. Дело в том, что на волне 4.4 см по наблюдениям на БПР в большинстве случаев возможно изучение лишь суммарной степени поляризации, которая для составного л. и., сопровождающего биполярную или мультиполярную группу пятен, может быть существенно занижена вследствие компенсации вкладов противоположной полярности в общее излучение л. и. Для ограничения этого эффекта при исследовании поляризации выбирались только те л. и., которые принадлежали группам пятен с сильным преобладанием одной магнитной полярности (более 80% по площади группы). При таком отборе материала суммарные поляризационные характеристики можно рассматривать как средние для сложного, но униполярного л. и.

Поскольку в данной работе ставилась задача исследования собственной поляризации л. и., результаты наблюдений были освобождены от влияния условий распространения, которое в см-диапазоне волн, согласно [18], характерно для большинства ($> 50\%$) л. и. С этой целью из рассмотрения были исключены все те периоды жизни л. и., когда изменения в поляризованном излучении можно приписать влиянию условий распространения. Всего для статистического исследования было выбрано 75 л. и., отвечающих обоим указанным выше требованиям, что дало возможность измерить поляризационные характеристики в 330 случаях.

Результаты наблюдений

По наблюдениям на БПР были исследованы интенсивность и эффективные размеры источников поляризованного излучения, а также направленность этого излучения. Попутно проводилось сопоставление с пло-

щадью соответствующих им групп пятен (S_p и S_d). * Кроме того, изучалась зависимость поляризованного излучения л. и. от стадии развития центра активности. Поскольку развитие поляризованного излучения на примере одного л. и. проследить практически невозможно из-за влияния условий распространения, проблема развития исследовалась статистически на основе морфологической классификации Вальдмайера. ** Известно [19], что эта классификация в строгом смысле слова не является генетической, и что ее классы только в основном характеризуют фазу развития группы

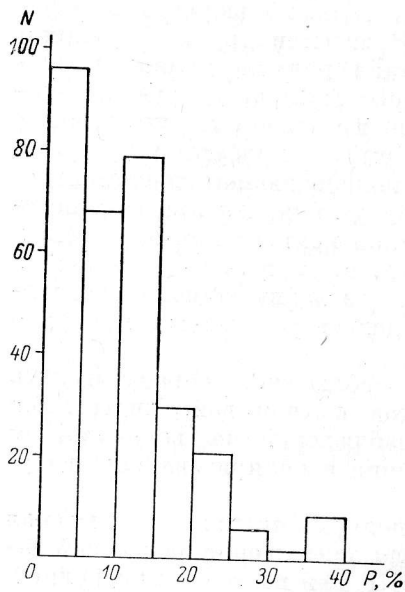


Рис. 1. Гистограмма распределения степеней поляризации (P) локальных источников S -компоненты радиоизлучения Солнца на волне 4.4 см (общее число случаев $N=330$).

пятен. В настоящей работе она использовалась как получившая широкое распространение. Приводимое ниже описание процесса развития поляризованного излучения л. и. нужно понимать с указанными выше оговорками.

Наблюдениями на БПР установлено, что в отсутствие влияния условий распространения знак поляризации на волне 4.4 см в подавляющем большинстве случаев соответствует преобладанию необыкновенной волны в излучении л. и. Оказалось, что при этом суммарная степень поляризации л. и. (P) на этой волне колеблется в довольно широких пределах — от 0 до 40%; в среднем по всем случаям она равна $(10.9 \pm 5.1)\%$. Распределение степеней поляризации представлено на рис. 1, откуда видно, что л. и. на волне 4.4 см поляризованы сравнительно слабо: практически P резко ограничена величиной $\sim 15\%$ (240 случаев).

В результате сопоставления с оптическими характеристиками обнаружилось, что по мере развития (усложнения) группы пятен и увеличения

ее площади растет средняя степень поляризации л. и., однако эта тенденция обладает рядом особенностей: 1) в начальной стадии восходящей ветви развития (до класса D) плавно нарастает степень поляризации, а поток поляризованного излучения F^V увеличивается почти на порядок в соответствии с увеличением средней площади группы пятен (рис. 2); 2) при переходе к высшей фазе развития (от D к E) скачкообразно (приблизительно в 2 раза) увеличивается степень поляризации и в еще большей степени (приблизительно в 3.5 раза) растет поляризованный поток, в то время как средняя площадь увеличивается примерно вдвое; 3) в максимальной стадии развития (класс F) степень поляризации несколько падает по сравнению с л. и. класса E, а поток поляризованного излучения продолжает расти, правда, уже гораздо медленнее, отставая от площади по скорости развития приблизительно в 1.4 раза; 4) на нисходящей ветви развития степень поляризации несколько возрастает (в 1.3 раза при переходе из класса F в H), а затем снова падает (класс J). При этом монотонно уменьшается и поток поляризованного излучения, однако

* Сведения об этих характеристиках брались из бюллетеня «Солнечные данные» (Пулкovo).

