

Diagnóstico retrospectivo de los destellos protónicos implementado con las observaciones mundiales de los radioeventos en las frecuencias del Servicio del sol en el Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba (II)*

**Ilia M. CHERTOK,
**Valeri V. FOMICHEV
y ***Eduardo del POZO

RESUMEN. *Se continúa el análisis del diagnóstico cuantitativo de los eventos protónicos ocurridos durante el periodo de 1966-1986, utilizando los máximos de intensidad de los radioeventos en microondas en las frecuencias de 6,7; 9 y 15 GHz. Se reafirman los fundamentos del diagnóstico que caracterizan el vínculo entre la intensidad del radioevento y los flujos de protones con energías mayores de 10 Mev en la Tierra, así como el vínculo entre el espectro de frecuencias del radioevento y el espectro energético de las partículas. Se obtiene una mejor correspondencia entre lo calculado y lo observado, que permite mejorar la efectividad para el pronóstico de los parámetros de los flujos de protones por radiodatos.*

INTRODUCCIÓN

En el artículo anterior (Chertok *et al.*, 1991) se analizaron los vínculos de la intensidad del flujo de protones en la Tierra con energías mayores de 10 Mev J_{10} y del índice r del espectro energético de los protones

*Manuscrito aprobado en diciembre de 1989.

**Instituto de Magnetismo Terrestre, Ionosfera y Propagación de Radioondas de la Academia de Ciencias de la URSS.

***Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.

($J_E \propto E^{-\tau}$), con los parámetros del radioevento en microondas. Se utilizó la intensidad máxima del radioevento en 6,7 GHz en calidad de parámetro principal de entrada S_7 , con la ayuda de la relación entre las intensidades máximas en 6,7; y 15 GHz como parámetro de espectro. Las observaciones que se realizan en la Estación Radioastronómica de la Habana, también dan la posibilidad de obtener un diagnóstico de los destellos protónicos incorporando otros parámetros de entrada: los máximos de intensidad del radioevento en las frecuencias de 9 y 15 GHz, es decir, S_9 y S_{15} , así como los parámetros S_7/S_9 y S_9/S_{15} .

El análisis de las características de la

dependencia de los flujos de protones con estos radioparámetros, se presenta en esta segunda parte del trabajo, empleando el conjunto de más de 100 eventos protónicos ocurridos durante el período 1966-1986 que se utilizó en el primer artículo, con el mismo método de análisis.

Por brevedad no se repetirán todos los detalles del análisis y las ecuaciones que relacionan los parámetros del flujo de protones con los parámetros del radioevento; y se centra la atención en la presentación de las dependencias fundamentales y los resultados del diagnóstico de los destellos protónicos a partir de los diferentes parámetros de entrada.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DEL ESPECTRO ENERGÉTICO DEL FLUJO DE PROTONES

En el primer artículo (Chertok, 1988) se describe el método de evaluación del índice del espectro energético de los protones τ a partir de la relación de los radioflujos S_7/S_{15} . Otro posible parámetro de entrada ya visto en la literatura es S_9/S_{15} (Chertok, 1982): al analizar el gran número de eventos se reafirma el ya mencionado vínculo entre τ y S_9/S_{15} , con un coeficiente de correlación para los eventos Oeste de 0,585. La corrección por heliolongitud $\tau(\theta)$ para todos los posibles parámetros de entrada corresponden con las ecuaciones (2) del primer artículo.

En la Fig. 1 se muestra la dependencia del índice τ del parámetro S_7/S_9 para los eventos Oeste, donde S_7/S_9 es la relación de las intensidades máximas del radioevento en las frecuencias de 6,7 y 9 GHz. Este parámetro no había sido analizado con anterioridad y puede observarse que tiene lugar una relación bastante clara entre τ y S_7/S_9 : a un radioespectro más débil (mayor relación S_7/S_9) le corresponde un espectro energético más blando de los protones

en la Tierra (mayor valor del índice τ).

