

EXPERIMENTO ENERGETICO COMPLEJO (CENEX)

Por K. YA. KONDRATYEV, L. R. ORLENKO,
YU. I. RABINOVICH, N. E. TER-MAKAR-
YANZ, V. I. SHLYAKOV

La ejecución de la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) y del Programa de investigación global de la atmósfera (GARP), supone el desarrollo de un cierto número de subprogramas destinados al estudio de algunos aspectos individuales de la circulación general de la atmósfera. Los proyectos elaborados con este objeto por los meteorólogos soviéticos han sido descritos por E. K. Fedorov¹ *. El presente artículo se propone exponer el objetivo y el contenido de uno de tales subprogramas, conocido como el Experimento energético complejo (CENEX).

Generalidades

La energética de la atmósfera y la energética de la interacción entre la atmósfera y la superficie sólida subyacente a ella (la que tiene lugar entre la atmósfera y el océano resulta demasiado intrincada), es la clave del problema de la circulación general atmosférica y de los métodos numéricos de predicción del tiempo a largo plazo. Aunque el mecanismo fundamental de la transformación de la energía solar dentro del sistema *suelo-atmósfera* y de la conversión mutua entre las energías potencial y cinética, puede considerarse que ha sido adecuadamente estudiado, quedan un buen número de problemas sin resolver. Esto resulta particularmente evidente cuando se exige una descripción cuantitativa de las transformaciones energéticas.

El problema de la introducción de la energía y del calor es muy amplio. Para fijarnos en sus aspectos prácticos, debemos dejar de lado la muy importante cuestión de las transformaciones mutuas de la energía cinética, potencial e interna¹, y limitarnos a una consideración de los problemas que implican los factores del tiempo y del clima que afectan a la radiación, tales como el intercambio turbulento en la capa límite atmosférica y el papel desempeñado por los cambios de fase del agua en la atmósfera, con el intento de fijar la atención sobre las cuestiones más importantes sin resolver.

Cabría destacar aquí un estudio detallado que, sobre el flujo calorífico y la energética, fue entregado al «Presidium» de la Academia de Ciencias de la URSS, en un informe elaborado por un grupo de expertos del Soviet directivo, como miembros del Comité Conjunto para la Predicción del tiempo y la Física de la atmósfera (Presidente: Académico G. I. Marchuk)¹. El papel de la radiación en la circulación general de la atmósfera también ha sido discutido recientemente con detalle^{2, 3}.

Para la descripción de los fenómenos que tienen lugar en la capa límite de la atmósfera es esencial el estudio del aporte de energía que resulta de los

* Véanse reseñas bibliográficas al final del artículo.

procesos turbulentos de intercambio de calor, de la humedad y del momento cinético.

Para admitir la mezcla turbulenta en la capa límite de la atmósfera pueden usarse varios métodos tan pronto como haya sido preparado un modelo numérico de la circulación general para el cálculo de la acción mutua entre la atmósfera y el suelo subyacente. Por ejemplo, el flujo de las distintas variables puede determinarse a partir del gradiente conocido de los valores medios correspondientes y de un valor supuesto del coeficiente de turbulencia en la capa límite. La dificultad radica aquí en la determinación de dicho coeficiente, que depende de varios factores y que no ha sido todavía suficientemente bien estudiado. Para la predicción es, pues, aconsejable utilizar las características generales de la capa límite sin intentar describir su estructura interna.

Como bien se sabe, los flujos turbulentos tienen su valor máximo cerca de la superficie de la tierra, disminuye rápidamente con la altura dentro de la capa límite y es prácticamente despreciable a una altura de 1 a 1,5 kilómetros. Suponiendo que el flujo turbulento sea nulo en el nivel superior de la capa límite, los flujos turbulentos al nivel del suelo subyacente pueden utilizarse como una característica *general*. Entonces el problema consistirá en determinar los flujos al nivel del suelo a partir de la diferencia entre los valores de los elementos meteorológicos correspondientes en los dos niveles de la capa límite y a partir de los valores del viento geostrófico y de la estratificación para todo el espesor de la misma.

