

**О ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ  
ЛОКАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ S-КОМПОНЕНТЫ  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА НА ВОЛНЕ 4.4 СМ  
ОТ СТРУКТУРЫ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИМ ГРУПП ПЯТЕН**

*Н. Г. Петерова*

По материалам наблюдений Солнца с высоким разрешением (1.8 угл. мин.) в период максимума 20-го цикла солнечной активности (1967—1970 гг.) приводятся результаты статистического исследования размеров и потоков излучения локальных источников (л. и.) 95 групп пятен в зависимости от их класса. Найдено, что корреляция потока излучения л. и. с площадью соответствующих им групп пятен класса А, В, С, J отсутствует, в то время как для л. и. остальных типов она имеется и растет по мере усложнения группы пятен, будучи максимальной ( $r=0.8$ ) для л. и., принадлежащих группам пятен класса F. Показано, что наблюдаемая для л. и. группы пятен всех классов значительная дисперсия излучательной способности ( $F/S_p$ ) является их реальным свойством. Характер усредненного спектра л. и. в диапазоне 3—9 см не меняется существенно образом при переходе от слабых к сильным группам пятен. Средние размеры л. и. не зависят от класса соответствующих им групп пятен и на волне 4.4 см примерно равны 2 угл. мин. Даны оценки яркостной температуры излучения л. и., верхняя граница ( $1.6 \cdot 10^6$  K) которой согласуется с представлением о тепловом характере излучения л. и. на этой волне.

Results are presented of a statistical study of radiation and sizes of local sources (LS) of 95 groups of spots depending on their class. These results are based on high-resolution solar observation data in the maximum of the 20 th cycle of solar activity (1967—1970). It is found that no correlation exists between the radiation flux from LS and the area of corresponding to them groups of spots of A, B, C, J — classes, whereas for LS of the rest of the types it exists and grows as groups of spots become more complicated, being maximum ( $r=0.8$ ) for LS of F-class.

It is shown that the considerable dispersion of emissivity ( $F/S_p$ ) observed for LS of groups of spots of all classes is their real property. The averaged spectrum character of LS at wavelengths from 3 to 9 centimeters does not change significantly in transition from weak to strong groups of spots. Mean sizes of LS are independent of the class of corresponding to them groups of spots and at 4.4 centimeter wavelength they are about 2 minutes of arc. Estimates are given of the brightness temperature of radiation from LS whose upper limit ( $1.6 \cdot 10^6$  K) agrees with an idea of thermal nature of radiation from LS at this wavelength.

Характерной особенностью суммарной S-компоненты радиоизлучения Солнца в сантиметровом диапазоне волн является тесная связь между потоком его излучения ( $F_{\Sigma}$ ) и суммарной площадью соответствующих ему групп пятен ( $\Sigma S_p$ ) [1]. Типичный пример такой связи показан на рис. 1, где представлены результаты годовых наблюдений интегрального потока излучения Солнца на волне 4.5 см с помощью малого радиотелескопа. Коэффициент корреляции между  $F_{\Sigma}$  и  $\Sigma S_p$  обычно достаточно велик (например, на  $\lambda=4.5$  см  $r=0.83 \pm 0.04$ ), а характер зависимости между ними в широком интервале изменения площадей и спектральной плотности потока излучения близок к линейному. Однако имеющийся у этой зависимости разброс значений свидетельствует о том, что излучение отдельных локальных источников (л. и.) определяется не только площадью

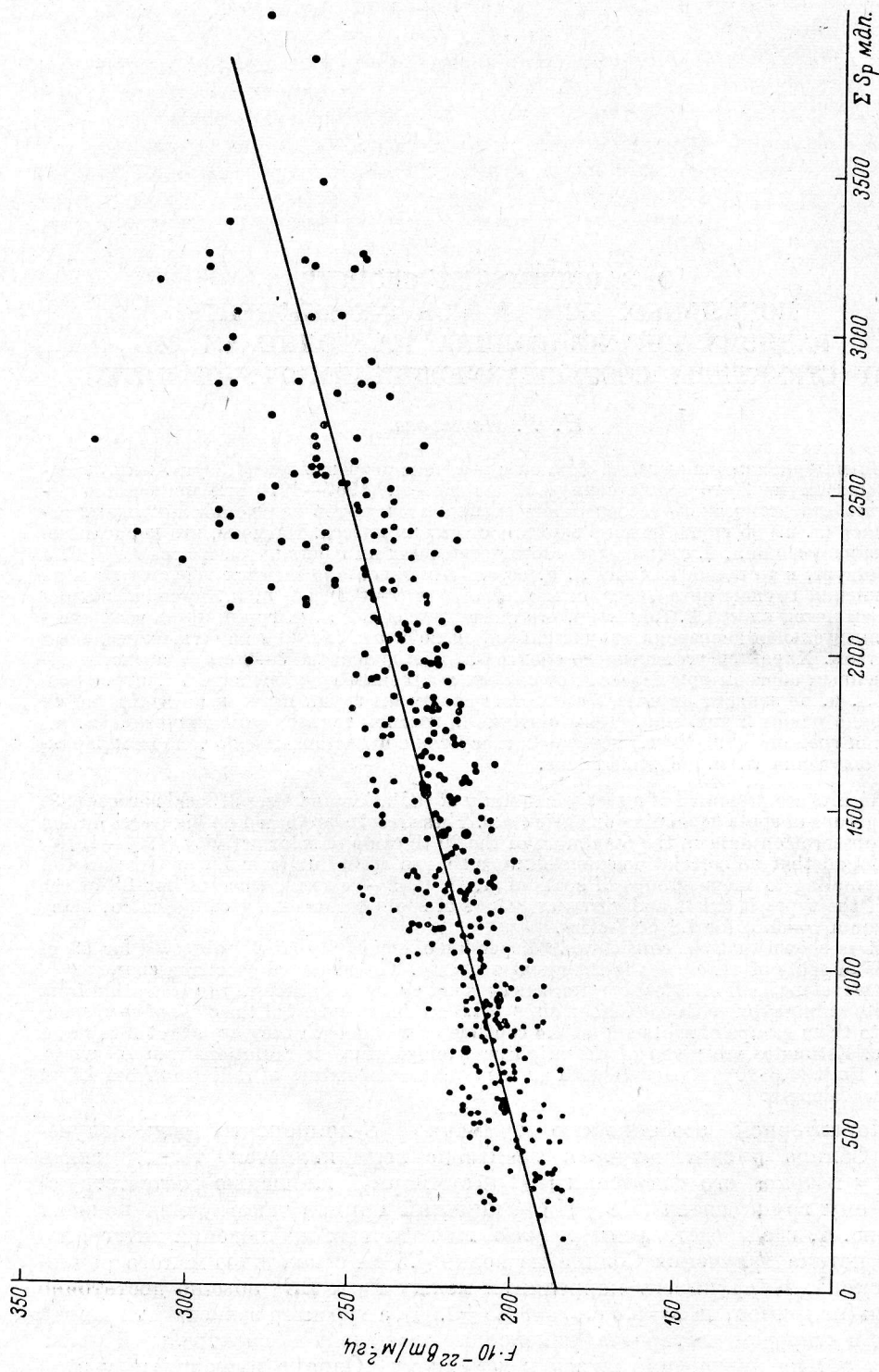


Рис. 1. Корреляционная диаграмма зависимости интегрального потока излучения Солнца на волне 4.5 см от суммарной площади пятен (Гавана, 1969—1970 гг.).

