

preparación en otros países. Los canales meteorológicos proyectados están pensados para complementar a los otros principales canales de TV, que mantendrían su proporción potencial de audiencia y su grado de satisfacción. Se espera que las nuevas cadenas meteorológicas de Europa se asocien con las norteamericanas. El canal meteorológico cubre una demanda, pero es obligado ofrecer más productos dado que las grandes empresas emisoras no harán un análisis en profundidad de la información.

También surge la cuestión de cómo van a tratar a la información los servicios gubernamentales. En los EE. UU., la información se distribuye gratuitamente por el organismo estatal, consiguiéndola aquellos que proporcionan los servicios, quienes la venden o la emiten; mientras que en Francia y en el resto de Europa, los servicios nacionales venden la información básica a usuarios exclusivos, sobre una base contractual. ¿Cómo evolucionará este intercambio si, en el futuro, se crean canales meteorológicos privados?

Los elementos más importantes en la información del tiempo son los siguientes:

- *aumento de la frecuencia de las informaciones* (cada cuarto de hora), con una retransmisión tan exacta como sea posible, en el estilo de las predicciones de las oficinas meteorológicas;
- *presentación personalizada de la información del tiempo*, que satisface la expectativa del público más que una presentación anónima (el presentador del tiempo pertenece a y posee unos seguidores leales);
- *la información gráfica* debe estar evolucionando constantemente, en línea con los avances tecnológicos, haciendo la presentación más educativa y agradable, y más clara.

- *el impacto de la presentación es esencial*: la TV es ante todo visual, pero también es una fuente de asombro. Un productor puede promover y acaparar la lealtad del público mediante su originalidad, por ejemplo, con mapas animados.

Estos diversos elementos se ponen de manifiesto cada año en el Festival Internacional del Tiempo en Issy-les-Moulineaux. Este acontecimiento especial promueve los conceptos de "intercambio", de "estar juntos" y de "enseñanza" mencionados con anterioridad, asistiendo al mismo presentadores del tiempo, periodistas, meteorólogos, productores, especialistas en técnicas audiovisuales y, por supuesto, el público. Los que ven los boletines meteorológicos de la TV, reciben un mensaje completo pero no tienen ni idea de lo que se requiere para hacer posible que lo reciban. En el festival se les muestra la intrincada maquinaria de la organización del mundo meteorológico y la gran cantidad de estilos diferentes de presentación de un país a otro. Para los profesionales el festival es una oportunidad de reunirse y ver lo que los demás están haciendo.

Otro elemento constante de este festival es el hecho de que los presentadores del tiempo son todos huéspedes invitados. Dado que existen cadenas de TV pobres y ricas, tomamos la decisión de invitar a todas, de forma que no vinieran únicamente los que tienen dinero.

Para concluir, creo que la información del tiempo y su presentador continuarán siendo una característica indispensable en la institución de la TV. Los presentadores representan el toque humano y ofrecen algunos conocimientos y una visión sobre el mundo exterior que hemos de soportar. Finalmente: todos necesitamos la información del tiempo para conocer en qué momento el cielo caerá sobre nuestras cabezas. ¡Con quien quiera y donde quiera que estemos!

SIEMBRA DE NUBES PARA PROTEGER MOSCÚ DE LA LLUVIA EL 9 DE MAYO DE 1995

Por A.I. BEDRITSKY¹ y A.A. CHERNIKOV²

Introducción

En el terreno de la modificación artificial del tiempo, Rusia ha realizado un trabajo considerable desarrollando métodos de disipación de nubes y medios de prevenir o de reducir sustancialmente la cantidad de precipitación.

¹ Director del Servicio Federal de Hidrometeorología y Vigilancia del Medio Ambiente, Moscú

² Director del Observatorio Aerológico Central de Roshydromet, Moscú

Elo se consigue, básicamente, aumentando el flujo de calor solar mediante el cambio del balance radiativo. Tal tarea se ha realizado con los objetivos principales de reducir los costes municipales de limpieza de la nieve en las grandes ciudades y de crear condiciones meteorológicas favorables para actividades deportivas de amplia base social o para otros acontecimientos especiales. La labor se ha llevado a cabo durante los últimos años en Moscú [1] como continuación de experimentos similares en San Petersburgo, Kiev y Tashkent. Durante

el verano de 1986, los institutos del Goskomgidromet de la URSS realizaron gran parte del trabajo de reducción de la precipitación y de disipación de las nubes sobre la zona afectada por el desastre de Chernobyl en el marco de las actividades de mitigación del impacto [2]. No existe bibliografía sobre un trabajo similar en otros países durante los últimos años.