La relación entre el flujo turbulento, la distribución de los elementos meteorológicos en la capa límite y las características de la superficie del suelo se puede obtener a partir de modelos teóricos de la estructura de dicha capa límite. Sin embargo, como los modelos teóricos dan una descripción incompleta de los procesos que se desarrollan en la capa límite (especialmente en lo que se refiere al flujo turbulento y al flujo calorífico), debería hacerse una determinación más exacta de esa relación, partiendo de datos experimentales. Por esta razón se hace necesaria una considerable labor de investigación sobre los continuos cambios que ocurren en los fenómenos que se verifican en la capa límite como consecuencia de la variación diurna en la radiación solar absorbida por el suelo. Es esencial que se lleve a cabo una investigación más profunda sobre los aspectos regulares de la estructura vertical del suelo y de las capas límite de la atmósfera y que se conozcan mejor los límites dentro de los cuales la capa atmosférica superficial puede ser tratada como un fenómeno casi-estacionario.

Es bien sabido que el mecanismo más poderoso responsable de las transformaciones de la energía en la atmósfera es la formación y disipación de las nubes. El consumo de energía debido a la evaporación alcanza a un tercio de la radiación solar absorbida por la tierra y es 15 veces mayor que la velocidad de producción de energía cinética. El calor de condensación liberado durante el proceso de formación de las nubes, constituye para la atmósfera una gigantesca fuente de energía. La formación de las nubes altera radicalmente los campos de radiación. Todo esto subraya la importancia que tiene investigar el papel que juegan las nubes como un factor de la energética atmosférica. Deben centrarse serios esfuerzos en el estudio del flujo calorífico que resulta de los cambios de fase del agua en la atmósfera, así como en la investigación de la naturaleza de las complejas relaciones existentes entre nubosidad, radiación, humedad, temperatura, movimiento vertical, etc.

Naturalmente que la significación de una evaluación correcta de los factores energéticos de la circulación general de la atmósfera depende de la sensibilidad de ésta a los cambios experimentados por dichos factores. En relación con esto conviene advertir que en el presente trabajo sobre la teoría del clima y la elaboración de modelos numéricos de la circulación general prestaremos poca atención al problema de la *sensibilidad*. Sin embargo, no cabe duda de que uno de los problemas centrales de la moderna meteorología (el cálculo de los factores no adiabáticos de la circulación general atmosférica), sólo puede resolverse apelando a modelos y a métodos de parametrización estadística y haciendo el mejor uso posible de todos los datos experimentales disponibles.

Propósitos fundamentales y características del CENEX

De las observaciones anteriores se deduce que el Experimento Energético Complejo (CENEX), como primer intento de realizar un estudio exhaustivo de la energética de la atmósfera y del suelo subyacente, es de vital importancia para la ejecución del Programa de Investigación Global de la Atmósfera (GARP).

El principal objetivo del CENEX es la investigación del transporte de todas las especies de energía y de todos los tipos de flujo calorífico que se producen en la atmósfera con el fin de analizar los factores determinantes de estos procesos, bajo distintas condiciones, y evaluar los factores energéticos del régimen térmico y dinámico de la atmósfera.

Es evidente que un tal experimento es muy complicado y sólo puede montarse sobre una base local organizando una serie coordinada de expediciones de investigación a ciertas regiones típicas bajo el punto de vista físico-geográfico (tales como el desierto, la estepa, la selva, los depósitos hidráulicos, etcétera). De aquí que la base experimental del CENEX consistirá en una serie de expediciones coordinadas a lo largo del período 1970-75. Este programa ha sido planeado con el intento de obtener datos completos sobre la energética de un volumen troposférico limitado de 200 a 300 kilómetros de extensión horizontal. En el centro de este volumen se realizarán sondeos verticales muy completos (aviones, globos, actinometría y radioviento) de la atmósfera. Estos sondeos se completarán con medidas realizadas desde avión, datos procedentes de sondeos de alto nivel en la periferia y con datos suministrados por satélites (cuando los satélites meteorológicos pasan por encima de la región sometida a investigación). La elección de la combinación de observaciones depende de las condiciones requeridas para cerrar el balance energético en distintas capas atmosféricas y en la capa en contacto con el suelo, con una precisión dada.

