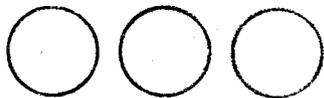


MES
ISMM - MOA

APUNTES DE METODOS GEOQUIMICOS

AUTOR: RODRIGUEZ A.



TEMA 1 INTRODUCCIÓN

Dentro del conjunto de métodos que se utilizan para la búsqueda de los yacimientos minerales, los geoquímicos ocupan un lugar cimerio por los problemas y tareas que resuelven durante los diferentes estadios de los trabajos de búsqueda. Estos métodos surgieron tomando como base a la geoquímica, la cual se puede definir como "la ciencia que estudia los elementos químicos, es decir, los átomos en la naturaleza; ella estudia la distribución de los elementos químicos en el espacio, sus formas de existencia, sus relaciones genéticas con nuestro planeta, su historia y entre otras cosas más, la migración de los elementos químicos en el espacio y en el tiempo".

Dentro de los diferentes aspectos de los elementos químicos que interesan a la geoquímica el más importante, desde el punto de vista de los métodos geoquímico de búsqueda, es el relacionado con la migración, que no es más, que el desplazamiento de los elementos químicos en el espacio. La migración de los elementos se puede verificar en dos sentidos diametralmente opuestos; hacia la dispersión o hacia la concentración.

En la naturaleza ocurren toda una serie de procesos que conducen a la concentración de los elementos químicos y que pueden dar lugar, si así lo permiten las condiciones favorables a la formación de los yacimientos minerales, pero al mismo tiempo se producen toda una serie de otros procesos que conducen a la dispersión de los elementos químicos con la consiguiente destrucción de los sectores anómalos, incluyendo los yacimientos.

De los procesos que conducen a la migración de los elementos químicos, en la corteza terrestre y en su superficie, predominan los que favorecen la dispersión y por lo tanto, predomina la migración en el sentido de la dis-

persión, lo cual se explica por el amplio predominio del estado disperso de los elementos químicos sobre el concentrado.

En la corteza terrestre el estado concentrado está representado por sectores relativamente pequeños que constituyen anomalías - yacimientos, aureolas, etc. - dentro de un fondo general disperso de los elementos químicos.

El estudio de los diferentes procesos geoquímicos que conducen tanto a la concentración como a la dispersión de los elementos químicos reviste una gran importancia para la búsqueda de los yacimientos minerales; los primeros proporcionan la información necesaria para comprender los problemas acerca de las condiciones de formación y las regularidades que rigen la distribución de los yacimientos minerales en el espacio, mientras que en los segundos descansan los fundamentos teóricos de diversos métodos de búsqueda, incluyendo los geoquímicos.

Fundamentos de los métodos geoquímicos

Como se señaló con anterioridad, existen toda una serie de procesos que favorecen la migración de los elementos químicos en el sentido de la dispersión, desde los sectores de la corteza terrestre con elevadas concentraciones de elementos químicos hacia los de bajas concentraciones, tendiendo a equilibrar los contenidos de los diferentes elementos en dicha corteza. Cuando estos procesos actúan sobre los afloramientos de los cuerpos minerales o sobre los cuerpos que no afloran directamente pero que yacen muy próximos a la superficie, se produce paulatinamente la dispersión de los elementos químicos, lo que da lugar a la aparición de aureolas secundarias y flujos de dispersión, los cuales constituyen el fundamento de numerosos métodos de búsqueda, fundamentalmente geoquímicos.

Las aureolas secundarias de dispersión guardan una estrecha relación espacial con los objetos de los cuales se derivan, encontrándose directamente sobre estos o muy poco desplazadas. Los flujos de dispersión, sin embargo, no guardan una relación espacial muy estrecha con los objetos de los cuales se derivan, desarrollándose según las direcciones del escurrimiento superficial o subterráneo.

La dispersión de los elementos químicos contenidos en los cuerpos minerales se puede producir en las formas más diversas, dentro de las cuales podemos destacar las siguientes:

- Fragmentos de menas y minerales
- Partículas arcillosas y coloidales
- Moléculas e iones

Las formas de migración de los elementos guardan estrecha relación con las formas de su movimiento durante los procesos de migración. Estas formas de movimiento pueden ser la física, la mecánica, la química y la biogénica.

Por otro lado la dispersión de los elementos contenidos en los cuerpos minerales puede ocurrir en cualquier medio (fase) y mediante los más variados mecanismos; la dispersión puede ocurrir en el medio sólido, en el líquido, en el gaseoso o en el biogénico, es decir, en todas las geosferas y mediante mecanismos tales como: el desplazamiento de los flujos de agua durante el escurrimiento superficial y subterráneo, la absorción biogénica durante el proceso vital de las plantas, etc.

De lo dicho con anterioridad se desprende que debido a la acción de los procesos de dispersión sobre los cuerpos minerales se pueden producir aureolas y flujos de dispersión dentro de cualesquiera de los medios mencionados. De acuerdo al medio en que se desarrollan, las aureolas y los flujos de dispersión reciben nombres muy específicos; así tenemos los litogeoquímicos (litósfera), atmogeoquímicos (atmósfera), hidroggeoquímicos (hidrosfera) y biogeo-

químicos (biósfera), que se corresponden con los medios sólido, gaseoso, líquido y biogénico respectivamente.

Las aureolas y flujos de dispersión litogeoquímicos en la actualidad son los más importantes para la búsqueda; en ellos los elementos químicos se pueden encontrar en forma de fragmentos de menas y minerales o en forma de precipitados salinos. Estas aureolas y flujos de dispersión constituyen el fundamento de varios métodos de búsqueda dentro de los cuales se destacan los siguientes:

Método clásico fluvial. Este método se basa en el estudio de los flujos y aureolas de dispersión visibles, donde los elementos químicos se encuentran en forma de grandes fragmentos de menas.

Método de jagua. Este se fundamenta en el estudio de los flujos y aureolas de dispersión donde los elementos químicos se encuentran en forma de pequeños fragmentos de minerales pesados, muy resistentes desde el punto de vista mecánico y muy estables en las condiciones hipergénicas.

Métodos litogeoquímicos. Estos se fundamentan en el estudio de las aureolas y flujos de dispersión no visibles donde los elementos químicos se encuentran en pequeñas concentraciones en forma de pequeños fragmentos de minerales, en forma de precipitaciones salinas o en otras formas de existencia, pero en la fase sólida.

En las aureolas y flujos de dispersión hidroggeoquímicos los elementos químicos se pueden encontrar en forma de sales disueltas o en forma coloidal, es decir, migrando en forma de soluciones verdaderas y coloidales. Estas aureolas y flujos constituyen el fundamento de los métodos hidroggeoquímicos.

Las aureolas que se desarrollan en las plantas y en los productos de su descomposición, debido a la migración biogénica de los elementos, constituyen el fundamento de

los métodos biogeoquímicos.

Por último, las aureolas que se desarrollan dentro de los límites de la atmósfera, tanto superficial como subterránea, constituyen la base de los métodos atmogeoquímicos.

Hasta aquí resulta evidente la gran importancia que reviste el estudio de los procesos que conducen a la dispersión de los elementos químicos en las condiciones superficiales para comprender los fundamentos teóricos de toda una serie de métodos geoquímicos para la búsqueda de los yacimientos minerales; sin embargo, es bueno aclarar que no solamente como resultado de la dispersión hipergénica se crean excelentes indicadores de la existencia de la mineralización como son: las aureolas secundarias y los flujos de dispersión, ya que también durante la propia formación de los cuerpos minerales surgen excelentes índices de la presencia de la mineralización, como son las aureolas primarias.

