

posios internacionales de hidrología es adecuada para un futuro previsible y que el apoyo relativo y la participación de la OMM son razonables.

Resumiendo, es de esperar que la OMM pueda desempeñar un mayor papel en la hidrología internacional. Muchas de sus actividades consisten en coordinación, y en algunos casos colaboración con otros organismos internacionales.

BIBLIOGRAFIA

1. Comisión de Hidrometeorología. Informe final abreviado de la Tercera Reunión, Ginebra, 9-21 septiembre 1968, OMM, n.º 239, RP. 79.
2. KOHLER, MAX A. (1963). *El Decenio Hidrológico Internacional*. Ginebra, *Boletín de la OMM*, XII, 4, 193-197.
3. KOHLER, MAX A. (1965). *Actividades del Decenio Hidrológico Internacional*. Ginebra, *Boletín de la OMM*, XIV, 4, 209-213.

INVESTIGACIONES SOBRE LA ELECTRICIDAD EN LAS NUBES

Por I. M. IMYANITOV y JA. M. SCHWARZ

Las investigaciones sobre la electricidad en las nubes, cuyos progresos crecen rápidamente, encuentran un estímulo en ciertos problemas con los que se encuentran enfrentados meteorólogos y otros especialistas. Vamos a destacar dos grupos de tales problemas.

En primer lugar, tenemos el grupo enlazado directamente con el estudio de la electricidad en la atmósfera. En él se incluyen problemas tales como el esclarecimiento de los mecanismos por medio de los cuales se produce la electrización de las partículas nubosas o de las nubes en conjunto, y el papel que juegan las nubes en la determinación de las características eléctricas, locales y generales, de la atmósfera. Este último problema es de especial importancia en relación con el contenido del programa propuesto para el decenio de electricidad atmosférica (1)*.

Un segundo grupo de problemas se refiere a la investigación en el campo de la física de las nubes, sobre todo, en lo que respecta a los fenómenos de influencia que se desarrollan activamente en ellas. Desde los tiempos de Palmer, muchos investigadores de los fenómenos eléctricos en las nubes, se dieron cuenta, a falta de un conocimiento completo, de que el campo eléctrico situado debajo de una nube crece, generalmente, a medida que aumenta la intensidad de la precipitación. En una misma línea de incertidumbre, los investigadores actuales saben que cuando aumenta el tamaño de las nubes, aumentan también su carga, y los campos eléctricos. Esta relación fue establecida recientemente de un modo cuantitativo al tratar de relacionar la intensidad media del campo (E) en el interior de nubes de distintos tipos con su reflectividad media al radar. En la figura 1, trazada con los datos obtenidos de la observación de nubes entre las latitudes de 50° y 60° N, se descubre una relación lineal entre Z y E (2). La relación que se obtiene

* Véanse las referencias en la página 278

puede explicarse o por el incremento producido en el campo eléctrico de la nube al que acompaña un aumento en el número y tamaño de las gotitas de agua, o por el hecho de que las propiedades eléctricas de las nubes juegan un amplio papel en los cambios de concentración y en el espectro de las dimensiones de las gotitas y, en consecuencia, en el desarrollo de las nubes. Si es válida la primera explicación, entonces las características eléctricas de las nubes sólo pueden servir a los meteorólogos como indicios del estado de la nube, pero si es correcta la segunda, entonces el estudio de las características eléctricas es esencial incluso para la comprensión de las leyes físicas que gobiernan el desarrollo de las nubes.

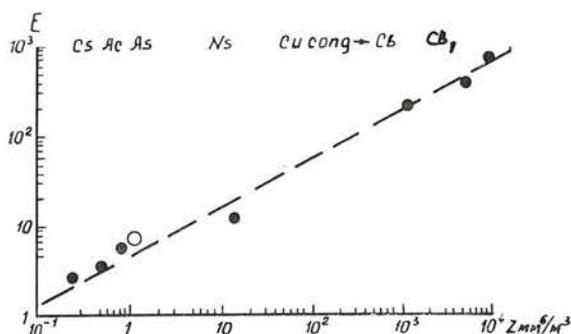


Figura 1.—Relación entre el gradiente medio de potencial E , expresado en volt cm^{-1} , y la reflectividad media al radar Z en nubes de distintas formas. CB_1 indica un Cúmulonimbo en desarrollo que no ha alcanzado todavía la fase tormentosa, y CB_2 una nube tormentosa desarrollada. El círculo en blanco indica el valor de la reflectividad en Cs , calculada según el contenido en agua, teniendo en cuenta que la permeabilidad dieléctrica del hielo para la frecuencia de la medida es aproximadamente un quinto de su valor para el agua.

Pese a la importancia de las investigaciones sobre las características eléctricas de las nubes, se tropezaba hasta ahora, con una falta completa de datos utilizables sobre la estructura eléctrica de las mismas y sus propiedades eléctricas. Es suficiente recordar, por vía de ejemplo, que incluso en trabajos fundamentales como son los de Wilson (3) y Frenkel (4), que descansan sobre hipótesis sumamente arbitrarias, ya se obtenían valores numéricos para el gradiente de potencial eléctrico en las nubes, sus cargas, etc. Y los valores asignados, por ejemplo, a la conductividad en el seno de las nubes tormentosas por distintos autores pueden diferir en varios órdenes de magnitud. Los resultados obtenidos a partir de datos medidos desde el suelo, tampoco son uniformes.