Dentro del citado programa preparado por el CENEX, las principales líneas de la investigación se encaminan a la solución de los siguientes problemas:

La constante solar y sus posibles variaciones.

Estudio de los aspectos regulares observados y de los factores que determinan los flujos de radiación y el aporte calorífico en la troposfera: perfiles verticales de la radiación neta y de sus componentes; distribución

espectral de los flujos de la radiación de onda corta y de onda larga; aerosoles en la atmósfera libre; distribución vertical de la concentración; micro-estructura, composición química y características ópticas.

Métodos aproximados de la teoría fenomenológica de la transmisión de la radiación, sus comparaciones mutuas y contraste con los datos experimentales; el papel de los aerosoles (dependiente de sus características ópticas y microfísicas). El efecto de las distintas capas de nubes sobre los flujos de radiación y el aporte de calor, dependiente de las características ópticas y microfísicas de las nubes; análisis de las posibilidades de aplicación de los métodos aproximados para tener en cuenta el efecto de la nubosidad.

Relaciones estadísticas fundamentales obtenidas por observación de las características cuantitativas del campo de radiación y de los parámetros descriptivos de la estructura y composición de la atmósfera y de las propiedades de las nubes; desarrollo, a partir de esta base, de procedimientos para la parametrización estadística de los factores de la radiación, con vistas al conocimiento de la circulación general de la atmósfera.

Balance calorífico del suelo: relaciones entre los componentes de la radiación, variación diaria, influencia del suelo no horizontal; investigación del grado de homogeneidad horizontal del suelo, usando los datos de la fotografía multispectral y la exploración radiactiva por avión.

Flujos de energía en la superficie y en las capas límites atmosféricas asociadas con el transporte del calor, la radiación, en el momento cinético y el vapor acuoso; relaciones fundamentales entre los flujos turbulentos y la distribución de los elementos meteorológicos; análisis de los esquemas aproximados teniendo en cuenta la acción mutua entre la superficie del suelo y la atmósfera y su comprobación experimental.

Balance calorífico del sistema tierra-atmósfera: los componentes del balance calorífico, su dependencia de los diferentes factores, la meso y macro estructura temporal de los campos de los componentes del balance térmico del sistema.

Estudio de la influencia de los distintos factores atmosféricos de la energía sobre el régimen térmico y dinámico de la atmósfera; comprobación experimental de los esquemas que tienen en cuenta los factores energéticos en la elaboración de modelos numéricos; desarrollo de los esquemas adecuados para la parametrización de los factores energéticos fundados en el uso de datos experimentales.

Para la realización de investigaciones experimentales sobre los anteriores temas se ha planeado organizar una zona de observación *casi estacionaria* y hacer algunas series de observaciones ocasionales (de mes y medio o dos meses de duración), en distintos puntos.

Durante estas expediciones se aplicarán varios tipos de técnicas de observación: aviones IL-18 (laboratorios volantes), helicópteros tipo MI-1 o MI-4, sondeos actinométricos de la alta atmósfera y de radioviento, instrumentación para la medida de las características de la radiación, composición y estructura de la atmósfera (dentro de la capa 0-30 km), con ayuda de globos y medidas por satélites meteorológicos.

Se intentó aprovechar plenamente las redes de estaciones meteorológicas de superficie y aerológicas existentes en las regiones sometidas a la investigación. Con este objeto se preparó un programa adicional de observaciones a realizar por las estaciones de la red fija, en momentos suplementarios.

Ante la necesidad de eliminar el efecto de las condiciones locales (cosa importante, sobre todo para la correcta reducción de los datos obtenidos con avión o globo a los datos de observación junto al suelo), habrá que escoger zonas suficientemente extensas (200-300 kilómetros), con suelo uniforme y suficientemente alejadas de montañas y depósitos de agua. La extensión actual sobre la que se van a promediar las cantidades medidas, será del orden de algunas decenas de kilómetros. Una serie coordinada de observaciones, tal como se necesita para resolver los problemas expuestos, ha sido planificada para el período 1970-75 para suelos con diferentes propiedades dinámicas (tierra, agua) y físicas (albedo, características termofísicas, rugosidad, etc.).