соответствующих им групп пятен. Кроме того, оно может зависеть и от других параметров области генерации, которые, как известно, сильно меняются от одного центра активности к другому [2]. Попытку улучшить корреляцию между потоком излучения л. и. и площадью соответствующих им групп пятен можно сделать, выделив какой-либо признак или ряд признаков активной области и сгруппировав по нему л. и. Так, например, можно исследовать зависимость излучательной способности л. и. от структуры соответствующих им групп пятен. Наиболее подходящим источником сведений о структуре является морфологическая классификация Вальдмайера [3], получившая широкое распространение. Кроме структуры, этой классификацией учитываются также абсолютные размеры пятен, расстояние между главными пятнами в группе, а также фаза развития группы пятен. Такая задача решалась рядом авторов [4—6] на основе совершенно различного наблюдательного материала. Согласно работе [4], выполненной по наблюдениям интегрального радиоизлучения (низкое разрешение), средняя излучательная способность в пределах ошибок является весьма устойчивой характеристикой л. и., не зависящей от длины волны, класса соответствующих групп пятен и от цикла солнечной активности. В [4] отмечается, что этот вывод делается при наличии весьма значительной дисперсии результатов, в некоторых случаях превосходящей измеряемую величину более чем вдвое. Аналогичный результат был получен по измерениям с высоким разрешением на волнах 9.0 и 3.2 см [5, 6]: излучательная способность л. и. внутри каждого класса испытывает столь значительную дисперсию (на порядок), что говорить о разнице средних излучательных способностей л. и., принадлежащих группам различных классов, весьма затруднительно. При этом оказалось, что разбиение л. и. на группы по классам не только не улучшает корреляцию потока излучения л. и. с площадью пятен, но даже несколько ее ухудшает.

Необходимость исследования л. и. на волне 4.4 см в зависимости от класса соответствующих им групп пятен диктовалась из тех соображений, что в диапазоне 2—10 см во многих случаях существуют довольно значительные различия в свойствах л. и. [7]. В частности, спектр л. и. в этом диапазоне весьма изменчив и не всегда имеет монотонный характер, демонстрируя некоторые особенности в районе 3—6 см (наличие максимума, плоские участки). Поэтому для выяснения природы излучения л. и. и физических условий в области генерации этого излучения нужны спектральные исследования с хорошим разрешением по частоте. Статистические исследования свойств л. и. на близких волнах могли бы дать некоторое представление об относительном вкладе в общее излучение л. и. того или иного механизма, если бы удалось обнаружить какую-то зависимость степени корреляции потока с площадью от длины волны.

Попутно с изучением излучательных способностей л. и. оказалось возможным на большем материале проверить результаты исследования размеров л. и. [8]. В [8] найдено, что средние размеры л. и. униполярных \* групп пятен на волне 4.4 см в 1.5 раза больше размеров л. и. биполярных и мультиполярных групп пятен для периода минимума солнечной активности (1964—1965 гг.).

Настоящая работа была выполнена по наблюдениям автора на Большом пулковском радиотелескопе (БПР) на волне 4.4 см в 1965—1970 гг. Для исследования отобрано около 100 л. и., каждый из которых наблюдался в течение нескольких дней, что в общей сложности дало около

\* Термин «униполярный» (биполярный) здесь и далее употребляется условно, ибо речь идет не о магнитной, а о морфологической классификации групп пятен.

500 случаев для определения параметров л. и. Следует отметить, что результаты этого исследования можно считать относящимися к периоду максимума 20-го цикла солнечной активности, ибо 80% всего материала приходится на 1967—1970 гг. Основными источниками сведений об оптических характеристиках групп пятен послужили бюллетень «Солнечные данные» (Пулково), из которого брались площади групп пятен  $S_p$  и  $S_{p,2}$ , а также бюллетень Фраунгоферовского института «Map of the Sun» (Цюрих), из которого заимствовался класс группы пятен. Дополни-

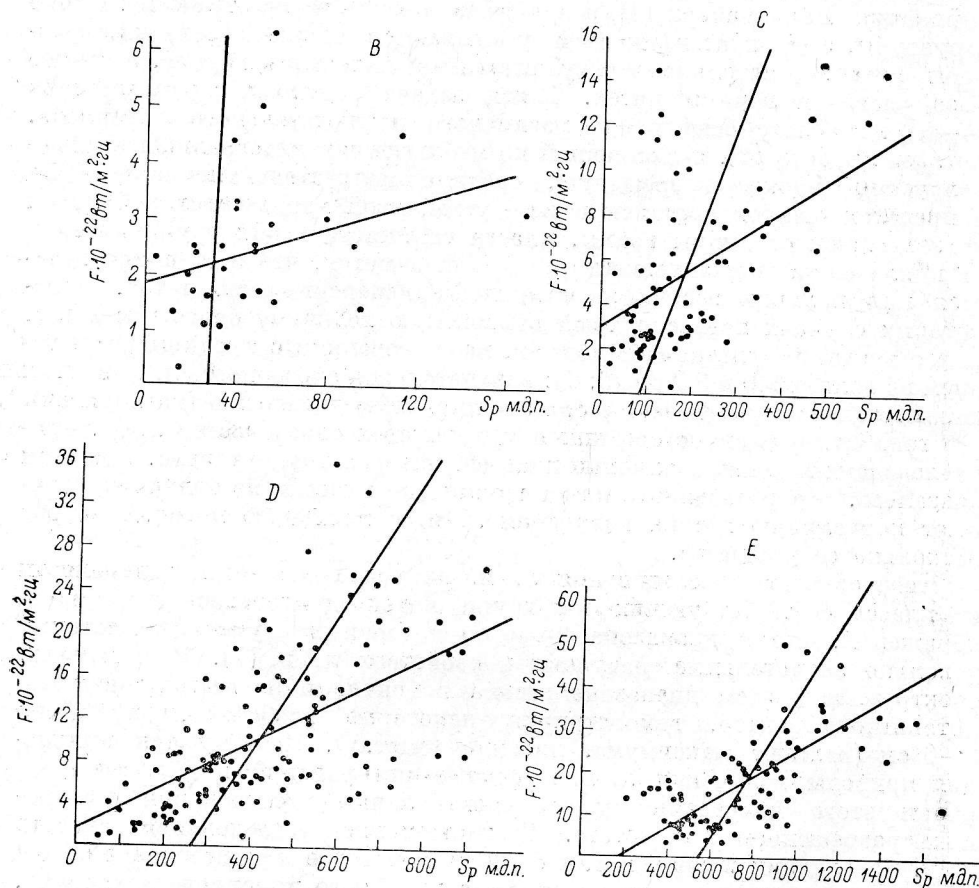


Рис. 2. Корреляционные диаграммы зависимости потока излучения локальных источников от площади соответствующих им групп пятен для различных классов.

мым источником сведений о площади и классе групп пятен явился бюллетень «Solar phenomena» (Рим).

Обработка наблюдений Солнца на БПР, т. е. определение потоков и эффективных размеров л. и., велась методами, изложенными в [8—10]. Абсолютные значения потоков излучения л. и. до 1969 г. определялись путем привязки наблюдений Солнца на БПР к наблюдениям интегральных потоков радиоизлучения Солнца, ведущимся в Японии на станции Toyakawa и публикуемым в «Quarterly bulletin» (Цюрих), причем значение потока на волне 4.4 см находилось интерполированием значений, получаемых на соседних волнах (3.2 и 8.0 см). После 1969 г. абсолютные измерения потоков л. и. на волне 4.4 см ведутся путем привязки к на-



блюдениям Солнца с помощью поляриметра, установленного на Кубе и осуществляющего на этой волне службу потоков. Результаты этой службы публикуются в бюллетене «Солнечные данные».