En cambio hoy, con ayuda de medidas directas, ha sido posible ajustar la estructura eléctrica de las nubes a ciertos esquemas y adquirir alguna idea justa sobre varias de sus características eléctricas.

Estructura eléctrica de las nubes

Ha sido en la Unión Soviética en donde se han llevado a cabo las más amplias investigaciones sobre la estructura eléctrica de las nubes de los distintos tipos (5, 6, 7). La estructura eléctrica de las nubes no tormentosas

fue explorada mediante medidas directas del gradiente de potencial del campo eléctrico (E) en la atmósfera del interior de la nube, y de las nubes tormentosas mediante medidas de E por encima de ellas.

La figura 2 representa cuatro estructuras eléctricas características, obtenidas en estratos cálidos (St), de latitudes templadas. Las estructuras de

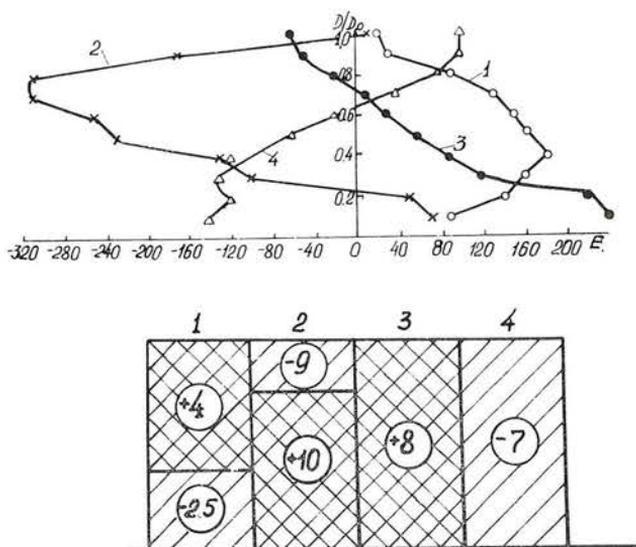


Figura 2.—Perfil del gradiente de potencial E (en volt m^{-1}) y diagrama de distribución de las cargas en St. 1 — nubes polarizadas positivamente (27 casos); 2 — polarizadas negativamente (7 casos); 3 — cargadas positivamente (16 casos); 4 — cargadas negativamente (6 casos). Las cifras encerradas en círculos representan los valores de la carga eléctrica contenida dentro de una columna aislada de una región polar o de toda la nube, en u. e. t. m^{-2} .

los estratocúmulos (Sc) son análogas. Con objeto de obtener curvas típicas de la distribución del gradiente de potencial E del campo eléctrico de las nubes en la atmósfera libre, fueron calculados sus valores medios en función de las alturas relativas D/D_0 en las mismas, donde D_0 es el espesor de la nube. El espesor de las nubes observadas oscilaba entre lo 100 y los 1.000 metros, con un espesor medio de 600 m. Los valores medios de E en St y Sc son de 150-200 $v. m^{-1}$. En nubes aisladas los valores medios de E pueden ser hasta tres o cuatro veces mayores. En determinadas zonas de las nubes los valores extremos pueden alcanzar hasta 1.500 $v. m^{-1}$. Los valores medios de la densidad de carga eléctrica en las nubes alcanzan algunos centenares de unidades electrostáticas (u. e. s.) por m^3 , o de 20 a 50 u. e. s. unidades de carga por cm^3 .

La figura 3 representa la distribución del gradiente de potencial del campo eléctrico E en función de la altitud y la de las densidades de carga en nimbostratos (Ns) de estructura mixta, observadas en latitudes templadas. Las estructuras eléctricas de los Ns cálidos y de los Ns totalmente bajo $0^\circ C$ son similares a las citadas anteriormente. Para obtener la estructura típica de una nube y al mismo tiempo destacar el efecto de la fusión, calculamos por separado las altitudes relativas por debajo y por encima de la isoterma de $0^\circ C$. El espesor medio de las nubes polarizadas positivamente es de unos 3.500 metros, y de las polarizadas negativamente de unos 3.000 metros. También se observan nubes polarizadas positiva y negativamente, pero el valor de E en Ns es varias veces mayor que en St. Los valores medios

de E en Ns aislados pueden alcanzar hasta algunas decenas de millares de $v. m^{-1}$, y la densidad de carga hasta algunas décimas de una u. e. s. o varias de u. e. s. $v. m^{-3}$. Los valores extremos de E superan varias veces su valor medio, aún cuando para un aumento del espesor de la nube hay una elevación de los valores medios del gradiente de potencial dentro de ella y, en una mayor proporción de los valores extremos (fig. 4).