** Принадлежность группы пятен к определенному классу устанавливалась по данным бюллетеня «Map of the Sun» (Цюрих).

при разрушении активного центра наблюдается некоторое «послесвечение» поляризованного источника по сравнению с восходящей ветвью развития.

Из указанной схемы выпадают л. и. групп пятен класса G, которые в поляризованном излучении обладают пониженной излучательной способностью (более чем в 1.5 раза по сравнению с классом H). Эта особенность л. и. класса G отмечалась и в неполяризованном излучении [17].

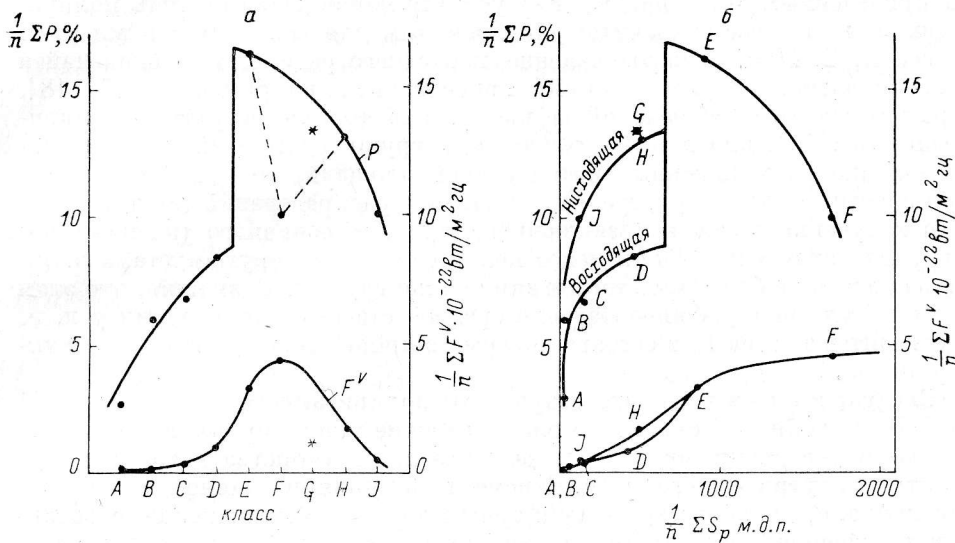


Рис. 2. Зависимость средней степени поляризации $\frac{1}{n} \sum P$ и плотности потока поляризованного излучения $\frac{1}{n} \sum F^V$ локальных источников на волне 4.4 см от класса соответствующих им групп пятен (а) и их средней площади $\frac{1}{n} \sum S_p$ (б).

Подмеченные закономерности в поведении средних поляризационных характеристик проявляются на фоне значительной дисперсии, о которой можно судить по данным табл. 1, где приведены среднеквадратичные ошибка и отклонение средней степени поляризации.

Однако указанные выше закономерности, по-видимому, реально существуют, ибо им можно найти косвенное подтверждение. В частности,

ТАБЛИЦА 1

Класс	Число случаев	$\frac{1}{N} \sum P, \%$	Среднеквадратичное отклонение	Среднеквадратичная ошибка
A	4	2.6	3.6	2.0
B	13	5.9	5.9	0.8
C	25	6.7	6.2	5.4
D	55	8.4	6.3	3.9
E	51	16.3	8.1	5.1
F	14	10.0	4.5	1.7
G	13	13.3	8.2	5.1
H	58	13.0	9.4	8.1
J	75	10.0	8.5	5.5

тенденция роста степени поляризации л. и. по мере развития центра активности (до класса E) обнаруживается и в поведении максимальных значений этой величины, зафиксированных для л. и. данного класса.*

Класс	A	B	C	D	E	F	G	H	J
$P_{\min}, \%$	<1	<1	<1	<1	<1	3	<1	<1	<1
$P_{\max}, \%$	9	17	22	38	42	15	26	38	40

Из приведенных выше данных следует, что наибольшая степень поляризации л. и. класса F значительно ниже, чем для соседних с ними л. и. класса D, E, H и J. Подтверждение последнего результата можно найти и среди затменных наблюдений, приведенных, например, в [7, 18]. В результате этих наблюдений зафиксирована тонкая структура поляризованного излучения л. и. двух сложных групп, состоявших из нескольких близко расположенных пятен разной площади, но одной магнитной полярности. Анализ приведенных в [7, 18] распределений поляризованного излучения позволяет заключить, что л. и. основного (по площади) в группе пятна может быть менее поляризован, чем другие детали л. и., принадлежащие более мелким пятнам той же группы. Возможно, что этим объясняется обнаруженное падение средней степени поляризации у л. и. групп пятен класса F, в составе которых обычно имеется несколько крупных пятен.