Como las frecuencias de 6,7 y 9 GHz son cercanas, la relación S_7/S_9 toma valores en un intervalo no muy amplio (entre 0,55 y 1,4), que se corresponden con valores medios del índice espectral de los protones τ de 1,1 a 2,8; el coeficiente de correlación entre τ y S_7/S_9 es aproximadamente de 0,64, y la regresión es:

$$\tau(S_7/S_9) = 0,386 + 1,606(S_7/S_9) \quad (1)$$

Así es posible obtener los valores de τ_c para todo el conjunto de eventos calculados a partir de los radioparámetros S_7/S_9 , S_9/S_{15} y S_7/S_{15} utilizando la expresión general:

$$\tau_c = \tau(SF_1/SF_2) + \tau(\theta) \quad (2)$$

y compararlos con los valores observados τ_o .

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la comparación y en la Fig. 2 se muestra la relación entre τ_o y τ_c , donde el valor calculado τ_c es el promedio de las tres eva-

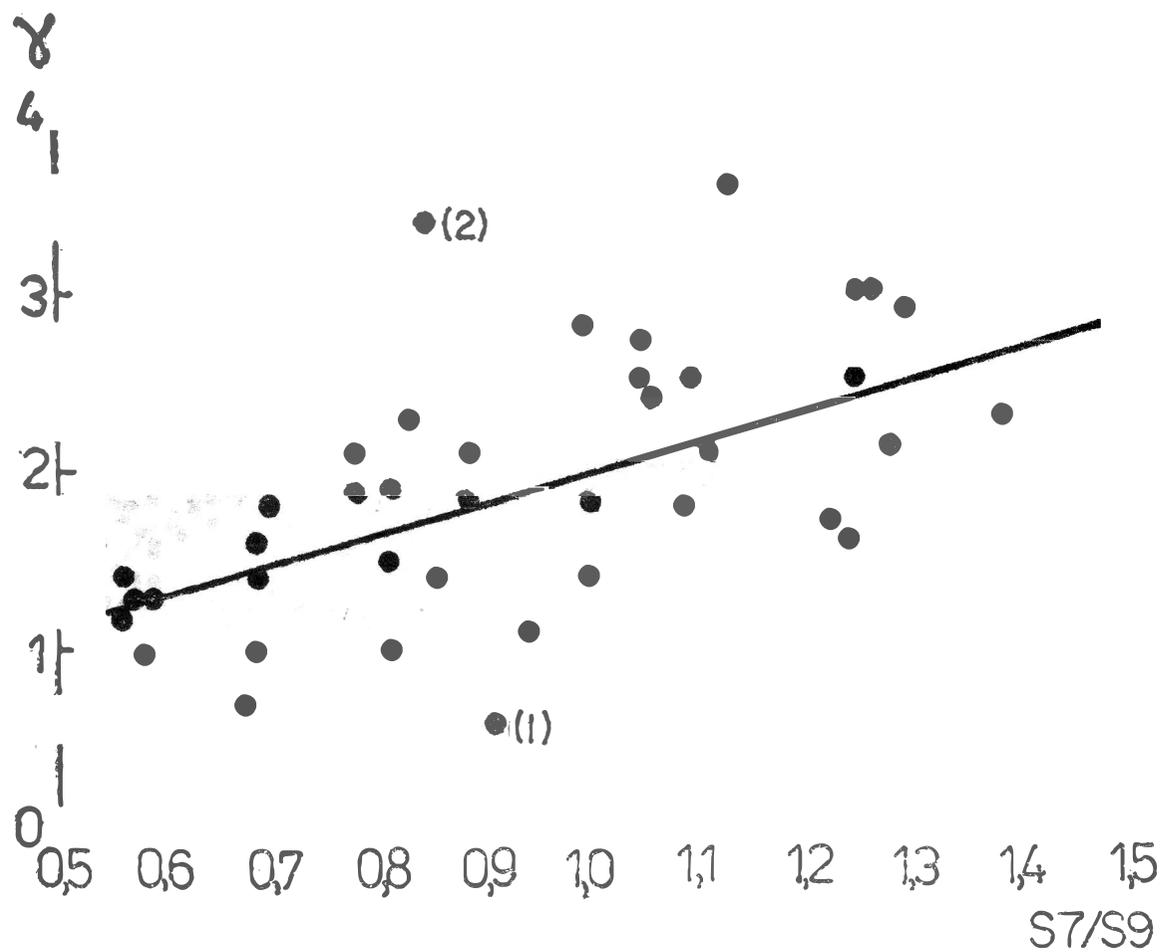


Fig. 1. Relación entre el índice del espectro energético de los protones γ y el radioparámetro S_7/S_9 para los destellos Oeste.

