

# Las tormentas de microsismos como fuentes de pulsaciones geomagnéticas

ARTURO D'COSTA, MARIO RUBIO, y LEONID S. ALPEROVICH

**RESUMEN.** Se analiza la influencia de las ondas de Rayleigh presentes en las tormentas de microsismos sobre la capa E de la ionosfera como un posible mecanismo para la generación de pulsaciones geomagnéticas.

Las ondas acústico-gravitacionales generadas por las ondas de Rayleigh pueden perturbar una ionosfera isotérmica débilmente ionizada produciendo dos tipos posibles de movimientos ondulatorios, uno de ellos correspondiente a las ondas magnetohidrodinámicas.

Partiendo de una onda de Rayleigh como perturbación inicial, se obtiene una solución para el modo MHD, que predice una variación del campo geomagnético con igual frecuencia que la onda que la provoca.

El análisis espectral de tormentas de microsismos y pulsaciones geomagnéticas simultáneas muestra una buena coincidencia entre los espectros de amplitud de ambas, dando apoyo experimental a la hipótesis de las ondas de Rayleigh de las tormentas de microsismos como una posible fuente de pulsaciones geomagnéticas.

## 1. INTRODUCCIÓN

La producción de ondas acústico-gravitacionales en la atmósfera, como consecuencia de los movimientos telúricos, fue experimentalmente confirmada durante el terremoto ocurrido en Alaska el 28 de marzo de 1964 (LEONARD y BARNES, 1965).

El movimiento del aire que acompaña a la onda acústico-gravitacional, al llegar a la altura de las capas ionosféricas, produce una corriente eléctrica la cual, al interactuar con el campo geomagnético, provoca la aparición de una fuerza hidromagnética que puede a su vez causar alteraciones en el movimiento de las partículas cargadas, lo que daría lugar al surgimiento de heterogeneidades, de carácter local, en la concentración de la ionosfera. Esta teoría ha sido desarrollada por KATO *et al.*

---

Manuscrito aprobado el 13 de junio de 1979.

A. D'Costa y M. Rubio pertenecen al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba. L. S. Alperovich pertenece al Instituto de Física de la Tierra, de la Academia de Ciencias de la URSS.

(1968), estableciendo la posible génesis de estas heterogeneidades, cuyo movimiento posterior, debido a la propia onda acústico-gravitacional, había sido estudiado teóricamente con anterioridad (KATO, 1965; TSEDILINA, 1965).

La relación entre las ondas de Rayleigh de los terremotos y los movimientos de las capas ionosféricas ha sido establecida en forma experimental (YUEN *et al.*, 1969) con ayuda de los registros de las variaciones de la frecuencia de una onda reflejada en las capas ionosféricas (efecto Doppler).

En este trabajo se estudia la posibilidad de generación de pulsaciones geomagnéticas en las capas ionosféricas, considerando como fuente de las ondas acústico-gravitacionales las tormentas de microsismos.

En los sismógrafos, además de los terremotos, se registran continuamente pequeños movimientos de la corteza terrestre, llamados ruidos sísmicos o microsismos, que son ruidos coherentes con espectro de frecuencias muy amplio y que afectan la obtención de la información útil en los sismogramas.

Los microsismos se presentan con formas características, como grupos muy bien definidos o como grupos aislados sobre un fondo de microsismos continuos. Al intensificarse las tormentas meteorológicas en el océano y al paso de los frentes fríos se producen intervalos de tiempo durante los cuales aumentan considerablemente las amplitudes y períodos de los microsismos, produciéndose lo que se conoce como tormenta microsísmica. La actividad media de los microsismos es mayor en los meses invernales dada la ocurrencia más frecuente de frentes fríos, ciclones extratropicales, etc.

Debido a la compresibilidad del agua, estos eventos meteorológicos transmiten suficiente energía al lecho oceánico para producir ondas elásticas (LONGUET-HIGGINS, 1950). HAUBRICH *et al.* (1963) estudiaron los espectros de los microsismos, encontrando un pico principal del espectro que se corresponde con la frecuencia de las olas, y otros con el doble de esta frecuencia, y que había sido predicho por la teoría de Longuet-Higgins.