La estructura eléctrica de los cúmulos congestus ($Cu\ con$), fue establecida mediante el estudio de 140 ejemplares, cuyos espesores variaban entre

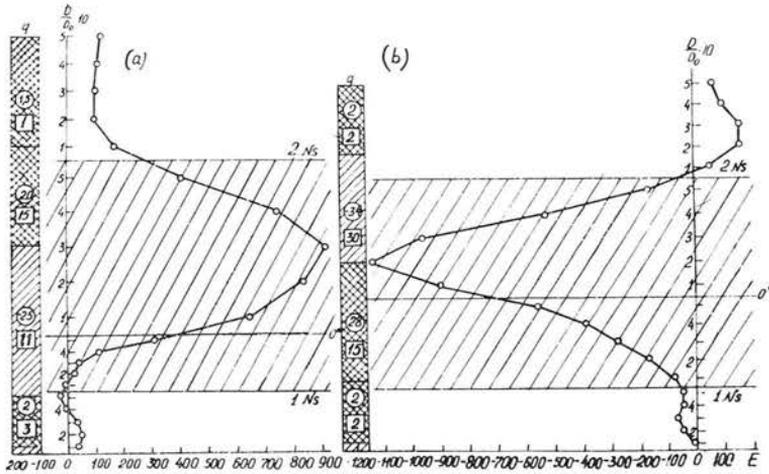


Figura 3.—Perfil del gradiente de potencial E (en $volt\ m^{-1}$) y diagrama de distribución de las cargas en Ns : (a), de nubes polarizadas positivamente (36 casos), (b), polarizadas negativamente (15 casos); 1, límite inferior de la nube; 2, límite superior; 0° es el nivel de la isoterma de $0^\circ C$. Las cifras encerradas en círculos son los valores de la carga eléctrica contenida en una columna aislada de la parte unipolar de la nube, en u. e. t. m^{-2} . Las cifras de los cuadrillos son los valores medios de la densidad de carga en las partes unipolares de la nube en milésimas de u. e. t. m^{-3} .

1.500 y 4.000 metros, en latitudes medias, así como de cúmulos (Cu) en las mismas zonas. La figura 5 representa un modelo esquemático de la estructura eléctrica de una nube negativa. Tanto los $Cu\ con$ como los Cu poseen fundamentalmente dos polos. Por regla general, hay un polo positivo en la parte superior (75 % de los casos), que se extiende a toda esa parte de la nube, mientras que el polo negativo está debajo. La densidad de carga ρ no es grande en esas regiones, quedando en el 50 por 100 de los casos, entre los límites 0,01 y 0,2 u. e. s. m^{-3} , pero se pueden registrar casos en los que sea $\rho > 1$ u. e. s. m^{-3} . El gradiente de potencial del campo eléctrico (E) en las nubes, creado por estas densidades de carga, en el 50 por 100 de los casos no excede de $+ 500\ v. m^{-1}$, pero en algunos casos puede exceder de algunos millares de voltios por metro. En los Cu se registran aproximadamente los mismos valores del campo. A este cuadro de distribución de cargas con densidad baja hay que añadir, como fondo, una distribución al azar de estas cargas positivas y negativas, con mayor densidad. En el 75 por 100 de los casos la densidad de estas cargas excede de 0,2 u. e. s. m^{-3}

y se han observado densidades de hasta 10 a 20 u. e. s. m^{-3} , extendiéndose sobre zonas no mayores de 50 metros. Por término medio las dimensiones de las zonas que contienen densidades extremas oscilan entre unas pocas decenas hasta algunos centenares de metros. El tamaño más corriente es de unos 120 metros. Las grandes cargas van asociadas normalmente a pequeñas zonas. En ellas el gradiente de potencial E excede de 1.000 v. m^{-1} en el 50 por 100 de los casos, de 3.000 v. m^{-1} en el 15 por 100, y de 1.000 v. m^{-1} en el 2 por 100 de los casos. El orden de magnitud de las zonas de desigualdad es comparable con el de la corriente en chorro en las nubes convectivas, determinada a bordo de un avión por medio de acelerómetros y termómetros de poca inercia.

No se ha observado aumento sensible en la densidad de carga dentro de los Cu y Cu con cuando las nubes aumentan de tamaño. Las densidades de

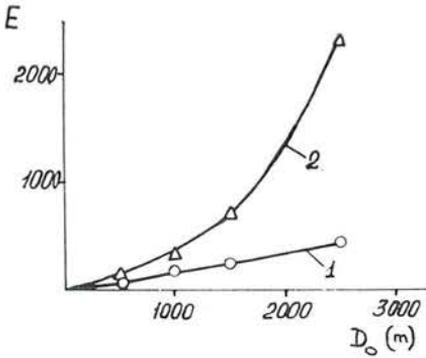


Figura 4.—Variación del valor medio del gradiente de potencial E (en volt m^{-1}) y valor máximo del mismo (E_{max}) en Ns, con el crecimiento del espesor de la nube D_0 (gráficos 1 y 2, respectivamente).

