

Resultados preliminares de la investigación de las explosiones solares en banda centimétrica

RAMÓN E. RODRÍGUEZ TABOADA

RESUMEN

Se hace un estudio estadístico de las explosiones solares. Se establece una clasificación para las mismas, en la banda de 1-21 cm, basada en los espectros observados en esta banda, y se presentan las asociaciones de estas clases espectrales con la clasificación morfológica y el campo magnético de la región activa en que ocurren. Además, se analizan algunas características de la polarización circular en el momento del máximo principal.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la elaboración de las observaciones del eclipse de sol del 24 de diciembre de 1973, realizadas en La Habana (KAIDANOVSKII *et al.*, 1978), se detectó, en la radioemisión proveniente del grupo 214, un detalle brillante y de corto tiempo de vida, que no aparecía ligado a ninguna formación fotosférica. Esta fuente se encontraba aproximadamente sobre la línea neutral del campo magnético, región en la que numerosos investigadores suponen que es donde ocurren los destellos solares, a los cuales están íntimamente ligadas las explosiones en radio-ondas.

En relación con esto surgió la pregunta de si se modifica o no la estructura magnética de la fuente local cuando ocurre la explosión. Para analizar esta situación, basándonos en nuestras experiencias de trabajos anteriores, se investigaron las características de polarización de los eventos y de las fuentes locales relacionadas con los mismos. El estudio bibliográfico de las características de polarización de los eventos mostró que se habían obtenido resultados contradictorios. Según NEFEDEV y TRESKOVA (1969), el signo de la polarización del evento no depende de la posición de la mancha en el disco, sino del campo magnético predominante en el grupo. Por otra parte, para los eventos en banda centimétrica, KRUGER (1976) observó una dependencia entre el signo y el porcentaje de polariza-

Manuscrito aprobado el 21 de marzo de 1980.

R. E. Rodríguez pertenece al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba.

ción circular del evento y la posición del mismo en el disco solar; relación ésta que concuerda con la observada para las fuentes locales.

En nuestra investigación anterior (PETEROVA y RODRÍGUEZ, 1977) se obtuvo, como resultado, que el signo y el porcentaje de la emisión polarizada de los eventos seguía el mismo comportamiento que la emisión polarizada de la fuente local a que están asociados, notándose dependencia con la frecuencia para el momento de la inversión del sentido de rotación y del fenómeno de depolarización que ya había sido encontrado anteriormente para las fuentes locales de radioemisión.

En la Fig. 1 puede verse el cambio del sentido de rotación en dos frecuencias. En línea de puntos para 9,4 GHz y en línea continua para 6,7 GHz. La depolarización se nota en que antes del PMC el porcentaje de polarización alcanza hasta el 40 %, y después del PMC sólo el 15 %, pero esto no aparece en el gráfico.

De estos hechos observacionales se extrae como hipótesis de trabajo que, durante el momento en que ocurren las explosiones solares, la estructura del campo magnético de la fuente local no se destruye (al