El presente artículo describe el proceso de modificación de estratos (St) y cúmulos (Cu) llevado a cabo para el gobierno ruso por el Observatorio Aerológico Central (OAC) de Roshydromet el 9 de mayo de 1995, fecha prevista para los festejos conmemorativos del 50º aniversario del Día de la Victoria en Europa. El acto sobresaliente era un desfile militar y de veteranos de guerra al que asistían Jefes de Estado y un gran número de diversos invitados. El objetivo era pues asegurar, en lo posible, las condiciones meteorológicas para el acontecimiento.

Conceptos básicos y medios de aplicación

Teniendo en cuenta las modificaciones meteorológicas que podrían darse el 8 y 9 de mayo en la zona circundante, la labor de mejorar el tiempo en Moscú se planeó como sigue:

- disipación de una capa de nubes superenfriada de 1,0 a 1,5 km de espesor mediante su siembra con agentes nucleadores;
- iniciación prematura de la precipitación a barlovento de la ciudad para producir una "cortina de lluvia" (es decir lluvia reducida) sobre Moscú;
- reducción de la intensidad de la precipitación en la ciudad mediante siembra de las capas de nubes causantes de lluvia con una gran cantidad del agente nucleador ("supersiembra");
- prevención o reducción de la intensidad de los chubascos fuertes suprimiendo el desarrollo de nubes convectivas mediante el uso de polvo grueso.

La base teórica actual para desarrollar casi todos los medios de modificación del tiempo es, por supuesto, el estado inestable de todos los procesos atmosféricos. De los diversos tipos de inestabilidad, los de mayor potencial de modificación local de los procesos de precipitación y de formación de nubes son el de estado de suspensión acuosa (existencia de humedad en forma de gotitas líquidas superenfriadas) y el de existencia de inestabilidad (vertical) convectiva en la atmósfera. En el primer caso es posible estimular la formación de núcleos de condensación en la parte superenfriada de la nube, lo cual, a su vez, altera sustancialmente la cinética de los procesos de formación de la precipitación [3]. En el segundo caso, para disipar nubes convectivas puede emplearse la propia energía de la inestabilidad atmosférica que causó el desarrollo de aquéllas. Es necesario sola-

mente encauzar dicha energía en sentido contrario creando en las nubes una subsidencia [4].

La planificación de la operación del 8 y 9 de mayo tuvo en cuenta los diversos métodos de reducción de la precipitación y de disipación de nubes, explotando los tipos de inestabilidad mencionados.

El primer y principal método adoptado fue el de suprimir el desarrollo de los Cumulus congestus (Cu con) y de los Cumulonimbus (Cb) usando polvo grueso [2]. El método implica la iniciación artificial de subsidencias en las nubes convectivas volcando polvo sobre sus cimas. Como se demostró en el experimento del OAC [5], tal método tiene éxito el 90 por ciento de las veces al aplicárselo a células individuales, nubes de masas de aire aisladas y del 60 al 65 por ciento cuando se aplica a nubes de origen frontal. Para los propósitos de la misión el método se adaptó a la dispersión de Cu y Cb, reduciendo así la cantidad de nubosidad en la zona señalada (el Moscú central).

El segundo método consistía en disipar las nubes estratiformes o en disminuir la precipitación originada en ellas sobre la zona señalada. Los estudios demostraron que, bajo ciertas condiciones, la inseminación de nubes estratiformes con agentes generadores de hielo conduce, o bien a su dispersión, o bien a una precipitación, originada en ellas, más intensa durante un cierto periodo, seguida de una reducción relativa de la intensidad de la lluvia y de la cantidad de nubosidad. Así, provocando un aumento relativo de la precipitación a una distancia apropiada a barlovento, se puede generar una cortina de lluvia sobre la zona señalada.

