

# ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS INVESTIGACIONES REALIZADAS SEGUN EL PROGRAMA DEL EXPERIMENTO MULTIPLE SOBRE LA ENERGETICA DE LA ATMOSFERA (1970-1972)

Por K. Ya. KONDRATYEV, S. P. MALEVSKY-MALEVICH,  
L. R. ORLENKO, N. E. TER-MARKARYANZ,  
O. B. VASSILYEV, V. F. ZHVALEV

Uno de los subprogramas que se están llevando a cabo en la preparación de la puesta en marcha del Programa de Investigación Global de la Atmósfera (GARP) es el del Experimento Múltiple de Energética Atmosférica (CAENEX) (1)\*. Su finalidad consiste en investigar, en la atmósfera, la transferencia de todas las categorías de energía y de todas las clases de divergencia de flujo para elaborar, sobre esta base, las recomendaciones adecuadas con el fin de tomar en consideración los factores diabáticos de la circulación general de la atmósfera. Una descripción detallada del programa se publicó en el *Boletín de la OMM* (2).

La base experimental del CAENEX está constituida por una serie de expediciones a situaciones típicas físico-geográficas con el fin de obtener un complejo total de datos que caracterizan a la energética de un volumen cerrado de la troposfera del orden de 200-300 km en dimensiones horizontales. La selección de los componentes a medir está determinada por las exigencias para calcular, con una precisión dada, el balance de energía de la superficie y de las distintas capas atmosféricas.

El primer experimento complejo (CAENEX-70), realizado con arreglo a las principales líneas de investigación, fue llevado a cabo en octubre de 1970 en el desierto de Karakum de Asia Central. Los resultados preliminares obtenidos en esta primera expedición han sido ya descritos (3) y en una colección especial de trabajos (4) puede encontrarse un detallado estudio de dichos resultados.

En los meses de junio y julio de 1971 fue realizada la segunda expedición (CAENEX-71), dirigida al Kazakhstan occidental, a 80 km al sur de la ciudad de Uralsk. El programa tenía mucho en común con el CAENEX-70, del que difería principalmente porque en aquél se estudiaron con más detalle los flujos de calor sensible. Las medidas necesarias fueron realizadas por el Instituto de Física Atmosférica de la Academia de Ciencias de la U. R. S. S. Se efectuaron medidas, por medio de aviones, del calor sensible y de los flujos de impulsos en la capa límite, así como también medidas directas de flujos de calor sensible, humedad e impulso en la superficie de la capa atmosférica.

En el método de medida se introdujeron varias mejoras respecto al CAENEX-70, sobre todo en el programa de sondeos realizados por aviones IL-18. La gran variabilidad que con el tiempo experimentan en la capa límite los elementos meteorológicos impide obtener perfiles verticales ins-

---

\* Véase la bibliografía al final del artículo.

tantáneos (relativos a instantes fijos de tiempo) de parámetros meteorológicos y de flujos de calor por medio de sondeos tales como los realizados con aviones, helicópteros o globos. Uno de los objetivos del estudio consistía en determinar detalladamente la variación temporal de todos los parámetros de interés a niveles fijos, por interpolación entre los datos obtenidos.

La expedición CAENEX-71 suministró abundante material de observación. Los resultados obtenidos de las medidas efectuadas en esa expedición serán publicados en 1973, en un número especial de *Trudy GGO* (Actas del Observatorio Geofísico Principal).

En la presente reseña se discuten los resultados más interesantes obtenidos en las dos expediciones, a partir de los datos elaborados.

### *Experimento sobre radiación total (cielo despejado)*

El carácter múltiple de las investigaciones llevadas a cabo con arreglo al programa CAENEX hizo posible por primera vez realizar el Experimento de Radiación Total (COMRAEX). Ello implicó efectuar medidas de los componentes del balance de radiación en la superficie, de los flujos total y espectral de radiación de ondas larga y corta en la atmósfera libre (por medio de instrumentos colocados a bordo de aeronaves, un helicóptero y también sondas radiométricas), de la distribución angular de las intensidades de la radiación ascendente y descendente de longitudes de onda corta y larga, y de la transparencia espectral de la atmósfera.