Casi todos los autores están de acuerdo en considerar que las ondas superficiales de Rayleigh contribuyen apreciablemente a la composición de los microsismos.

Se ha encontrado (MONAJOV y DOLBILKINA, 1960) que en la composición de los microsismos generados por tormentas meteorológicas localizadas en el Atlántico Norte, no intervenían las ondas de Love; las ondas de Rayleigh constituían un 15 y un 75 %, y eran ondas con una trayectoria compleja de las partículas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para este trabajo se utilizaron registros sísmicos y magnéticos del observatorio geofísico "Soroa" ( $\Phi = 34,5^\circ$ ;  $\Lambda = 345^\circ$ ;  $\varphi = 22^\circ 47' N$ ;  $\lambda = 83^\circ 00' O$ ).

Para el análisis de la tormenta microsísmica en el dominio del tiempo se utilizaron registros de las tres componentes del complejo sismológico de períodos medios, y para el análisis en el dominio de la frecuencia se emplearon sólo registros de la componente vertical Z. Esto permitió estudiar las amplitudes y períodos de los microsismos en ambos dominios, para lo cual se determinaron sus parámetros en intervalos de 20 min, tomados cada 3 horas.

Los registros sísmicos con un factor de tiempo de 30 mm/min. fueron ampliados y digitalizados con un intervalo de muestreo de 0,8 s.

Para el análisis de las pulsaciones geomagnéticas se utilizaron los registros de inducción magnética en dos bobinas (*N-S* y *E-W*) con un factor de tiempo de 30 mm/min. y un factor de escala de 15 m $\gamma$ /mm (GUELLER *et al.*, 1977). Estos registros se amplificaron y digitalizaron con igual intervalo de muestreo que los sísmicos.

Con los datos así obtenidos se calcularon los espectros de los microsismos y de las pulsaciones geomagnéticas, utilizando una computadora ES-1022 y un programa basado en el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier, desarrollado por Cooley-Turkey, y fueron suavizados empleando el método de Hamming-Tukey. La respuesta de amplitud de los registradores se tuvo en cuenta para hacer las correcciones necesarias a los espectros.

## 3. RESULTADOS

ALPEROVICH *et al.* (1979) estudiaron teóricamente la posible generación de variaciones geomagnéticas, con períodos del orden de 1-10 min., en las capas bajas de la ionosfera debido a un pulso acústico-gravitacional plano, originado en la atmósfera por la ocurrencia de un terremoto.

Las ondas de Rayleigh viajan por la superficie terrestre con velocidades de 2,4 a 4,5 km/s, o sea de 4 a 8 veces la velocidad de propagación de las ondas acústico-gravitacionales en su movimiento ascendente en la atmósfera; por ello, basándonos en el mismo modelo, supusimos como fuente de la onda acústico-gravitacional una onda plana de Rayleigh, de la forma:

$$V_0(t) = V_0 \exp(i\alpha_R t) \quad (1)$$

cuya transformada de Fourier tiene la expresión:

$$V_0(\omega) = [V_0 / \sqrt{2\pi}] \int_{-\infty}^{\infty} \exp[i(-\omega + \alpha_R) t'] dt' \quad (2)$$

En (2) y (1) no se ha considerado la dependencia de la frecuencia (o del período) de la amplitud del espectro de velocidades de las ondas de Rayleigh.

Para una ionosfera isotérmica débilmente ionizada, y considerando que la onda acústica-gravitacional provoca perturbaciones pequeñas en la densidad y presión del medio. Alperovich *et al.* (1979) obtuvieron la expresión:

$$h(\omega) = (H_0 \zeta_1 / x_1 a) (p_0 / p(x_1))^{1/2} V_0(\omega) (L/N) \quad (3)$$

siendo  $L \stackrel{\text{def}}{=} 2(1-\Omega^2)^{3/2} \exp [x_1 \sqrt{1-\Omega^2}]$

$$N \stackrel{\text{def}}{=} (i\Omega\zeta_1 - 2) [(1-\Omega^2)(\Omega^2 + 2\sqrt{1-\Omega^2}) - i\eta\Omega]$$