El tercer método consistía en sembrar los sistemas de nubes generadores de lluvia directamente en los suburbios de la ciudad con cantidades mayores de las normales del agente formador de hielo. Tal superinseminación tiene como consecuencia la creación de una concentración de núcleos de hielo mucho mayor que la que se daría de forma natural. Dado el contenido invariable de agua de la capa de nubes generadora de lluvia y el flujo constante de vapor de agua, un aumento acusado de la cantidad de partículas de lluvia que crecen simultáneamente, conduce a una ralentización sustancial de su proceso de crecimiento y de caída lo cual, a su vez, provoca una marcada reducción de la precipitación que se desprende, en un intervalo de tiempo dado, de la capa de nubes tratada.

La superinseminación es, generalmente, el método preferido para reducir la precipitación en una zona específica, primero porque se obtiene una reducción sustancial de la precipitación y segundo porque el rápido efecto hace más fácil dirigir el área de menor precipitación hacia la zona elegida, lo cual es importante en situaciones de un campo de vientos complejo y variable. Al calcular los impactos de la superinseminación, la distancia elegida desde las líneas de siembra a la frontera de la zona elegida resulta ser aproximadamen-

te igual al desplazamiento semihorario de la nube generadora de lluvia, o sea varias veces menor que la distancia necesaria para crear una cortina de lluvia.

La aplicación de los métodos susodichos se basó en las técnicas desarrolladas por el OAC usando aviones equipados con los siguientes aparatos de siembra: dispositivo de dosificación para la suelta de gránulos de hielo seco, sistemas de eyección para las bengalas pirotécnicas PV-26 (40 g) y PV-50 (400 g) que contienen un 2 por ciento de yoduro de plata, y cintas transportadoras para la suelta de paquetes de 25 a 30 kg de un agente triturado a base de óxidos de aluminio y de apertura automática posterior al lanzamiento.

Condiciones meteorológicas el 9 de mayo de 1995

La borrasca que causaba las nubes y la precipitación había formado durante el período fijado un frente frío (ártico) ondulado. Durante la mañana del 9 de mayo, Moscú se encontraba en el sector cálido de una onda ciclónica, mientras la depresión se centraba cerca de 200 km al sudeste y se movía hacia el este a una velocidad de 20 a 30 km h⁻¹ (véase la figura 1, que también muestra la trayectoria del eje de la depresión en altura).

Según los datos de las 1000 TU, la zona de Moscú estaba bajo la influencia de dos frentes: uno cálido, orientado del SW al NE, a unos 40 km al oeste de la ciudad (las nubes asociadas eran campos de niveles medios de St y Cu en varias capas), y otro frío

cercano a la parte sur del oblast de Moscú (con la cresta de la onda ciclónica aproximadamente 100 km al SW de Moscú, donde había Altocumulus y Cb). Dicha situación se mantuvo hasta cerca de las 1300 TU.

Durante la segunda mitad del 9 de mayo, Moscú se encontraba virtualmente en el centro de una borrasca local en la proximidad de dos frentes que apenas se desplazaban. A las 1600 TU el frente cálido pasó exactamente sobre la ciudad manteniendo su orientación SW-NE, mientras que el frente frío se desplazó algo hacia el norte, encontrándose el punto de oclusión de 100 a 120 km al sur de Moscú. Al norte de dicho punto, y como resultado del calentamiento del aire durante la tarde, la nubosidad convectiva (Cu y Cb) aumentó mucho a los largo de la superficie frontal, provocando chubascos fuertes y tormentas.

