

ACOPLAMIENTO DE LA ALTA Y BAJA IONOSFERA DURANTE LA TORMENTA
GEOMAGNETICA DEL 26 DE MARZO DE 1976. (*)

José R. Manzano^{**}, Olga I. Pintado^{***}, Rodolfo G. Ezquer^{***}
y Ana C. Martínez de Garat.^{***}

Laboratorio de Ionósfera, Facultad de Ciencias Exactas y
Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán
Tucumán, Republica Argentina.

RESUMEN

Se realiza el análisis comparativo del comportamiento de diferentes parámetros de las regiones D, E y F para Tucumán durante la tormenta del 26 de marzo de 1976. Para el estudio de las capas E y F se trabajó con registros del sondador vertical. Para la región D se infiere el comportamiento de la misma a través de registros de fase y amplitud en señales de muy baja frecuencia emitidas por la estación NAA. El rasgo más saliente del presente estudio indica que la perturbación ionosférica que, iniciada en la zona auroral de la región F y propagada hacia bajas latitudes en camino horizontal, también mostraría una componente vertical que llega a afectar la región D. En la comparación de parámetros indicadores de concentración electrónica se observa comportamiento tanto en fase como en contrafase.

ABSTRACT

A comparative analysis of the behaviour of the D, E and F regions physical parameters over Tucumán for the 26 of march, 1976 storm, has been realized. Tucumán vertical sounder records were used for the E and F regions data. The behaviour of D region has been inferred through phase and amplitude records of VLF signals emitted by the NAA station. One important feature of the present study indicates that the ionospheric perturbation, with origin in the auroral zone and propagating equatorward in a horizontal way, would also show a vertical component reaching the D-region. After comparing parameters indicating electron concentration changes a behaviour in phase as well as in counterphase has been observed.

* Trabajo subvencionado parcialmente por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a través del Programa Nacional de Radiopropagación.

** Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET.

*** Becarios del CONICET.

INTRODUCCION

El problema de entender los mecanismos que operan en la atmósfera superior tanto neutra como ionizada a niveles correspondientes a región F y como respuesta a tormentas geomagnéticas, permanece aún como uno de los más desafiantes para los científicos. Si a ese aspecto se suma la consideración de la incidencia del proceso en las capas bajas de la ionósfera y atmósfera neutra, llegamos a la conclusión que la tarea por realizar es ímproba.

Sin embargo, la historia de las tormentas y sus efectos en la atmósfera ionizada desde el punto de vista experimental se remonta a los años 1928 con C.N. Anderson (1928) y 1929 con Hafstad y Tuve (1929), quienes reportaron perturbaciones directas en la ionósfera y en circuitos de comunicaciones respectivamente. El mayor peso de la información recayó por muchos años en los registros de sondadores verticales, numerosos a nivel global pero mal distribuidos en el sentido hemisférico: saturación en el norte con lagunas muy grandes en el hemisferio sur. A pesar de ello, América del Sur goza del privilegio de poseer una significativa red que puede permitir el análisis de procesos ionosféricos y su comportamiento latitudinal, que podría incluir propagación longitudinal si se complementa con otras redes (por ejemplo la australiana). Desgraciadamente, la falta desde hace muchos años de una red longitudinal norte homogéneamente distribuida que parta desde Huancayo y corra entre los meridianos -60° y -75° impide completar de polo a polo el estudio de fenómenos como las perturbaciones ionosféricas viajeras (TID's) en la ionósfera de base.

De la red sudamericana, Tucumán es la única estación que realiza en un mismo lugar mediciones de sondaje vertical, de señales satélites baliza y de propagación de señales de muy baja frecuencia (MBF). La información proporcionada por los correspondientes instrumentos para un período de fuertes tormentas magnéticas, constituye la base del presente trabajo. En el mismo se procura, en un propósito que puede pecar de demasiado pretencioso, sugerir ideas físicas que permitan unir los mecanismos que afectan a toda la ionósfera de base sobre Tucumán.