- donde
- $H_0$  —campo geomagnético,
  - $x_1$  —altura adimensional donde ocurre la interacción de la onda acústico-gravitacional con la ionosfera,
  - $\zeta_1$  —conductividad adimensional en  $x_1$ ,
  - $a$  —velocidad del sonido,
  - $p(x)$  —densidad de la atmósfera a la altura  $x$ ,
  - $V_0(\omega)$  —espectro de velocidades de la fuente de las ondas acústico-gravitacionales,
  - $\Omega$  —frecuencia adimensional de la variación oscilatoria resultante,
  - $\eta(x)$  —coeficiente adimensional,
- $$\eta(x) = \nu_{in} [\omega_H \Omega_H / (\nu_e \nu_{in} + \omega_H \Omega_H)]$$
- $\nu_e$  y  $\nu_{in}$  —frecuencias de choque de los electrones con las partículas pesadas y de los iones con las partículas neutras,
  - $\omega_H$  y  $\Omega_H$  —girofrecuencia de los electrones e iones.

Solamente las ondas acústicas con frecuencias muy pequeñas son capaces de alcanzar las capas superiores de la ionosfera, pues el aire, debido a su viscosidad, absorbe las altas frecuencias. Nosotros consideramos que la interacción ocurre solamente a la altura de la capa E de la ionosfera, donde se puede considerar que:

$$\eta = 0 \quad (4)$$

Para considerar las ondas de Rayleigh como posible fuente de pulsaciones geomagnéticas de bajo período sustituimos (2) y (4) en (3).

Hallando la transformada inversa de Fourier de la expresión resultante obtenemos  $h(t)$ . De los dos tipos de ondas posibles, solamente uno estará relacionado con movimientos hidrodinámicos, es decir, sólo este

tipo podrá ser excitado por ondas acústicas, y para él la parte real de  $h(t)$  corresponde a la componente  $E-W$ ,  $h_y(t)$ .

Como expresión final de la perturbación magnética engendrada se obtiene:

$$h_y(t) = [A/(B^2 + C^2)] (B \operatorname{sen} D + C \operatorname{cos} D)$$

donde:

$$\begin{aligned} A &= (2H_0/x_1 a) [\rho(0)/\rho(x_1)]^{1/2} (V_0 \omega^*/\alpha_R) (\alpha_R^2 - \omega^2)^{1/2} \\ B &= 2(\alpha_R^2 - \omega^2)^{1/2} + (2\alpha_R/\zeta_1) \\ C &= -(\alpha_R^2/\omega^2) \\ D &= x_1(\alpha_R^2 - \omega^2)^{1/2}/\omega^* + \alpha_R t. \end{aligned} \quad (5)$$

donde:  $\omega^* = aMg/2kT$

$M$  —masa de los iones,

$k$  —constante de Boltzmann,

$T$  —temperatura.

Para la capa  $E$  se tomó como valor representativo  $\omega^* = 2 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , por lo cual las expresiones (5) sólo son válidas para ondas con períodos menores de 50 s, lo cual siempre se cumple para las ondas de Rayleigh.

Como se puede ver de las expresiones (5) la perturbación resultante debe ser una onda con el mismo período que las de Rayleigh.

La expresión (5) fue calculada para diferentes valores de  $v_0$  y de  $\alpha_R$  con ayuda de una computadora ES-1022. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 1, donde se puede ver que la pulsación provocada tiene el mismo período que la onda de Rayleigh que la genera y que la amplitud es mayor cuanto más pequeña sea la frecuencia de la onda generatriz. La pulsación engendrada se amortigua aunque muy suavemente.

Para comprobar estos resultados experimentalmente se analizaron las tormentas de microsismos más notables registradas en Cuba en los años 1971-1973 y se pudo verificar que cuando el período de los microsismos se encontraba dentro del ancho de banda de la característica de frecuencias del registro magnético, aparecían en los magnetogramas pulsaciones continuas con los mismos períodos que los microsismos.