Equipo y método empleados

En la operación del 9 de mayo tomaron parte siete aviones: cuatro AN-30 equipados con dispositivos dosificadores de hielo seco, dos AN-12 con sistemas de suelta de paquetes de polvo grueso y un AN-26 con un dispositivo dosificador de hielo seco y sistemas de eyección de bengalas PV-26 y PV-50 (también se instaló un sistema de eyección de bengalas PV-26 en uno de los AN-30). Siendo el AN-26, un avión laboratorio meteorológico especializado, llevaba también a bordo un conjunto de equipos de medida, de proce-

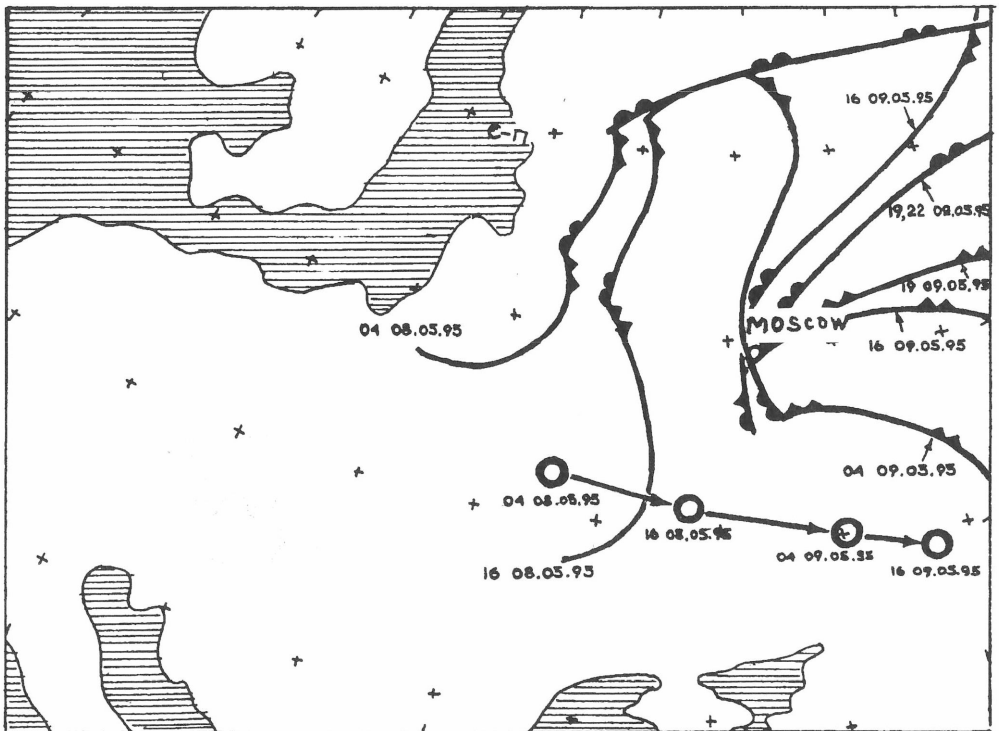


Figura 1 — Mapa del tiempo en la zona de Moscú el 9 de mayo de 1995

samiento y de registro, que permitía medir las características de navegación y los principales parámetros meteorológicos del aire y de las nubes, necesarios para evaluar la situación meteorológica, tomar la decisión de cómo dirigir la operación y calcular entonces el esquema y modalidad de la siembra.

El esquema, usando gránulos de hielo seco, exigía sembrar la capa superior de nubes productoras de lluvia a lo largo de líneas de 50 a 70 km, comenzando a distancias a barlovento de Moscú no inferiores al desplazamiento de las nubes por el viento en un intervalo de 1,5 a 2 horas. Las cantidades requeridas para disipar de dicha manera la nube estratiforme fueron de 1 a 2 kg de hielo seco y de 8 a 12 cartuchos por km de vuelo del avión, mientras que para la superinseminación se emplearon varios aviones a una distancia de Moscú de 30 a 40 minutos de recorrido del viento, en cuyo caso las cantidades empleadas fueron de 5 a 12 kg de hielo seco y de 20 a 36 cartuchos por km. En esos casos, el esquema fue diseñado para asegurar una siembra continua del campo de nubes mientras éste se movía hacia el interior de la zona de siembra.

Los Cu y Cb fueron disipados como a continuación se explica. Aviones AN-12, volando no más de 100 m por encima de las nubes o a través de las cimas de éstas, sembraron los Cu en desarrollo con paquetes de polvo grueso a barlovento de la ciudad. Las cantidades del agente vinieron determinadas por el número de cimas de nubes en desarrollo y por las dimensiones geométricas de cada cima, y variaron en total desde 25 ó 30 kg hasta 200 ó 250 kg por nube.