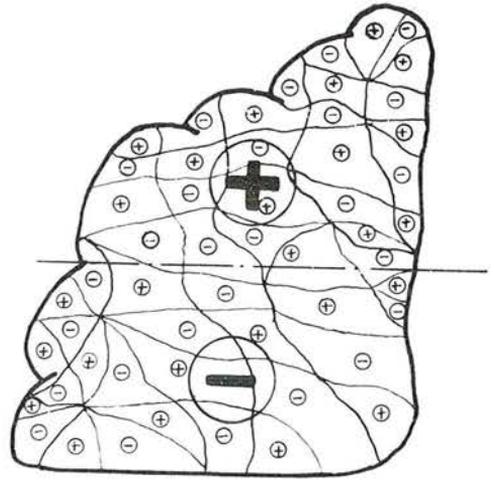


Figura 5.—Estructura eléctrica de los Cu y de los Cu con.

carga indicadas pueden registrarse ya en nubes que tengan 1.000 segundos de existencia. La velocidad de crecimiento de la densidad de carga alcanza de 10^{-5} a 10^{-3} u. e. s. $m^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

Se han efectuado medidas del gradiente de potencial del campo eléctrico en la atmósfera situada encima de más de 100 nubes tormentosas. Durante el proceso de formación fueron medidos simultáneamente tres gradientes de potencial. Por término medio, las cargas polares en una nube tormentosa fueron de ± 23 culombios y el momento eléctrico de la nube de 35 culombios km. Hay que tener en cuenta que la magnitud de estas cargas de nubes aisladas puede diferir de los citados promedios en un orden de magnitud.

Mediante series de vuelos repetidos con regularidad sobre la cima de una misma nube tormentosa, se ha descubierto que su estructura eléctrica

experimenta considerables cambios durante el desarrollo de la nube. Se observaron muchos casos durante las primeras fases del desarrollo, en los que los gradientes de potencial por encima de la nube eran positivos y únicamente al empezar la fase de madurez se producía un cambio, pasando a gradientes negativos, cuando la estructura eléctrica de la nube se ajustaba al esquema descrito generalmente por los autores.

En contraste con la distribución de estas cargas, que constituyen el campo principal de las nubes tormentosas, existen en éstas considerables irregularidades en la densidad de carga. El gradiente medio de potencial dentro de las nubes va de 1 a $2 \cdot 10^5$ v. m⁻¹. Pero para que empiecen las descargas el gradiente tiene que alcanzar valores del orden de 1 a $2 \cdot 10^6$ v. m⁻¹ y, por consiguiente, tales gradientes deben alcanzarse en las irregularidades, aunque sólo por poco tiempo. Pese a las semejanzas externas entre las estructuras eléctricas de Cu y nubes tormentosas conviene puntualizar que las diferencias de magnitud entre sus cargas y sus campos son tan grandes que los primeros no pueden tomarse como modelos de las segundas ni siquiera como una fase preliminar en la acumulación de cargas para los fenómenos tormentosos. Teniendo en cuenta que entre la fase Cu con y la fase Cb sólo transcurren pocos minutos, debe concluirse que sólo los potentes mecanismos de electrificación que aparecen en esta última fase pueden ser responsables de la magnitud de las cargas observadas.

La investigación del movimiento momentáneo del gradiente de potencial en la atmósfera libre inmediatamente después de un relámpago, ha demostrado que la resistencia eléctrica y la conductividad eléctrica turbulenta dentro de la nube son muy elevadas. Para el más probable período de atenuación del campo de $\sim 1-3$ segundos, la conductividad eléctrica total dentro de la nube es unos dos órdenes de magnitud más elevada que en cielo despejado, a la altura aproximada del centro de la nube tormentosa.

Tomando como base las medidas del gradiente de potencial del campo eléctrico, realizadas en la atmósfera situada encima de las nubes tormentosas, se han efectuado cálculos de la intensidad de la corriente eléctrica que circula por encima de dichas nubes, sobre el territorio europeo de la Unión Soviética (8). Por término medio, dicha intensidad vale de 0,1 a 0,2 amp., siendo su valor máximo de 1,5 amp. A partir de los valores numéricos encontrados para las intensidades de corriente y para los tiempos de debilitación del campo, hemos calculado el tiempo necesario para la acumulación de la densidad de carga en las nubes tormentosas. Por término medio resulta del orden de 1 u. e. s. m⁻³ seg⁻¹. En nubes aisladas la velocidad de producción de una carga volumétrica puede alcanzar valores de un orden de magnitud superior a éste.

Se han efectuado medidas individuales de conductividad eléctrica en el interior de nubes de forma estratificada (St), y de desarrollo vertical (Cu), en observatorios de montaña y desde avión (9). En ellas la conductividad eléctrica del aire es varias veces menor que en la atmósfera. Los valores de la conductividad eléctrica polar fueron aproximadamente de la misma magnitud.

Las pérdidas de corriente eléctrica en las nubes pueden tomar la forma de corriente de conductividad o ser producidas por difusión turbulenta. En St y Sc su densidad es del orden de 10^{-12} a 10^{-13} A. m⁻²; en Ns no baja

de 10^{-11} A. m^{-2} ; en nubes convectivas, por ser mayor el coeficiente de intercambio, llega a 10^{-10} A. m^{-2} , y en nubes tormentosas es del orden de 10^{-6} — 10^{-7} A. m^{-2} . Las disipaciones de electricidad debidas a las pérdidas de corrientes son compensadas por la nube funcionando como generador.