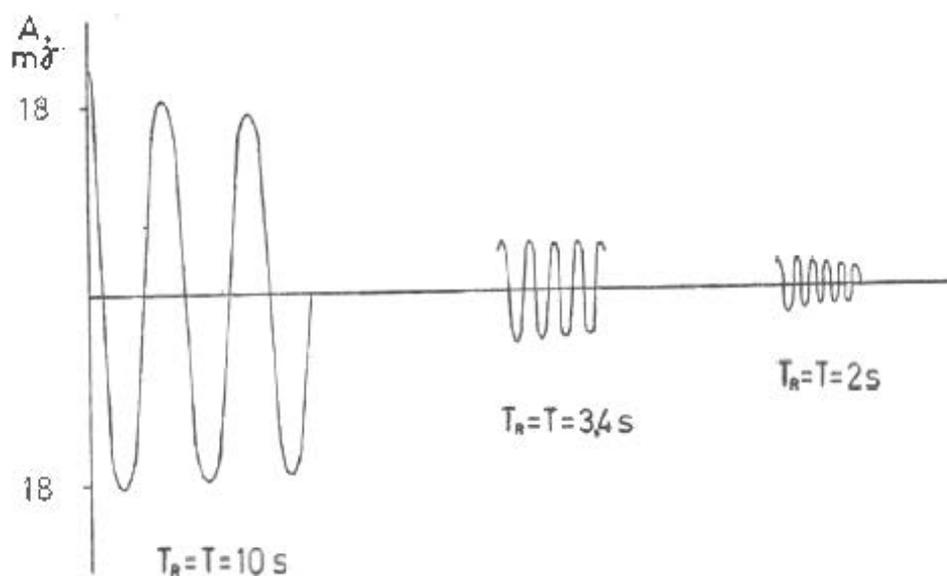


FIG. 1. Variación geomagnética calculada según el modelo teórico.

Como ejemplo veremos la tormenta microsísmica registrada el 26 de noviembre de 1973 en el observatorio Soroa.

Se obtuvieron las variaciones en el tiempo de la amplitud y el período de los microsismos en las componentes *N-S*, *E-W* y vertical. En la Fig. 2 se ve que los períodos alcanzan sus valores mayores a las 00 horas UT del día 26 de noviembre de 1973.

Se calcularon los espectros de amplitud de los microsismos a las 00, 06, 12, y 18 horas UT del mismo día, y a partir de ellos se dibujó el

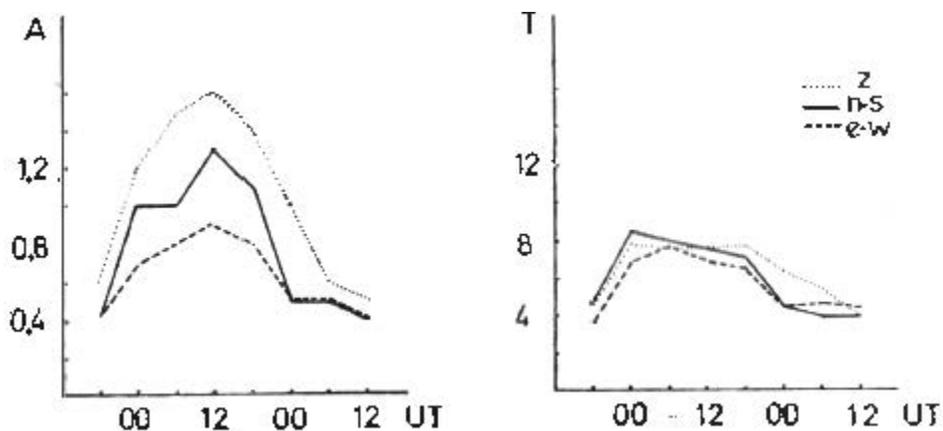


FIG. 2. Comportamiento temporal de los períodos y amplitudes de los microsismos durante la tormenta, desde las 1800 UT del 25-11-73 hasta las 1200 UT de 26-11-73.