Como resultado de los propios procesos de mineralogénesis que dan lugar a la formación de los cuerpos minerales, las rocas encajantes de éstos se enriquecen en toda una serie de elementos meníferos y acompañantes. Estos sectores circunmeníferos enriquecidos en determinados elementos químicos se denominan aureolas primarias.

Debido a que los cuerpos minerales se forman bajo la acción de procesos que conllevan a la concentración de los elementos químicos, resulta muy difícil considerar las aureolas primarias como aureolas de dispersión, sin embargo, el hecho de que las aureolas primarias de los diferentes elementos ocupen un volumen que supera en muchas veces al de los cuerpos minerales a los cuales se asocian y la disminución paulatina de las concentraciones a medida que aumenta la distancia con respecto a las vías de circulación de las soluciones mineralizantes, para el caso espe-

cífico de los yacimientos hidrotermales, hacen pensar en la idea de que estas aureolas se forman debido a cierta tendencia: a la dispersión de los elementos durante el desarrollo de los diferentes procesos que conducen a la formación de los cuerpos minerales.

Independientemente de que las aureolas primarias se consideran como de dispersión o de concentración, el sólo hecho de que éstas sean consideradas como acumulaciones circunmeníferas, subraya aun más el valor de este tipo de anomalía para la búsqueda. Estas aureolas constituyen el fundamento de determinados métodos geoquímicos para la búsqueda.

Los métodos geoquímicos resuelven todas sus tareas y problemas mediante la revelación y estudio de las aureolas y flujos de dispersión, los cuales constituyen el objeto de estudio de dichos métodos. De acuerdo a su objeto de estudio los métodos geoquímicos se clasifican en:

Litogeoquímicos. Estos métodos se fundamentan en la revelación y estudio de las aureolas que se desarrollan en el medio sólido, es decir, en las aureolas y flujos de dispersión litogeoquímicos y en las aureolas primarias.

Hidroggeoquímicos. Estos métodos se fundamentan en las aureolas y flujos de dispersión hidroggeoquímicos.

Atmogeoquímicos. Estos métodos se fundamentan en el estudio de las aureolas atmogeoquímicas.

Biogeoquímicos. Estos métodos se fundamentan en la revelación y estudio de las aureolas biogeoquímicas.

Origen y desarrollo de los métodos geoquímicos.

Los métodos geoquímicos aparecieron por primera vez en la URSS, relacionados con los problemas de la industrialización de dicho país. Los problemas de la industrialización de la URSS exigieron un desarrollo muy amplio de los trabajos de búsqueda y exploración con la finalidad de asegurar las reservas de las más diversas materias primas

minerales para satisfacer las demandas del gigantesco desarrollo industrial experimentado durante los primeros planes quinquenales. Como consecuencia de esto surgió el problema del perfeccionamiento radical de los métodos de búsqueda y exploración de los yacimientos minerales. Esos años se caracterizaron por el acentuado desarrollo y los éxitos en la aplicación de los métodos geofísicos.

Conjuntamente con el descubrimiento de yacimientos industriales mediante el empleo de métodos geofísicos eran revelados una cantidad significativa de anomalías no productivas, es decir, que no guardaban relación con la mineralización. La necesidad de dar una interpretación correcta a estas anomalías condujo a la introducción de métodos que permitieran comprobar la composición sustancial de los cuerpos que producen dichas anomalías.

En el año 1932, N.I. Safronov propuso utilizar métodos físico-químicos para determinar la presencia o ausencia de huellas de metales en las rocas de las áreas de desarrollo de anomalías eléctricas, detectadas como resultado de los trabajos geofísicos para la búsqueda de yacimientos polimetálicos en la región de Altai.

Al mismo tiempo, V.A. Sokolov propuso efectuar la investigación del aire contenido en el suelo con la finalidad de detectar la presencia de hidrocarburos y de esta forma ayudar a los métodos geofísicos para la búsqueda de yacimientos petrolíferos.

En el período de 1932-1935 los nuevos métodos físico-químicos de búsqueda de yacimientos polimetálicos, propuestos por N.I. Safronov, tuvieron un acentuado desarrollo. Sobre la base de trabajos experimentales en una serie de yacimientos, se demostró la posibilidad práctica de su descubrimiento mediante las aureolas de dispersión desarelladas en sus superficies.

A comienzo del año 1936, N.I. Safronov en su trabajo

"Acerca de los problemas de las aureolas de dispersión de los yacimientos minerales y su utilización en la búsqueda" por primera vez dio una interpretación general del concepto sobre campo de dispersión, llevó a cabo una síntesis sobre la aplicación de los métodos geoquímicos y señaló las perspectivas de su desarrollo.

En el año 1940, el académico A.E. Fersman terminó la monografía "Métodos geoquímicos y mineralógicos para la búsqueda de los yacimientos minerales". En esta obra escribió: "Es necesario de manera radical variar la metodología de los trabajos de búsqueda por cuanto sin la introducción de las nuevas ideas geoquímicas, no habremos de dar respuesta lo suficientemente rápida a las crecientes demandas de la economía socialista". De manera particular debe subrayarse la idea por A.E. Fersman en el sentido de que: "El problema de la búsqueda geoquímica de los yacimientos minerales es por su esencia, un problema geoquímico".

En el año 1941 fue publicado el libro de E.A. Sergeev "Métodos físico-químicos para la búsqueda de los yacimientos minerales", en el cual fue sintetizada la experiencia práctica en la aplicación de los métodos geoquímicos mediante las aureolas de dispersión hasta el año 1938 inclusive, así como el subsiguiente desarrollo de los problemas teóricos y metodológicos de los nuevos métodos.

En 1950, A.P. Solovov elaboró la primera instrucción para los levantamientos metalométricos, en la cual se reglamentan la metodología y la técnica de realización de estos trabajos, en 1957 esta instrucción fue corregida y editada de nuevo. Como fundamento para la confección de estas instrucciones se tomó la gran experiencia práctica en la realización de los levantamientos litogeoquímicos. Un gran aporte al desarrollo de los métodos geoquímicos para la búsqueda lo es el libro de A.P. Solovov "Fundamentos teóricos y prácticos de los levantamientos metalomé-

tricos", publicado en 1959 en la URSS.

Hasta 1955 en la URSS los métodos geoquímicos eran realizados sólo por organismos geofísicos, pero a mediados de 1955 fue dictada una resolución especial por el Ministerio de Geología, estableciendo la aplicación obligatoria de la metalometría para todas las dependencias geológicas durante la realización de los trabajos geológicos en cualquier escala. En estos tiempos, paulatinamente, se inician en la elaboración de los fundamentos teóricos y técnicos de los métodos geoquímicos, un amplio círculo de trabajadores científicos, geólogos y geoquímicos, dentro de los cuales se destacan: A.P. Venogradov, I.I. Ginzburg, V.I. Krasnikov, A.A. Saukov, A.I. Perelman y otros.

A finales de los años cincuenta surge una nueva dirección en el desarrollo de los métodos geoquímicos: la búsqueda de la mineralización oculta, mediante el empleo de las aureolas primarias y las aureolas secundarias enterradas.

También a finales de los años cincuenta comenzó el estudio de los problemas relacionados con la especialización geoquímica y metalogénica de los complejos intrusivos, estrechamente relacionados con las investigaciones sobre las regularidades en la distribución de los yacimientos endógenos.

Durante el transcurso de las dos últimas décadas los métodos geoquímicos experimentaron un impetuoso desarrollo, gracias al perfeccionamiento de los métodos de análisis y de la técnica de cálculo electrónico. Durante el transcurso de estas décadas se obtuvieron grandes logros en el estudio de las principales características de las aureolas, como es el caso de la zonalidad de las aureolas primarias, de gran importancia para la búsqueda, así como en la elaboración de los datos geoquímicos.