La carga eléctrica de las nubes y de los núcleos de precipitación

Las cargas de las partículas nubosas han sido medidas por varios investigadores. En el cuadro I figura un resumen de los resultados obtenidos.

CUADRO I
Carga media sobre la gotita (en valores absolutos)
en cargas elementales

Origen	Tipo de nube	Información sobre las medidas	Radio de las gotitas en micras				
			2	5	8	10	
10	Nieblas		a	20	74	(42)	(46)
			b	18	67	(20)	(20)
			g	28	29	94	(73)
10	Cu y Sc	Falda M. Elbrus	a, d	19	48	—	—
15	— " —	medidas desde avión		28	68	81	104
				25	94	127	88
10	— " —	medidas desde aeróstatos	a	36	96	—	—
11	Sc	medidas desde avión	k	90	100	—	—
12, 13	Nubes cálidas St y Sc	sobre montaña, California	a, n	230	700	—	—
			l				
14	St y Sc cálidos y nubes subfundidas	sobre montaña, Tasmania	b	5	7	9	10
			o	—	200	800	1.200
13	Nubes tormentosas	sobre montaña, California		—	270	320	—

OBSERVACIONES: a-gotitas con cargas medibles; b-todas las gotitas, g-nubes débilmente electrizadas, d-nubes fuertemente electrizadas, k-zonas en las que es igualmente probable la presencia de gotitas de ambas polaridades, l-zonas donde predominan las gotitas cargadas positivamente, n-escaso número de medidas, o-nubes con y sin precipitación.

Está claro, según el cuadro, que los resultados de las medidas efectuadas por distintos métodos sobre formaciones nubosas de diferentes regiones y condiciones difieren ampliamente entre sí, aun para nubes de tipos muy similares. Las razones que haya para ello no han sido todavía investigadas, pero no parece imposible que tales diferencias sean debidas a la desigualdad de condiciones bajo las cuales se hayan formado las nubes y a disparidades en su desarrollo.

Resultados más o menos semejantes fueron obtenidos por A. Kacyka, G. Petrov y Chao-Bo Lin (1961) para nubes, y por L. Mahotkin, V. Soloviev y M. Akimov (1965) para nieblas (10, 15). Es evidente que hay la misma probabilidad, aproximadamente, de encontrar gotitas cargadas positiva y

negativamente. Las cargas medias fueron sensiblemente proporcionales a los radios de las gotas

$$Q = Kr$$

Si r se expresa en micras y Q en unidades de carga elemental, entonces $K = 10$ a 20 .

En cuanto a los resultados obtenidos por las medidas efectuadas sobre partículas de precipitación es imposible llegar a una imagen general de la distribución de cargas entre dichas partículas, dentro y debajo de las nubes. La carga soportada por las partículas negativas de precipitación en Ns vale de 10^{-4} a 10^{-3} u. e. t. En nubes tormentosas las cargas por partícula son grandes y alcanzan algunas centésimas o décimas de una u. e. t., y a veces llegan a valores extremos. Se encuentran extensas zonas en el seno de la nube, donde las cargas de las partículas tienen el mismo signo. En los Ns encontramos que la densidad de corriente de la precipitación llega de 10^{-9} a 10^{-10} A. m^{-2} , y en nubes tormentosas hasta 10^{-7} A. km^{-2} . Sin embargo, no se produce un transporte sustancial de cargas. Junto al suelo las partículas cargadas positiva y negativamente aparecen mezcladas. En las latitudes templadas la densidad de la corriente de precipitación procedente de Ns vale de 5.10^{-12} a 5.10^{-11} A. m^{-2} . En la mayor parte de las tormentas el flujo de la corriente de precipitación se acerca a 10^{-9} A. m^{-2} , aunque en tormentas aisladas se llega a 10^{-8} A. m^{-2} y aún más.

Resultados de las medidas

A continuación damos algunos de los resultados de las medidas. Para nubes no tormentosas ha quedado establecido que su polarización, en muchos casos, no está decidida por la dirección del campo atmosférico, pero la diferencia de potencial entre la cima de la nube y el suelo es mucho más elevada que la diferencia media de potencial entre el suelo y las capas superiores de la atmósfera. Esto significa que muchas nubes no actúan como simples resistencias pasivas, sino como generadores de cargas eléctricas. Ocupando, como ocupan, grandes espacios, pueden contribuir a la creación del campo eléctrico en tiempo bueno. Una amplia cooperación internacional en las tareas desarrolladas dentro del programa del decenio de electricidad atmosférica nos podrá dar las respuestas que esperamos sobre las características de la generación de la electricidad en las nubes de todos los tipos y bajo las más variadas condiciones físicas y geográficas. Las medidas de potencial en el campo eléctrico y de conductividad eléctrica del aire dentro y alrededor de las nubes tormentosas serían extremadamente útiles.