Следует иметь в виду, что результаты поляризационных исследований на БПР на волне 4.4 см, даже принадлежащие униполярным л. и., все же являются усредненными по всем деталям л. и., свойства которых могут меняться внутри одного л. и. Кроме того, поляризованное излучение, как правило, сравнивается с суммарным для всего л. и. неполяризованным излучением, область генерации которого значительно шире первой. Согласно измерениям на БПР [17], линейные размеры источников неполяризованного излучения на волне 4.4 см вдоль суточной параллели в среднем по всем л. и. составляют 2.1 угл. мин. Аналогичная величина в поляризованном излучении не превышает 1 угл. мин. для л. и. всех классов, исключая E и F. Для двух последних эффективные размеры области, внутри которой генерируется поляризованное излучение, несколько больше: для л. и. класса E они близки к 1.1 угл. мин., а для F — к 1.8 угл. мин. В связи с этим максимальная степень поляризации источников поляризованного излучения всех типов превышает полученную для л. и. в целом, в отдельных случаях, возможно, приближаясь к 100%.

Корреляционный анализ связи плотности потока поляризованного излучения с площадью групп пятен показал их относительно слабую зависимость. Интересно отметить, что эта связь для поляризованного излучения оказалась даже хуже выраженной, чем для неполяризованного на той же волне. Если для всей совокупности точек коэффициент корреляции плотности потока неполяризованного излучения с суммарной площадью группы $r_{sp} = 0.82 \pm 0.02$, то для поляризованного $r_{sp} = 0.66 \pm 0.03$. Этот результат является несколько неожиданным, поскольку на основе затменных наблюдений следовало бы ожидать улучшения связи поляризованного излучения с площадью пятен.** На самом деле для

* Одновременно результаты статистики свидетельствуют и о том, что отбор материала наблюдений для исследования поляризации был выполнен правильно. В противном случае вследствие недостаточной разрешающей способности БПР на волне 4.4 см степень поляризации л. и. биполярных групп пятен оказалась бы слишком низкой по сравнению с униполярными. На самом деле $P_{\max}(D, E) \approx P_{\max}(H, J)$, а $\bar{P}(E) > \bar{P}(H, J)$.

** Указанное предположение базируется на хорошем совпадении размеров и координат поляризационных источников и соответствующих им пятен, а также на отсутствии в распределении яркости протяженного источника, по размерам сравнимого с общими размерами группы.

отдельных типов л. и. эта связь практически отсутствует, о чем можно судить по данным табл. 2. Некоторое исключение составляют л. и. класса Н, для которых степень корреляции поляризованного и неполяризованного излучения с площадью близки между собой: $r_{S_p(I)} = 0.67 \pm 0.08$, а $r_{S_p(V)} = 0.77 \pm 0.05$.

Высота источников поляризованного излучения была оценена по наблюдениям во время солнечных затмений 22 сентября 1968 г., 11 сентября 1969 г. и 7 марта 1970 г.,* которые были выполнены на волне 4.5 см с помощью малого радиотелескопа (диаметр зеркала 3 м). Эффективная высота области генерации поляризованного излучения была опре-

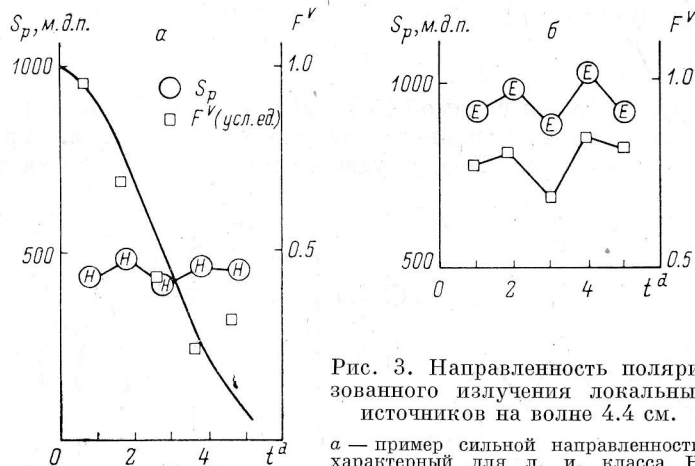


Рис. 3. Направленность поляризованного излучения локальных источников на волне 4.4 см.