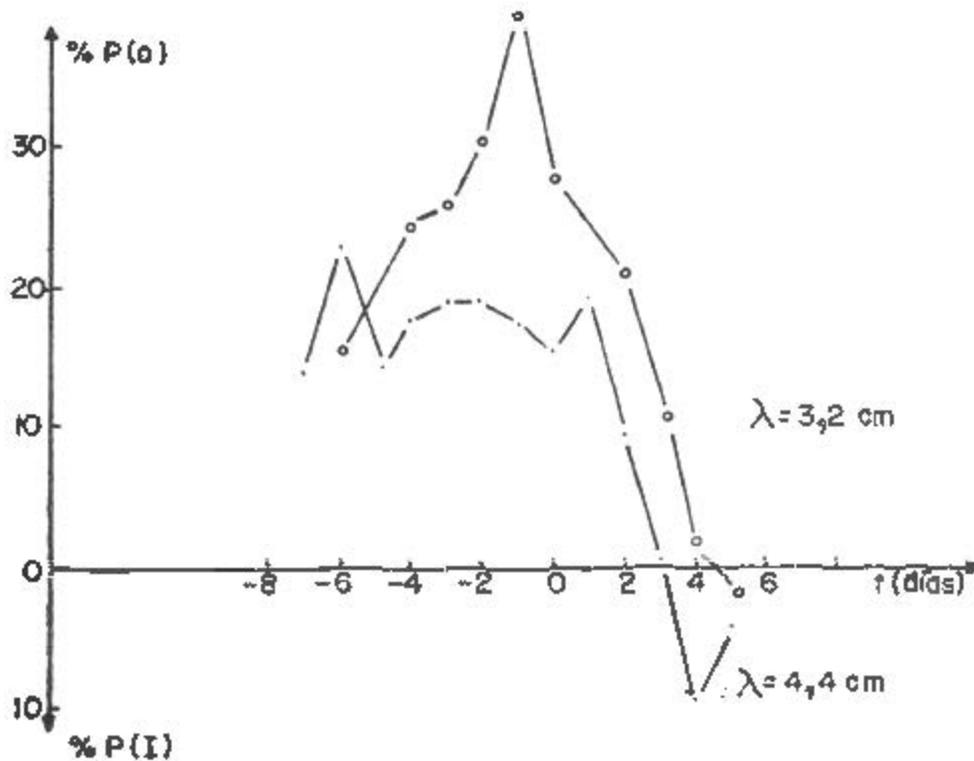


FIG. 1. Comportamiento característico del porcentaje de polarización circular de la radioemisión solar, al paso de una fuente local por el disco solar.

menos sobre los 150 000 km de altura sobre la fotosfera, según los estimados para la zona de interacción en las fuentes locales a esta frecuencia).

Estos resultados pueden tener importancia en los análisis de las fuentes de energía de los destellos, puesto que, en principio, excluyen el campo magnético potencial como fuente primordial de energía, dejando sólo el campo libre de fuerzas ("force free") como fuente de energía del destello. Además, los mecanismos de aceleración de partículas deben tener en cuenta este hecho, ya que no podrían ser tales que modificaran apreciablemente la estructura magnética del campo potencial en las regiones señaladas. Para aclarar algunas de estas interrogantes y orientar las investigaciones sobre los eventos y las fuentes de componente S, se desarrolló esta investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron como material de base los reportes de eventos solares del Solar Geophysical Data y las observaciones de la Estación Radioastronómica de La Habana (ERH). Con este material se construyeron los espectros de los máximos de los eventos, desde la longitud de onda de 1 cm hasta los 21 cm, aproximadamente, y se determinó el grado de polarización circular y el tipo morfológico.

La relación de las explosiones solares con las formaciones ópticas se estableció empleando los reportes de patrulla de "flares" en H α del Solar Geophysical Data y de Datos Solares; básicamente por superposición en el tiempo.

Los datos de observaciones espectrográficas en banda métrica se tomaron también del Solar Geophysical Data.

La primera tarea que nos propusimos fue la de agrupar los distintos eventos en ciertas clases espectrales que pudieran representar, de forma general, las características más frecuentes en los espectros de las explosiones solares.

Para ello, después de revisar los espectros construidos en base de los reportes, se determinaron seis clases espectrales. Estas clases espectrales, junto con el porcentaje de su frecuencia de aparición, se muestran en la Fig. 2. En ella se muestra cada clase espectral con un esquema del tipo de espectro y su descripción. Nótese que más de un 80 % del total de eventos observados en 1970 puede ser clasificado dentro de las clases escogidas, y que las clases 3 y 4 se diferencian en la posición del máximo.

Pero esta clasificación tendría un valor muy escaso si a ella no pudiera asociarse alguna otra característica de los eventos, especialmente características ligadas a las condiciones físicas de las regiones donde se producen los destellos. Para analizar esto, tratamos de encontrar alguna relación entre las clases espectrales y la clasificación morfológica (clasificación de las explosiones solares según la forma que presenta el aumento de la radiación cuando se observa a frecuencia fija), ya que para algunos de estos tipos existen hipótesis de generación. Para ello utilizamos los eventos observados en la ERH, en la longitud de onda de 4,5 cm, y se asoció a cada evento, siempre que fue posible, el tipo morfológico con que fue clasificado en nuestra estación, confeccionándose una tabla de tipo morfológico vs clase espectral (Fig. 3).

El análisis por una prueba de bondad de ajuste indica que en el caso de los eventos con tipo morfológico 3, el aumento de clase espectral 2 y disminución de

clase 3 sólo puede esperarse como casual en un 10 % de los casos. Para los de tipo 6,67, las variaciones observadas no son significativas.