Los aviones operaron desde los aeropuertos de Bykovo (los AN-30 y los AN-26) y de Ermolino (los AN-12). Los cuarteles generales para la coordinación y dirección global de la tarea se establecieron en el punto de control radar de Krylatskoye (Moscú), que está equipado con un sistema automático de recogida, procesado y transmisión de informaciones de radar (AKSOPRI), con un receptor de satélite, con un facsímil de recepción de información sinóptica y con enlaces telefónicos y de radio, tanto con los grandes complejos terrestres que preparaban y llevaban a cabo la operación aérea, como con los aviones. Durante la operación hubo a bordo de los aviones un registro continuo de las coordenadas de los puntos de siembra y de información relativa a ésta.

Análisis de los resultados

La evaluación del resultado de dichas operaciones es muy compleja, puesto que, de forma ideal, la cantidad de precipitación después de la siembra debe compararse con la cantidad de precipitación que se hubiera registrado sin ella. Para experimentos científicos se emplea un método especial, la aleatorización de los experimentos, que suministra de forma simul-

tánea el conjunto de valores experimentales de la precipitación después de la siembra, y, para comparación, un conjunto de datos de control de la precipitación obtenidos con un desarrollo normal de las nubes. Desgraciadamente, dicho método no se aplica normalmente en trabajos operativos por la necesidad de omitir un número significativo de situaciones favorables para la labor de siembra.

La manera más difundida de evaluar una siembra operativa de nubes consiste en comparar los valores de la precipitación en la zona sembrada con los valores de una o de varias zonas de control no afectadas, como se hizo en el presente caso.

La siembra del 9 de mayo se realizó durante dos períodos: de las 0600 a las 1200 TU y de las 1400 a las 2200 TU. (Todos los vuelos se suspendieron al mediodía para una exhibición aérea).

La información del radar digital obtenida empleando el sistema AKSOPRI de Krylatskoye mostró que de las 0600 a las 1200 TU las zonas de eco radar de los Estratocumulus (Sc) que potencialmente podían producir precipitación en el Moscú central, se situaban principalmente de 70 a 120 km al sur y sudoeste de la ciudad. Las alturas de las cimas de las nubes eran de 30 km h^{-1} , y la dirección del movimiento era cercana a los 0° al principio del período, cambiante gradualmente a 45°. La siembra de dichos sistemas nubosos condujo a su casi completa disipación.

Durante las dos horas de interrupción se produjo un cambio sustancial en la naturaleza de las nubes. De las 1200 a las 1400 TU grandes Cb, con altura de sus cimas entre 7 y 8 km e intensidades de precipitación de 20 a 30 mm h^{-1} , empezaron a formarse de 30 a 80 km al oeste y sudoeste de la ciudad. Al mismo tiempo se daban Sc al sur y sudoeste como previamente, con alturas de las cimas de hasta 4 a 5 km e intensidades de precipitación de hasta 3 mm h^{-1} .

El cambio de la situación meteorológica hizo necesaria la adaptación de los métodos de siembra. A partir de la 1400 TU se empezó a sembrar los Cu en desarrollo soltando paquetes de polvo grueso desde los aviones AN-12. Esto constituyó la principal forma de siembra durante la segunda mitad del día.

La figura 2 muestra las trayectorias de la siembra y los puntos de todos los aviones a lo largo del 9 de mayo. Las líneas representan las trayectorias a lo largo de las cuales se sembraron de manera continua los campos nubosos con hielo seco y cartuchos, y las cruces las zonas de sembrado de los Cu mediante polvo grueso y las posiciones de los ocho cuadrados de 50 km de lado empleados para evaluar el impacto de la siembra. Se puede apreciar que los cuadrados 1, 3 y 5 contienen la mayoría de las trayectorias de sembrado y de los puntos correspondientes a la segunda mitad del día, con los cuadrados 2, 4 y 6 como sus respectivos cuadrados de control



Figura 2 — Zonas de siembra de nubes y distribución de ocho cuadrados empleados para evaluar el impacto de la siembra del 9 de mayo de 1995 (+ = zona en la cual las nubes se sembraron con polvo grueso; - = zona en la que las nubes se sembraron con agentes formadores de hielo).