La frondosa información proporcionada por instrumentos montados sobre satélites en los últimos tiempos, ha permitido concretar ideas básicas sobre aspectos generales en la morfología de las tormentas ionosféricas de la región F y sus causas. Una interesante puesta al día sobre el problema se puede encontrar en Pröls (1980). Se consi

dera que la fase negativa de las tormentas ionosféricas se debe casi exclusivamente a cambios en la composición de la atmósfera neutra y en especial a variaciones en la relación de densidades de O/N_2 . Aunque esta idea ya fue sugerida en 1956 por Seaton, solo mediciones recientes han confirmado completamente la misma (Prölss, 1980). En cuanto a la fase positiva, se cree ahora en forma general que la misma está asociada a transporte de ionización, el cual estaría afectado por vientos y/o campos eléctricos.

Fueron realizados pocos intentos para correlacionar parámetros de región E y D durante tormentas; Muraoka (1979) demuestra que incrementos en f_{min} (aumento de absorción) sólo se corresponden con variaciones de fase en MBF durante el invierno (anomalía de invierno) y en pocos casos de tormentas fuertes en otras épocas del año. Peres (1980) discute los incrementos anormales en la ionización de la región D, observados con riómetros, y atribuidos a "efectos posteriores" de la tormenta, conectándolos con la respuesta de la región F.

OBSERVACIONES Y DISCUSION

Los parámetros usados para comparación son f_oF_2 , $h'F$, f_oE y f_{min} , extraídos de los ionogramas de Tucumán, y fase (ψ) y amplitud (A) de los registros de la señal de MBF (17,8 MHz) emitidos por NAA y recibidos en Tucumán. Se hace referencia también al comportamiento de f_oF_2 y $h'F$ para la red sudamericana de sondadores, que incluyen las estaciones: Islas Argentinas, Ushuaia, Puerto Stanley, Buenos Aires y Tucumán. Así mismo fueron usados datos de Contenido Electrónico Total (CET) proporcionados por el satélite I.N.T.A.S.A.T.

El análisis involucra la tormenta del 26 de marzo de 1976, ocurrida dentro del primer período de ASHAY.

La figura 1 muestra las diferencias entre los valores instantáneos de los parámetros mencionados arriba y los de la curva de control calculados con promedios horarios de días tranquilos. Se incluyen también en la figura los índices magnéticos Dst ecuatorial y AE auroral.

Analizando por partes la figura 1, se ve que en las horas finales del día 25 que rodean al SC de la tormenta magnética, la fase de la tormenta en región F es negativa iniciándose la elevación de capa prácticamente en el momento del SC. Por su lado, la amplitud en MBF (representada en escala invertida) presenta una excursión negativa significando una transición más suave de la densidad electró