En los últimos años se han perfeccionado nuevas meto-

dologías de elaboración de los datos geoquímicos, gracias a la computación, las cuales permiten obtener índices más confiables para evaluar las anomalías geoquímicas.

En la actualidad se continúan desarrollando los fundamentos teóricos de los métodos geoquímicos y surgen nuevos métodos cada vez más efectivos sobre la base del desarrollo científico-técnico. En los momentos actuales se le presta un gran interés a la aplicación y desarrollo de los métodos geoquímicos para la búsqueda; en la URSS, Bulgaria, Checoslovaquia, RDA, Rumanía, así como en los países capitalistas desarrollados tales como: USA, Canadá, Suecia, Francia, etc.

En Cuba, la historia de los métodos geoquímico se limita al período revolucionario, y en la actualidad la aplicación de los mismos alcanza cierto desarrollo, aunque insuficiente todavía, debido a la baja preparación científica y técnica del personal que lleva a cabo esta actividad y a la ausencia de una base analítica sólida. Actualmente, con la ayuda de especialistas del campo socialista, se dan los primeros pasos para elevar los métodos geoquímicos al lugar que les corresponde.

Problemas que se resuelven mediante la aplicación de los métodos geoquímicos

La búsqueda de los yacimientos minerales mediante la aplicación de los métodos geoquímicos, conforme a su escala o grado de detalle, puede estar orientada hacia la resolución de los siguientes problemas:

1. Revelación de nuevas regiones y campos meníferos.
2. Revelación de nuevos yacimientos dentro de los límites de las regiones y campos meníferos conocidos.
3. Revelación de cuerpos meníferos de yacencia profunda dentro de los límites de los yacimientos en explotación o explotados.

Todos estos problemas se resuelven mediante la revelación y estudio de las aureolas geoquímicas. La importancia de las aureolas como índices para la búsqueda está dada por los siguientes aspectos:

- a) las aureolas geoquímicas son considerablemente más extensas que los afloramientos de los cuerpos minerales y por tal razón se descubren con mayor facilidad;
- b) la cantidad de aureolas geoquímicas supera en decenas de veces la cantidad de afloramientos y manifestaciones minerales por lo que permite revelar con mayor claridad y seguridad nuevos campos y regiones meníferas;
- c) en la composición de las aureolas se refleja la composición de los cuerpos minerales de los yacimientos buscados;
- d) la distribución zonal de los elementos químicos en las aureolas y específicamente los índices de la zonalidad permiten apreciar correctamente el valor prospectivo de las mismas y orientar adecuadamente los trabajos de búsqueda.

Objetivo fundamental de los métodos geoquímicos.

En la actualidad, en las regiones desarrolladas de nuestro planeta, prácticamente no existen yacimientos minerales que ofrezcan índices visibles sobre su presencia en la superficie (afloramientos de menas, aureolas de dispersión visibles, etc). Debido a la enorme demanda de materia prima mineral durante el presente siglo, las reservas concentradas en estos yacimientos se han agotado o están a punto de agotarse en las viejas y bien estudiadas regiones minero-industriales; por otro lado, el incremento de las reservas de materia prima mineral en estas regiones básicas, desde el punto de vista económico, es de

vital importancia. La única fuente para incrementar las reservas en estas regiones son los yacimientos difíciles de revelar, por no presentar índices visibles en la superficie, mediante el empleo de los antiguos métodos visuales de búsqueda.

La búsqueda de la mineralización oculta requiere del empleo de métodos modernos, capaces de revelar la misma mediante sus índices indirectos. Dentro de estos métodos, los geoquímicos desempeñan un papel fundamental y por tal razón, el objetivo fundamental de los métodos geoquímicos es la revelación de la mineralización oculta.

Tipos de yacimientos en los que resulta útil la aplicación de los métodos geoquímicos para su búsqueda.

Conforme con V.I. Krasnikov (1957), se pueden distinguir cuatro grupos de yacimientos de mineralización oculta, para los cuales resulta útil la búsqueda mediante la aplicación de métodos geoquímicos; estos son los siguientes:

1. Yacimientos que afloran a la superficie en zonas desfavorables para su localización. Dentro de este grupo se incluyen yacimientos de diferentes tipos genéticos, incluso aquellos representados por menas estables en las condiciones superficiales, pero que por encontrarse en zonas con determinadas características desfavorables para la búsqueda, no se pueden localizar mediante los métodos visuales. Dentro de los factores que impiden la revelación de los índices visibles podemos mencionar la vegetación exuberante, suelos potentes, nieves perpetuas, etc.
2. Yacimientos de menas fácilmente oxidables. Estos yacimientos presentan índices visibles (afloramientos y aureolas de dispersión visibles) en los sectores recién erosionados del relieve. En otros sectores estos yacimientos solamente pueden formar aureolas de dispersión

no visibles, las cuales solamente se pueden revelar mediante el empleo de métodos geoquímicos.

3. Yacimientos que no forman índices visibles aun en sectores recién erosionados. Son yacimientos de nuevos tipos genéticos que por no presentar índices visibles en las condiciones superficiales eran pasados por alto durante la aplicación de los métodos visuales de búsqueda. En los momentos actuales estos yacimientos son revelados a partir de sus aureolas no visibles, gracias a la aplicación de los métodos geoquímicos. Como ejemplo de tales yacimientos pueden servir los de menas de estaño, representados por casiterita finamente diseminada dentro de dolomitas (Jabarovsk, URSS). Durante los procesos de dispersión la casiterita resultaba tan finamente triturada que no podía ser detectada mediante el método de jagua.
4. Yacimientos que no afloran a la superficie. Los yacimientos que forman parte de este grupo no presentan índices visibles en la superficie y en algunos casos no presentan ni siquiera índices directos no visibles (aureolas geoquímicas). Dentro de este grupo se distinguen los siguientes (fig. 1)
 - a) yacimientos ciegos. Son aquellos en los cuales el nivel de erosión ha podido afectar solamente sus aureolas primarias. En estos yacimientos las aureolas primarias afloran directamente a la superficie, constituyendo el principal índice para la búsqueda;
 - b) yacimientos ciegos-cubiertos. Son yacimientos ciegos que se encuentran cubiertos por formaciones autóctonas (eluviales y deluviales); como indicadores de los mismos se pueden utilizar las aureolas secundarias de dispersión formadas a partir de las primarias;

- c) yacimientos ciegos-enterrados. Son yacimientos ciegos enterrados por formaciones alóctonas (aluviales, eólicas, glaciales, etc); como índices para la búsqueda de los mismos pueden servir determinados tipos de aureolas secundarias;
- d) yacimientos cubiertos. Son aquellos en los cuales el corte de erosión ha llegado hasta el nivel de las menas, pero que se encuentran cubiertos por formaciones eluviales y deluviales. Como índices para la búsqueda se pueden utilizar las aureolas secundarias de dispersión;
- e) yacimientos enterrados. Son semejantes a los del subgrupo anteriormente descrito, pero enterrados por formaciones mullidas alóctonas. Sus índices para la búsqueda pueden ser determinados tipos de aureolas secundarias;
- f) yacimientos de yacencia profunda. Son aquellos que yacen a profundidades considerables de la superficie y que por tal razón no ofrecen índices visibles en la misma; estos yacimientos yacen tan profundamente que ni siquiera sus aureolas primarias han sido cortadas por el nivel de erosión, o por el contrario, han sido cortados por una antigua superficie de erosión y posteriormente cubiertos por potentes espesores de formaciones sedimentarias jóvenes. Como estos yacimientos no presentan índices directos en la superficie actual, la búsqueda de los mismos sólo es factible llevarla a cabo en las áreas sumamente perspectivas o dentro de los límites de los campos meníferos y yacimientos conocidos, mediante la combinación de los métodos geológicos, geoquímicos, geofísicos y técnicos (fig. 1).