Simultáneamente con las observaciones de radiación se efectuaron diversas medidas complementarias: perfiles verticales de temperatura del aire, presión y humedad; temperatura de la superficie subyacente; la concentración, distribución de tamaño y composición química de los aerosoles, y la concentración y distribución vertical del ozono. Estos datos complementarios se necesitaban para efectuar experimentos numéricos de comprobación de los métodos de cálculo (5). Especialmente fueron calculados los flujos de radiación de ondas larga y corta, comparándose los resultados obtenidos con los datos experimentales. La comparación demostró que las discrepancias entre los valores calculados y los medios de los flujos ascendentes no excedía, en promedio, del 8 por ciento de los de radiación de onda corta, y del 5 al 10 por ciento de los de onda larga. Las discrepancias fueron mucho mayores en los flujos descendentes, llegando a ser en algunos casos tan altas como para alcanzar el 50 por ciento.

La observación simultánea de los flujos de radiación integral y espectral hizo posible comparar los datos de las medidas de flujo total con los de las obtenidas por medio de una integración de los componentes del espectro. Para la capa atmosférica comprendida entre 300-8.400 m, la divergencia total de flujo radiativo de onda corta calculada a partir de las medidas efectuadas el día 25 de octubre de 1970 es de  $0,190 \pm 0,020$  cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>. El correspondiente valor del flujo de divergencia calculado a partir de los datos obtenidos con las medidas espectrales, es de  $0,195 \pm 0,040$  cal cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>. Esta coincidencia casi satisfactoria demuestra que los datos obtenidos del COMRAED pueden considerarse suficientemente fiables para los fines del experimento.

El calentamiento total radiativo fue observado en la capa que va de la superficie hasta los 8 km. Los máximos valores de calentamiento fueron observados en la capa inferior situada entre 300-500 m, donde alcanzaron valores de 1,0 grado hora<sup>-1</sup>. La relación entre el calentamiento producido por las componentes de onda corta ( $\theta_S$ ) y de onda larga ( $\theta_L$ ) es distinta en las diferentes capas atmosféricas. En las capas inferiores, 0-300 y 0-500 m, el calentamiento radiativo de la atmósfera hacia el mediodía se debe principalmente a la radiación de onda larga ( $\theta_L > \theta_S$ ). Desde los 500 m hasta los 1.500-2.000 m es la radiación de onda corta la que contribuye principalmente al calentamiento, a pesar de que todavía en ella sea  $\theta_L > 0$ . En las capas situadas a unos 2 km,  $\theta_L < 0$  y, por consiguiente, el calentamiento debido a la radiación de onda corta es compensado por el enfriamiento producido por la de onda larga.

Los datos obtenidos por medio del COMRAEX han hecho posible establecer ciertas relaciones entre los perfiles verticales de los componentes del balance de radiación y las distribuciones espaciales de los aerosoles (concentración y distribución del tamaño de las partículas) y la humedad relativa de la atmósfera.

#### *Distribución espectral de la divergencia de flujo radiativo de onda corta y el papel de la absorción debida a los aerosoles*

Durante la ejecución del programa COMRAEX, dentro del CAENEX-70, la primera experiencia tuvo por objeto obtener los datos experimentales necesarios para hacer una estimación cuantitativa de la distribución espectral de la divergencia del flujo radiativo. Esta distribución fue estudiada en la región de onda larga de 0,3-2,4  $\mu\text{m}$ . El programa de medida comprendía el estudio de los perfiles verticales de los flujos ascendente y descendente de la radiación de onda corta, la distribución angular del brillo espectral del sistema *superficie-atmósfera*, y el brillo espectral de un platillo horizontal ortotrópico normal iluminado desde arriba.

La *figura 1a* muestra una curva de la distribución espectral de la divergencia del flujo radiativo  $b\lambda$  en la troposfera (la capa situada a 0,3-8,4 kilómetros) en la región de los 0,4-2,4  $\mu\text{m}$ , obtenida el 25 de octubre de 1970 a mediodía (siendo la distancia solar zenital  $z_\odot = 55^\circ$ ) sobre un desierto en condiciones de calma densa. La *figura 1b* presenta la distribución espectral de la divergencia del flujo radiativo relativo  $\beta\lambda$  (en tanto por ciento).