TABLA 1. Relación entre la magnitud r_c del índice del espectro energético de los protones calculada y la magnitud r observada.

r_c	$\gamma(S_7/S_9)$	$\gamma(S_7/S_{15})$	$\gamma(S_9/S_{15})$	r_c
Coefficiente de correlación	0,78	0,83	0,81	0,84
% con $ \gamma_o - \gamma_c \leq 0,5$	64	72	62	69
% con $ \gamma_o - \gamma_c \leq 0,25$	69	74	72	78
r_o				

luaciones de r calculadas a partir de los radioparámetros S_7/S_9 , S_9/S_{15} y S_7/S_{15} .

El análisis demuestra que el pronóstico a corto plazo del índice del espectro energético de los protones es factible a partir de cada uno de estos parámetros. Así como el valor medio de estos pronósticos, que

dan una correspondencia suficientemente buena entre r_c y r_o con coeficientes de correlación de 0,78 a 0,84 para todo el conjunto de eventos. El acierto en 62 a 74 % de los casos según las diferencias absolutas entre lo observado y lo calculado, no sobrepasan los límites $|\gamma_c - \gamma_o| < 0,5$, y en

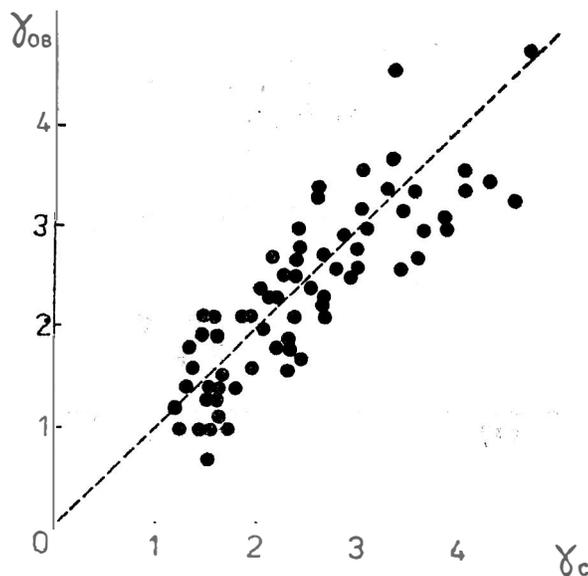


Fig. 2. Relación entre la magnitud observada γ_o , y el promedio de lo calculado por los diferentes parámetros de entrada γ_c del índice del espectro energético de los protones.

70 a 78 % las diferencias relativas no sobrepasan los límites $|r_c - r_o|/r_o < 0,25$. De los tres radioparámetros la mejor correspondencia se obtuvo al utilizar el paráme-

tro S_7/S_{15} , y evidentemente se debe, a que los datos del parámetro caracterizan al radioespectro en una banda más amplia del espectro de frecuencias.

DETERMINACION DE LA INTENSIDAD MÁXIMA DEL FLUJO DE LOS PROTONES

Como se mostró en el primer artículo con el análisis a partir del parámetro de entrada S_7 , la expresión general para el cálculo de la intensidad máxima del flujo de protones J_{10} es:

$$J_{10} = K_{1,2,3} (SF_1/SF_2, \theta) * \varphi_{1,2,3}(\theta) * J(SF_1), \quad (3)$$

donde $J(SF_1)$ es la función de intensidad que caracteriza el flujo medio de protones del destello a partir del parámetro de entrada SF_1 , sin considerar los efectos fundamentales de la heliolongitud.