а — пример сильной направленности, характерный для л. и. класса Н; сплошная линия — $\cos^3 L$ (L — долгота л. и. от центрального солнечного меридиана); б — случай отсутствия направленности, нередко наблюдаемый у л. и. высокоразвитых групп пятен.

делена для 5 л. и. Оказалось, что во всех случаях она не превышает $0.02 R_{\odot}$, в некоторых случаях будучи практически нулевой ($h \approx 0.005 \pm 0.005 R_{\odot}$). Малость высот источников поляризованного излучения делает нецелесообразным статистическое исследование этой характеристики по наблюдениям на БПР, ибо точность этих измерений сравнима с измеряемой величиной. Поэтому наблюдения на БПР были использованы только для оценки нижней границы высот источников поляризованного излучения, которые можно выполнить по наблюдениям восходов и заходов л. и. Для этой цели было выбрано около 10 случаев, когда л. и. группы пятен класса Н или J в момент наблюдений на БПР находился вблизи лимба Солнца ($L = 90^\circ \pm 5^\circ$). Во всех случаях наблюдалось поляризованное излучение (степень поляризации $P = 2-20\%$). Отсюда следует, что по крайней мере верхняя часть источника поляризованного излучения не может слишком низко располагаться над фотосферой ($h < 5 \cdot 10^3$ км), ибо в противном случае она экранировалась бы непрозрачной и холодной хромосферой.

К вопросу о высоте тесно примыкает проблема направленности поляризованного излучения. Согласно результатам статистического исследования, направленность поляризованного излучения выражена более четко, чем неполяризованного, ибо коэффициент корреляции интенсивности поляризованного излучения увеличивается при переходе от истинной

* В наблюдениях двух последних затмений принимали участие Г. Б. Гельфрейх и А. Н. Коржавин.

ТАБЛИЦА 2

Класс	Число случаев	$r_{S_p} \pm \sigma$	$r_{S_d} \pm \sigma$
B	13	0.23 ± 0.27	0.23 ± 0.27
C	25	0.57 ± 0.14	0.62 ± 0.12
D	55	0.27 ± 0.13	0.47 ± 0.11
E	51	0.43 ± 0.12	0.54 ± 0.09
F	14	0.79 ± 0.11	0.69 ± 0.14
G	13	0.47 ± 0.22	0.71 ± 0.14
H	58	0.77 ± 0.05	0.85 ± 0.04
J	75	0.14 ± 0.11	0.32 ± 0.10
Все точки	330	0.66 ± 0.03	0.72 ± 0.03

площади группы (S_p) к видимой (S_d) (табл. 2). * Особенно хорошо заметна направленность поляризованного излучения для л. и. групп пятен класса H, во многих случаях ее удается проследить даже на примере от-