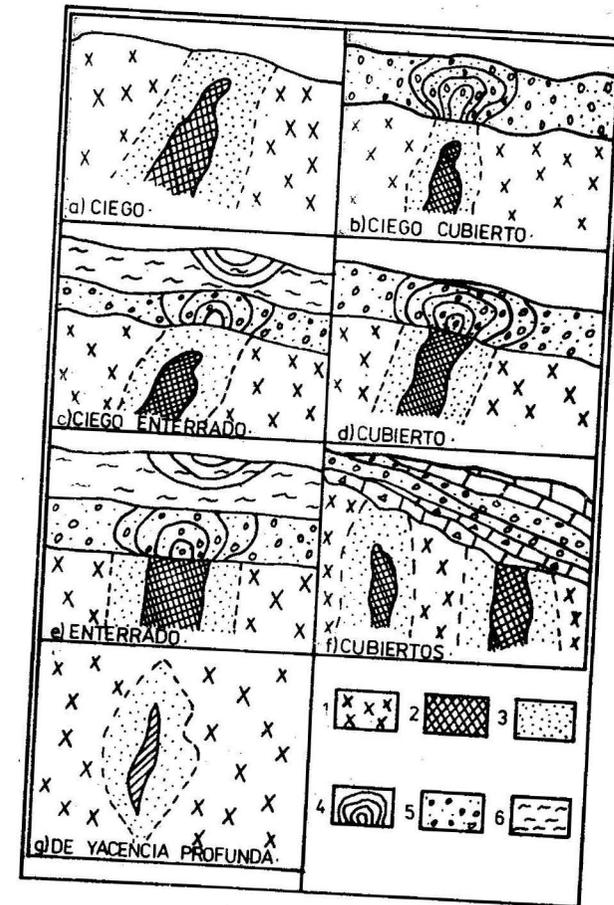


Fig. 1 Esquemas de yacimientos ocultos (perfiles) y sus posibles índices litogeoquímicos:
 1. rocas encajantes; 2. cuerpos meníferos;
 3. aureola primaria; 4. aureola secundaria;
 5. eluvio; 6. aluvio

Las reservas de materia prima mineral concentradas en los yacimientos que no afloran a la superficie son muy grandes. Los cálculos preliminares hechos por N.I. Safro-nov (1962), demuestran que las reservas de estos yaci-mientos en el territorio de la URSS, tomando en cuenta una profundidad de 1 000 m , supera por lo menos en 6 ve-ces las reservas de los yacimientos que afloran a la su-perficie.

Si tenemos en cuenta que el yacimiento de oro y plata de Minas Geraes, en Brasil, así como el yacimiento de oro y uranio de Wetvathersrand, en África del Sur, se explo-tan a profundidades cercanas a los 3 km , y que muchas minas han alcanzado profundidades de unos cuantos cientos de metros, es completamente lógico pensar en la posibil-i-dad de revelar muchos yacimientos minerales que yacen profundamente dentro de las estructuras y horizontes ma-níferos; por tal razón, a medida que se agotan las reser-vas de los yacimientos fáciles de descubrir, se hace nece-sario perfeccionar los métodos para la búsqueda de los di-fíciles de descubrir, en especial los geoquímicos.

El problema fundamental de los métodos geoquímicos.

Algunos conceptos básicos

Todos los problemas y tareas de los métodos geoquími-cos se resuelven mediante el estudio de la relación entre el estado disperso y el concentrado; por lo tanto, el es-tudio de la relación entre el estado disperso y el con-centrado constituye el problema fundamental de los métodos geoquímicos.

El problema fundamental de los métodos geoquímicos, así como todos los demás problemas y tareas relacionadas con esta disciplina, se resuelven mediante la revelación y estudio de las anomalías geoquímicas, dentro del fondo general disperso, para lo cual es necesario tener dominio

de algunos conceptos básicos, tales como; anomalías geo-química, fondo geoquímico y umbral de contenidos anómalos.

Anomalías geoquímicas. Son sectores de la corteza te-rrestre u otro sistema geoquímico donde, debido a determi-nados procesos ha ocurrido la concentración de uno o va-rios elementos químicos, en contraste con la generalidad del sistema, donde predomina el estado disperso.

Las anomalías geoquímicas, como regla general, repre-sentan el estado concentrado, es decir, las aureolas geo-químicas, los yacimientos minerales, los sectores de mi-neralización dispersa, etc.

Fondo geoquímico. Es el contenido medio de un elemento químico en un sistema geoquímico determinado, fuera de la influencia de las anomalías geoquímicas. A escala planeta-ria el fondo geoquímico se corresponde con el clarke.

Para los efectos de la búsqueda geoquímica de los ya-cimientos minerales se utiliza el concepto de fondo geo-químico local que se define como el contenido medio de un elemento químico en un sistema geoquímico determinado, fuera de la influencia de los yacimientos minerales, aureolas geoquímicas u otras anomalías, dentro de los lí-mites de una región dada.

Umbral de contenidos anómalos. Es el límite entre los valores anómalos y los de fondo o normales. Este paráme-tro representa el límite exterior de las anomalías y es puramente convencional ya que hasta el momento resulta imposible establecer el límite exacto entre los sectores anómalos y los normales.

En la (fig. 2) están representados estos conceptos de forma gráfica.

TEMA 2: AUREOLAS PRIMARIAS

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA FORMACIÓN DE LAS AUREOLAS PRIMARIAS.

Como resultado de la diferenciación de las masas magmáticas y de los procesos post-magmáticos, ocurre la especialización espacial y la acumulación de muchos elementos químicos en forma de yacimientos endógenos de diferentes tipos genéticos. En las rocas encajantes de estos yacimientos también se originan acumulaciones anómalas de toda una serie de elementos químicos meníferos y acompañantes, cuyos contenidos disminuyen paulatinamente a medida que aumenta la distancia con respecto a los límites de los cuerpos meníferos. Estas acumulaciones reciben el nombre de aureolas primarias. (fig. 3).

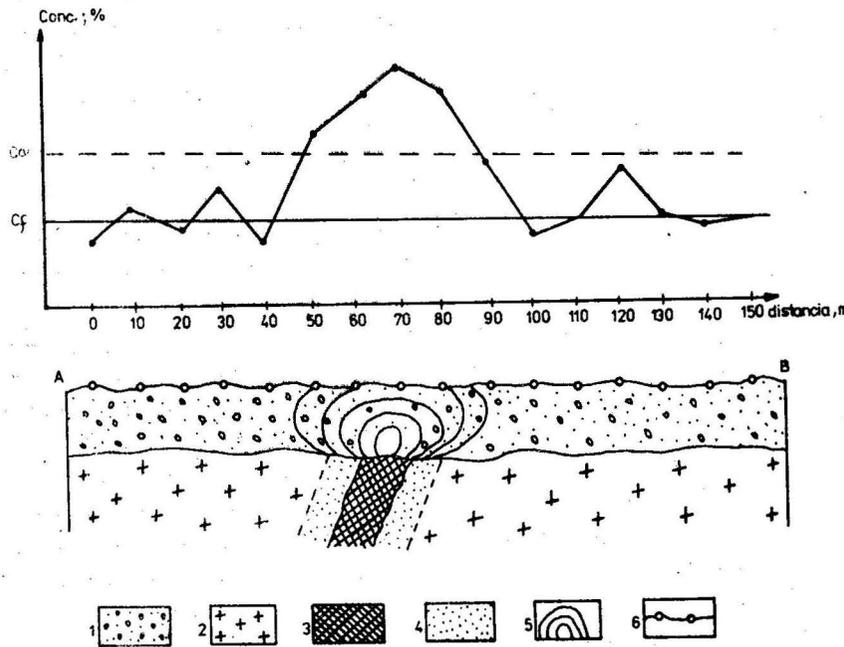


Fig. 2 Anomalia geoquímica de Cu revelada por el muestreo metalométrico según la línea A-B
 1. eluvio; 2. rocas encajantes de menas;
 3. cuerpo menífero; 4. aureola primaria;
 5. aureola secundaria; 6. puntos de muestreo;
 Cf) contenido de fondo,
 Ca) umbral de contenidos anómalos