Las medidas de las cargas de las partículas individuales de nubes de varios tipos (Cuadro 1), demuestran la necesidad de continuar con esas medidas y con la investigación sobre el mecanismo que produce su electrificación. Las teorías actuales que invocan la captura de iones como causa de la electrificación no resultan totalmente adecuadas para explicar la distribución y la magnitud de las cargas observadas, ni aún en los casos más sencillos de los St y Ns y de las nieblas. Las dimensiones de las cargas de las partículas son de casi un orden de magnitud mayores que las previstas por la teoría de Fuchs de las cargas estáticas. Tampoco parece bien fundado el intento de explicar la acumulación de grandes cargas sobre las partículas de

coagulación, pues teniendo en cuenta la intensidad de la ionización natural existente (10^{10} pares de iones por cm^3 por seg.), se necesitarían de cinco a diez horas para que las partículas llegasen a adquirir las cargas observadas. La cosa es aún menos clara cuando se consideran nubes que dan precipitación y nubes de tormenta.

La investigación sobre la electricidad en nubes tormentosas ha revelado correlaciones entre procesos eléctricos y no eléctricos en ella. Por ejemplo, el enlace descubierto recientemente entre la polaridad de una nube tormentosa y su fase de desarrollo, mencionado más arriba, y puesto en evidencia mediante un parámetro no eléctrico, tal como la velocidad de crecimiento de la cima de la nube (16); esto se demuestra, por ejemplo, por los resultados obtenidos por Vornegut (17), quien observó la relación existente entre las magnitudes del gradiente de potencial por encima de nubes tormentosas y su desarrollo convectivo. Lo mismo indica la brusca variación de la magnitud del gradiente de potencial del campo eléctrico por encima de nubes tormentosas subfundidas y de Cu, después de sembradas con bióxido de carbono. La siembra produce la congelación de las nubes y, en algunos casos, su conversión de Cu con en Cb (18, 19).

El esclarecimiento de las relaciones existentes entre los procesos eléctricos y los no eléctricos en las nubes, es de gran importancia. Una característica tal como el gradiente de potencial del campo eléctrico alrededor de una nube es un indicador de los procesos desarrollados en los cambios en la microestructura de la nube, que acompañan a la siembra. Si pudiésemos determinar cuáles son las condiciones necesarias para la acumulación de cargas eléctricas en el seno de la nube, se podría alcanzar una mejora sustancial en la previsión de tormentas. Se sabe que la turbulencia juega un papel general en las nubes tormentosas (5), asociada a las corrientes ascendentes que, junto con la elevada humedad del aire arrastrado, constituyen las causas primordiales de la formación de las nubes tormentosas y de chubascos. Por otra parte la turbulencia puede también destruir la estructura eléctrica regular de la nube. Esta puede ser precisamente la explicación de la relación no lineal existente entre el grado de inestabilidad y la probabilidad de tormentas, así como la aparición de tormentas vespertinas y nocturnas en la zona ecuatorial y en otros lugares bajo condiciones de relativa calma (no tormentosas). La teoría cuantitativa de este efecto y de otros enlazados de un modo u otro con la acumulación de cargas eléctricas en las nubes, no ha sido desarrollada todavía.

Desafortunadamente ni siquiera tenemos una imagen cualitativa sistemática de las conexiones que deben existir entre los fenómenos no eléctricos y los eléctricos en las nubes tormentosas y de chubascos, y mucho menos de sus aspectos cuantitativos.

Para los meteorólogos es de la mayor importancia saber cómo están enlazados los fenómenos eléctricos y los no eléctricos. No cabe duda de que existen correlaciones entre ellos, sobre todo en las nubes tormentosas, pero el problema práctico fundamental consiste en saber si los procesos eléctricos tienen alguna influencia sobre los no eléctricos y cómo esta influencia puede perfilar la imagen física del desarrollo de la nube.

Los datos experimentales obtenidos sobre las características eléctricas de la nubes sólo permiten trazar un amplio esquema de los caminos a seguir

para acercarse a la solución del problema. Por de pronto se puede admitir que los campos eléctricos y las cargas pueden afectar a la velocidad de colisión y fusión de dos partículas nubosas y a los procesos de formación y de combinación de los cristales de hielo. Los campos eléctricos y las cargas pueden influir sobre las colisiones entre partículas de 10 a 15 micras de tamaño con tal de que la tensión en el campo sea de algunas decenas de millares de v.m.⁻¹ y las cargas sobre las partículas sean del orden de los millares de u. e. t. La combinación de la coalescencia turbulenta y de la eléctrica puede conducir a una considerable reducción de estos valores. La acción de las fuerzas eléctricas sobre la coalescencia de las partículas de diámetro inferior a 10 micras empieza a notarse cuando las cargas medias que sopotran son comparables con las que fueron medidas por A. Kacyka (10).

De acuerdo con los hechos aducidos podemos considerar en qué generos de nubes las condiciones favorecen la influencia de las fuerzas eléctricas. Las tensiones de los campos eléctricos observadas en St y Sc son claramente inadecuadas para producir la coalescencia de las partículas. Aparentemente, los campos eléctricos naturales y las cargas de las partículas carecen de efecto sobre el desarrollo de estos tipos de nubes, excepto durante la fase inicial del crecimiento de las gotas, pero hoy por hoy es imposible decir hasta qué punto esta influencia se deja sentir sobre la formación del espectro de tamaños en las nubes naturales y en las nieblas.