Programa de observaciones del primer Experimento Energético Complejo (CENEX-70)

La zona experimental está en Asia Central (junto a la estación científica desértica de Repetek). La expedición se considera como el primer ensayo de organización del CENEX, dirigido principalmente a la investigación de métodos de medida y de tratamiento de datos, y en segundo lugar para obtener datos previos de la acción energética mutua entre la atmósfera y el suelo y de la divergencia del flujo calorífico en la atmósfera haciendo con ello posible la elaboración de un modelo a largo plazo de los procesos.

Las instituciones que toman parte en la expedición son: el Observatorio Principal de Geofísica, el Observatorio Central Aerológico, el Instituto Hidrometeorológico de Investigación de Asia Central, la Universidad Estatal de Leningrado, el Instituto de los Desiertos de la Academia de Ciencias del Turquestán Ruso y el Instituto de Óptica Atmosférica de la Sección Siberiana de la Academia de Ciencias de la URSS.

Programa de observaciones en superficie

Las siguientes observaciones se efectuarán por la expedición dedicada al estudio de la superficie:

Determinación de los perfiles verticales de temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento dentro del estrato junto al suelo, de 20 metros de espesor.

Medidas de los componentes de la radiación neta y de la temperatura de radiación de la superficie.

Determinación de los componentes del balance calorífico en la capa inferior, utilizando métodos directos y de cálculo.

Medidas de la temperatura del suelo a diferentes profundidades, y de las características termofísicas del suelo.

Determinación experimental de la radiación y del aporte de calor en la capa atmosférica junto al suelo.

Estudio de la distribución de energía en el espectro de la radiación de onda corta.

Observaciones de ozono.

Observaciones actinométricas en distintos puntos (aprovechando la red de estaciones actinométricas y de balance térmico, establecida).

Observaciones con globo piloto: determinación de la distribución media de la velocidad y dirección del viento; investigación de la disipación de la energía turbulenta a partir de las observaciones con globos a nivel constante.

Sondeo vertical con helicóptero: investigación de los perfiles verticales de los flujos de radiación en la capa límite; medidas de temperatura, humedad, presión, fluctuaciones de temperatura y aceleraciones verticales; la altura del sondeo es de 2 a 2,5 km.

Globos de sondeo (globos cautivos): medidas de presión, temperatura y humedad, velocidad media del viento y fluctuaciones de las componentes horizontal y vertical de la velocidad del viento en la capa límite.

Observaciones con radioviento en distintos puntos (aprovechando las estaciones de la red aerológica).

Sondeos actinométricos y frecuentes sondeos de radioviento en el punto central para medidas en superficie.

Programa de observaciones con avión

El programa CENEX incluye ciertos estudios a realizar por avión en el dominio de los flujos de radiación en la atmósfera libre. Para ello se llevarán a cabo sondeos verticales con avión a niveles tipo sobre determinadas zonas de suelo uniforme. Las investigaciones llevadas a cabo con avión incluirán medidas de un gran número de características de radiación y meteorológicas de la atmósfera y del suelo, que pueden dividirse en cuatro grupos:

Medidas de los flujos de radiación espectral y total, ascendente y descendente, de onda corta y larga.

Medida de la distribución espectral angular de las intensidades de radiación ascendente y descendente, de onda corta y larga.

Toma de fotografías de la superficie del suelo en varios intervalos espectrales y trazado de mapas de temperatura de radiación para apreciar la falta de homogeneidad del suelo.