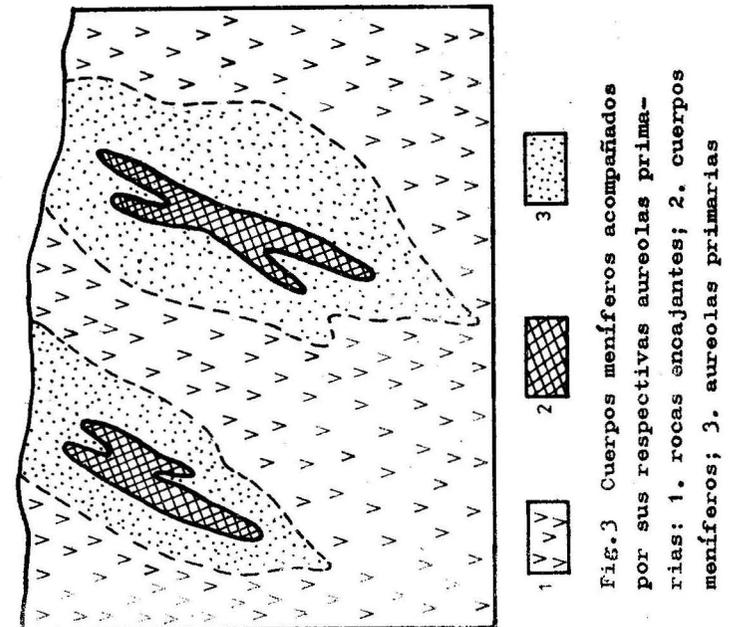


Fig. 3 Cuerpos meníferos acompañados por sus respectivas aureolas primarias; 1. rocas encajantes; 2. cuerpos meníferos; 3. aureolas primarias

Las aureolas primarias se forman como resultado de los mismos procesos de mineralogénesis que dan lugar a los cuerpos meníferos de los yacimientos endógenos; por tal razón, las aureolas primarias y los cuerpos meníferos a los cuales se asocian representan un todo único, no solo en el espacio, sino también genéticamente. Según la opinión de L.M. Obchinikov y S.V. Gregarión, la concepción de que las aureolas endógenas se formaron como resultado de la extracción de los metales de los cuerpos meníferos, después de la formación de éstos no puede considerarse correcta, ya que es evidente que durante la formación de los cuerpos meníferos ocurrió al mismo tiempo el acarreo de metales hacia el espacio ocupado por las aureolas, debido a un mecanismo centrífugo. Al estudiar la composición y estructura de estas aureolas se puede comprobar que toda una serie de elementos químicos alcanzan dentro de ellas concentraciones mucho más elevadas que en los cuerpos meníferos, lo que demuestra que ellos no pudieron ser extraídos de los cuerpos meníferos y posteriormente redepositados en las rocas encajantes; aunque es bueno aclarar que la formación de los yacimientos minerales endógenos es un fenómeno que ocurre en varias etapas y que los elementos depositados durante una etapa pueden ser disueltos nuevamente y redistribuidos por las soluciones de etapas posteriores. De esta forma los elementos de las etapas meníferas pueden ser removilizados por las soluciones postmeníferas y redistribuidos posteriormente dentro de los límites de las rocas encajantes, dando lugar a aureolas de dispersión.

El hecho de que las aureolas geoquímicas primarias estén relacionadas genética y espacialmente con los cuerpos minerales endógenos y que, además, superan en muchas veces a dichos cuerpos les da un enorme valor como índices directos para la búsqueda, facilitando notablemente el des-

cubrimiento de los yacimientos minerales.

De acuerdo a la relación genética con las rocas encajantes las aureolas primarias pueden ser singenéticas y epigenéticas.

Las aureolas singenéticas son características de los yacimientos magmáticos de menas de cobre-níquel, de platino-cromo, de apatito, de titanio-magnetita, etc. Estas aureolas se forman conjuntamente con las rocas encajantes.

Las aureolas epigenéticas se forman después que las rocas encajantes y son características para los yacimientos postmagmáticos.

Las aureolas primarias se pueden originar debido a diversos mecanismos, al igual que los cuerpos minerales a los cuales se asocian; sobre la base de sus mecanismos de formación ellas se pueden clasificar en:

- Gravitacionales
- De difusión
- De infiltración
- De infiltración-difusión
- De emanación o gaseosas

Las aureolas gravitacionales están relacionadas con los yacimientos de licuación y de segregación y al igual que estos se originan a partir de un mecanismo de sedimentación gravitacional de las partículas meníferas; al ocurrir el proceso de diferenciación, por licuación o por segregación, que da lugar a la concentración de los componentes meníferos en cuerpos minerales, una parte de las partículas meníferas de pequeño tamaño no tiene tiempo de sedimentar, quedando atrapadas al cristalizar el fundido magmático de composición silicatada. De esta forma, por encima de los cuerpos minerales, en las rocas encajantes, se crea una especie de "nube" en cuya composición entran también partículas meníferas submoleculares que no pudieron sedimentar debido al movimiento browniano.

Ante una diferencia de densidad suficientemente notable entre las partículas meníferas que sedimentan, las aureolas gravitacionales adquieren una marcada estructura zonal en la distribución de los elementos-químicos, ya que las partículas con menor densidad forman aureolas más extensas. De esta forma, debido a que la densidad de la calcopirita, que forma las aureolas de cobre, es menor que la de la pentlandita, que contiene níquel, las aureolas de cobre sobre los cuerpos de menas piríticas de cobre-níquel de la península de Kola tienen mayores dimensiones (según D.V. Polferov).

Las aureolas gravitacionales son asimétricas, alcanzando un amplio desarrollo en el bloque colgante de los cuerpos meníferos, mientras que en el yacente su desarrollo es insignificante. Estas aureolas por su relación con las rocas encajantes son singenéticas (fig. 4)

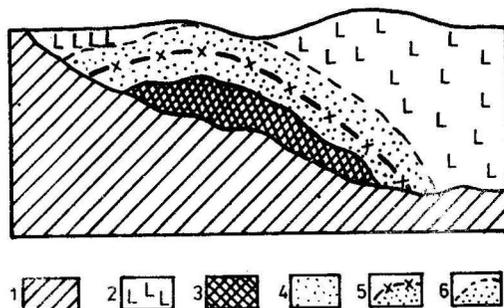


Fig. 4 Aureola gravitacional de un yacimiento de licuación cobre-níquel: 1. esquistos; 2. gabro; 3. menas de cobre-níquel; 4. aureola primaria; 5. límite exterior de las concentraciones anómalas de Ni; 6. límite exterior de las concentraciones anómalas de Cu

Las aureolas de difusión, infiltración e infiltración-difusión son características de los yacimientos post-magmáticos, que se originan con la participación de soluciones hidrotermales y preunamatólíticas.