El potencial del campo eléctrico en las distintas zonas de las nubes de tipo Ns puede alcanzar algunos centenares de v.cm⁻¹. Es muy probable que en tales casos los valores medios absolutos de las cargas sobre las partículas individuales pueden exceder de los valores medios de tales cargas en otras partes de las mismas nubes. Una cosa análoga ocurre en los Cu con.

Por consiguiente, en determinadas zonas de Ns y Cu con, pueden desarrollarse condiciones favorables para la coalescencia de las partículas y esto puede ser decisivo para el futuro desarrollo de la nube, aunque la extensión sea pequeña. Permítasenos recordar que en la siembra de nubes el reactivo cae únicamente dentro de una parte reducida de todo el volumen de la nube. Estas observaciones que hacemos están basadas en los resultados de la investigación de electricidad en las nubes efectuada en las latitudes templadas. Como ya se indicó en (6) las nubes se hacen más y más activas eléctricamente a medida que nos vamos aproximando al ecuador. Por consiguiente el efecto de las fuerzas eléctricas sobre su desarrollo también irá aumentando.

Es evidente la necesidad de más amplia investigación sobre las pequeñas irregularidades de las cargas volumétricas y la medida de las cargas sobre las partículas aisladas dentro de dichas irregularidades, así como un estudio del papel desempeñado por estas pequeñas zonas que producen coalescencia en el desarrollo de la nube como un todo, para poder enfocar el problema de las posibles influencias de las fuerzas eléctricas sobre los procesos no eléctricos que se producen en las nubes. No debe olvidarse que el estudio de las razones que motivan la aparición de estas irregularidades eléctricas, aún cuando ellas no influyesen en el desarrollo de la nube, es importante para el conocimiento de los procesos de electrificación de las nubes.

En las nubes tormentosas los campos eléctricos son tan intensos que pueden afectar tanto a la coalescencia de las gotas como a la formación de cristales de hielo en ciertas zonas. Sin embargo, no disponemos de información

sobre el grado de esta influencia o sobre su significación en el desarrollo de la nube en conjunto.

No hay nada claro respecto a las velocidades de coalescencia de las gotas. El influjo de las fuerzas eléctricas sobre la coalescencia de las gotas por choque fue señalado desde tiempo atrás, así como el hecho de que no todos los choques sobre una superficie plana conducen a la coalescencia. Posteriormente tales conclusiones fueron confirmadas por otros experimentos, pero, por desgracia, todos estos experimentos se desarrollaron en condiciones muy alejadas de las que concurren en la naturaleza. Al mismo tiempo hay que decir que si de hecho no todas las colisiones conducen a la coalescencia de las gotas, por lo menos existe una posibilidad de electrificación de las partículas por contacto, como se sugirió en (20). A primera vista parece que este es el único mecanismo capaz de explicar la intensa electrificación de las nubes cálidas, frecuentemente observada. Las tareas más importantes son ahora el estudio de la significación del factor de coalescencia de las gotas, en condiciones lo más próximas posibles a las condiciones naturales y un estudio del volumen de las cargas entre las gotas en el momento de su colisión cuando no se produce coalescencia.

Para terminar, advertiremos que en el presente artículo, sólo hemos intentado señalar los hechos principales y de interés para quienes se dediquen a estudiar los problemas de las relaciones existentes entre las características eléctricas y no eléctricas de las nubes y hemos prestado atención principalmente a la estructura eléctrica de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

1. DOLEZALEK, H. (1966): *Discusión sobre el programa decenal de electricidad atmosférica*. Informe Técnico n.º D. 2, Contract Nonr N00014-66-C0303.
2. GASINA, S. B., IMYANITOV, I. M., y otros (1965): *Svjaz' radiolokacionnyh harakteristik oblakov ih turbulentnym i elektriceskim sostojaniem* (Relación entre las propiedades radáricas de las nubes, el grado de turbulencia y el estado eléctrico). GGO, Leningrado, Trudy 173.
3. WILSON, C. T. R. (1929): *Some thundercloud problems* (Algunos problemas sobre las nubes tormentosas). J. of the Franklin Inst., 208, 1, 1.
4. FRENKEL, JA. I. (1949): *Teorija javlenij atmosfernogo elektricestva* (Teoría sobre la formación de la electricidad atmosférica). Gostehizdat, Leningrado-Moscú.
5. IMYANITOV, I. M., EVTEEV, B. F. y KAMALDINA, I. I. (1968): *Grozovoe oblako* (La nube tormentosa). Informe de la cuarta conferencia sobre Electricidad en la atmósfera y en el espacio, Tokio.
6. IMYANITOV, I. M., CHUBARINA, E. V. (1965): *Elektricestvo svobodnoj atmosfery* (Electricidad de la atmósfera libre). Gidrometeoizdat, Leningrado.
7. IMYANITOV I M (1961): *En la colección Issledovanija oblakov, osadkov i grozovogo elektricestva* (Investigaciones sobre nubes, precipitación y electricidad de las tormentas). Acad. Sci. URSS, Moscú, pág. 25.
8. IMYANITOV, I. M., SCHWARZ, JA. M. y otros (1967): *Elektriceskie toki nad grozovymi oblakami* (Corrientes eléctricas sobre nubes tormentosas). GGO, Leningrado, Trudy 204, 3-17.
9. ZACEK, S. I. (1965): *Pribor dlja izmerenija elektroprovodnosti vozduha v svobodnoj atmosfere* (Aparato para la medida de la conductividad eléctrica del aire en la atmósfera libre). Met. i gidro., Leningrado. N.º 9, 51.
10. KACYKA, A. P. y otros (1961): *Elektriceskie zarjady kapel oblakov i tumanov* (Cargas eléctricas de las gotitas de agua en las nubes y en la niebla). Proc. Acad. Sci. URSS, Geophys. Ser. N.º 1.
11. KRASNOGORSKAJA, N. V. (1968): *Elektricestvo teplyh oblakov* (Electricidad de las nubes cálidas). Trans. Acad. Sci. URSS, 181, N.º 5.