De aquí deducimos que, al menos en el caso de los eventos con tipo morfológico 3, existe relación con la clase espectral 2, y que para los eventos de tipo morfológico 6,67 esta relación no está bien definida; probablemente porque la disminución de eventos con clase espectral 2 no se traduce en un aumento considerable de otra clase espectral, sino que se distribuye entre todas.

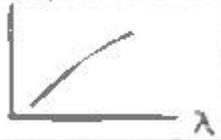
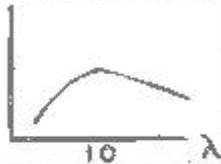
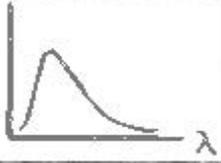
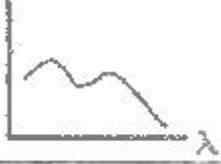
CLASE ESPECT.	FREC. (%)	ESPECTRO	DESCRIPCIÓN
1	15		MONÓTONO CRECIENTE
2	27		MONÓTONO DECRECIENTE
3	20		PENDIENTES CM Y DM DE SIGNO CONTRARIO
4	17		MÁXIMO EN BANDA CM CORTA
5	1		COMPLEJO
6	5		CONSTANTE

FIG. 2. Clases espectrales observadas en el diapásón 1 a 21 cm, y su frecuencia de aparición (porcentaje) observada en 1970.

Un parámetro muy importante de las fuentes locales es la intensidad de su campo magnético, por lo que procedimos entonces a buscar una relación entre la clase espectral y la intensidad del mismo. Para esto se construyeron tablas con la frecuencia de aparición de las distintas clases espectrales, para los grupos con área manchada mayor de 800 mhv y para los grupos con área manchada menor de 300 mhv, ya que se conoce que la intensidad del campo magnético a nivel fotosférico aumenta con el área del grupo.

En la Tabla 1 se nota un aumento de los eventos de clase espectral 4 para los grupos de Sp mayor de 800 mhv, y un aumento de los eventos de clase espectral 2 para los de Sp menor de 300 mhv. Los contrastes de hipótesis correspondientes por bondad de ajuste y prueba de proporciones dieron como resultado que el aumento de clase espectral 4 era débilmente significativo (nivel de significación del 20 %) pero no despreciable. El aumento de clase espectral 2 resultó no significativo.

Por cuanto los eventos en banda métrica de tipo III y U se conoce que tienen el mismo origen, diferenciándose en que en los eventos de tipo U las partículas que producen la radioemisión se desplazan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético que se cierra sobre la fotosfera (y se conoce que mientras más intenso es el campo magnético fotosférico, más alto penetran en la corona solar las líneas de fuerza hasta llegar a una región en que la estructura del campo magnético se rompe, formándose una estructura con la forma de una Y invertida), procedimos a realizar una tabla de los eventos tipo III y U que se observaron en banda métrica asociados a los eventos cuyos espectros habíamos construido.

TABLA 1. Frecuencia de aparición de las clases espectrales para distintos valores del área de los grupos de manchas.

Parámetro	Clases espectrales					
	1	2	3	4	5	6
Para todos los grupos						
<i>N</i>	104	188	141	121	5	37
%	14,5	26,5	19,8	15,6	0,7	5,2
Grupos <i>Sp</i> > 800						
<i>N</i>	30	58	50	53	1	10
%	12,8	24,8	21,3	22,6	0,5	4,2
$\Delta\%$	-1,8	-1,7	1,5	7,0	-0,8	-1,0
Grupos <i>Sp</i> < 300						
<i>N</i>	2	5	3	2		1
%	13,3	33,2	19,9	13,3		6,6
	-1,3	6,7	0,1	-2,3	-0,7	1,4

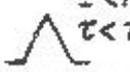
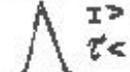
TIPO MORFOLÓGICO	ESQUEMA	CLASE ESPECTRAL					
		1	2	3	4	5	6
1	$I < 10\%$ $\tau < 7 \text{ MIN.}$ 	11	14	13	7	1	6
2	$I > 10\%$ $\tau < 7 \text{ MIN.}$ 	1	3	6	7	1	.
3	G.R.F. I MEDIA $\tau > 7 \text{ MIN.}$ 	8	29	12	17		5
4	P.B.I. 	5	11	13	8		4
5	P.B.D. 			1			
6, 67	$I < 500$ 	9	14	23	14	3	6
7							
8				1			
9				1	1		
10	$I > 500$ 	1	1	2	2		

FIG. 3. Relación observada entre los distintos tipos de la clasificación morfológica y las clases espectrales.