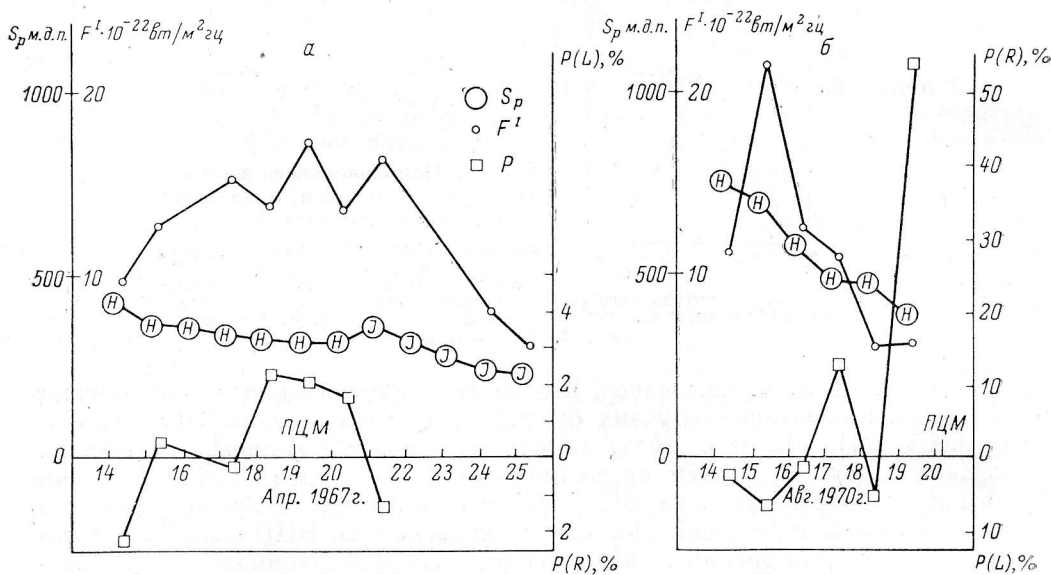


Рис. 4. Необычный характер поляризации локальных источников на волне 4.4 см. а — отсутствие поляризованного излучения у л. и. группы пятен № 132, 1967 г. в течение всего периода наблюдений; б — переменность знака поляризации у л. и. группы пятен № 375, 1970 г.

дельного л. и. (рис. 3, а). Характер изменения интенсивности поляризованного излучения в зависимости от положения л. и. на диске Солнца (исключая большие долготы $L=80-90^\circ$) в приведенном примере (л. и. группы № 432, 1970 г.) близок к $\cos^3 L$. С другой стороны, л. и. групп пятен более сложной структуры нередко демонстрируют полное отсутствие направленности излучения (рис. 3, б; л. и. группы № 385, 1967 г.), что уже отмечалось в [12].

Изучение л. и. показало, что на волне 4.4 см поляризованная по кругу составляющая, как правило, всегда присутствует в излучении л. и., причем знак поляризации соответствует избытку необыкновенной волны.

* В случае неполяризованного излучения оказалось, что на волне 4.4 см $r_{S_p} = r_{S_d}$ [17].

Среди исследованных случаев имеется лишь единственный (л. и. группы пятен № 132, 1967 г.), когда поляризованное излучение л. и. от восхода до захода практически отсутствовало (рис. 4, а). Следует отметить, что этот л. и. был расположен на очень большой широте, так что во все время наблюдений расстояние от него до центра Солнца (r/R_{\odot}) было больше 0.5. В силу этого характер поляризации л. и. группы пятен № 132 можно объяснить сильной направленностью излучения (кстати, он принадлежал к классу Н).

В нескольких случаях ($N \approx 10$) была зафиксирована переменность знака поляризации. Для исключения ошибок методического происхождения такой пример приведен на рис. 4, б только для л. и. одной из униполярных групп пятен (№ 375, 1970 г., класс Н): интенсивность поляризованного излучения этого л. и. при монотонном падении площади группы колеблется вблизи нуля с амплитудой ~ 1 ед. потока ($P \approx 10\%$).

Обсуждение результатов

Исследование неполяризованного излучения источников S-компоненты, выполненное ранее на волне 4.4 см [17], показало, что это излучение носит тепловой характер. В пользу этого свидетельствует устойчивость излучения, а также наблюдаемая величина яркостных температур, максимальные значения ($3-4 \cdot 10^6$ К) которой не превосходят корональных температур. Там же была обнаружена тесная связь излучения на этой волне с сильными магнитными полями пятен. Анализ поляризованного излучения показал, что последний вывод в еще большей мере относится и к этой составляющей излучения л. и. По наблюдениям на БПР на примере многочисленных случаев удалось установить, что источники поляризованного излучения имеют весьма малые размеры. Этот результат совместно с затменными наблюдениями надежно подтверждает тот факт, что источники поляризованного излучения в коротковолновой части спектра располагаются только вблизи сильных магнитных полей пятен. Полученные результаты наблюдений позволяют использовать для интерпретации см-излучения л. и. (особенно поляризованного) тепловой магнитно-тормозной механизм излучения.

Располагая сведениями о л. и. только на одной волне, трудно судить о физических условиях в источнике излучения, тем более, что электронная температура (T_e) и плотность (N_e), а также магнитное поле имеют сложное распределение над центром активности. Поэтому результаты статистического исследования на волне 4.4 см будут прокомментированы на основе модели одного л. и. (сопровождавшего группу пятен № 105, 1970 г., класс Е), которую удалось построить благодаря наличию обширной высококачественной информации об этом источнике во всем см-диапазоне волн [20]. При построении этой модели использовались представления об источнике излучения, обусловленном совместным действием тормозного и магнитно-тормозного механизмов излучения, развиваемые в работах [8, 21]. На рис. 5 показано полученное в [20] распределение T_e с высотой h в атмосфере Солнца над активной областью.* Следует отметить, что результаты расчета относятся к сложному (по структуре) л. и. и являются усредненными по всем его деталям. Это обстоятельство упрощает интерпретацию на основе указанной модели результатов статистического исследования поляризации л. и. на волне 4.4 см, которые также сглажены в силу недостаточной разрешающей способности БПР на этой волне.