Según D.S. Karzhenski (1953), la migración de los elementos químicos en las rocas, en las condiciones en que se producen los procesos endógenos, puede ocurrir debido al desplazamiento de soluciones acuosas y fluidos gaseosos. Pueden migrar dentro de las soluciones acuosas, en forma de aniones halogenados complejos, elementos tales como: Sn, Ag, Fe y Be; en forma de cationes oxigenados complejos: U, T, y otros elementos de alta valencia; en forma de aniones con el oxígeno: Mo, W, Nb, Re, Be, B y otros elementos de alta valencia pero con pequeño radio catiónico; en forma de sulfocaniones: Sb, Mo, Sn, Au, Hg y otros elementos calcófilos; en forma de aniones de las combinaciones heterogénicas complejas del tipo del ácido fosfórico-wolfrámico y otros.

En la fase gaseosa pueden migrar el Hg, B, As y S, en forma molecular; el B, Ta, Nb, W, Mo, Hg, Re, Fe, Zr, P y Sb, en forma de combinaciones moleculares con los halógenos; el Be y Sn, en forma de aniones complejos con los halógenos.

Los yacimientos hidrotermales se forman como resultado del flujo constante de soluciones, enriquecidas en componentes mineralizantes, a través de un volumen dado de rocas, observándose una disminución regular de la concentración de los elementos meníferos desde el canal por donde circulan las soluciones hidrotermales hacia las rocas laterales, lo cual se refleja en la disminución del contenido de dichos elementos, dentro de las rocas encajantes, a medida que aumenta la distancia con respecto a los límites de los cuerpos minerales. Esa misma disminución de los contenidos de los elementos meníferos se observa

según la dirección del flujo de las soluciones formadoras de menas luego de pasar éstas por las cámaras de sedimentación de las rocas.

Son posibles dos mecanismos de migración de los elementos químicos contenidos en las soluciones hidrotermales a través de un volumen de roca dado:

- a) por difusión de los elementos desde la fase líquida, representada por las soluciones hidrotermales, hacia la fase sólida, representada por las rocas encajantes;
- b) por infiltración de los elementos conjuntamente con las soluciones hidrotermales, a través de los poros y grietas de las rocas.

Ambos mecanismos actúan conjuntamente en la naturaleza y solo es posible hablar del predominio de uno sobre el otro durante el proceso de formación de las aureolas de los yacimientos postmagmáticos; de acuerdo al predominio de uno u otro, las aureolas pueden ser de difusión o de infiltración.

El factor fundamental que determina la formación de las aureolas de difusión es la diferencia de concentraciones de los elementos químicos en las soluciones y sus vapores con respecto a las rocas encajantes. La difusión consiste en el intercambio de masa sin ningún movimiento de flujo, en este caso, las moléculas altamente concentradas en las soluciones hidrotermales migran hacia las rocas encajantes sin flujo alguno de soluciones hacia el interior de las rocas. Según la ley de Fick, la masa del componente que pasa por difusión a través de una sección determinada es proporcional al gradiente de concentración de este componente en el sentido del desplazamiento.

Durante el proceso de difusión, la disminución de la concentración a partir del cuerpo menífero o más concretamente del canal por el cual circulan las soluciones

hacia las rocas encajantes, ocurre según la ley logarítmica, por tal razón, las aureolas de difusión se caracterizan por sus pequeñas dimensiones.

Los factores fundamentales que influyen en la formación de las aureolas de infiltración son los siguientes:

- El gradiente de presión. Este determina el sentido y la velocidad del flujo, así como el volumen de soluciones que se infiltran.

- La permeabilidad de las rocas. Esta se determina por la porosidad intercomunicada más el agrietamiento y facilita la penetración de los fluidos a través de las rocas.

La forma de las aureolas depende en gran medida del grado de variabilidad y permeabilidad de las rocas encajantes alrededor de los cuerpos minerales; si la permeabilidad es poco variable, las aureolas presentarán formas regulares, pero si sucede lo contrario sus formas serán muy irregulares. Esto último ocurre cuando los procesos de mineralogénesis se desarrollan en sectores muy afectados por disoluciones premeníferas.

Las dimensiones de las aureolas de infiltración frecuentemente son grandes, debido a la penetración de las soluciones por zonas de grietas a grandes distancias (fig. 5)

La infiltración tiene lugar por medio de la libre circulación de las soluciones por las grietas abiertas, conjuntamente con la penetración a través de los finísimos poros y grietas de las rocas (infiltración propiamente dicha).

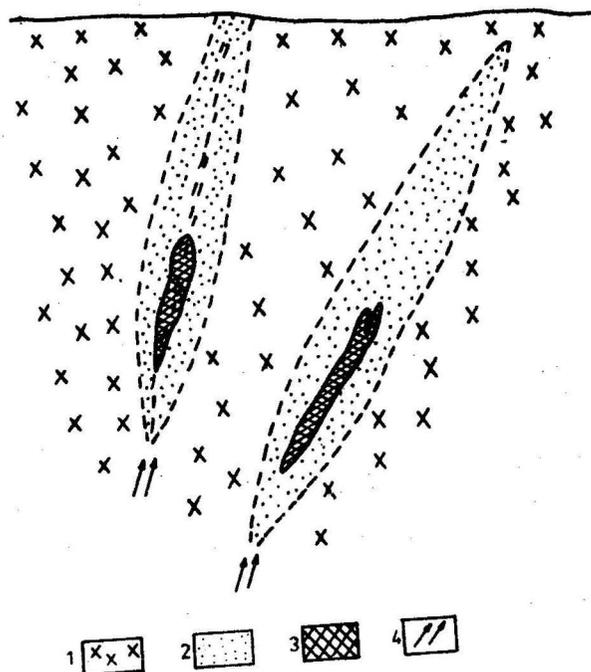


Fig. 5 Aureolas de infiltración: 1. rocas encajantes; 2. cuerpos meníferos; 3. aureolas primarias; 4. dirección de infiltración de las soluciones mineralizantes

Nota: Obsérvese el gran desarrollo de estas aureolas según la dirección de infiltración de las soluciones.

Las soluciones al penetrar a través de rocas con una porosidad muy fina, con microfisuras y poros menores de

5×10^{-8} cm, tiene lugar el efecto de filtración que consiste en la retención y rezago de la sustancia disuelta (soluto), mientras que el disolvente continúa migrando. El efecto de filtración es diferente para los distintos elementos, lo que conduce al desplazamiento diferenciado de los componentes disueltos y a su distribución zonal dentro de los límites de las aureolas; experimentalmente se ha establecido que la magnitud del efecto de filtración aumenta con el crecimiento del radio iónico y de la diferencia de presión, disminuyendo con el aumento de las dimensiones de los poros, de la temperatura de la solución y del coeficiente de difusión del ión (L.A. Obchinikov, 1956).

La magnitud del efecto de filtración se determina por la cantidad relativa de sustancia retenida, pudiendo alcanzar hasta más del 50%. La distribución de los elementos en las aureolas de infiltración es bastante irregular, sobre todo en el sentido perpendicular al movimiento de las soluciones. Las concentraciones mayores se observan cerca de las grietas por donde circulan las soluciones y en el material de las mismas (fig. 6).

En la práctica es siempre muy importante determinar el papel relativo de los mecanismos de difusión e infiltración en la formación de las aureolas; antes que nada hay que tener presente que la infiltración se desarrolla en el sentido del movimiento de las soluciones meníferas, mientras que el movimiento de los metales por difusión prevalece en el sentido transversal. Como regla general la infiltración prevalece sobre la difusión.

Cuando las soluciones mineralizantes circulan por zonas de alta porosidad y pequeñas grietas, el componente de la difusión alcanza dimensiones significativas.