В силу того что, согласно результатам работ [5, 6, 8], была обнаружена большая дисперсия излучательных способностей и размеров л. и., оказалось необходимым оценить ошибки измерений и их вклад в на-

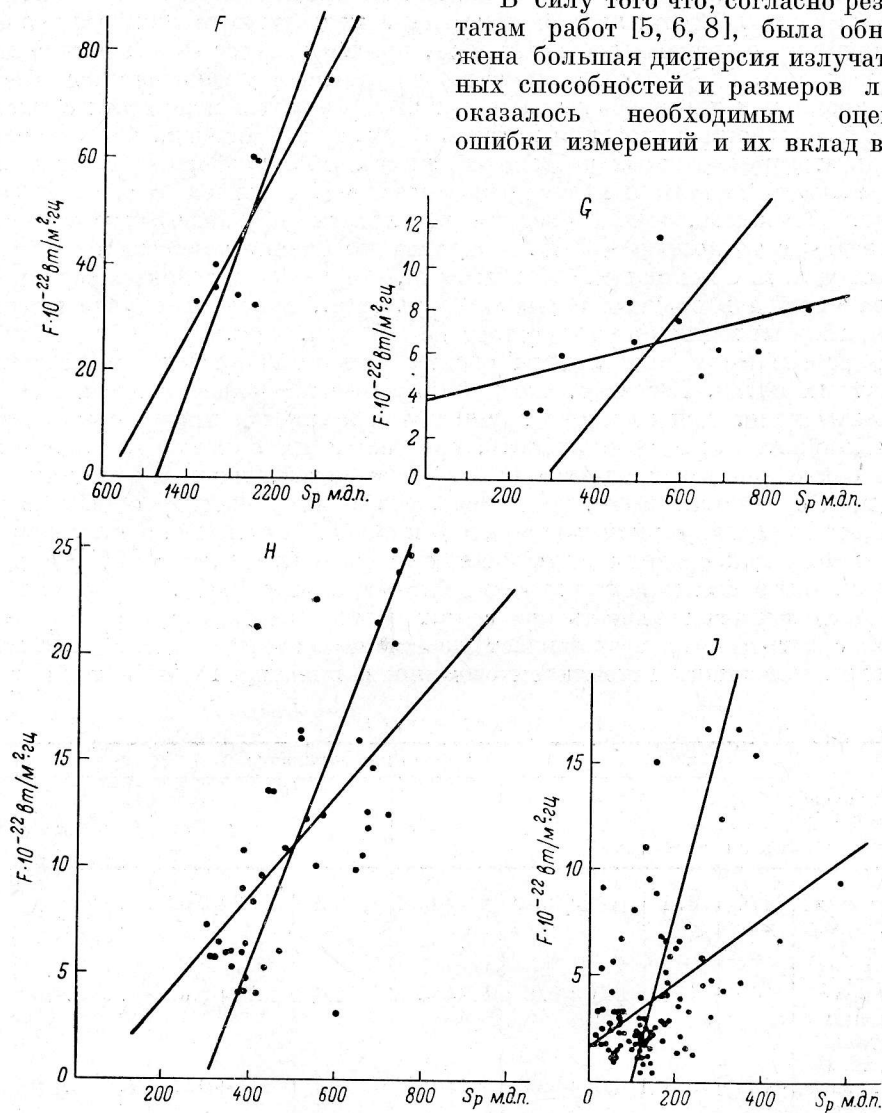


Рис. 2 (продолжение).

блюдаемую дисперсию результатов. В настоящей работе для уменьшения ошибок измерений были исключены из рассмотрения моменты восхода и захода пятен (два дня), когда все характеристики активной области (площадь и класс группы пятен, поток и размер л. и.) определяются неуверенно. Для остального периода наблюдений активной области на Солнце анализ ошибок измерения потоков и размеров л. и. на БПР показал, что основной является ошибка, обусловленная неоднозначностью выделения излучения л. и. из излучения слабых протяженных источников, на фоне которых он зачастую наблюдается. При наблюдениях на БПР такие протяженные источники могут быть обязаны своим происхождением целому ряду причин: 1) неточности выделения уровня излучения

«спокойного Солнца» (~5%); 2) наличие вокруг л. и. протяженного «гало», возможно связанного с окружающим группу пятен флоккулом; 3) попадание в «ножевую» диаграмму направленности БПР одновременно с исследуемым л. и. слабыми источниками, принадлежащих мелким пятнам и флоккулам. В среднем эта ошибка при измерении потоков в сумме с более мелкими ошибками достигает 20%, причем следует отметить, что для сильных л. и. ( $F > 20 \cdot 10^{-22}$  вт/м<sup>2</sup>·гц) ее значение уменьшается до 10%, в то время как для слабых она может быть близка в некоторых случаях к 100%. Точность измерения потоков была также оценена из сравнения результатов независимых наблюдений ряда л. и., выполненных практически одновременно на БПР и малом радиотелескопе в период солнечных затмений. Оказалось, что в среднем результаты независимых измерений совпадают с точностью ~20%. Аналогичные оценки точности измерения размеров л. и. с помощью БПР показали, что для всей совокупности материала ошибка в среднем равна 0.2 угл. мин., однако в случае неоднозначного выделения она возрастает до 0.7 угл. мин.

В работе были произведены оценки точности оптических сведений о группах пятен. Известно, что публикуемые в «Солнечных данных» результаты измерений площади групп пятен являются предварительными, точность которых можно оценить, сравнивая их с материалами «Каталога солнечной деятельности» Р. С. Гневышевой, где даны уточненные сведения о группах пятен. Оказалось, что систематическая ошибка в результатах предварительных измерений площади практически отсутствует, в то время как средняя случайная ошибка составляет  $\pm 12\%$ , причем максимальное расхождение может достигать почти 100%.

Определенную трудность при сопоставлении результатов радионаблюдений с оптическими представляет разница во времени между ними. В этом смысле подходящим источником сведений о площади групп пятен мог бы

ТАБЛИЦА 1

Класс группы пятен	Цюрихская классификация							
	Число		$r_{S_p} \pm \sigma_r$	$a_{S_p} \pm \sigma_a$	$b_{S_p}$	$r_{S_d} \pm \sigma_r$	$a_{S_d} \pm \sigma_a$	$b_{S_d}$
	групп	точек						
Все точки (А, В, С, D, Е, F, G, H, J)	174	474	$0.82 \pm 0.02$	$2.4 \pm 0.01$	0.2	$0.79 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.1$	1.0
Униполярные группы (А, H, J)	46	151	$0.77 \pm 0.03$	$2.0 \pm 0.1$	1.0	$0.71 \pm 0.04$	$1.1 \pm 0.1$	1.9
Биполярные группы (В, С, D, Е, F, G)	128	323	$0.81 \pm 0.02$	$2.4 \pm 0.1$	0.2	$0.78 \pm 0.02$	$1.5 \pm 0.1$	0.8
Класс А	8	11	$0.14 \pm 0.31$	$1.3 \pm 2.8$	2.2	—	—	—
Класс В	17	30	$0.31 \pm 0.15$	$1.2 \pm 0.7$	1.9	$0.20 \pm 0.18$	$0.5 \pm 0.5$	2.1
Класс С	36	68	$0.49 \pm 0.09$	$1.3 \pm 0.3$	3.0	$0.44 \pm 0.10$	$0.9 \pm 0.2$	3.2
Класс D	42	121	$0.57 \pm 0.06$	$2.1 \pm 0.3$	1.6	$0.47 \pm 0.07$	$1.1 \pm 0.2$	3.1
Класс Е	25	84	$0.63 \pm 0.07$	$3.0 \pm 0.4$	-4.8	$0.57 \pm 0.07$	$1.7 \pm 0.3$	-2.5
Класс F	3	9	$0.81 \pm 0.12$	$3.9 \pm 0.9$	-2.7	$0.85 \pm 0.10$	$1.9 \pm 0.4$	-8.4
Класс G	5	11	$0.45 \pm 0.25$	$0.5 \pm 0.3$	3.8	$0.43 \pm 0.26$	$0.2 \pm 0.2$	3.4
Класс H	12	46	$0.67 \pm 0.08$	$2.4 \pm 0.4$	-1.0	$0.70 \pm 0.08$	$1.2 \pm 0.2$	1.1
		31	$0.76 \pm 0.08$	$2.5 \pm 0.4$	-1.9			
Класс J	26	94	$0.45 \pm 0.08$	$1.5 \pm 0.3$	1.6	$0.18 \pm 0.10$	$0.3 \pm 0.2$	3.2
		45	$0.14 \pm 0.15$	$0.7 \pm 0.7$	2.0			

Примечание. Коэффициенты  $a$  и  $b$  указаны в единицах потока ( $10^{-22}$  вт/м<sup>2</sup>·гц) на каждые 100 м.д.п.