$\varphi_{1,2,3}(\theta)$ es la función debilitamiento por heliolongitud, que representa el debilitamiento del flujo de protones del destello según su posición (θ) en el disco del Sol, teniendo en consideración las diferentes condiciones de salida de las partículas (componente métrica). Esta función describe los siguientes efectos:

a. Para los destellos Oeste: Los de componente métrica intensa se caracterizan por un flujo de protones con mayor intensidad y los de componente métrica débil por un menor flujo de protones.

b. Para los destellos Este: La influencia de la componente métrica en la intensidad del flujo de protones se invierte, cuanto más fuerte es la componente métrica, mayor es el debilitamiento por heliolongitud y por consiguiente un menor flujo de protones.

Los parámetros de entrada S_9/S_{15} para la evaluación del flujo de protones, ya han sido utilizados [Akinjian et al., 1978, 1981]. Al examinar estos parámetros con todo el

conjunto de datos de los eventos del período 1966-1986, se demuestra la permanencia de los efectos fundamentales ya descritos, pero es necesario incluir algunos cambios en las expresiones analíticas anteriores, tanto de la función intensidad, como de la función debilitamiento.

El nuevo elemento fundamental que aparece en la fórmula (3) para el diagnóstico de los destellos protónicos, es la función de corrección espectral $K_{1,2,3} (SF_1/SF_2, \theta)$; ella representa en cuántas veces la magnitud observada del flujo de protones J_o se aparta del flujo calculado a partir de las funciones de intensidad y debilitamiento, es decir de: $J'_c = J(SF_1) * \varphi_{1,2,3}(\theta)$, y describe la dependencia del cociente J_o/J'_c del radioparámetro SF_1/SF_2 . En otras palabras, $K_{1,2,3} (SF_1/SF_2, \theta)$ caracteriza la dependencia de la intensidad del flujo de protones en la Tierra a partir de su espectro energético en la región del destello.

En el primer artículo, a partir del parámetro de entrada S_7 se determinó la función de corrección espectral empleando el cociente S_7/S_{15} , es decir $K(S_7/S_{15}, \theta)$. Además como se vio en el epígrafe anterior, tiene lugar una estrecha dependencia entre el índice del espectro de protones r y los diferentes cocientes de radioparámetros SF_1/SF_2 . Para cada parámetro de entrada S_7 , S_9 y S_{15} , puede emplearse una de las relaciones S_7/S_9 , S_7/S_{15} , ó S_9/S_{15} en la determinación de la función espectral de corrección.

Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 2, con los coeficientes de

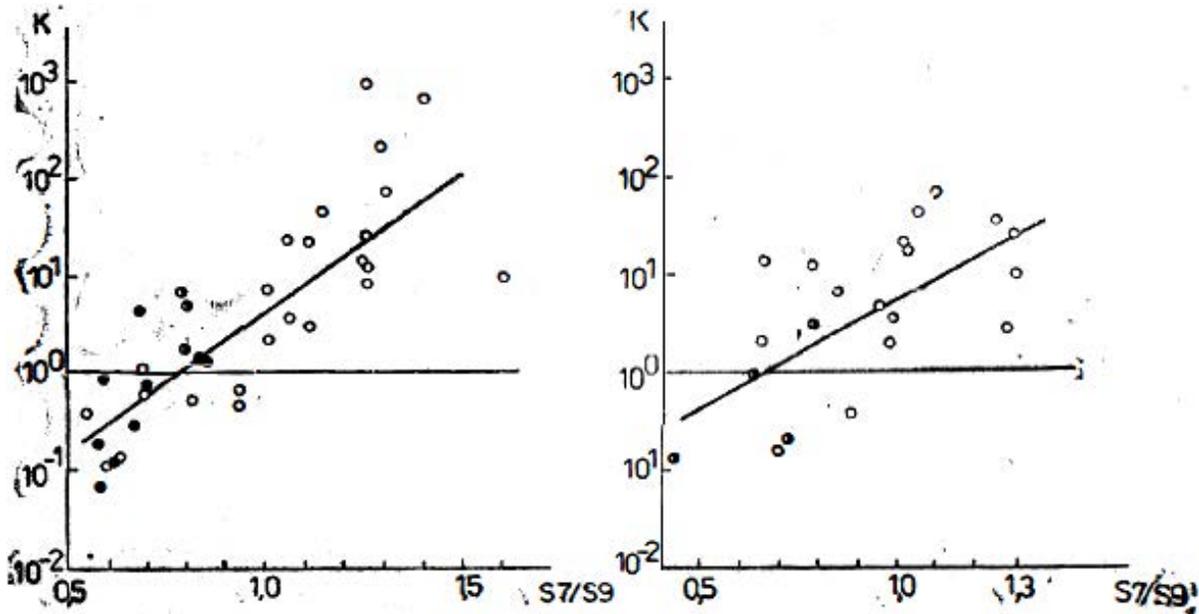


Fig. 3. Dependencia del coeficiente de corrección por radioespectro $K(S_7/S_9)$ con parámetro de entrada S_9 para los eventos Oeste (a la izquierda) y para los eventos Este (a la derecha).

correlación entre los valores de la corrección espectral K y los radioparámetros SF_1/SF_2 . Obsérvese que con cada parámetro tiene lugar una correlación positiva, y se ha tomado a $F_1 < F_2$. Este efecto fundamental se ilustra en la Fig. 3 para el parámetro S_9 y la relación de radioflujos S_7/S_9 , que contiene los siguientes elementos

fundamentales: para un radioespectro débil (un valor grande de S_7/S_9), la intensidad del flujo de protones en la Tierra J_{10} se presenta mucho mayor que el calculado con S_9 ; y para un radioespectro duro (un valor pequeño de S_7/S_9), la intensidad del flujo de protones se presenta menor que el calculado a partir de S_9 .

TABLA 2. Coeficientes de correlación entre el factor de corrección espectral K y los parámetros radioespectrales SF_1/SF_2 , para los parámetros de entrada S_7 , S_9 y S_{15} .

Parámetro de entrada	$K, \gamma(S_7/S_9)$		$K, \gamma(S_7/S_{15})$		$K, \gamma(S_9/S_{15})$	
	Oeste	Este	Oeste	Este	Oeste	Este
S_7	0,69	0,59	0,62	0,46	0,39	0,23
S_9	0,79	0,67	0,66	0,50	0,41	0,19
S_{15}	0,71	0,66	0,73	0,56	0,55	0,31

En la Tabla 2 se observa también, que de todos los parámetros de entrada hay un vínculo más estrecho entre K y los radioparámetros SF_1/SF_2 cuando utilizamos la relación S_7/S_9 , y el vínculo más débil se tiene con la relación S_9/S_{15} . Probablemente esto se debe a que el factor principal, el debilitamiento del radioespectro y el correspondiente debilitamiento del espectro energético de las partículas aceleradas, se refleja mejor por la relación de radioflujos en frecuencias suficientemente bajas como 6,7; y 9 GHz. Al mismo tiempo al utilizar sólo frecuencias altas 9 y 15 GHz, en mayor medida caracteriza la parte dura del radioespectro y a las partículas de

energías más altas en el destello.

La Tabla 3 presenta para todo el conjunto de eventos y partículas con $E > 10$ Mev, los resultados de la comparación de la intensidad del flujo observado J_o por la fórmula (3), separadamente para cada uno de los parámetros de entrada S_7 , S_9 y S_{15} , utilizando como parámetro radioespectral la relación S_7/S_9 . En la Fig. 4 (así como en la última columna de la Tabla 3), se muestra la relación entre J_o y los valores de J_c obtenidos al promediar los valores de intensidad resultantes de la aplicación de la fórmula (3) a partir de cada uno de los parámetros y S_7/S_9 .

TABLA 3. Relación entre las magnitudes observadas y calculadas de la intensidad del flujo de protones.