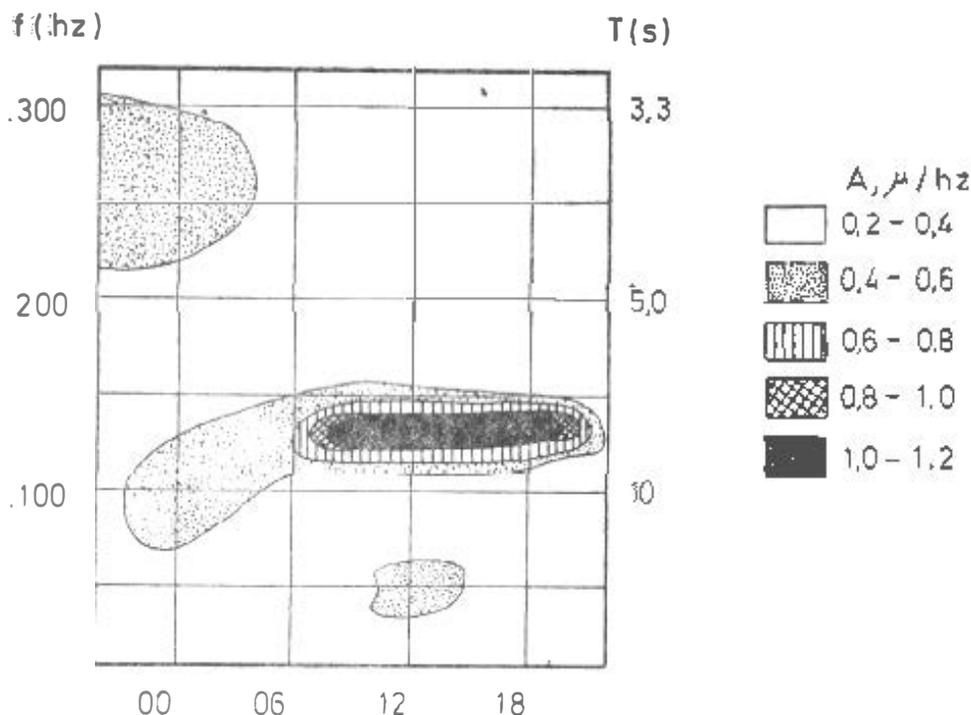


FIG. 3. Sonograma de la tormenta microsísmica que representa el comportamiento temporal de los espectros de amplitud relativa, calculados cada 3 horas.

sonograma de la tormenta (Fig. 3), donde es evidente que la tormenta alcanza su máxima intensidad a las 12h UT del día 26, cuando son notablemente superiores las amplitudes de los microsismos con períodos mayores.

Se calcularon los espectros de las pulsaciones geomagnéticas registradas a las 06:06 y 18:06 UT y se compararon con los obtenidos para los microsismos a esas horas. En las Figs. 4 y 5 se puede ver la notable coincidencia de los picos de ambos espectros.

#### 4. CONCLUSIONES

Por todo lo dicho anteriormente se puede concluir que las tormentas de microsismos, como fuente de ondas acústico-gravitacionales, pueden generar, en la ionosfera, pulsaciones geomagnéticas con períodos que coinciden con los de los microsismos.

El modelo planteado explica satisfactoriamente el proceso y los resultados experimentales coinciden bien con lo predicho teóricamente.

Si en los cálculos teóricos se considera la dependencia de la frecuencia de la amplitud del espectro de velocidades de las ondas de Rayleigh (2),