служить бюллетень «Solar phenomena», данные которого почти одновременно с нашими наблюдениями на БПР, однако для этого бюллетеня характерны частые пропуски в наблюдениях. Оценка точности измерений площади групп пятен в этом бюллетене по «Каталогу солнечной деятельности» Р. С. Гневышевой дает несколько большую величину ~20%, что по сравнению с «Солнечными данными» может быть вызвано сдвигом по времени в наблюдениях.

В работе для определения типа группы использована классификация Вальдмайера. Известно, что в силу недостаточной четкости классификации ее применение вызывает определенные трудности [11]. В этом легко было убедиться на примере данной работы: оказалось, что использование классификации Вальдмайера двумя различными станциями наблюдений (Цюрих и Рим) дает весьма значительные расхождения. Из 470 случаев классификации только 180 оказались совпадающими. Нами использовались как более надежные сведения цюрихской станции, ибо в пользу цюрихской классификации может свидетельствовать больший опыт наблюдений, а также тот факт, что по данным этой станции каждый класс имеет более узкие пределы площади группы. К примеру, в класс Е цюрихский бюллетень зачисляет группы, площадь которых лежит в пределах от 200 до 1550 м.д.п., в то время, как римский к этому же классу относит группы площадью от 20 до 950 м.д.п.

В результате сопоставления потоков излучения л. и. ( $F$ ) с площадями соответствующих им групп пятен ( $S_p$ ) получены корреляционные диаграммы для всей совокупности точек, для униполярных групп пятен (классы А, Н, J) и биполярных (классы В, С, D, Е, F, G), а также для

ТАБЛИЦА 2

Класс группы пятен	Римская классификация							
	Число		$r_{S_p} \pm \sigma_r$	$a_{S_p} \pm \sigma_a$	$b_{S_p}$	$r_{S_d} \pm \sigma_r$	$a_{S_d} \pm \sigma_a$	$b_{S_d}$
	групп	точек						
Все точки (А, В, С, D, Е, F, G, Н, J)	120	360	$0.82 \pm 0.02$	$2.5 \pm 0.1$	-0.4	$0.79 \pm 0.01$	$1.5 \pm 0.1$	0.3
Униполярные группы (А, Н, J)	50	139	$0.83 \pm 0.03$	$3.1 \pm 0.2$	-1.6	$0.79 \pm 0.03$	$1.9 \pm 0.1$	-0.2
Биполярные группы (В, С, D, Е, F, G)	113	221	$0.83 \pm 0.01$	$2.2 \pm 0.1$	-0.1	$0.82 \pm 0.02$	$1.4 \pm 0.1$	0.5
Класс А	4	4	$0.17 \pm 0.56$	$1.7 \pm 4.9$	2.2	—	—	—
Класс В	—	—	—	—	—	—	—	—
Класс С	16	24	$0.90 \pm 0.04$	$3.4 \pm 0.3$	0.5	$0.82 \pm 0.07$	$2.2 \pm 0.3$	0.9
Класс D	27	20	$0.94 \pm 0.03$	$2.8 \pm 0.2$	1.2	$0.32 \pm 0.13$	$0.7 \pm 0.3$	3.4
		49	$0.40 \pm 0.12$	$1.2 \pm 0.4$	2.8			
Класс E	33	40	$0.42 \pm 0.14$	$1.3 \pm 0.4$	5.1	$0.25 \pm 0.11$	$0.6 \pm 0.3$	6.0
		72	$0.44 \pm 0.10$	$1.5 \pm 0.4$	3.0			
Класс F	13	69	$0.42 \pm 0.11$	$1.3 \pm 0.4$	5.1	$0.88 \pm 0.04$	$1.6 \pm 0.2$	-2.2
		32	$0.89 \pm 0.04$	$2.7 \pm 0.2$	-3.1			
Класс G	24	28	$0.89 \pm 0.04$	$2.7 \pm 0.3$	-3.1	$0.62 \pm 0.09$	$0.6 \pm 0.1$	3.0
		44	$0.65 \pm 0.09$	$0.9 \pm 0.2$	2.7			
Класс H	22	39	$0.61 \pm 0.10$	$0.8 \pm 0.2$	3.3	$0.75 \pm 0.05$	$2.1 \pm 0.2$	-2.0
		75	$0.80 \pm 0.04$	$3.7 \pm 0.3$	-5.7			
Класс J	24	64	$0.81 \pm 0.04$	$3.8 \pm 0.3$	-4.2	$0.02 \pm 0.13$	$0.0 \pm 0.2$	3.2
		60	$0.19 \pm 0.12$	$0.9 \pm 0.6$	2.2			

Примечание. Коэффициенты  $a$  и  $b$  указаны в единицах потока ( $10^{-22}$  вт/м<sup>2</sup>гц) на каждые 100 мдп.



каждого класса в отдельности по цюрихской и римской классификациям. Примеры этих диаграмм для цюрихской классификации представлены на рис. 2. Для оценки направленности излучения способом, предложенным в [5], аналогичные диаграммы получены при сопоставлении  $F$  с  $S_d$  — проекцией  $S_p$  на видимый диск Солнца.

По этим диаграммам методом наименьших квадратов были сосчитаны коэффициенты корреляции ( $r_{S_p}$  и  $r_{S_d}$ ) и уравнения регрессии, которые искались в виде  $F = a_{S_p} \cdot S_p + b_{S_p}$  и  $F = a_{S_d} \cdot S_d + b_{S_d}$ . Результаты этих вычислений сведены в табл. 1 для цюрихской классификации и в табл. 2 для римской, причем для обеих классификаций основным является сопоставление с  $S_p$  и  $S_d$  из бюллетеня «Солнечные данные». Дополнительным является исследование корреляционной связи для совпадающих случаев

ТАБЛИЦА 3\*

Класс группы пятен	$\frac{\bar{F}}{S_p}$	Среднее квадратичное отклонение	Средняя квадратичная ошибка
A	6.2	4.4	4.4
B	7.5	10.2	10.0
C	3.9	3.5	3.6
D	2.4	1.3	1.3
E	2.3	1.1	1.1
F	2.5	0.5	0.6
G	1.2	0.3	0.4
H	2.2	1.0	0.9
J	4.0	5.1	5.1
Все точки	3.2	4.0	3.8
Униполярные	4.2	3.6	4.1
Биполярные	3.1	1.4	3.5

классификации (см. вторые строчки табл. 1), а также исследование этой связи по материалам одного бюллетеня, когда классификация и площадь пятен бралась только из «Solar phenomena» (см. вторые строки табл. 2). Кроме того, излучательная способность л. и. была определена как отношение  $F/S_p$ , и ее дисперсия для каждого класса в отдельности демонстрируется гистограммами рис. 3. Средняя излучательная способность л. и. каждого класса, считаемая как

$1/n \sum F/S_p$ , представлена в табл. 3 для цюрихской классификации.

При исследовании размеров все л. и. были разбиты на две группы, принадлежащие униполярным пятнам (классы А, Н, J, площадь в пределах  $5 \div 1200$  м.д.п.) и биполярным (классы В, С, D, Е, F, G, площадь в пределах  $5 \div 2700$  м.д.п.) по цюрихской классификации, и было найдено, что их средние размеры соответственно равны  $2.1 \pm 0.6$  угл. мин. и  $2.1 \pm 0.8$  угл. мин. Гистограммы распределения размеров л. и. обоих типов приведены на рис. 4.