Los datos de la *figura 1b* demuestran el indudable papel dominante que la absorción molecular juega en la troposfera en la divergencia espectral relativa del flujo radiativo. La absorción relativa producida por los aerosoles, tal como puede observarse en la curva de puntos y rayas del diagrama, parece ser inferior al 20 por ciento en la región de onda larga considerada, y varía aproximadamente en proporción a  $\lambda^{-1}$ .

La curva de puntos y rayas dibujada en la *figura 1a* fue obtenida multiplicando las ordenadas de la curva suavizada de la divergencia espectral relativa del flujo radiativo (aproximada según la dependencia  $\sim\lambda^{-1}$ ) por la distribución de energía en el espectro de la radiación incidente, obteniéndose así la variación espectral, en la troposfera, de la divergencia media absoluta del flujo radiativo. El área de debajo de esa curva (igual a 0,095

cal  $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$  ó 4,8 por ciento de la constante solar) corresponde a la absorción molecular total. Así, a pesar del hecho de que el principal papel en la divergencia espectral relativa del flujo es desempeñado por la absorción molecular, la distribución de energía en el espectro de la fuente (el sol) es tal que la energía radiante absoluta absorbida por el componente aerosol es oproximadamente igual a la absorbida por los gases atmosféricos. La comparación de la distribución espectral de la divergencia del flujo radiativo con la dependencia de la longitud de onda de los paráme-

Clave:

- 1.....distribución espectral medida de la divergencia del flujo radiativo (espectrómetro K-2).
- 2.....componente aerosol de la divergencia del flujo radiativo, aproximada por la dependencia  $\propto \lambda^{-1}$
- 3.....resultados del cálculo de la divergencia del flujo radiativo, a partir de los datos obtenidos por medio del espectrómetro SP1-2M.

-  absorción debida a los aerosales =  $0,095 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  ( $\approx 4,8 \% \theta_0$ ).
-  absorción modular =  $0,075 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  ( $\approx 3,8 \% \theta_0$ ).

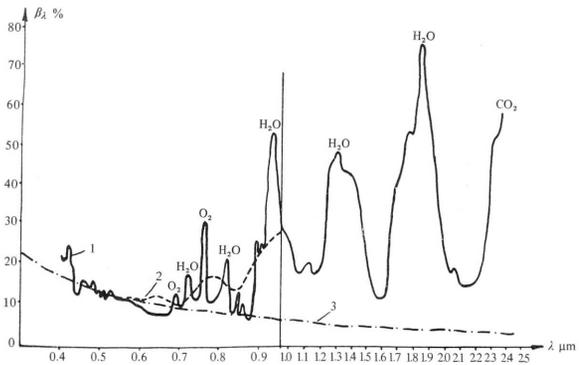
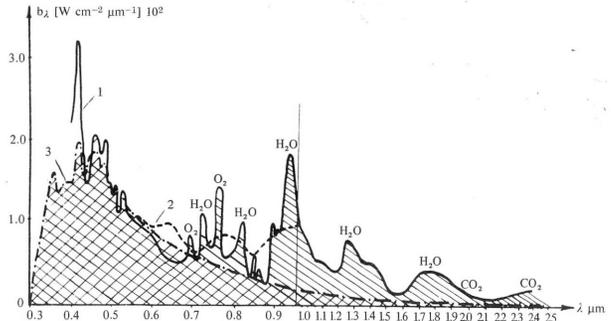


Figura 1.—Divergencia espectral del flujo radiativo en la troposfera (0,3-8,4 km) en la región de longitud de onda comprendida entre 0,4-2,4  $\mu\text{m}$   
a) absoluta, b) relativa.

tros ópticos de los aerosoles, calculada con los datos obtenidos de los análisis microfísicos y químicos de los aerosoles, demuestra que en el caso considerado, las partículas de limonita-hematites son, sobre el desierto, los principales componentes absorbentes de los aerosoles.