J_c	$J(S_7, S_7/S_9)$	$J(S_9, S_7/S_9)$	$J(S_{15}, S_7/S_9)$	J_c
Coefficiente de correlación	0,793	0,789	0,769	0,801
% con J_o y $J_c \leq 10$ u ó $ J_o/J_c \leq 2,5$	64	61	56	63

Se muestra que cada uno de los valores calculados a partir de estos parámetros dan una buena correspondencia con la intensidad del flujo de protones observada. El coeficiente de correlación entre J_o y J_c para todos los casos está entre los límites de 0,77 a 0,80. El número de pronósticos exitosos es decir: la suma de los casos en que ambas magnitudes J_o y J_c tienen valores inferiores a los 10 cm s ester, con aquellos casos en que la diferencia entre ellas no

rebase el factor de 2,5 veces, es de 56 a 64 % con relación al total de eventos analizados. Un mejor resultado se obtiene cuando cada uno de los parámetros de entrada S_7 , S_9 , y S_{15} son utilizados para el cálculo, y J_c se determina por el promedio de los resultados obtenidos a partir de cada parámetro de entrada; así, el coeficiente de correlación alcanza el valor de 0,80 y los pronósticos exitosos ≈ 65 %.

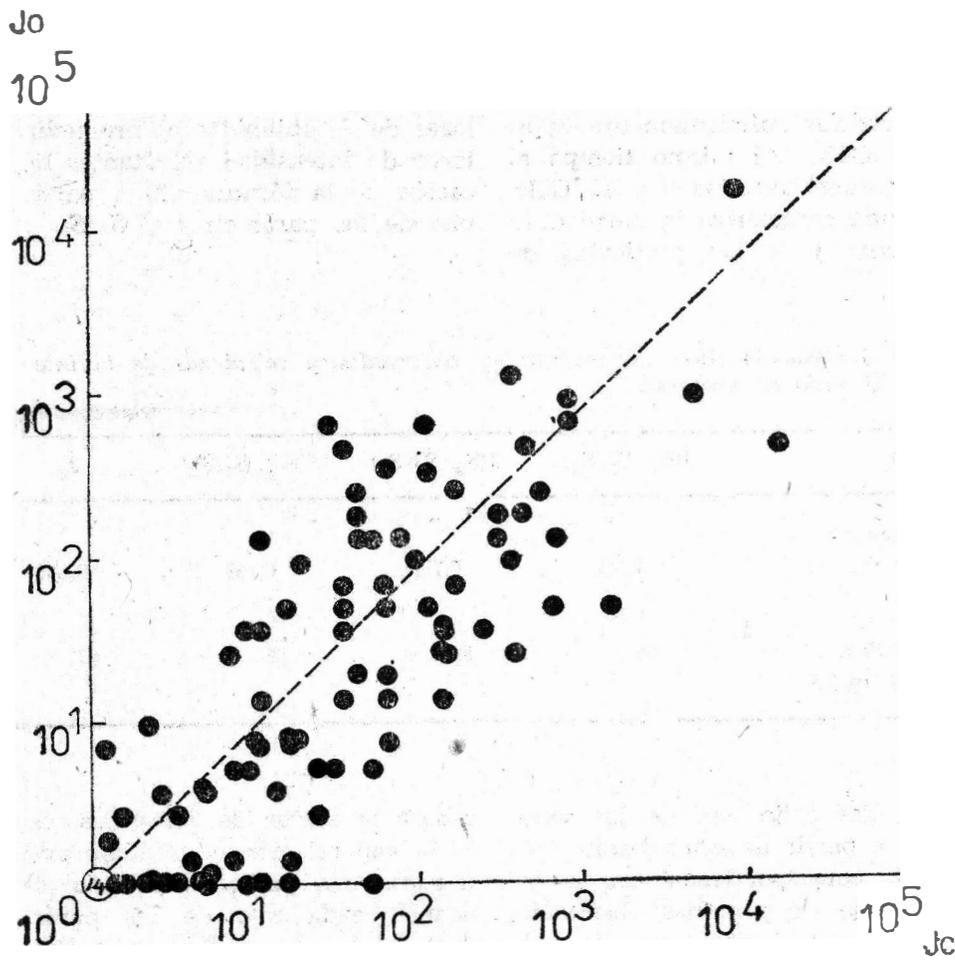


Fig. 4. Dependencia entre la magnitud observada J_0 y el promedio de los valores calculados J_c para la intensidad del flujo de protones.