* Распределение $N_e(h)$ задавалось согласно [22]. Шкала высот определялась моделью магнитного поля вертикального диполя, и в этом смысле она условна.

Из поляризационных наблюдений следует, что для области формирования коротковолнового поляризованного излучения, как правило, характерен рост электронной температуры с высотой, подобный полученному для л. и. группы № 105 (1970 г.). Этот вывод основан на том наблюдательном факте, что на волне 4.4 см знак поляризации в подавляющем большинстве случаев соответствует преобладанию в излучении необыкновенной волны.* Это не исключает возможности существования температурных распределений в источнике более сложного вида, однако с точки зрения результатов данной работы их следует признать крайне редко встречающимися. Гипотеза о сложном температурном распределении может оказаться полезной только для интерпретации таких, например, случаев,

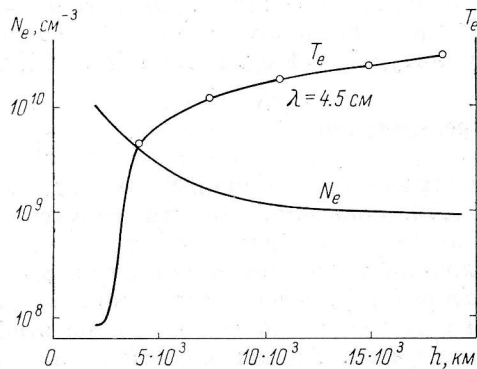


Рис. 5. Распределение электронной температуры (T_e) с высотой в атмосфере Солнца над группой пятен № 105 — 1970 г., полученное по радионаблюдениям [20]; N_e — из [22].

как представленный на рис. 4, б. Из модели л. и. группы пятен № 105, 1970 г. (рис. 5) видно, что поляризованное излучение S-компоненты на волне 4.4 см возникает довольно высоко в короне, в тех ее областях, где градиент температур уже достаточно мал ($T_e > 10^6$ К). Этим можно объяснить сравнительно низкую степень поляризации, наблюдаемую в среднем у л. и. на указанной волне ($P \approx 11\%$). Наиболее очевиден этот вариант интерпретации результатов статистики для л. и. крупных групп пятен ($S_p > 500$ м. д. п.), в создании излучения которых доминирующая роль, согласно [17, 20], принадлежит магнитно-тормозному механизму излучения (на волне 4.4 см его вклад в общее излу-

чение л. и. составляет $\sim 70\%$). По мере приближения центра активности к максимальной стадии развития гирорезонансные уровни могут перемещаться все выше в корону и для л. и. класса F оказаться в области почти постоянных температур, в связи с чем у л. и. этого типа наблюдается относительное падение степени поляризации.** В пользу этой гипотезы свидетельствует и рост яркостных температур излучения с увеличением площади групп пятен, установленный ранее в [17] при исследовании неполяризованной составляющей излучения на той же волне.

Подъемом гирорезонансных уровней в более нагретые слои короны можно качественно объяснить и отсутствие направленности поляризованного излучения, часто наблюдаемое на волне 4.4 см у л. и. высоко развитых групп пятен. В этих случаях гирорезонансные уровни ($H \approx 1000$ гс на $\lambda = 4.4$ см), почти целиком находясь в короне, могут по своей форме оказаться близкими к полусфере, давая весьма заметное излучение и вблизи края Солнца. Наличие направленности излучения л. и. групп пятен малой площади может означать, что уровни слабых л. и. обрываются раньше, переходя в более холодные слои атмосферы Солнца и по форме приближаясь к плоскости.*** Не исключено, что источники поля-

* Если исходить из магнитно-тормозного механизма, то уровень генерации 3-й гармоники гирочастоты, дающий основной вклад в необыкновенную моду излучения, лежит выше, чем второй гирослой, ответственный за обыкновенное излучение.

** Именно так объясняется низкая ($\sim 2\%$) степень поляризации л. и. в дм-диапазоне волн [21].

*** При этом должна наблюдаться косинусная направленность излучения.

ризованного излучения последнего типа и геометрически располагаются ниже над фотосферой, чем источники больших пятен. В этом случае может иметь место частичная экранировка поляризованного излучения холодной материей спикул, иногда приводящая к более сильной ($\cos^3 L$) направленности излучения, зарегистрированной, к примеру, у л.и. группы пятен № 432, 1970 г. (рис. 3, а).