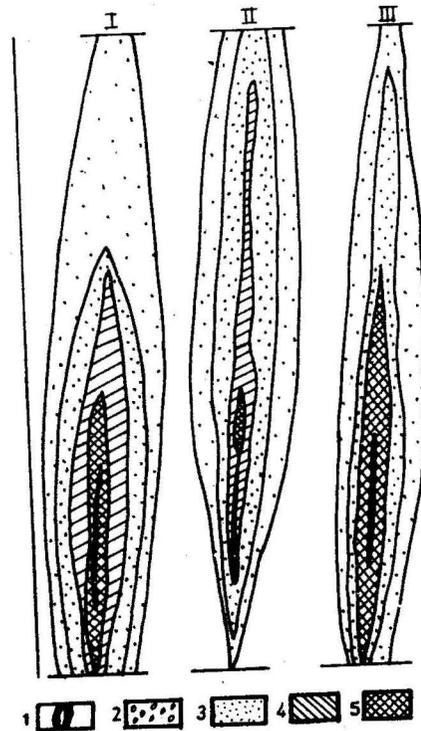


Fig. 6 Datos generalizados sobre la distribución de U, Pb y Mo en la aureola de infiltración de un yacimiento hidrotermal de uranio (según A.D. Kablumov, 1960):

1. cuerpo menífero 2 3 4 5 concentraciones de los elementos en la aureola en fondos geoquímicos (Cf): en ppm ; I (Uranio): 2. 1,5; 3) 1,5-5; 4) 5-20; 5) 20-50; 6) 50
 II (Plomo): 2. -2; 3) 2-5; 4) 5-20; 5) 20-50; 6) 50
 III (Molibdeno) 2. 5; 3) 5-20; 4) 20-50; 5) 50 ; Cf (Uranio) = $1,8 \times 10^{-5} \%$
 Cf (Plomo) = 0,06 % ; Cf (Molibdeno) = $5 \cdot 10^{-4} \%$
 p.p.m - parte por millón
 28

Teniendo en cuenta la tendencia ampliamente observada del mercurio, el bismuto, el azufre, el arsénico y el antimonio, de concentrarse en grandes cantidades en la parte superior de los yacimientos estudiados, así como la alta volatilidad de estos elementos, existen argumentos para suponer que estos elementos migran en la fase gaseosa. Esto da base para distinguir a las aureolas de emanación o gaseosas (fig. 7) .

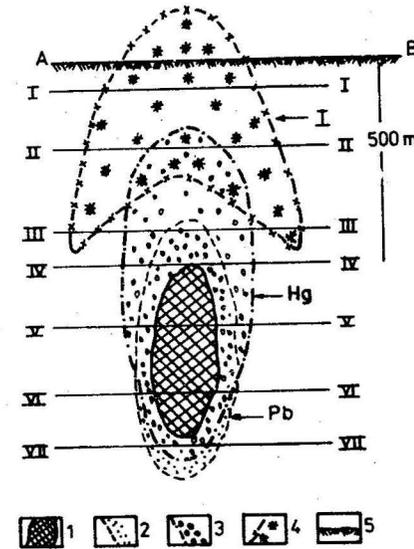


Fig. 7 Aureolas primarias de emanación (gaseosas) de iodo y mercurio desarrolladas sobre un cuerpo menífero hidrotermal (esquema): 1. cuerpo menífero; 2. aureola de Pb; 3. aureola de Hg; 4. aureola de I; 5. niveles de muestreo

La amplia propagación de la zona de piritización de las rocas sobre los cuerpos meníferos en los efusivos ácidos permite suponer que el azufre se desplazó en la fase gaseosa; de la misma forma se puede explicar las acumulaciones de mercurio sobre los yacimientos polimetálicos.

Las aureolas de emanación o gaseosas se desarrollan, formando especies de gorros, sobre los cuerpos meníferos, a distancias considerables de los mismos; el carácter supramenífero de estas aureolas les da una gran importancia para la búsqueda de los cuerpos minerales ciegos que yacen a profundidades considerables. En la actualidad se desarrollan métodos de búsqueda que se fundamentan en estas aureolas, sobre todo en las de mercurio y yodo; siendo los resultados muy alagüeños.

Más adelante veremos que en la naturaleza también se pueden distinguir aureolas de emanación o gaseosas secundarias, las cuales son muy importantes para la búsqueda de la mineralización oculta.

Influencia de los factores geoquímicos de la migración en los parámetros de las aureolas primarias

El papel de los factores geoquímicos en la formación de las aureolas primarias es muy variado; aquí es necesario tener en cuenta tanto los factores de la migración (presión, temperatura, contenido de elementos meníferos en las soluciones, etc). Como los internos (radio iónico de los elementos, volatilidad, peso específico, solubilidad y coeficiente de difusión de los compuestos, etc).

1. Contenido de metal en las soluciones meníferas. De acuerdo con las particularidades de la difusión de los elementos químicos y teniendo en cuenta que la migración de los mismos, predominantemente, está orientada en el sentido de igualar los contenidos en el espacio, es lógico esperar que cerca de los canales por los cuales se infiltran las soluciones más ricas, las aureo-

las se propagaron a grandes distancias. Como consecuencia de esto, podemos deducir que alrededor de los cuerpos con menas más ricas van a observarse aureolas de dispersión mucho más amplias que alrededor de los de menas pobres.

La dependencia entre las dimensiones de las aureolas y la concentración de los respectivos elementos en el cuerpo menífero es cómodo expresarlas en forma de clakes de concentración, es decir, la relación entre los contenidos de los elementos en las aureolas y la magnitud de los fondos geoquímicos para cada uno de ellos. Esto es corroborado por las investigaciones de E.M. Yanichesvki (1963) para toda una serie de yacimientos de plomo-zinc, obteniendo los siguientes coeficientes de concentración: plomo, de 400-600 ppm; zinc, de 150 a 300 ppm; plata de 40 a 70 ppm y cobre de 10 a 15 ppm, lo cual concuerda con la serie de elementos, colocados según el orden de disminución de las dimensiones de sus aureolas: Pb, Zn, Ag y Cu.

La dependencia de las dimensiones de las aureolas primarias y el contenido de elementos en las mismas de su concentración en los cuerpos meníferos es pequeña e inclusive nula para los elementos que migran en la fase gaseosa (arsénico, antimonio, mercurio y otros).

Los parámetros de las aureolas de dispersión dependen no solamente de la concentración de los elementos en las soluciones, sino también de la cantidad total de soluciones hidrotermales, que participa en el proceso de mineralogénesis, y que penetra en el lugar de deposición de la mineralización.

2. Influencia de la temperatura. Con el incremento de la temperatura aumentan los coeficientes de difusión de los iones, aumenta la solubilidad de muchos compuestos, disminuye la viscosidad de las soluciones acuosas, lo que aumenta su capacidad para infiltrarse a través de los sistemas de finísimos poros y grietas de las rocas, etc.

Con el aumento de la temperatura el coeficiente dinámico de viscosidad del agua disminuye notablemente; este coeficiente (en centipois) a 50 °C es igual a 0,55 a 100 °C es de 0,282 y a 150 °C es de 0,184. Por esto se comprende, por qué en condiciones de altas temperaturas las soluciones acuosas son capaces de infiltrarse por zonas de porosidad fina y grietas muy pequeñas, mientras que a bajas temperaturas el movimiento de las soluciones se produce fundamentalmente por grietas muy abiertas.

Con el incremento de la temperatura crece la velocidad de difusión de los componentes en las soluciones; según datos de R.M. Garrels (1949), al aumentar la temperatura de 25 a 100 °C, los coeficientes de difusión de los iones K^+ , Ag^+ , Ba^{2+} y otros aumentan de 2 a 3 veces.