Medidas similares de la divergencia del flujo espectral, realizadas en la capa situada a 0,85-4,2 km, fueron efectuadas en agosto de 1970 sobre un desierto. Los últimos datos obtenidos demuestran que el día 4 de agosto de 1970 la divergencia relativa del flujo radiativo era, en la troposfera, por lo menos de un orden de magnitud inferior al obtenido en los días anteriores. Puesto que las observaciones del 4 de agosto fueron hechas

tras un período de intensas lluvias, resulta que las partículas absorbentes estuvieron ausentes en la atmósfera aquel día.

El principal resultado de las investigaciones espectrales de la divergencia del flujo radiativo es la prueba de que la absorción residual de la radiación de onda corta descubierta anteriormente [véase (5)] es en la actualidad una absorción característica debida a los aerosoles, de gran selectividad. Sus posibles variaciones están determinadas, por una parte, por las variaciones de la concentración de aerosoles en la atmósfera y, por otra, por la variabilidad de la composición química y de las características ópticas resultantes de las partículas constituyentes de los aerosoles.

### *Balance calorífico de la capa límite. Interacción entre la radiación y la transferencia de calor sensible*

Como ya se ha dicho anteriormente, en el programa CAENEX-70 se prestó mucha atención a los estudios experimentales de las divergencias de flujo en la capa límite, tanto del calor radiativo como del sensible. El programa comprendía también la obtención de todas las características necesarias para la investigación del balance calorífico sobre la base de la ecuación de la divergencia del flujo calorífico integrada con la altura.

La adquisición de un gran complejo de material de observación hizo posible estudiar por primera vez el balance calorífico de la superficie y de las distintas capas atmosféricas utilizando datos experimentales. En particular, ha sido estudiado el balance calorífico de toda la capa límite en cuyo nivel superior desaparece la influencia de la variación diurna de la temperatura de la superficie (para las condiciones actuales de 0 a 3 kilómetros).

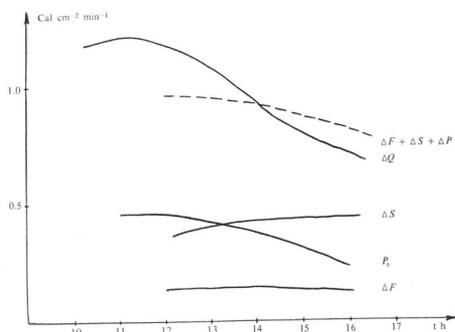
En ausencia de advección y sobre una superficie homogénea, la variación del contenido del calor de una capa atmosférica estable está determinada por la diferencia entre los flujos de calor radiativo y sensible existente en los límites de la capa. La diferencia de flujo radiativo en la capa 0-3 km ha sido determinada a partir de los datos obtenidos por medio de medidas directas, como ya se ha dicho anteriormente. Puede suponerse con suficiente precisión que el flujo de calor sensible en el nivel superior de la capa límite es igual a cero. Así, la aportación de calor al conjunto de la capa límite debido a la transferencia de calor sensible, está determinado por el valor del flujo de calor sensible medido al nivel de la superficie subyacente.

A partir de los datos de la *figura 2* podemos calcular la relación entre distintas clases de divergencia de flujo. Dicha figura muestra la variación diaria de los cambios de la capacidad calorífica de la capa situada entre 0-3000 m ( $\Delta Q$ ), las divergencias de flujo calorífico debidas a la radiación de onda corta ( $\Delta S$ ) y de onda larga ( $\Delta F$ ), el flujo de calor sensible cerca de la superficie de la Tierra ( $P_0$ ), y la divergencia total del flujo para la capa considerada ( $\Delta S + \Delta F + \Delta P$ ) para una simple serie de medidas. De acuerdo con las evaluaciones realizadas a partir de los datos obtenidos por medio de observaciones con globos piloto utilizando mapas sinópticos, la divergencia de flujo advectivo no excedió de  $0,1 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ . Como puede verse en la *figura 2*,  $\Delta Q$  y el valor de la divergencia total del flujo,

concuerdan bastante bien. Esto demuestra que los métodos de medida son suficientemente fiables.