При интерпретации результатов наблюдений не следует забывать, что см-радиоизлучение л. и. по своей природе является многокомпонентным. В его составе, кроме поляризованной составляющей, имеется неполяризованная, заполняющая собой значительные области л. и., по размерам сравнимые с общими размерами группы пятен. Согласно [17], роль этой составляющей, которая может иметь отличное от магнитно-тормозного происхождение, на волне 4.4 см возрастает для л. и. групп пятен малой площади. Наблюдаемый характер поляризации на восходящей ветви развития центра активности, по-видимому, отражает тот факт, что с ростом площади группы вклад излучения электронов на гармониках гирочастоты постепенно увеличивается. Заметным это излучение на волне 4.4 см становится только у л. и. класса В, средняя степень поляризации которых удваивается при переходе группы из класса А (группа пор) в класс В. Наблюдения на волне 4.4 см показали, что л. и. класса А поляризованы примерно так же, как источники флоккульного происхождения (близкие к ним по размерам). Поэтому можно считать, что магнитно-тормозное излучение на волне 4.4 см появляется только с образованием полутени пятна, затем растет по мере развития центра активности, становясь преобладающим на высшей стадии развития.

Интересно отметить, что, согласно наблюдениям поляризации на 4.4 см, градиент температур оказался независимым параметром области излучения. В пользу этого свидетельствует обнаруженное ухудшение степени корреляции плотности поляризационного потока излучения с площадью пятен по сравнению с неполяризованным. Его можно понять в рамках магнитно-тормозной модели л. и., предположив, что от одного источника к другому в довольно широких пределах независимо друг от друга, кроме $T_e(h)$ и $N_e(h)$, определяющих интенсивность неполяризованного излучения, меняется еще и $\text{grad } T_e$.*

Выводы

Резюмируя исследование радиоизлучения источников S-компоненты на волне 4.4 см, можно выделить следующие результаты наблюдений.

1. Излучение л. и. в указанном диапазоне поляризовано сравнительно слабо, средняя по всем случаям ($N=330$) суммарная степень поляризации $\bar{P}=10.9 \pm 5.1\%$, а наибольшие значения этой величины не превышают 40%.

2. Размеры источников поляризованного излучения весьма малы, по наблюдениям на БПР для большинства л.и. они не превышают 1 угл. мин., в случае л. и. больших по площади групп пятен (класса Е и F) приближаются к 1.1—1.8 угл. мин. Поскольку размеры л. и. в неполяризованном свете значительно больше (в среднем они равны 2.4 угл. мин.), максимальная степень поляризации превышает суммарную, иногда достигая значений $\sim 100\%$.

3. Интенсивность поляризованного излучения л. и. связана с параметрами соответствующей ему группы пятен. Средняя степень поляризации л. и. растет по мере увеличения площади и усложнения структуры

* Наблюдаемый разброс параметров л. и. может быть интерпретирован еще и неоднородностью области излучения, которая может варьировать от одного л. и. к другому.

группы, составляя для групп класса А всего 2.6% и достигая максимальных значений $\bar{P} \approx 16\%$ у л. и. групп пятен класса Е ($\bar{S}_p \approx 800$ м. д. п.).

4. У л. и. самых крупных групп пятен класса F ($\bar{S}_p \approx 2000$ м. д. п.) наблюдается относительное (по сравнению с л. и. класса Е) уменьшение степени поляризации до значений $\bar{P} \approx 10\%$.

5. Обнаружено, что характеристики поляризованного излучения испытывают значительные отклонения от среднего. В частности, степень корреляции плотности потока поляризованного излучения с площадью группы во всех случаях оказалась относительно малой, $r_{S_p} = 0.66 \pm 0.03$. Примечательно, что эта связь у поляризованного излучения выражена слабее по сравнению с неполяризованным, для которого на той же волне $r_{S_p} = 0.82 \pm 0.02$.

6. Корреляционный анализ зависимости интенсивности поляризованного излучения от видимой площади группы пятен показал, что это излучение обладает направленностью. Особенно хорошо направленность излучения прослеживается у л. и. групп пятен класса H и в некоторых случаях приближается к закону $P \sim \cos^3 L$ (L — долгота л. и. от центрального солнечного меридиана). С другой стороны, направленность излучения у л. и. высокоразвитых групп пятен классов Е и F часто отсутствует.

7. Знак поляризации л. и. на волне 4.4 см в подавляющем большинстве случаев соответствует преобладанию в излучении л. и. необыкновенной волны. В единичных случаях знак поляризации л. и. является переменным, флуктуируя вблизи нуля (иногда с весьма значительной амплитудой колебаний $P \approx 10\%$).