Подводя итоги проделанного исследования, прежде всего следует отметить большую (почти на порядок) дисперсию излучательных способностей л. и. внутри каждого класса (см. табл. 3), которой обусловлены довольно низкие коэффициенты корреляции для связи  $F$  с  $S_p$  и  $S_d$ . Часть этого разброса, конечно, можно отнести за счет ошибок измерений. Прежде всего это касается неоднозначности классификации, которая, как отмечалось выше, превышает 60%. Следствием этого явилось большое различие коэффициентов корреляции, полученных по разным классификациям (см. табл. 1 и 2). Однако использование при обработке материала только совпадающих случаев классификации существенным образом не изменяет результатов. Точно так же никакого улучшения корреляции не дает и использование оптических данных одной станции наблюдений, когда классификация и площадь групп пятен берется только из бюллетеня «Solar phenomena» (см. вторые строки в табл. 2). Частично (30—

\* Все величины в таблице указаны в единицах потока ( $10^{-22}$  вт/м<sup>2</sup>·гц) на каждые 100 м.д.п.



40%) разброс параметров л. и. можно отнести за счет ошибок измерения потоков л. и. и площадей соответствующих им групп пятен. В самых неблагоприятных случаях, число которых невелико, эти ошибки могут быть причиной разброса излучательных способностей порядка 2—3 раз, однако различия на порядок никоим образом не объясняются ошибками измерения потоков и площадей. Таким образом, большая дисперсия излучательных способностей является реальным свойством л. и. Аналогичный вывод можно сделать и относительно размеров л. и., дисперсия которых также не укладывается в ошибки измерений.

Как уже отмечалось в работе [5], структурные особенности группы, харак-

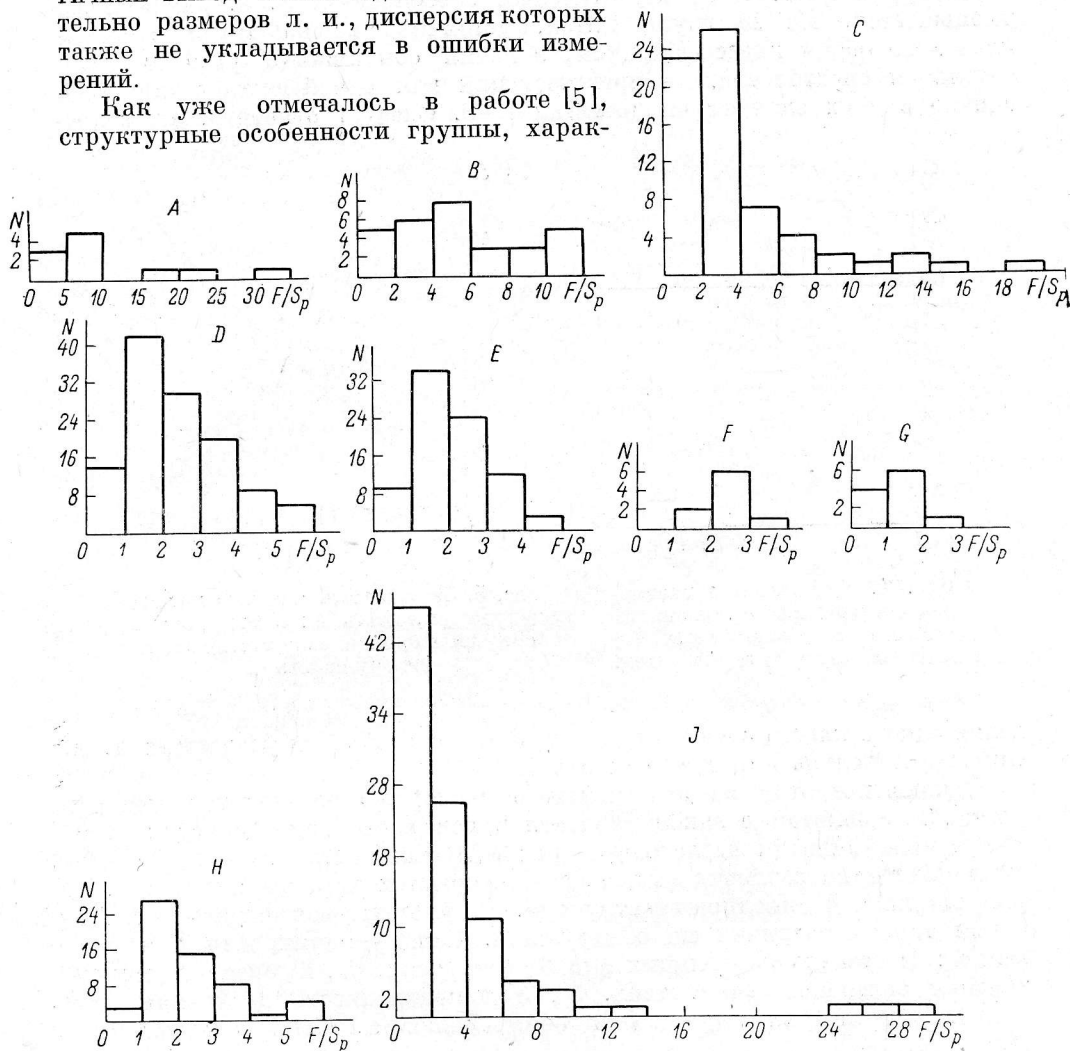


Рис. 3. Гистограммы распределения излучательных способностей локальных источников для групп пятен различных классов.

$F/S_p$  указано в единицах потока ( $10^{-22}$  Вт/м<sup>2</sup>·Гц) на каждые 100 м.д.п.

теризуемые классом, скорее всего, не в состоянии однозначно определить поток излучения л. и. Он также может зависеть еще от целого ряда причин, в частности от устойчивости центра активности. Известно [7], что процессы развития активной области в радиоизлучении сопровождаются некоторыми особенностями, наиболее наглядно проявляющимися себя в период возникновения и распада группы пятен,

когда поток радиоизлучения весьма плохо коррелирует с площадью пятна. Чаще всего л. и. развивается быстрее, чем группа пятен, в связи с чем наибольшее значение потока излучения л. и. достигается на 1—2 дня раньше, чем площади группы. Для исключения влияния процессов развития в настоящей работе была исследована излучательная способность л. и. тех групп пятен, которые довольно длительное время принадлежали данному классу (более четырех дней). Оказалось, что для таких групп дисперсия излучательных способностей л. и. значительно уменьшается. Из 14 групп пятен, устойчиво державшихся в одном классе по обеим классификациям, 9 групп обнаружили разброс излучательной способности, не превышающий для одной группы двух раз, однако в двух случаях он достигал 7—8. Следует отметить, что в пре-

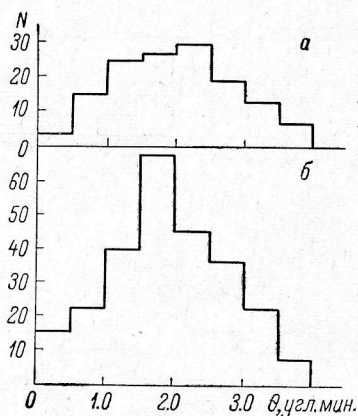


Рис. 4. Гистограммы распределения размеров локальных источников униполярных (а) и биполярных (б) групп пятен.