La Tabla 2 muestra, en primer lugar, que la probabilidad de aparición de eventos tipo III es máxima para la clase espectral 5; que para la clase espectral 2 es mínima, y que para el resto de las clases permanece entre el 10 y el 20%. Esto nos hace pensar que los eventos de clase espectral 2 ocurren en regiones donde el campo magnético es menos intenso y donde, por tanto, no penetra hasta grandes alturas en la corona solar, independientemente de que la prueba con los grupos de área manchada inferior a 300 m_hv haya resultado no significativa. Y, por otra parte, nos lleva a pensar que los eventos de clase espectral 5 ocurren, por el contrario, en los

TABLA 2. Frecuencia de aparición de eventos tipos III y U para las distintas clases espectrales de eventos en banda centimétrica.

Clase espectral No.	N	Tipo III		Tipo U	
		N	%	N	%
1	104	10	10		
2	188	4	2	2	50
3	141	25	18	5	20
4	121	13	17	1	7
5	5	4	80	1	25
6	37	2	10		

grupos en que el campo magnético es intenso y penetra profundamente en la corona solar.

El análisis de la relación N_{III}/N_U muestra que, en el caso de que se produzcan eventos de corrimiento rápido en frecuencia, la posibilidad de que éstos sean del tipo U es máxima para la clase espectral 2, o sea, que las partículas se moverán sobre líneas de fuerza que se mantienen cerradas, lo que también está de acuerdo con la hipótesis anterior. Las pruebas de contraste de hipótesis dan una confiabilidad del 20 %.

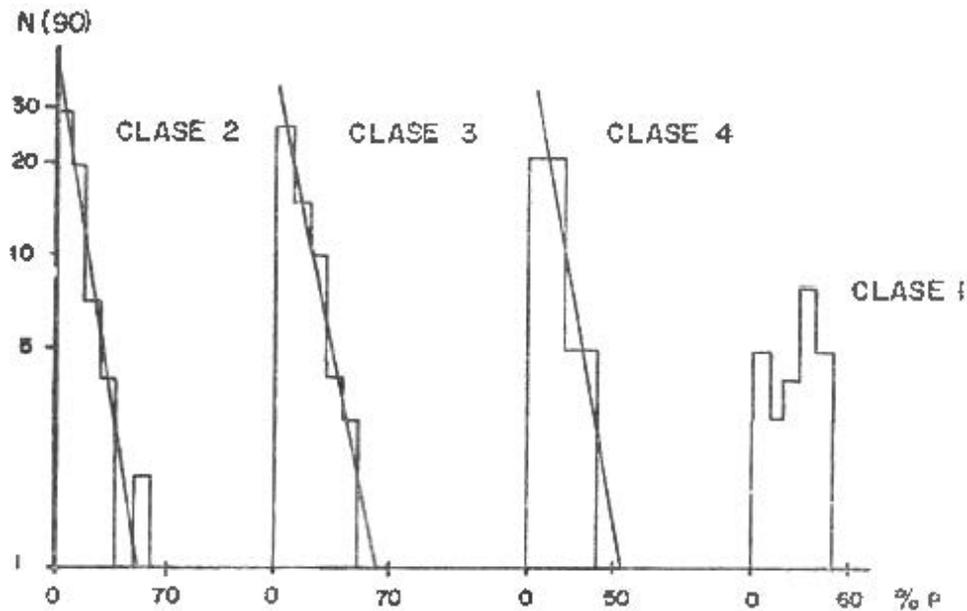


FIG. 4. Histogramas de la distribución del porcentaje de polarización circular, para aquellas clases espectrales que fueron observadas en más de 25 eventos.

Un parámetro muy importante de la radioemisión es su polarización. Para investigar este parámetro se construyó una tabla de porcentaje de polarización circular vs clase espectral, y se construyeron los histogramas correspondientes (Fig. 4), empleando para ello, igual que para el análisis entre el tipo morfológico y la clase espectral, los eventos que fueron observados en la ERH.