El análisis de los datos obtenidos demuestra que: tanto la radiación de onda corta como la de onda larga contribuyen notablemente al balance calorífico de la capa límite de la atmósfera durante el día; la aportación de la divergencia de flujo radiativo es comparable en magnitud a la divergencia del flujo de calor sensible, y algunas veces  $\Delta S + \Delta F > \Delta P$  para toda la capa límite; durante el día la capa límite es calentada debido a la

Figura 2.—Variación diaria de la capacidad calorífica ( $\Delta Q$ ), de las divergencias de flujo debidas a la absorción por la radiación de longitudes de onda corta ( $\Delta S$ ) y larga ( $\Delta F$ ), del flujo de calor sensible ( $P_0$ ) y de la divergencia total del flujo ( $\Delta S + \Delta F + \Delta P$ ) en la capa situada entre 0-3000 m.



transferencia existente de calor radiativo y sensible; por la noche, ambos factores producen enfriamiento. Así, en el caso considerado, la radiación y el calor sensible producen cambios de temperatura del mismo signo. Hay que advertir que este concepto acerca del papel que el calor sensible y la radiación juegan en la transferencia de calor (para toda la capa límite) ha sido recientemente más o menos aceptada en general. A este respecto es de gran interés estudiar la influencia que los factores anteriormente mencionados ejercen sobre el balance calorífico de no sólo el conjunto de la capa límite, sino también de las distintas capas más delgadas, especialmente, la capa superficial.

Las investigaciones realizadas según el programa CAENEX han hecho posible estudiar las características de la variación diaria del balance calorífico de diferentes capas atmosféricas de la troposfera inferior, debida a la transferencia de calor radiativo. Una de esas características es el considerable calentamiento radiativo que la capa atmosférica más baja sufre durante el día debido al intenso calentamiento de la superficie del suelo.

Los datos disponibles demuestran que, mientras que el conjunto de la capa límite es calentado por transferencias de calor radiativo y sensible, en su parte más inferior (en la capa de aproximadamente 100 m de espesor) el considerable calentamiento producido durante el día por la radiación (sobre todo por la de onda larga) es compensado por el enfriamiento del aire debido a la transferencia de calor sensible (el flujo de calor sensible aumenta en esta capa con la altura). Por la noche (casi al amanecer) el calentamiento de la capa de aire superficial es debido a la transferencia de calor sensible. Todos estos datos atestiguan a favor del

importante papel que desempeña la interacción entre los campos de radiación y el movimiento de las capas atmosféricas superficial y límite.

### *Experimento total sobre radiación (cielo cubierto)*

Las investigaciones de campo del CAENEX realizadas en 1970-1971, fueron llevadas a cabo en condiciones lo más simples posible: sobre una superficie subyacente relativamente homogénea y con un cielo despejado. Sin embargo, un importante componente del programa CAENEX es el estudio de la influencia de la nubosidad sobre los flujos radiativos y las divergencias de flujo. A este respecto, en 1971 se realizaron múltiples observaciones preliminares con nubosidad, con el fin de efectuar el COMRAEX en condiciones de cielo cubierto. Medidas de flujos de radiación, parámetros microfísicos y de otro tipo de la nubosidad fueron hechas sobre el área del Mar Negro. Durante la primera etapa se propuso estudiar la dependencia existente entre el albedo espectral de varias nubes y sus características ópticas y microfísicas, así como investigar las peculiaridades de la distribución espectral de la divergencia del flujo radiativo en presencia de cielo cubierto de nubes.

Los análisis efectuados de las medidas del albedo espectral de nubes con idénticos espesores ópticos pero diferentes características microfísicas (en condiciones meteorológicas similares), han demostrado que los valores del albedo espectral de la nubosidad que tiene un mayor radio modal pero una menor concentración de partículas, son inferiores a los del caso opuesto (tamaño inferior pero mayor concentración de partículas). Las medidas totales han confirmado también esta conclusión. En el intervalo espectral de 0,3-3,0  $\mu\text{m}$  el albedo de la nube fue de 0,49 y 0,56 respectivamente.

La radiación absorbida por una nube en el intervalo de longitud de onda de 0,35-0,95  $\mu\text{m}$  es de 0,4 cal  $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1}$  o del 31 por ciento de la radiación incidente, en el límite superior de la nube en la región espectral considerada. Esto atestigua en favor de la máxima absorción intensiva de la radiación de onda corta, en particular en la región visible del espectro, donde las bandas de absorción del agua están ausentes.