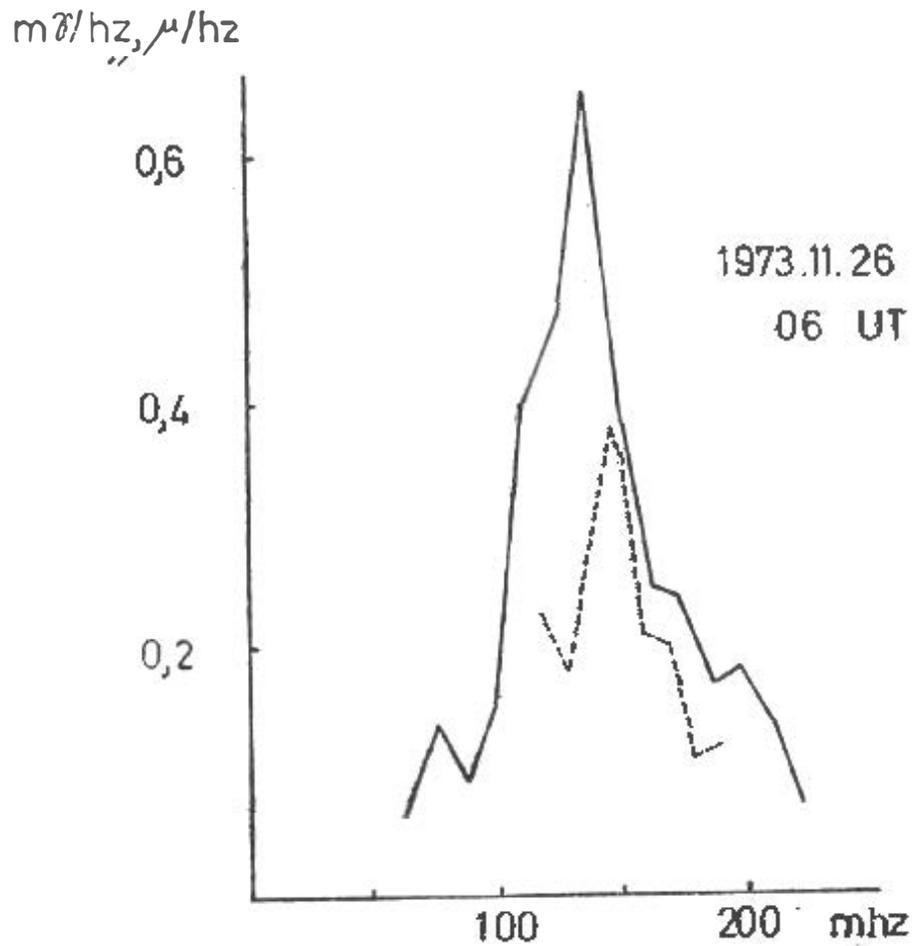


FIG. 4. Comparación de los espectros de los microsismos (línea continua) y de las pulsaciones geomagnéticas (línea discontinua) para las 0600 UT del 26-11-73.

se obtiene un enriquecimiento del espectro de las pulsaciones geomagnéticas engendrados por los microsismos, cuya confirmación experimental debe ser objeto de trabajos posteriores.