Интерпретация результатов наблюдений была выполнена в рамках теории теплового магнитно-тормозного механизма излучения, на основе которой были сделаны некоторые заключения о физических условиях в источнике излучения.

а) Поляризованное излучение л. и. в диапазоне 4.4 см генерируется в короне, в тех ее слоях, где электронная температура (T_e) превышает 10^6 °К, в случае л. и. самых развитых групп пятен перемещаясь в область насыщения корональных температур.

б) Градиент температур наряду с электронной температурой, плотностью и магнитным полем является независимым параметром области излучения.

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что результаты настоящего исследования относятся к л. и. в целом и являются усредненными по всем его деталям. Следующий, качественно новый шаг в исследовании л. и. может быть сделан при значительном увеличении разрешающей способности наблюдений. Следует ожидать, что многие проблемы солнечной радиоастрономии получат более полное решение с помощью РАТАН-600, особенно если на нем будут выполняться не эпизодические, а достаточно длительные циклы наблюдений. Опыт наблюдений на БПР показал, что регулярность наблюдений является необходимым условием исследований Солнца. Высокая разрешающая способность сама по себе, как свидетельствует опыт затменных наблюдений, еще не дает возможности разобраться в сложной структуре излучения л. и. Особая ценность РАТАН-600 для наблюдений Солнца состоит в том, что он может одновременно сочетать в себе оба указанных качества, необходимых при солнечных исследованиях.

Автор выражает глубокую признательность Ю. Л. Кокорину и Л. А. Коржавиной, которые принимали участие в наблюдениях и их обработке, а также Г. Б. Гельфрейху за ценные замечания, сделанные им при чтении рукописи.

Литература

1. A. E. Covington, Proc. Inst. Radio Eng. Austr., 37, 407, 1949.
2. H. Tanaka, T. Kakinuma, Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ., 4, 78, 1956.
3. Г. Б. Гельфрейх, А. Н. Коржавин, Г. Ф. Шемякин. В кн.: Радиоастрономические наблюдения солнечного затмения 20 мая 1966 г. М., «Наука», 1972, с. 50.
4. G. Feix, Astron., Astrophys., 16, 268, 1972.
5. M. R. Kundu, T. P. McCullough, Sol. phys., 27, 182, 1972.
6. I. H. Piddington, H. C. Minnett, Austr. J. Sci. Res., A4, 130, 1951.
7. Д. В. Корольков, Н. С. Соболева, Г. Б. Гельфрейх, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 164, 81, 1960.
8. В. В. Железняков, Астрон. ж., 39, 5, 1962; 40, 829, 1963.
9. Г. Б. Гельфрейх, Ш. Б. Ахмедов, В. Н. Боровик, В. Я. Гольнев, А. Н. Коржавин, В. Г. Нагнибеда, Н. Г. Петерова, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 185, 167, 1970.
10. Г. В. Кузнецов, Н. С. Соболева, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 172, 122, 1964.
11. Г. В. Кузнецов, Изв. Глав. астрон. obs. в Пулкове, 182, 245, 1967.
12. Г. Б. Гельфрейх, Н. Г. Петерова, Астрон. ж., 47, 689, 1970.
13. Н. А. Есепкина, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 4, 157, 1972.
14. Н. А. Есепкина, В. Ю. Петрунькин, Н. С. Соболева, А. В. Рейнер, Изв. вузов, радиофизика, 14, 1149, 1971.
15. А. Б. Берлин, Д. В. Корольков, Г. М. Тимофеева, Приборы и техника эксперимента, 3, 146, 1969.
16. W. W. Christiansen, I. A. Warburton, Austr. J. Phys., 6, 190, 1953.
17. Н. Г. Петерова, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 6, 39, 1974.
18. Н. Г. Петерова, Ш. Б. Ахмедов, Астрон. ж., 50, вып. 6, 1220, 1973.
19. Ю. И. Витинский, Морфология солнечной активности. М.—Л., «Наука», 1966.
20. Ш. Б. Ахмедов, В. Н. Боровик, В. Н. Ихсанова, В. Г. Нагнибеда, Н. Г. Петерова. Материалы VII Всесоюзной конференции по радиоастрономии. Горький, НИРФИ, 1972, с. 46.
21. Е. Я. Злотник, Астрон. ж., 45, 310, 1968; 45, 585, 1968.
22. G. Newkirk, Astrophys. J., 133, 983, 1961.