12. ALLEE, P. A. y PHILLIPS, B. B. (1959): *Measurement of cloud-droplet charge, electric field and polar conductivities in supercooled clouds* (Medida de la carga de las gotitas de agua de las nubes, del campo eléctrico y de las conductividades polares en nubes subfundidas). *J. Met.*, 16, N.º 4, 405.
13. PHILLIPS, B. B. y KINZER, A. D. (1958): *Measurement of the size and electrification of cloud droplets in cumuliform clouds* (Medida del tamaño y de la electrificación de las gotitas de agua en nubes cumuliformes). *J. Met.*, 15, N.º 4, 369.
14. TWOMEY, S. (1956): *Electrification of individual cloud drops* (Electrificación de gotas en nubes aisladas). *Tellus*, 8, n.º 4, 445.
15. AKIMOV, M. N. (1965): *Spektr elektriceskuj zarjadov kapel oblakov* (Espectro de la carga eléctrica de las gotitas de agua de las nubes). GGO, Leningrado, Trudy 177.
16. KAMALDINA, I. I. (1968): *Ob uzmenii elektriceskoj struktury kucevodozdevykh oblakov i processe in razvitija* (Cambios en la estructura eléctrica de cumulonimbos desarrollados). GGO, Leningrado, Trudy 225.
17. VONNEGUT, B. y otros (1966): *Electrical potential gradients above thunderstorms* (Gradientes de potencial eléctrico encima de nubes tormentosas). *J. Atm. Sci.*, 23, n.º 6, 764.
18. IMYANITOV, I. M., KULIK, M. M. y CUVAEV, A. P. (1957): *Predvaritel'nye dannye ob opytah po regulirovanija razvitija i izmenenija elektriceskogo sostojanija oblakov mosčnoj konvekcii v iznyh rajonah evropejskoj territorii sojuza SSR i v Zakavkaz'e* (Datos preliminares sobre experimentos dirigidos a regular el desarrollo y los cambios de las condiciones eléctricas en nubes fuertemente convectivas en las regiones meridionales de la URSS europea y de la Transcaucasia). GGO, Leningrado, Trudy 67, 33-58.
19. MACCREADY, P. B. y otros (1959): (Meteorol. Res. Inc., Pasadena, Calif., 41 páginas); citado en U. S. Govt. Res. and Developm. Repts. 41, n.º 23, 19, 1967.
20. IMYANITOV, I. M. (1968): *K voprosu ob elektrizacii oblacnyh castic posle razyva kontakta mezdu nimi* (Sobre la electrificación de las gotitas de agua de las nubes después de haber roto el contacto entre ellas). Informe de la cuarta conferencia sobre Electricidad en la atmósfera y en el espacio. Tokio.

METEOROLOGIA DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA

Las aplicaciones de la meteorología al problema cada vez más grave de la contaminación del aire, exigen diversos métodos que dependen de las dimensiones de la dispersión considerada. Por un lado debemos considerar la posibilidad de que la proporción de productos químicos en la atmósfera, sobre extensiones muy grandes y aún sobre todo el globo, puede ir aumentando gradualmente, debido a la producción de impurezas producidas por la actividad industrial, cada día mayor; éste es un problema de contaminación débil pero muy extensa, la cual puede producir, con el transcurso del tiempo, cambios considerables de la química de la atmósfera, a escala regional o aún mundial, con posibles consecuencias peligrosas para el ser humano: por ejemplo, grandes cantidades de sulfatos dispersados en el aire pueden ser arrastrados hacia el suelo por las lluvias, aumentando así la acidez de los terrenos y de las aguas subterráneas; y un aumento a escala mundial de la concentración de anhídrido carbónico significaría un cambio considerable de las propiedades de radiación de la atmósfera, lo que podría producir una variación de los climas de la Tierra. Por esto, es importante que los meteorólogos vigilen la contaminación débil y extensa de la atmósfera comprobando las variaciones químicas de ésta y relacionando la difusión de los agentes contaminantes con la circulación general de la atmósfera. Por otro lado, puede plantearse el problema de estudiar los dañosos efectos para