nica hasta llegar al valor de la superficie reflectora de la onda. Esto implica también mayor ionización remanente debajo del nivel de reflexión y en consecuencia mayor absorción. La fase negativa continúa el día 26 en foF2 hasta las 06 hs. (T.L.), con evidentes oscilaciones en la base de la región F. Según los modelos actuales aceptados, el vaciamiento de electrones indicaría un decrecimiento en la relación O/N_2 con respecto a días tranquilos. Aparentemente este efecto se manifiesta a lo largo de la red americana de sondadores como muestra la figura 2. Prölss (1980) muestra que la distribución global de la fase negativa puede alcanzar latitudes invariantes cercanas al Ecuador en el hemisferio de verano. Para la tormenta en consideración, el hemisferio sur acaba de recorrer el verano encontrándose en los comienzos del equinoccio de otoño, por lo que el mecanismo actuante podría estar aún afectando el mencionado hemisferio con una posible expansión hacia otras longitudes. El mecanismo híbrido sugerido por Miller y otros (1979), establece que, casi inmediatamente después del comienzo de una tormenta, del calentamiento Joule y del depósito de energía por partículas penetrantes, se generan vientos meridionales que transportan ionización hacia arriba a lo largo de las líneas de campo a alturas donde la velocidad de pérdida es menor y la densidad electrónica crece (tormenta ionosférica positiva). Al avanzar el tiempo se hace más efectiva la difusión hacia el ecuador (mecanismo relativamente lento) de átomos de oxígeno transportados por el viento mientras continúa la convección de N_2 y O_2 desde bajas alturas a la región F. Este proceso acelera la pérdida de ionización que eventualmente supera a la fase positiva generada por el primer mecanismo, estableciendo una tormenta ionosférica negativa que se propaga hacia el ecuador. En el caso que interesa, la tormenta es nocturna, y aparentemente la primera parte del mecanismo híbrido estaría inhibida en alguna magnitud, o sea que el transporte del oxígeno neutro hacia el ecuador es más rápido que el proceso de elevación de ionización. Pero evidentemente, para que la relación O/N_2 disminuya, incluso a la latitud de Tucumán, se debería pensar que el transporte de oxígeno es transhemisférico y que la convección de N_2 y O_2 hacia arriba ocurre a lo largo de la región F sudamericana, al menos. Se necesita más evidencia experimental para comprobar esto. Esta evidencia debería indicar que para la tormenta analizada, la fase en el hemisferio norte es positiva a lo largo del continente americano. Este resultado sustentaría lo propuesto por Prölss en la figura 5 del trabajo ya citado.

En cuanto a la fase de MBF, y volviendo al mismo período que se extiende hasta las 06 hs. del día 26, la misma no muestra variaciones significativas respecto a la curva de control. La amplitud cambia a excursiones positivas (representadas en forma invertida en la figura 1) desde las 23 hs. del día 25. Según los modelos existentes esto significaría gradiente más fuerte de ionización debajo de la altura efectiva de la guía de onda, o sea menor ionización (menor absorción) remanente en el camino de la onda hacia la reflexión. Con respecto a $f_{mín}$ no se observan efectos significativos que indiquen mayor o menor absorción de la onda de HF emitida por el sondador.

Desde la 06 hs. y prácticamente durante el resto del día 26 la tormenta en región F de Tucumán muestra una fase positiva, hecho que se manifiesta en toda la red (excepto Islas Argentinas). Esto indicaría efectivamente un transporte de ionización latitudinal desde zonas aurorales (Miller y otros, 1979). Este mecanismo sería confirmado por el proceso de aumento en el contenido electrónico total según lo indican los dos pasos del satélite INTASAT, señalados por rectángulos negros en figura 2. El paso nocturno registró también un fuerte centelleo.

El proceso de perturbación parece ser más complejo en sentido vertical, ya que f_oE está por debajo de lo normal alrededor del mediodía, la altura de la guía de onda disminuye según muestra la figura 1, el valor de ΔA indica un vaciamiento de la guía de onda. Es posible entonces que, además del transporte meridional, la región E contribuya en algo a la fase positiva en región F como mecanismo secundario, y que el incremento en región D (descenso de capa) sea contribución en parte de los electrones internos de la guía de onda. Se debe recordar que la onda de MBF recorre un camino trans equatorial de aproximadamente 8000 Km y que la fase y la amplitud de la misma muestran el comportamiento integrado a lo largo de todo el camino. Por otra parte los datos del sondador reflejan el comportamiento de la ionósfera local. Por este motivo no puede hacerse una correlación directa entre los fenómenos observados a distintas alturas, pero puede intentarse una explicación del posible acoplamiento de las diferentes regiones de la ionósfera. En resumen: aparentemente existe un desplazamiento vertical rápido de ionización hacia alturas mayores. Esta suposición sería confirmada por el significativo pico en ΔA indicando menor absorción, y la mayor excursión positiva en f_oF_2 , aunque el comportamiento normal de $f_{mín}$ en esa zona conduciría a suponer que la ionización de región D sólo se

reacomoda arriba de la guía de onda. El incremento de $f_{mín}$ entre 11 y 15 hs. indicaría que en ese lapso ha incrementado la ionización debajo de la región E, lo que es confirmado por el descenso de la capa.