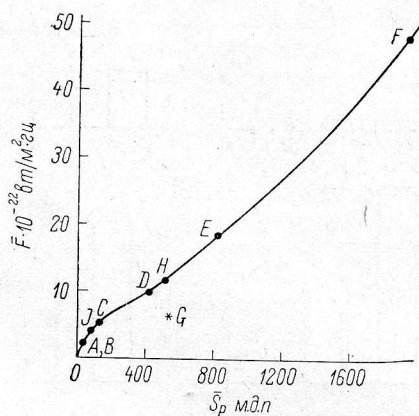


Рис. 5. Зависимость среднего потока излучения локальных источников от средней площади соответствующих им групп пятен.

делах одного класса средние излучательные способности указанных л. и. также отличались не более чем вдвое.

Однако несмотря на значительную дисперсию результатов удалось установить некоторые закономерности в поведении характеристик л. и. Ранее проведенными исследованиями [5, 8] было установлено, что имеются некоторые различия (в 1.5 раза) в средних характеристиках л. и. униполярных и биполярных структур. Результаты настоящего исследования такого различия не обнаружили. Совпадающими для них оказались: 1) степень корреляции  $F$  с  $S_p$  (см. табл. 1); 2) средние излучательные способности (см. табл. 3), 3) направленность излучения, ибо в пределах ошибок  $r_{S_p} = r_{S_d}$  для обоих типов л. и., 4) средние размеры.

Последний результат находится в противоречии с полученным ранее [8]. Причиной расхождения результатов может служить реальное различие свойств л. и. в период минимума и максимума солнечной активности. Однако нельзя исключить при рассмотрении и ошибок методического характера, которые могли привести к такому расхождению результатов. Дело в том, что в период минимума солнечной активности, когда интенсивность излучения падает, л. и. труднее отделить от излучения протяженных источников, о которых упоминалось выше. При этом могли быть завышены размеры л. и., причем особенно униполярных групп пятен, площадь которых в среднем меньше, чем биполярных. Поэтому кажется более вероятным, что интерпретация результатов в [8] скорее

относится к отличию в структуре излучающих областей, лежащих над флоккулами и пятнами, чем над униполярными и биполярными пятнами.

Причиной отсутствия различий в характеристиках л. и. униполярных и биполярных структур могут служить большие качественные и коли-

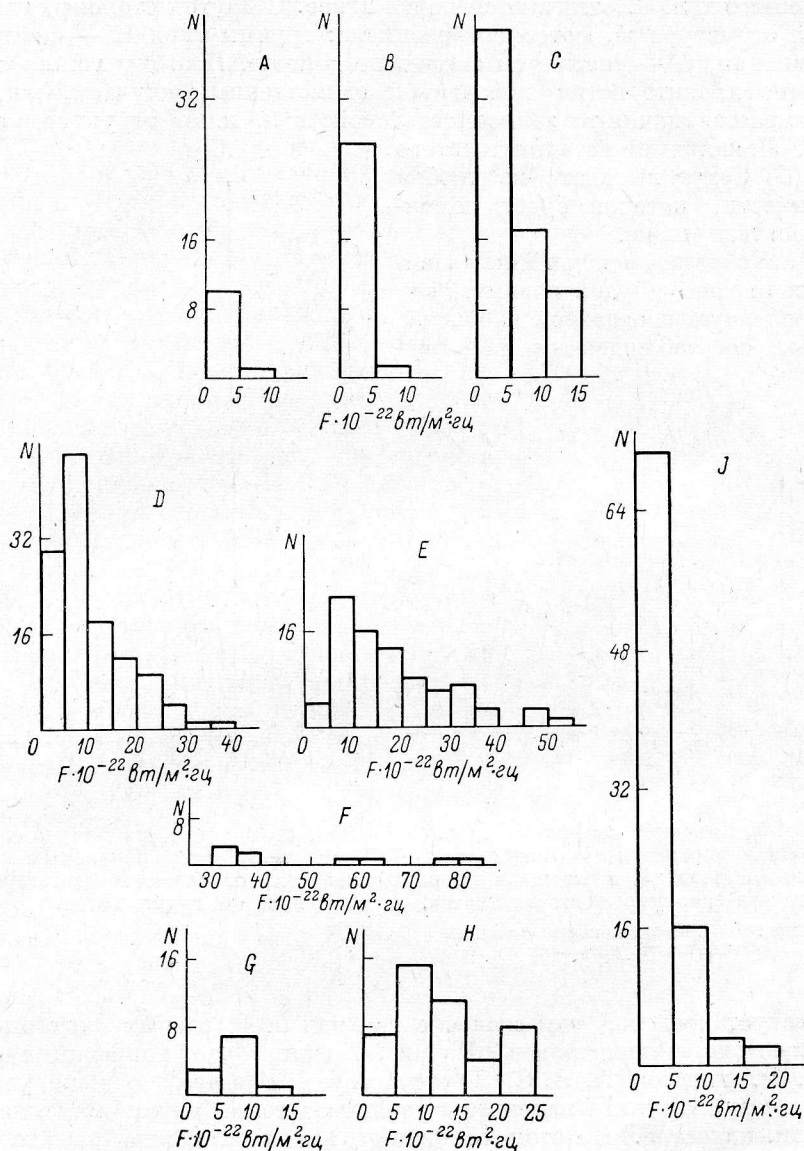


Рис. 6. Гистограммы распределения потоков излучения локальных источников для групп пятен различных классов.

чественные отличия групп пятен, включаемых и в тот и в другой тип. В частности, к униполярным принадлежат слабые группы пятен класса А и довольно сильные Н, их средние площади отличаются более чем на порядок. То же можно сказать и о биполярных группах пятен. Поэтому, если в свойствах л. и. преобладает зависимость от площади, то ею может маскироваться зависимость от структуры. Разделить влияние этих причин трудно, ибо в понятие «класс» включена оценка как структуры так и пло-

щадки группы. Поскольку грубое деление л. и. на униполярные и биполярные не дало различий в их свойствах, можно полагать, что на волне 4.4 см определяющее значение имеет площадь. Исключение составляют л. и. класса G (рис. 5). По площади они близки к классу H, однако средние потоки излучения их л. и. отличаются почти вдвое. С другой стороны, известно, что их структура на фотосфере различна: группы типа H — компактные образования, G — растянуты сильно по долготе. Поэтому можно считать различие характеристик этих групп единственным случаем, когда обнаруживается какая-то зависимость свойств л. и. от структуры группы пятен. Локальные источники этого типа (G) будут выпадать из любой зависимости, которая будет демонстрироваться ниже.

Таким образом, в дальнейшем зависимость от класса будем понимать как обусловленную в основном площадью группы. По наблюдениям на волне

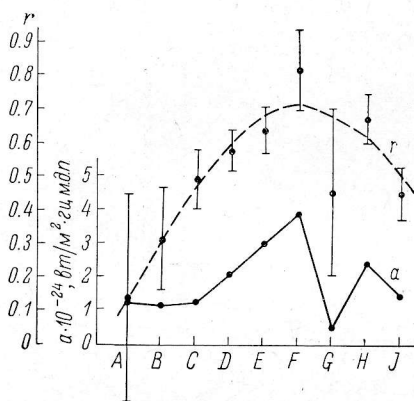


Рис. 7. Значение коэффициента корреляции потока излучения локальных источников и площади групп пятен в зависимости от их класса.

Сплошной линией показано поведение коэффициента регрессии  $\alpha_{S_p}$ .

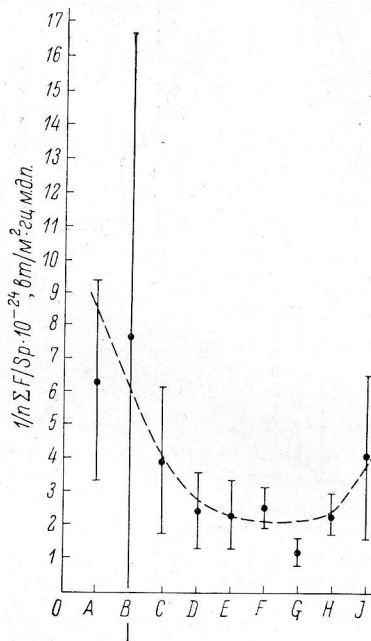


Рис. 8. Зависимость излучательной способности локальных источников от класса соответствующих им групп пятен.