Hay que advertir que los resultados antes citados pueden considerarse sólo como preliminares. El futuro perfeccionamiento del método de medida y de la técnica de tratamiento de datos, así como posteriores investigaciones del campo, harán posible conseguir una solución más fiable del problema.

### *Conclusiones*

Los principales resultados obtenidos de las investigaciones realizadas según el CAENEX durante el período de octubre de 1970 a marzo de 1972 pueden ser resumidos como sigue:

El Experimento múltiple de Radiación con cielo claro ha sido realizado. El empleo de los datos del COMRAEX ha hecho posible efectuar una comprobación experimental de algunos métodos adecuados para el cálculo de los flujos de radia-

ción de ondas corta y larga empleados en valorar los factores radiativos en la elaboración de modelos numéricos de la circulación general de las atmósfera.

Dentro del programa COMRAEX se efectuaron medidas de la distribución espectral de la divergencia del flujo de la radiación de onda corta, los cuales revelaron (en determinadas condiciones) la existencia de considerable absorción debida a los aerosoles. Las medidas directas de aerosoles efectuadas han demostrado que en condiciones de desierto las partículas de limonita-hematites son principalmente responsables de la absorción. Los resultados obtenidos demuestran la urgente necesidad de investigar sobre la microestructura y las características ópticas de los aerosoles naturales e industriales con el fin de estudiar el impacto causado por el hombre sobre el clima.

Sobre la base de los datos obtenidos por medidas directas ha sido examinado el intercambio de calor de la capa límite.

Los datos resultantes de la transferencia de radiación y de calor sensible en la superficie y en las capas límites ponen de relieve la importancia que tiene la interacción entre los campos de radiación y el movimiento para la dinámica de esas capas. El carácter específico de esta clase de interacción en las zonas inferior y superior de la capa límite, ha sido revelado.

El Experimento múltiple sobre Radiación ha sido efectuado en condiciones de cielo cubierto de nubes. Ello ha hecho posible obtener datos sobre la dependencia del albedo espectral de las nubes de su microestructura y de sus parámetros macroscópicos, así como estudiar la dependencia de la divergencia del flujo radiativo (la radiación de onda corta absorbida por una nube) de la longitud de onda. Ha sido descubierta la existencia de absorción intensiva (considerable divergencia de flujo) en la región visible del espectro.

En resumen, debe hacerse constar que, junto con una continuación de las investigaciones brevemente descritas más arriba, se proyectan llevar a cabo durante los próximos años algunas investigaciones de campo según el programa CAENEX, con el fin de estudiar el impacto causado por el hombre en el clima (el CAENEX *industrial*). Se espera que participe en estas expediciones un amplio grupo de expertos en contaminación atmosférica. Se proyecta efectuar también investigaciones sobre un área marina (el CAENEX *marítimo*).

## BIBLIOGRAFIA

1. WMO/ICSU (1971): *Report of the Sixth Session of the Joint Organizing Committee* (Informe sobre la Sexta reunión del Comité Conjunto de Organización), Toronto, 20-25 octubre 1971. Ginebra.
2. KONDRATYEV, K. Ya. y otros (1970): *Experimento Energético Complejo (CENEX)*. Bol. OMM, Vol. XIX, 4, pág. 265.
3. KONDRATYEV, K. Ya. y otros (1971): *Predvartel'nye resulyaty pervoj ekspedicii po programme Kompleksnogo energetičeskogo eksperimenta (KENEKS-1970)* (Resultados preliminares de la primera expedición efectuada según el Programa del Experimento Complejo sobre la Energética de la Atmósfera (CAENEX-1970). Met i Hidro., n.º 6.
4. KONDRATYEV, K. Ya. y ORLENKO, L. R. (Ed.) (1971): *Kompleksnyj energetičeskij eksperiment (KENEKS-1970)*. (Experimento Energético Complejo (CAENEX-1970). Trudy GGO, n.º 276.
5. KONDRATYEV, K. Ya. (1969): *Radiation in the Atmosphere*. Academic Press, Nueva York.