El día 27 está indicando un comportamiento que se acerca a lo normal en la ionósfera superior, hasta las 14 hs. coincidiendo con una transitoria normalización de la actividad magnética en las zonas auroral (índice AE) y ecuatorial (Dst). No podemos decir lo mismo de la ionósfera inferior donde aún persiste la perturbación con fase negativa en región E y descenso de capa debajo de lo normal en región D ($\Delta \Psi$). A pesar de que un descenso de la capa D tendería a estar asociado con un incremento de ionización en la región, esto no sería confirmado por el comportamiento de $f_{mín}$ pues está indicando disminución de ionización después de las 08 hs. Si este vaciamiento de la ionósfera inferior no alimenta la región F, como lo indica el comportamiento de f_oF_2 , debería existir un transporte de electrones hacia otras latitudes por deriva electromagnética o activación de los procesos de recombinación por cambios en los componentes neutros de la atmósfera baja.

El incremento de la actividad magnética después de las 12 hs., tanto auroral como ecuatorial, coincide para el caso de Tucumán con una fase negativa en región F, una fase negativa en región E que tiende a normalizarse hacia las 18 hs. y un incremento de ionización entre los 80 y 100 Km, indicado por los aumentos en ΔA y $f_{mín}$ y disminución en $\Delta \Psi$.

Es posible que parte de la pérdida en región F se deba a una deriva vertical hacia menores alturas por la presencia de campos eléctricos apuntando al oeste. La figura 2 nos muestra que existen mayores complicaciones, dado que la fase negativa de la tormenta aparece hacia bajas latitudes, siendo la fase positiva predominante en latitudes medias. Es evidente que el mecanismo de circulación que pudiera existir para explicar el comportamiento observado es más complejo que cualquiera de los pensados hasta el presente. Estaríamos tentados de proponer la superposición de dos mecanismos, uno remanente de la actividad del día 26 que según Miller y otros (1979) ya estaría en la etapa de fase negativa, y otro nuevo de carácter también híbrido que empezaría a gestar la fase positiva en latitudes medias y altas. Esta idea estaría reforzada por la fase negativa del día 28 a altas latitudes como lo muestra la figura 2.

Con respecto al día 28, las estaciones de latitudes medias y al-

tas muestran una fase negativa no tan significativa, presentándose un comportamiento alternado a latitudes bajas. Este proceso debe estar relacionado con la 2° fase del mecanismo híbrido de Miller. La baja ionósfera de Tucumán muestra mayores perturbaciones con fuerte descenso de la capa límite en la región D indicado por $\Delta \Psi$ y un incremento de ionización arriba de los 70 o menos Km de altura deducido a través del incremento en ΔA . Esta aseveración estaría reforzada por el agudo pico en $\Delta f_{mín}$ caracterizando un aumento fuerte de ionización debajo de la región E. La fase en la región E es negativa, llevando a pensar que esta región es la que alimenta con electrones los otros niveles inferiores.

Los agudos picos que aparecen en $\Delta \Psi$ indicando retraso de fase, no fueron considerados confiables dado que se producen en el momento de la transición sombra-luz del amanecer. Un leve desplazamiento en el tiempo de la brusca variación de fase que siempre se presenta al amanecer (y al atardecer) con respecto a la curva normal, podría conducir a un $\Delta \Psi$ que no es real.

CONCLUSIONES

Evidentemente la complejidad en el comportamiento dinámico de la ionósfera se hace decididamente mayor cuando se pretende unir mecánicamente lo que ocurre en región F con procesos en la baja ionósfera.