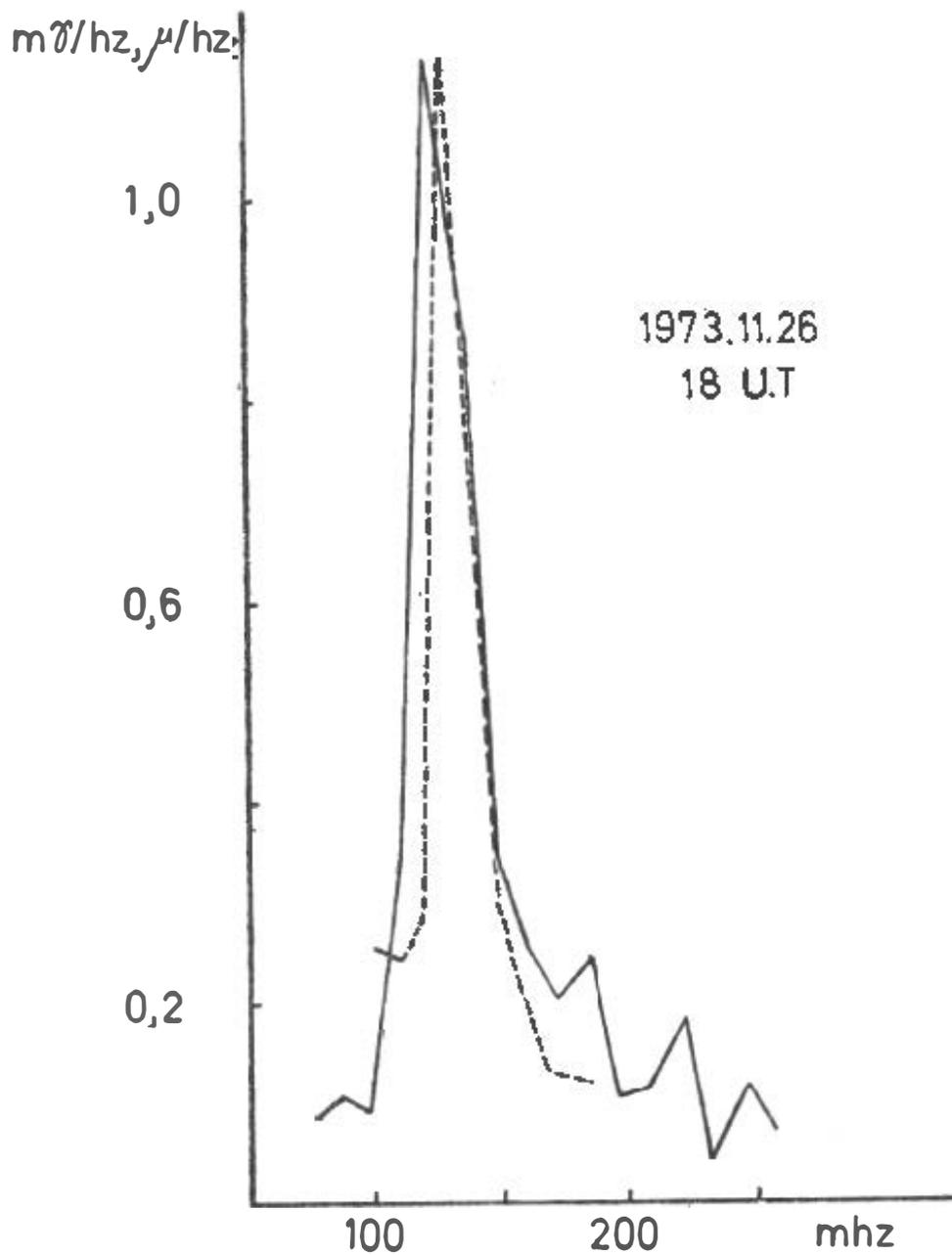


FIG. 5. Comparación de los espectros de los microsismos (línea continua) y de las pulsaciones geomagnéticas (línea discontinua) para las 1800 UT del 26-11-73.

## REFERENCIAS

- ALPEROVICH, L. S., GOJBERG, M. B., SOROKIN, V. M., y FEDOROVICH, G. V. (1979): Acerca de la generación de variaciones geomagnéticas por ondas acústicas durante los terremotos. *Fiz. Zemli*, 3:58-68.
- GUELLER, L. A., GORBIN, V. A., D'COSTA, A., y GUASCH, E. (1977): Variaciones rápidas del campo electromagnético de la Tierra, en Cuba. *Inf. Cient. Téc.*, 18:1-17.
- HAUBRICH, R. A., MUNK, W. H., y SNODGRASS, F. E. (1963): Comparative spectra of microseisms and swell. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 53:27-37.
- KATO, S. (1965): Theory of movement of irregularities in the ionosphere. *Space Sci. Rev.*, 4:233-235.
- KATO, S., REDDY, C. A., y MATSUSHITA, S. (1968): *Acoustic gravity waves in the atmosphere*. Symposium Proceedings, Boulder, Colorado.
- LEONARD, R. S., y BARNES, R. A., Jr. (1965): Observation of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *J. Geophys. Res.* 70(5):1250-1253.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1950): A theory of the origin of microseisms. *Phil. Roy. Soc.*, ser. A, 243:1-35.
- MONAJOV, F. I., y DOLBILKINA, N. A. (1960): The structure of microseisms and methods of determining the direction of their origination. *Bull. Acad. Sci. URSS, Geophys. ser.*, 10:974-975.
- TSEDILINA, Y. Y. (1965): Movimiento de heterogeneidades en el plasma (ionosfera). *Geomag. Aeronom.*, 5:525-530.
- YUEN, P. C., WEAVER, R., SUZUKI, y FURUMOTO, A. S. (1969): Continuous traveling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in May 1968 earthquake data. *J. Geophys. Res.*, 74(9):2256-2264.

**ABSTRACT.** An analysis is made of the influence of Rayleigh waves, which are present in microseisms storms, on the ionospheric E-layer as a possible mechanism for the generation of geomagnetic pulsations.

Acoustic-gravitational atmospheric waves generated by Rayleigh waves may disturb a weakly-ionized, isothermal ionosphere, producing two possible types of wave motions, one of them corresponding to MHD waves. Starting from a Rayleigh wave as the initial perturbation, a solution for the MHD mode is obtained that predicts a geomagnetic field variation with the same frequency as the source wave. The spectral analysis of simultaneously occurring microseisms storms and geomagnetic pulsation shows a good agreement between both amplitude spectra, giving experimental support to the hypothesis of microseisms storm Rayleigh waves as a possible source of geomagnetic micropulsations.

**CDU 550.348.432:550.385.4.001.32**