4.4 см установлено, что значение  $r_{S_p}$  для л. и. разных классов образует монотонную зависимость. Из рис. 7 видно, что корреляция  $F$  с  $S_p$  для л. и. классов A, B, C, J отсутствует, а затем по мере увеличения площади группы пятен  $r_{S_p}$  увеличивается, будучи максимальной для л. и. класса F. На этом основании все л. и. можно разделить на две группы, граница между которыми лежит в районе  $S_p \approx 200$  м.д.п. Намечается некоторая зависимость и излучательной способности л. и. от класса соответствующих им групп пятен. Она представлена на рис. 8. Видно, что  $F/S_p$  растет по мере падения площади групп пятен. Однако это не означает, что л. и. слабых групп пятен ярче, чем сильных. Следует при этом помнить, что размеры л. и. больших и малых групп пятен примерно равны, а потоки излучения уменьшаются с площадью группы пятен, поэтому на самом деле яркостные температуры л. и. растут вместе с площадью групп пятен. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 9, где указаны нижняя и верхняя граница эффективных яркостных температур л. и. в зависимости от площади соответствующих им групп пятен. Ниж-



няя получена на основе измеренных нами эффективных размеров л. и. в предположении о круговой симметрии формы л. и., верхняя — считая, что телесный угол источника совпадает с  $S_p$  группы пятен.

Величина верхнего предела яркостных температур указана только для л. и. классов D, E, F и H, ибо для них она находится в разумном согласии с результатами затменных измерений, показавших, что в отдельных деталях л. и. температуры достигают именно таких значений ( $1.5 \div 2.0 \cdot 10^6 \text{K}$ ). Для л. и. слабых групп пятен (A, B, C, J) такая оценка оказывается слишком завышенной.

В целях исследования формы л. и. в настоящей работе искалась зависимость размеров л. и. от положения активной области на диске Солнца. Все л. и. были разбиты на две группы, для которых  $r/R_\odot$  было либо меньше, либо больше 0.5. Результаты этого исследования представлены на рис. 10. В верхней части рисунка указана средняя для каждой зоны площадь групп пятен. Для источников всех классов случайно оказалось, что площадь групп пятен во внешней зоне несколько больше, чем во внутренней. Несмотря на эту разницу, результаты исследования показали, что средние размеры слабых источников при их приближении к краю сокращаются на 20—30%, в то время как для сильных они либо остаются неизменными, либо увеличиваются (класс F).

Естественно, что при этом меняются и средние эффективные температуры излучения л. и. в зависимости от положения активной области на диске Солнца. Эта зависимость представлена на рис. 11, причем в расчетах грубо (считая, что  $F \sim S_p$ ) уравнивали площади групп пятен во внутренней и внешней зонах. В данном случае не обнаружено четкой связи характера этой зависимости от класса группы. С большой осторожностью, вероятно, можно сказать, что почти для всех типов л. и. эффективная яркостная температура либо остается неизменной при перемещении активной области по диску Солнца, либо слегка растет к лимбу. Исключение составляет л. и. групп пятен класса F, для которых  $T_b$  к лимбу падает почти вдвое.

Сравнение результатов настоящей работы с работой [5] показывает, что на волне 4.5 см и 9.0 см многие закономерности, в частности характер зависимости  $T_{\text{эфф}}$  от площади группы, проявляют себя одинаковым образом. Поэтому можно сказать, что в этом диапазоне, вероятно, нет сильных различий в природе излучения л. и. Оценки яркостных температур не противоречат представлению о том, что излучение л. и. в сантиметровом диапазоне волн является тепловым и генерируется либо в переходном слое между хромосферой и короной над активной областью, либо в короне.

Одной из решающих характеристик л. и., по которой можно судить о механизме излучения, является его спектр. На основе данной работы, привлекая результаты работ [5, 6], были построены усредненные спектры для л. и. некоторых типов групп пятен. Они представлены на рис. 12. Известно [7, 12], что спектр отдельного л. и. сильно меняется в связи с развитием активного центра. Однако этот факт никак не отразился на усредненных спектрах сильных л. и. (класс C—H), несмотря на то, что класс группы до некоторой степени характеризует фазу ее развития.

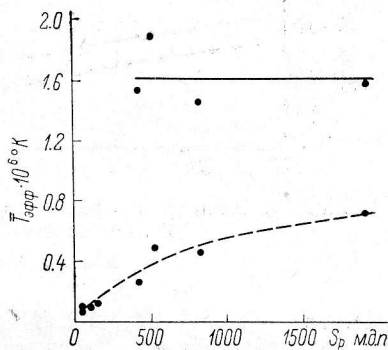


Рис. 9. Пределы изменения эффективной температуры излучения локальных источников в зависимости от площади соответствующих им групп пятен.

В ряде работ [13—15] делались попытки объяснить наблюдаемый характер спектров л. и. на основе учета тормозного и магнитно-тормозного излучения тепловых электронов в активной области, физические па-

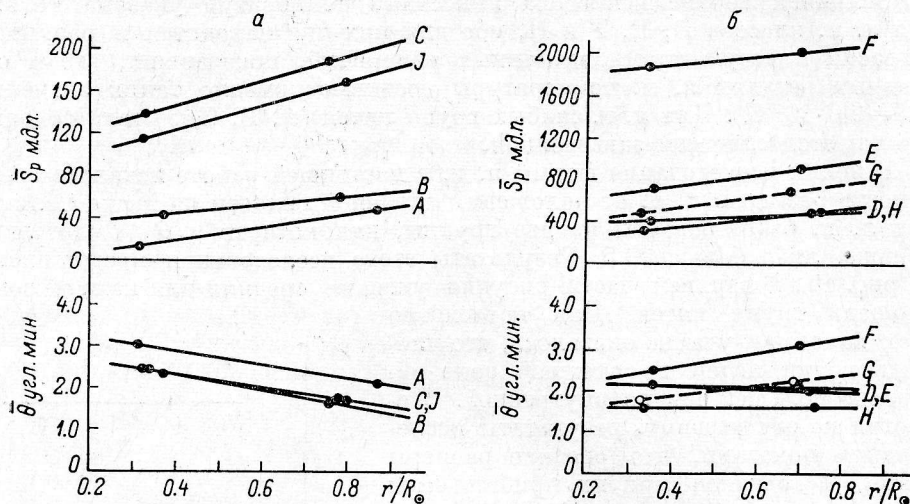


Рис. 10. Зависимость размеров локальных источников от положения на диске Солнца соответствующей ему активной области.

*a* — для слабых, *б* — для сильных л. и.

раметры которой ( $N_e$ ,  $T_e$ ,  $H$ ) считались известными из результатов оптических наблюдений. Рассчитанные в этих работах спектры качественно объясняют наблюдаемый рост потоков излучения л. и. с длиной волны

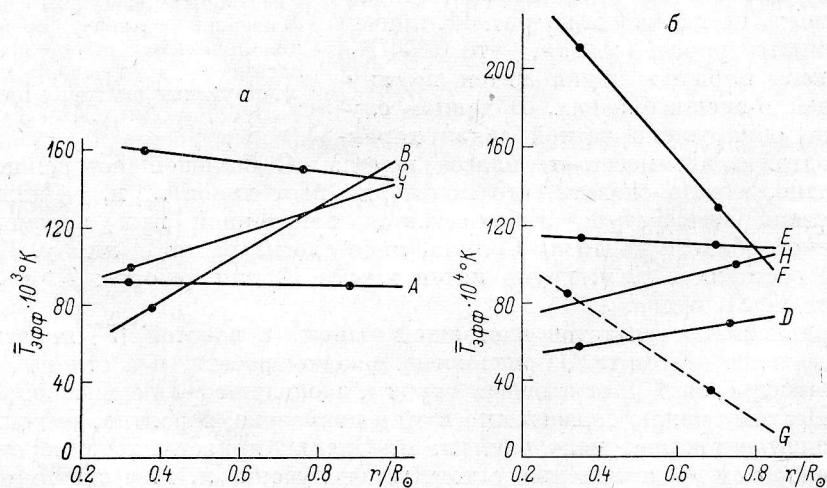


Рис. 11. Зависимость эффективной температуры излучения локальных источников от положения на диске Солнца соответствующей ему активной области.