Figura 3 — Imagen digital de radar (diagrama simplificado) de la precipitación desde las 0600 TU hasta las 2300 TU del 9 de mayo de 1995 en un radio de 200 km alrededor de Moscú (Sistema de radar AKSOPRI de Krylatskoye)

a sotavento, con los que se esperaba apreciar el impacto; los cuadrados 7 y 8 constituyen un par similar de cuadrados salvo por el hecho que no existió siembra en el cuadrado 7.

Superponiendo los ocho cuadrados sobre la imagen radar de distribución de la precipitación en un radio de 200 km alrededor de Moscú durante todo el intervalo de la siembra (de 0600 a 2300 TU), se puede apreciar (figura 3) que la razón de las precipitaciones en los pares de cuadrados seleccionados (1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, y 7 y 8) difiere sustancialmente, dependiendo de si se sembró o no en el primer cuadrado (a barlovento) del par. Se calculó, así, que la razón de la precipitación media para los cuadrados 1 y 2 fue de 9,1 (es decir la precipitación en el cuadrado 1 fue 9,1 veces mayor que el cuadrado 2), que para los cuadrados 3 y 4 la razón fue de 3,7 y que para los cuadrados 5 y 6 fue de 1,9; para los cuadrados 7 y 8, por otra parte, la razón fue cercana a la unidad (0,9).

Estos resultados confirman que se alcanzó el objetivo de la siembra de nubes del 9 de mayo, con una reducción sustancial de la precipitación en la zona elegida.

Bibliografía

[1] BERYULIEV G.P., I.I. BURTSSEV, N.K. VINNICHENKO, A.A. IVANOV, V.P. KORNEEV, A.K. MORGEOV, Y.A. SEREGIN, V.I. KHovorostyanov, A.M. YUDOV, 1990: Ob opyte po rassseyaniyu sloistobraznoi oblachnosti nad Moskvoy 7 noyabrya 1986 g. [Sobre el experimento de dispersión de nubes estratiformes

sobre Moscú el 7 de noviembre de 1986]. *Trudy Vses. Konf. po aktivnym vozdz.*, Leningrad, Gidrometeoizdat, 394-401.

- [2] BERYULIEV, G.P., L.P. ZATSEPINA, L.B. ZONTOV, B.N. SERGEEV, Y.A. SEREGIN, A.A. CHERNIKOV, E.E. KORNIENKO, V.S. MAKSIMOV y S.V. KHUSID, 1990: Opyt provedeniya rabot po iskusstvennomu regulirovaniyu osadkov v tselyakh oslableniya posledstviy avarii na Chernobylskoi AES [Experiencia de modificación artificial de la precipitación destinada a mitigar el impacto del desastre de Chernobyl]. *Trudy Vses. Konf. po aktivnym vozdz.*, Leningrad, Gidrometeoizdat, 233-238.
- [3] DENNIS, A., 1983 *Izmenenie pogody zasevom oblakov* [Cambiando el tiempo mediante la siembra de nubes]. Moscú, Mir, 272 págs.
- [4] VULFSON, I.N., L.P. LEVIN y E.P. CHERENKOVA, 1970. Razrusheniye razvivayushchikhsya konvektivnykh oblakov iskusstvenno sozdannymi niskhodyyashchimi struyami [Disipación de nubes convectivas en desarrollo empleado subsidencias creadas artificialmente]. *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*, **6** (1), 14-28.
- [5] BELYAEV, V.P., L.P. ZATSEPINA, L.B. ZONTOV, V.V. PETROV y Y.A. SEREGIN, 1987. Nyekotorye rezultaty polevykh opytov po razrusheniyu mnogoyacheikovykh konvektivnykh oblakov [Algunos resultados de los experimentos de campo para disipar nubes convectivas multicelulares]. *Trudy TsAO*, 1987, **164**, 3-10.