Series de medidas meteorológicas para la determinación de los perfiles verticales de la presión, temperatura, humedad, fluctuaciones de temperatura, aceleración vertical y viento, así como características de la nubosidad y del aerosol atmosférico. Considerando que el tiempo empleado en una serie de medidas varía mucho según los distintos tipos de instrumentos (desde cinco segundos hasta quince minutos), la serie completa de medidas sólo puede llevarse a cabo para un número limitado de altitudes. En consecuencia, el plan de sondeos verticales tiene que desarrollarse según dos programas:

Sondeos verticales a los niveles tipo: 950, 850, 700, 500, 300 mb, durante los cuales se medirán los flujos de radiación espectral y total, ascendente y descendente, realizándose, al mismo tiempo otra serie de medidas auxiliares. Los espectrómetros destinados a la medida de la distribución angular de la radiación están dirigidos sólo verticalmente hacia abajo.

Sondeos verticales a los niveles tipo: 950, 700, 300 mb. Además de las medidas de los flujos espectral y total de radiación, se efectuarán medidas de la distribución angular de la radiación junto con un complejo de medidas meteorológicas subsidiarias.

A bordo de dos aviones laboratorio (IL-18) se montarán combinaciones semejantes de instrumentos que permitirán efectuar medidas simultáneas a dos niveles, eliminando la necesidad de introducir correcciones según la altura del sol. Algunos instrumentos podrán mostrarse probablemente a bordo de un avión IL-2.

Cuando el cielo esté cubierto se efectuarán series especiales de medidas, por encima y por debajo de la capa nubosa.

Se efectuarán medidas meteorológicas auxiliares en forma continuada. Respecto de las observaciones realizadas con arreglo al primer programa, el avión realizará en cada nivel, un vuelo con azimut 0-180° y otro con azimut 90-270° respecto del sol. La duración del vuelo en cada nivel será de unos treinta minutos y la duración total será de cinco horas. Para las observaciones del segundo programa, el avión hará, para cada nivel, dos vuelos con azimut 0-180° y 90-270° respecto al sol. La duración del vuelo a cada nivel será de una hora y la total del vuelo cinco horas. De noche el avión efectuará en cada nivel un vuelo a lo largo de dos rutas perpendiculares entre sí, correspondientes a los sondeos efectuados durante el día. Las medidas se efectuarán tanto si el cielo está despejado como si está cubierto. Los sondeos empezarán hora y media antes de medio día o de media noche, hora solar local.

En cada nivel los instrumentos realizan un registro continuo de los parámetros que hay que medir. Los instrumentos destinados a la medida espectral de la distribución angular de la radiación efectuarán medidas hacia el zénit, hacia el nadir y en las direcciones $\pm 60^\circ$ y $\pm 80^\circ$ respecto de la vertical.

En los niveles de 300 y de 700 mb se tomarán fotografías normales y con infrarrojos cuando el cielo esté claro. Cuando esté nublado se tomarán fotografías de alta calidad de la capa de nubes.

En el seno del Comité del GARP de la URSS ha sido creado un Grupo de trabajo para el CENEX que actuará como órgano coordinador. La orientación operativa está a cargo de la Oficina del Grupo, cuyos miembros son: K. Ya. Kondratyev (presidente), V. M. Shlyakhov (vicepresidente) y director del CENEX, V. F. Belov, L. R. Orlenko, N. E. Ter-Markaryanz, V. F. Zhvaley (secretario).

BIBLIOGRAFIA

1. FEDOROV, E. K. (1970): *Osnovnye problemy PIGAP* (Principales problemas del GARP). Met. y gidro, N.º 7.
2. KONDRATYEV, K. Ya. (1968): *Programma planetarnyh issledovaniy atmosfery y radiacionnye faktory pogody y klimata* (El GARP y los factores de radiación del tiempo y del clima). Met. y gidro, N.º 6, págs. 11-20.
3. KONDRATYEV, K. Ya. (1970): *Oradiacionnyh faktorah obscej cirkuljacij atmosfery* (Sobre los factores de radiación de la circulación general de la atmósfera). Met. y gidro, N.º 4, págs. 36-41.
4. LORENZ, E. N. (1967): *The nature and theory of the general circulation of the atmosphere* (La naturaleza y teoría de la circulación general de la atmósfera). Publicación OMM - N.º 218, T. P. 115. Ginebra.