En todos los casos representados en la Fig. 4 (sólo se representan aquellos casos con más de 25 eventos), se observaron eventos con polarización mayor del 40 %, que fue el límite superior obtenido por PETEROVA (1975) para las fuentes locales en la longitud de onda de 4,4 cm. En este trabajo se expresa que una de las 330 fuentes analizadas presentaba polarización mayor del 40 %, por lo que este valor pudiera interpretarse como un límite inferior, ya que en esta frecuencia el poder de resolución del BPR, en su dirección más estrecha, es del orden de 1,8 min de arco, y las fuentes de emisión polarizada (como se conoce de las observaciones de eclipses) pueden ser más pequeñas.

El análisis de la distribución del porcentaje de polarización muestra que con un nivel de significación del 1 % se puede considerar que las clases espectrales 2, 3, y 4 presentan la misma distribución.

Para analizar el comportamiento de la polarización con la posición del evento en el disco solar, se construyó un gráfico de porcentaje de polarización promedio para los distintos intervalos de heli longituditud respecto al meridiano central.

Por cuanto los grupos de manchas de los hemisferios *N* y *S* tienen manchas líder de polaridad contraria, se escogió arbitrariamente que para los grupos con latitud negativa la polarización circular derecha sería positiva, y que para los grupos con latitud positiva la polarización circular derecha sería negativa. Obtuvimos entonces el resultado que aparece en la Fig. 5. En ella podemos notar que, para

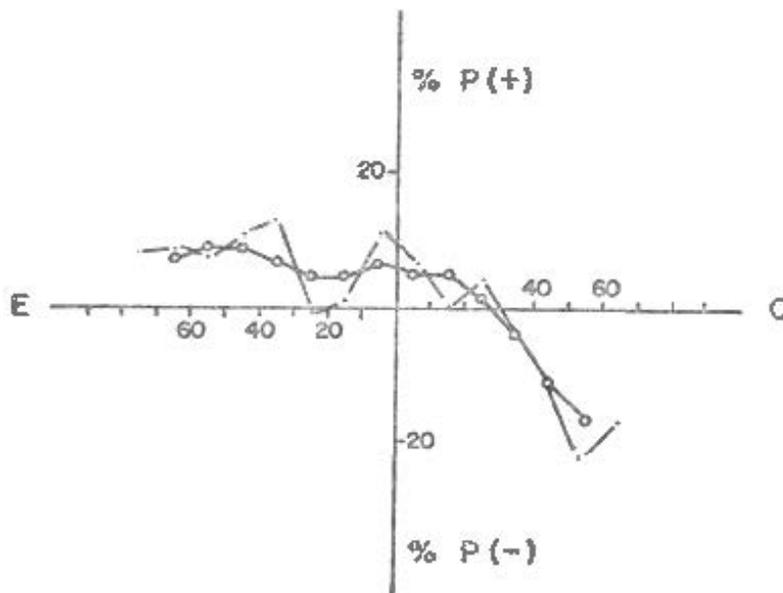


FIG. 5. Comportamiento del porcentaje de polarización circular de la radioemisión de los eventos, promediado sobre intervalos de heli longituditud de 10°. La curva de puntos representa valores promedio; la de círculos, valores suavizados por un promedio deslizando.

longitudes mayores de 30 grados después del PMC, el signo de la polarización circular no vuelve a tomar valores positivos. De los valores promedio obtenidos puede decirse que el signo del porcentaje de polarización cambia entre los 10 y los 40 grados después del PMC, lo que equivale a 1-3 días con un valor probable de 2 días. Estos valores están de acuerdo con el de 1-2 días después del paso por el meridiano central obtenido por PETEROVA (1975) para las fuentes de componente S. La pequeña densidad de eventos observada para longitudes mayores de 60-70 grados de heliolatitud puede deberse a la directividad de la radioemisión, asunto éste poco estudiado.

3. RESULTADOS

Las clases espectrales dadas por nosotros pueden cubrir más del 80 % de los eventos que se observan, y en principio recoge las clasificaciones anteriores (GUIDICE y CASTELLI, 1973; KRUGER, 1976) aunque no toma en consideración la intensidad del máximo del evento.

Se obtuvo la probabilidad de que ocurrieran eventos de cada clase espectral (para el período de 1970, año cercano al máximo de actividad solar), valores éstos que pueden ayudar a determinar el tiempo de observación necesario para obtener suficientes eventos de cada clase espectral para analizar sus características de polarización u otras.

Se detectó que los eventos de tipo morfológico 3 (GRF) están asociados a la clase espectral 2 con un nivel de significación del 10 %.