CONCLUSIONES

Los resultados de las partes I y II garantizan que cada una de estas frecuencias, que son las utilizadas para la observación de radioeventos en el Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA), en conjunto permiten evaluar el índice del espectro energético y la intensidad del flujo de protones para energías $E > 10$ Mev, teniendo en cuenta el importante factor de la potencia energética del destello (intensidad del radioevento en microondas), las condiciones de salida de las partículas (componente métrica de la radioemisión), el espectro energético de las partículas (espectro de frecuencias del radioevento), y la heliolongitud del destello (debilitamiento del flujo de protones de los destellos Este y el debilitamiento

de su espectro).

Por otra parte, perfeccionar los datos de las observaciones en la Tierra de la intensidad del flujo de protones de los eventos, sería un nuevo e importante elemento para el trabajo en el diagnóstico, en particular en aquellos con un espectro de frecuencias de radioemisión débil (débil espectro energético de las partículas).

Estos resultados reafirman una vez más la gran información que posee la radioemisión, y ponen de manifiesto que los fundamentos de esta informatividad descansan en el vínculo cuantitativo entre electrones y protones, en el proceso de aceleración de las partículas durante el destello.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los colaboradores del Departamento de Astronomía del IGA: Genaro del Río Hernández y Jesús Soto Pérez por su participación en la traducción del texto del artículo, y a Michel Monzón por la preparación de las ilustraciones. El trabajo forma

parte de los planes de colaboración científica entre la Academia de Ciencias de Cuba y la Academia de Ciencias de la URSS para la Radioastronomía. Dos de sus autores (I. Chertok y V. Fomichev) reconocen a la dirección del IGA por la hospitalidad y buenas condiciones de trabajo.

REFERENCIAS

- Akinjian, S. T., M. M. Alibegov, V. D. Kozlovskii, y I. M. Chertok (1978): Diagnóstico de los destellos protónicos por los radioeventos en la frecuencia de 9 GHz. *Geomagnetismo y Aeronomía*, 18(3): 410-415.
- Akinjian, S. T., V. V. Fomichev, y I. M. Chertok (1981): Valoración de los flujos de protones por las características del radioevento en las frecuencias de 15-19 GHz. *Física Sol Tierra*, Potsdam, 17: 135-143.
- Chertok, I. M. (1982): Valoración del índice del espectro energético de los protones con los datos de los radioeventos solares en microondas. *Geomagnetismo y Aeronomía*, 22(2): 182-186.
- Chertok, I. M., V. V. Fomichev, y E. del Pozo (1991). Diagnóstico retrospectivo de los destellos protónicos implementado con observaciones mundiales de los radioeventos en las frecuencias del Servicio del Sol en el IGA de la Academia de Ciencias de Cuba: *I. Ciencias Tierra Espacio*, 19, 1991.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 20, 1992

PROTONS FLARES RETROSPECTIVE DIAGNOSTIC SUPPORTED
ON BURST WORL OBSERVATIONS IN THE SUN PATROL
FRECUENCIES AT THE GEOPHYSIC AND ASTRONOMY
INSTITUTE OF THE CUBAN ACADEMY OF SCIENCES. II

ABSTRACT. Proton events cuantitative diagnostic analysis is continued for the period of 1966 to 1986, supported on the microwave burst intensity maxima in the frecuencies of 6.7, 9, and 15 GHz. The diagnostic principle relating burst intensity maxima to arrival on Earth of proton flux intensity maxima with energy grather than 10 Mev is confirmed. The relationship between burst frecuency espectra and particles energy spectra was also reafirmed. Better agreement between the observed data and calculate one is obtained, and also better effectivity in the proton flux parametra forecast by radio data.

Ilia M. CHERTOK,
Valeri V. FOMICHEV
and Eduardo del POZO