Algunas conclusiones particulares se pueden obtener del análisis de los diferentes períodos en que se dividió la tormenta:

1) Deben necesariamente existir mecanismos de transporte de gases neutros e ionizados y en especial sistemas de circulación de vientos meridionales generados a altas latitudes posteriormente al depósito de energía por precipitación de partículas y/o por calentamiento Joule. Un mecanismo adicional de transporte, aunque no tan significativo, es la deriva electromagnética introducida por la inducción de campos eléctricos en la baja ionósfera.

Los vientos neutros transhemisféricos parecerían ser los agentes principales de la fase negativa multilatitudinal de fines del día 25 y comienzos del 26. A este proceso se suma la convección de moléculas más pesadas hacia mayores alturas y actuando aparentemente a lo largo de la mitad sud del continente sudamericano. Parece que durante este proceso no hay campos eléctricos significativos en la baja ionósfera, que puedan introducir una componente vertical de deriva de ionización.

2) Vientos combinados con deriva electromagnética justificarían la amplia fase positiva de prácticamente el resto del día 26, que afecta toda la red, excepto Islas Argentinas, correlacionada con un nuevo incremento de la actividad magnética auroral. El proceso de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$, parece ser confirmado por el comportamiento de las capas bajas de la ionósfera.

3) El día 27 parece nuevamente manifestarse una tormenta que se interpone a la fase de recuperación de los procesos anteriores. Coincide con fases negativas en región F a bajas latitudes y positivas a altas latitudes, lo que solamente podría ser explicado por la superposición de dos mecanismos. Uno, remanente del día 25 con fases negativas, y el comienzo de un nuevo mecanismo híbrido a altas latitudes, pero en su fase positiva. El comportamiento de las regiones bajas de la ionósfera indicaría una deriva vertical hacia menores alturas desde la región F.

4) El día 28 indica que la 2ª parte del mecanismo híbrido está actuando a latitudes altas, mientras que en latitudes bajas todavía observamos el efecto de transporte de ionización desde altas latitudes.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Sres. O. Lascano y S. de Lascano por su apoyo en la elaboración y representación de datos.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson C.N., 1928: Correction of long wave transatlantic radio transmission with others factors affected by solar activity, Proc.Inst.Radio.Eng 16 297-347.-
- Hafstad L.R., 1929: Y.M.A. Tuve, Note of Kennelly-Heaviside layer observations during a magnetic storm, Terr Magn.Atoms. Elec; 34, 39-43.-
- Miller N.J., Grebowsky J.M., Mayr H.G., Harris I., 1979: F-Layer positive response to a geomagnetic storm-june 1972; J.Geophys Res.; 84, 6493-6500.-
- Muraoka Y., 1979: Lower ionospheric disturbances observed in long distances VLF transmission at middle latitude; J.Atmos. Terr. Phys.; 41, 1031-1042.-
- Peres M., 1980: Observación de efectos posteriores en Ushuaia; presentado en la XIa. Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Tucumán, Argentina (a publi-

car).-

- Prölss G.W., 1980: Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere: recent results obtained by satellite-borne gas analyzers, Rev. Geophys. Space. Phys.; 18, 183-202.-
- Seaton M.J., 1956: A possible explanation of the drops in F region critical densities accompanying major ionospheric storms, J. Atmos. Terr. Phys.; 8, 122-124.-

EPIGRAFES DE LAS FIGURAS

Fig. 1: Diferencia entre los valores instantáneos de los parámetros foF2, h'F, foE, Ψ , A y fmín, y sus curvas de control para la tormenta ionosférica y magnética del 26 de marzo de 1976. También se incluyen los índices AE y Dst magnéticos. Las flechas indican el comienzo súbito (SC) de la tormenta geomagnética. La hora corresponde a tiempo estandar local.