Se probó hallar una relación entre las clases espectrales, el campo magnético (intensidad mediante el área del grupo) y estructura (mediante la aparición de eventos tipo III y U en banda métrica), obteniéndose como resultado que estas asociaciones no están en general bien definidas. Se observó un aumento de clase espectral 4 para los grupos con área manchada mayor de 800 mhv (con un nivel de significación del 20 %). Los valores de la relación N_{III}/N_U se comportan de forma que apoyan la suposición (con un nivel de significación del 20 %) de que los eventos de clase espectral 4 están ligados a configuraciones abiertas, y los de clase espectral 2 a configuraciones cerradas, del campo magnético.

El análisis del porcentaje de polarización circular (que sólo se llevó a cabo para las clases espectrales con N mayor de 25) mostró que las clases espectrales 2, 3, y 4 no presentan un carácter significativamente distinto (nivel de significación del 1 %). La clase espectral 1, por el contrario, mostró un comportamiento que la segrega del resto de las clases espectrales analizadas. En relación con la componente S podemos decir que, en todos los casos, el valor máximo sobrepasa el observado para la componente S.

El estudio de la dependencia del porcentaje de polarización respecto a la posición de la fuente en el disco solar mostró el cambio del signo durante el paso de las regiones activas. El momento del cambio del signo de la polarización ocurre entre 1 y 3 días después del paso por el meri-

diano central, lo que concuerda aproximadamente con el valor de 1-2 días después del paso por el meridiano central obtenido para las fuentes de componente S. Esto reafirma la idea nuestra de que la zona de interacción de las ondas normales no es afectada por la explosión. Es probable que el hecho de que no haya sido observado el fenómeno de depolarización sea debido a una débil estadística en cada uno de los sectores de heliolatitud, ya que la intensidad de los eventos varía dentro de límites muy amplios.

Un análisis de este tipo para cada una de las clases espectrales podría dar un estimado de la altura relativa de las distintas fuentes de radioemisión, lo que pudiera confirmar las hipótesis anteriores.

4. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Las clases espectrales dadas presentan asociaciones con características de las regiones activas. En especial la clase 2 se relaciona con regiones de campo magnético de configuración cerrada y relativamente débil, y la clase espectral 4 con regiones de campo magnético de configuración abierta y fuerte. La clase espectral 1 muestra un comportamiento de polarización significativamente distinto del resto de las clases analizadas y del obtenido por otros investigadores para la componente S.

El resultado obtenido de la dependencia del signo de la polarización circular de la posición del evento en el disco solar muestra que el efecto hallado por nosotros para algunos grupos tiene un carácter más general, lo que reafirma la idea de la rigidez del campo magnético a nivel coronal.

Estos resultados permitirán, bajo un enfoque observacional, analizar las posibilidades de los distintos mecanismos de generación para cada caso concreto; aspecto éste que será tratado en futuras investigaciones.

REFERENCIAS

- GUIDICE, D. A., y CASTELLI, J. P. (1973): *High energy phenomena on the sun*. NASA SP-342, Washington, pp. 87-108.
- KAIDANOVSKII, M. N., PETEROVA, N. G., y RODRÍGUEZ, R. E. (1978): Rezultati nabludienii solnechnovo zatmeniya 24 dekabrya 1973 g. v Gavane na volnax 2,0, 4,5 cm. *Astrofizicheskie Issledovaniya*, 10:9-17.
- KRUGER, A. (1976): A study of circular polarization of solar microwave burst emission. *Physica Solari-terrestris*, 1:7-16.
- NEFEDEV, V. P. y TRESKOVA, L. E. (1969): Polarization of solar radioburst at 3,2 cm and its connection with the magnetic field at the photospheric level. *Solniechnie Dannie*, 7:107-113.
- PETEROVA, N. G. (1975): Issledovanie krugavoi polarizatsii istochnikov s-komponenti radioizlucheniya solutsa po nabludieniyam s visokim razriosheniom. *Astrofizicheskie Issledovaniya*, 7:134-146.
- PETEROVA, N. G., y RODRÍGUEZ, R. E. (1977): Some results of the study of the polarization in microwave bursts and S-component source. *Solniechnie Dannie*, 2:47-53.

ABSTRACT

A statistical study of solar burst is made. A classification is established in the 1 to 21 cm band based on the observed spectra, and the association of these spectral classes with the morfological classification and the magnetic field of the active region in which they occur, is presented. Some characteristics of the circular polarization in the maximum were also analyzed.