*a* — для слабых, *б* — для сильных л. и.

в диапазоне 2—10 см, однако количественно расчетные спектры далеки от наблюдаемых. По всей вероятности, в этом нет ничего удивительного, ибо всякий расчет связан с большими упрощениями и идеализацией реальных условий в области генерации излучения л. и. В частности, если несколько видоизменить используемую для расчетов в [14]

модель л. и. (для 4.5 см примерно вдвое увеличить температуры в области генерации этого излучения, а также несколько увеличить размеры этой области), то, по-видимому, можно добиться удовлетворительного согласия предсказанного в [14] потока излучения л. и. на этой волне с тем, который действительно наблюдается в среднем для л. и. класса Н.\*

Анализ результатов наблюдений, полученных в данной работе, еще раз подтверждает вывод, сделанный в [7], о необходимости дальнейшего уточнения теории радиоизлучения л. и. Расчет модели л. и. выходит за рамки настоящего исследования тем более, что наибольший успех в решении этой проблемы, вероятно, будет достигнут при использовании не усредненных, а конкретных сведений об активной области, учитывая их большое разнообразие и динамику развития. Исходя из результатов настоящей работы, можно думать, что дальнейшие теоретические исследования л. и. следует вести путем усложнения модели источника, при этом оставаясь в рамках уже известных представлений о природе их излучения [1, 14]. Можно ожидать, что таким образом найдут объяснение наблюдаемые особенности л. и., в частности, слабая направленность неполяризованного излучения.

В заключение отметим еще раз, что статистическими исследованиями л. и. на волне 4.4 см не обнаружено влияния на их излучение морфологической структуры группы пятен. Этот результат находится в качественном согласии с выводами [4]. Некоторым противоречием этому является заключение, сделанное в [5], однако его скорее всего следует признать ошибочным, ибо оно высказано на основе анализа коэффициента регрессии, который будет совпадать с излучательной способностью ( $F/S_p$ ) только в том случае, если во всем диапазоне изменения площадей пятен связь их с интенсивностью излучения л. и. будет линейной. Согласно [4], а также результатом настоящего исследования (рис. 5), зависимость между ними носит более сложный характер. Поэтому дальнейшие поиски влияния структуры группы, оцениваемой на основе классификации Вальдмайера, следует считать мало перспективными. Поскольку пока не выявлено четкой связи излучения л. и. с крупномасштабной структурой группы, можно полагать, что у л. и. отсутствует высоко расположенный источник излучения, удерживаемый всей системой силовых линий магнитного поля группы, либо его роль в общем излучении мала.

С другой стороны установлено, что определяющее значение для излучения л. и. имеет площадь соответствующих им групп пятен, особенно групп большой площади ( $S_p > 500$  м. д. п.). Этот результат может свидетельствовать о том, что в создании излучения наиболее мощных л. и. ( $F > 10$  вт/м<sup>2</sup>·гц) на волне 4.4 см основной вклад вносит гирорезонансное излучение электронов в сильных магнитных полях пятен. Для л. и. групп пятен меньшей площади доля этого излучения, скорее всего, уменьшается, в связи с чем наблюдается ухудшение связи с площадью пятен.

Кратко суммируя основные результаты проделанного исследования, можно сказать, что на волне 4.4 см:

1) большая дисперсия излучательных способностей и размеров л. и. всех типов является их реальным свойством;

\* По всей вероятности, использованная в [14] модель наиболее близка к реальной структуре л. и., принадлежащих группам пятен класса Н.

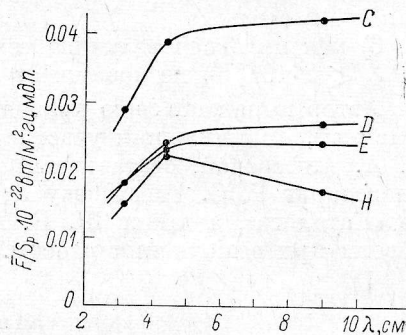


Рис. 12. Усредненные спектры излучательной способности локальных источников для групп пятен классов C, D, E, H, J.



2) разброс излучательных способностей значительно уменьшается для л. и. тех групп пятен, которые устойчиво в течение нескольких дней ( $> 4$  дней) сохраняют свою структуру на фотосфере;

3) многие средние характеристики (степень корреляции  $F$  с  $S_p$ , излучательная способность, размеры и направленность излучения) л. и. униполярных и биполярных групп пятен совпадают. Зависимость от структуры группы пятен обнаружена только для л. и. класса G;

4) найдена зависимость степени корреляции  $F$  с  $S_p$  от площади групп пятен: корреляция этих двух величин отсутствует для  $S_p < 200$  м.д.п., а затем растет по мере увеличения  $S_p$ , будучи максимальной для л. и. класса F ( $r_{S_p} = 0,8$ );

5) эффективная температура излучения л. и. монотонно растет по мере увеличения площади соответствующих им групп пятен, достигая  $0,8 \cdot 10^6$  °K у л. и. класса F;

6) максимальная величина температуры излучения л. и. на  $4,4$  см ( $T_{\text{эфф}} < 2 \cdot 10^6$  °K) не превышает корональных значений.

Автор выражает свою признательность Ю. Л. Кокорину и Л. А. Коржавиной, принимавшим участие в наблюдениях и их обработке, а также З. А. Алферовой, составившей программу вычислений для ЭВМ. Автор благодарит Р. С. Гневыху за предоставленные в рукописи материалы ее «Каталога», а также Ш. Б. Ахмедова и Г. Б. Гельфрейха за ценные советы при выполнении работы.

#### Литература

1. В. В. Железняков. Радиоизлучение Солнца и планет. Изд-во «Наука», М., 1964.
2. К. де Ягер. Строение и динамика атмосферы Солнца. ИЛ. М. 1962
3. M. Waldmeier. Publ. Obs. Zürich, 9, 2, 1947.
4. Н. С. Соболева. Изв. ГАО, 178, 73, 1965 и 185, 183, 1970.
5. Ш. Б. Ахмедов. Солнечные данные, 2, 76, 1968.
6. В. Н. Боровик. Доклад на всесоюзном симпозиуме по изучению солнечной короны, Самарканд, 1971.
7. Г. Б. Гельфрейх, Ш. Б. Ахмедов и др., Изв. ГАО, 185, 167, 1970.
8. А. Н. Коржавин, Н. Г. Петерова, Астрон. ж., 45, 36, 1968.
9. W. N. Christiansen, I. A. Warburton. Austr. J. Phys., 6, 262, 1953.
10. Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский, Н. С. Соболева. Солнечные данные, 9, 65, 1958.
11. Ю. И. Витинский. Мофология солнечной активности. Изд-во «Наука», М.—Л., 1966.
12. Ш. Б. Ахмедов, В. Н. Боровик и др. Солнечные данные, 2, 62, 1966.
13. М. А. Лившиц, В. Н. Обридко, С. Б. Пикельнер, Астрон. ж., 43, 1135, 1966.
14. Е. Я. Злотник. Астрон. ж., 45, 310, 1968; 45, 585, 1968.
15. P. Lantos, Annals d'astrph., 31, 105, 1968.