Fig. 2: Comportamiento de foF2 y h'F para la red sudamericana durante la tormenta del 26 de marzo de 1976. Las líneas llenas indican los valores instantáneos y las líneas cortadas las curvas de control promediadas sobre cinco días tranquilos de marzo de 1976. Las flechas indican el comienzo súbito de la tormenta geomagnética. Los bloques negros están referidos a datos de contenido electrónico total (CET) y centelleo (S), obtenidos con registros del satélite INTASAT. Abreviaturas para CET: N = normal; AN = arriba de lo normal. Abreviaturas para centelleo: W = centelleo débil; M = moderado y No = ningún centelleo. La hora corresponde a tiempo estandar local.-

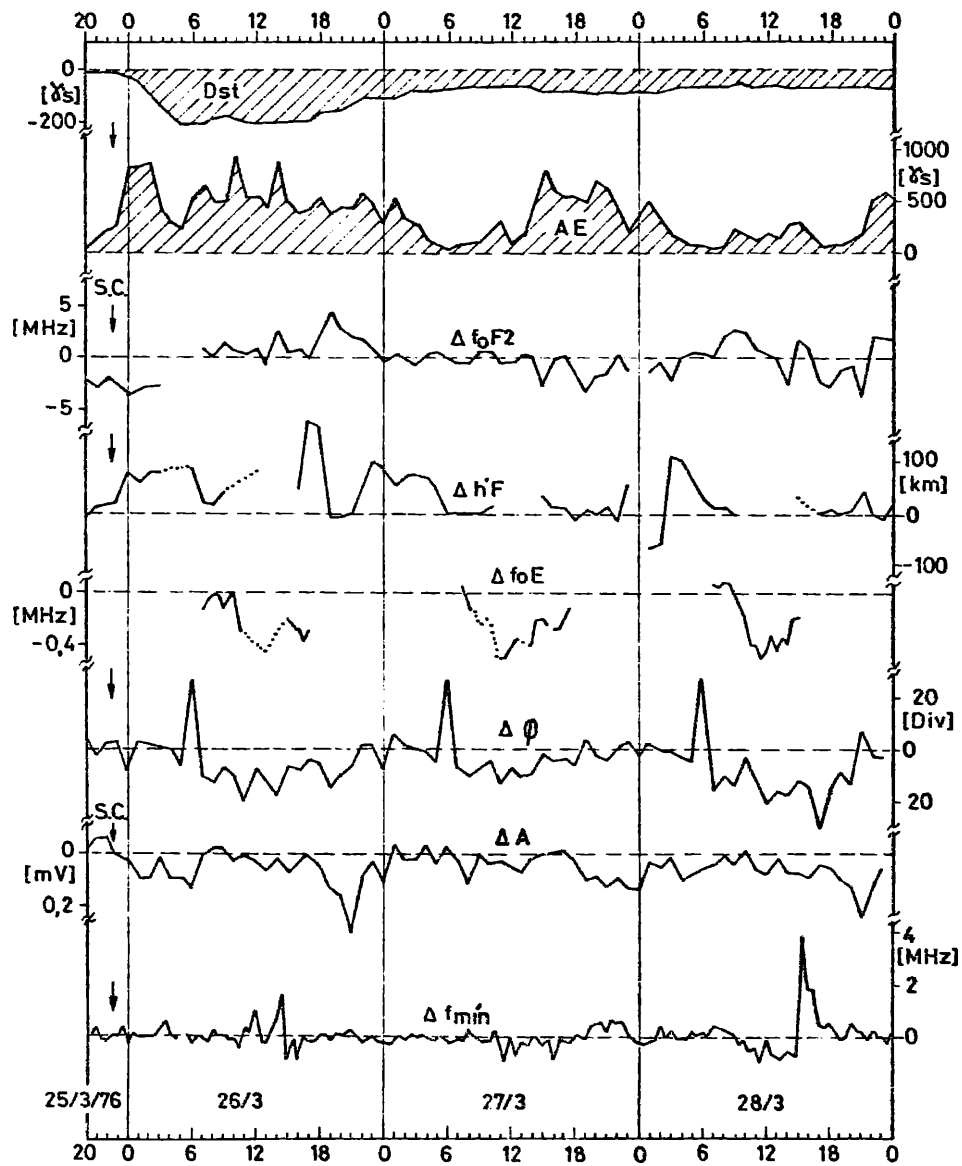


Fig. 1

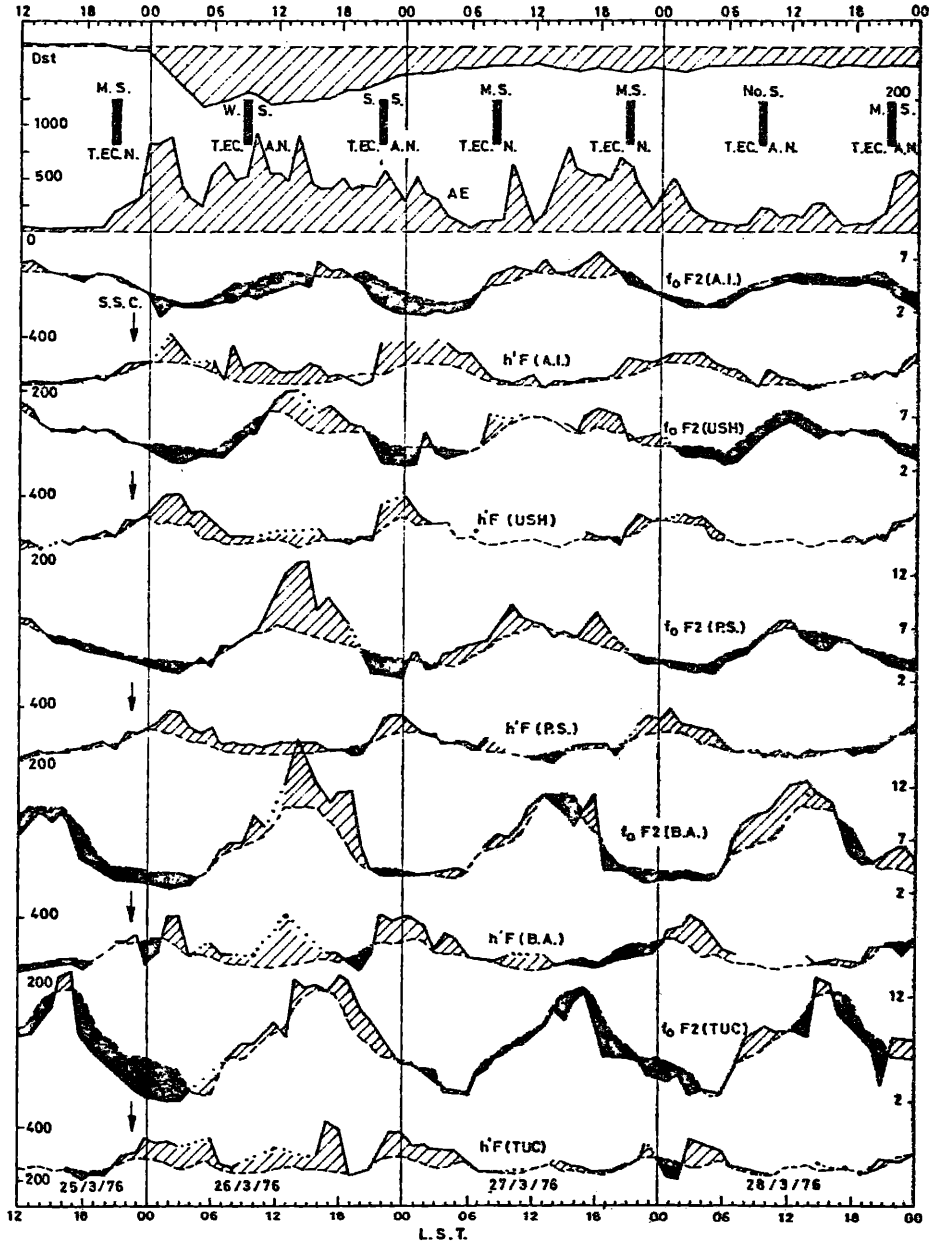


Fig. 2