Por último, con el aumento de la temperatura crece la presión parcial de saturación de las diferentes combinaciones químicas, y en correspondencia con esto aumenta la importancia del papel que juegan los componentes volátiles en la migración de los elementos químicos y en la formación de aureolas de emanación de Hg, As, Sb, S y otros elementos, que yacen en forma de sambuyos sobre los cuerpos meníferos.

3. Influencia de la presión. El papel de la presión como factor externo de la migración es extraordinario ya en 1953 A.G. Betejtin señaló que: "el movimiento de las soluciones hidrotermales a lo largo de las grietas abiertas o de las zonas debilitadas puede tener lugar en aquellos casos en que por una u otra causa se crea una diferencia de presión". Cuando las soluciones se mueven de las zonas de altas presiones hacia las que tienen presiones más débiles, mientras mayor es la diferencia de presión, tanto mayor será la velocidad del movimiento de las soluciones.

En las condiciones de formación de los yacimientos

hidrotermales tiene lugar, fundamentalmente, un movimiento de traslación ascendente de las soluciones desde las zonas profundas a las cercanas a la superficie, aunque es posible también la formación de yacimientos debido a la migración horizontal de las soluciones.

Por otra parte, la presión ejerce una gran influencia en la solubilidad de las combinaciones fácilmente volátiles. Con la disminución de la presión externa la solubilidad de los compuestos volátiles en las soluciones acuosas disminuye, lo que facilita el paso de éstos a la fase gaseosa. De esto se desprende que con la disminución de la profundidad aumenta el papel de los componentes volátiles en el movimiento de traslación de los elementos químicos; esto es corroborado por el hecho de que en las zonas volcánicas actuales se produce con mucha intensidad la separación del CO_2 y el H_2S de las soluciones.

Durante la formación de los yacimientos hidrotermales a pequeñas profundidades, una acentuada disminución de la presión exterior debido a la presencia de dislocaciones tectónicas disyuntivas, puede conducir a la separación y expulsión de los componentes volátiles de los cuerpos meníferos.

De todo lo dicho con anterioridad se desprende que la presión desempeña un papel muy importante en los parámetros de las aureolas de aquellos elementos que migran en la fase gaseosa, en forma molecular o en forma de combinaciones fácilmente volátiles. Estas aureolas se desarrollan hacia la zona supramenífera de los cuerpos minerales y alcanzan sus mayores dimensiones en los yacimientos que se forman en condiciones de bajas presiones externas.

4. Influencia de la acidez-basicidad (P_h) de las soluciones y el carácter oxidante-reductor (E_h) del medio. Estos factores externos de la migración, que están condicionados por la presencia de determinadas sustancias, in-

fluyen notablemente en los parámetros de las aureolas, tanto en sus dimensiones como en la concentración de diferentes elementos; estos factores determinan la velocidad de las reacciones de neutralización y de oxidación-reducción (redox), lo que condiciona la magnitud del desplazamiento en solución de determinados compuestos. Si estas reacciones se verifican enérgicamente, el desplazamiento de los elementos será pequeño y las aureolas serán muy ricas pero poco extensas. Si ocurre lo contrario, los elementos se desplazarán a una mayor distancia y las aureolas serán más pobres pero más extensas.

Hasta aquí se ha podido apreciar la gran importancia del papel jugado por los factores externos de la migración en los parámetros de las aureolas primarias; pero esta importancia está dada por la influencia que ejercen los factores externos sobre los internos. Por tal razón, al estudiar la migración de los elementos químicos, en general, y su influencia en los parámetros, en particular, hay que tener en cuenta la estrecha interacción existente entre los factores internos y externos.

Dentro de los factores internos que ejercen mayor influencia sobre los parámetros de las aureolas primarias tenemos los siguientes: los coeficientes de difusión de los iones, las dimensiones de los radios iónicos, la volatilidad y la solubilidad de los compuestos químicos, los cuales en conjunto determinan la movilidad geoquímica de los diferentes elementos.

- Los coeficientes de difusión de los diferentes iones, para una temperatura constante, también son diferentes y la movilidad geoquímica es directamente proporcional a la magnitud de estos coeficientes.
- Las dimensiones de los radios iónicos condicionan la movilidad geoquímica de estos durante la formación de las aureolas de dispersión; las aureolas de

difusión de los iones de mayor radio son menos extensas que los de los iones de menor radio y a modo de ejemplo pueden servir las aureolas de plomo, que son menos extensas que las de cobre y zinc. Las magnitudes de los radios iónicos para estos elementos son los siguientes: $r_i (\text{Pb}^{2+}) = 2,58 \text{ \AA}$; $r_i (\text{Zn}^{2+}) = 0,83 \text{ \AA}$; $r_i (\text{Cu}^{2+}) = 0,80 \text{ \AA}$.

Las dimensiones de los iones hidratados influyen en la magnitud del efecto de filtración; a mayor radio mayor será la magnitud del efecto de filtración y menor será la movilidad geoquímica del ión. Sin embargo, si tenemos en cuenta que los radios de los iones varían en más de dos veces (con la exclusión de los iones complejos), mientras que el contenido de los metales en las soluciones formadas de menas varía en decenas y centenas de veces, es lógico pensar que el primer factor quedará supeditado al segundo. (E.M. Yanichevski, 1963).

A continuación señalamos las magnitudes de los radios de algunos iones hidratados en anistrons (A°): $\text{Pb}^{2+} = 2,58 \text{ \AA}$; $\text{Cu}^{2+} = 3,55 \text{ \AA}$; $\text{Zn}^{2+} = 3,42 \text{ \AA}$; $\text{Bi}^{3+} = 3,86 \text{ \AA}$; $\text{Sb}^{3+} = 4,52 \text{ \AA}$; $\text{Mo}^{4+} = 4,91 \text{ \AA}$.

4. La solubilidad de las combinaciones de los elementos condiciona sus contenidos en las soluciones y de ahí que este factor también influya en las dimensiones de las aureolas; lógicamente, a mayor solubilidad mayores serán las dimensiones de las aureolas.

La volatilidad de las combinaciones de muchos elementos es un factor que influye de una forma muy importante en la migración de los mismos; como es ya conocido, dentro de estos elementos tenemos el mercurio, el antimonio, el arsénico y el azufre. La influencia de la volatilidad en la migración es también acentuada para elementos tales como; el fluor, boro, bismuto, talio, selenio y telurio, muchos a cuyas combinaciones son fácilmente volátiles.

La migración de los elementos en la fase gaseosa, y por tanto, las dimensiones de las aureolas que se forman en el transcurso de tal migración dependen acentuadamente de las condiciones externas y sobre todo de la presión y la temperatura.

Para finalizar con la influencia de los factores de la migración en los parámetros de las aureolas primarias, se debe puntualizar que al estudiar éstos hay que tener en cuenta todos los posibles factores que actúan en los mismos ya que todos de una forma u otra, están interrelacionados, cada uno de ellos por separado no determina el carácter de los diferentes parámetros de las aureolas primarias.

Influencia de los factores geológicos en los parámetros de las aureolas primarias

En la morfología y dimensiones de las aureolas primarias ejercen gran influencia los factores geológicos, entre los cuales tienen mayor importancia los litológicos y los estructurales, sobre todo estos últimos.

Factores litológicos. Las particularidades litológicas de las rocas, dentro de las cuales se destacan la composición química y mineralógica y las propiedades físico-mecánicas, influyen notablemente en los parámetros de las aureolas. Cuanto mayor es la permeabilidad de las rocas (porosidad abierta + agrietamiento), tanto más lejos, en igualdad de condiciones, migrarán los elementos químicos, siendo el mecanismo fundamental la infiltración; éstos dan lugar a aureolas muy amplias, pero de pequeñas concentraciones de los elementos, debido a que el efecto de filtración disminuye notablemente (fig. 8).

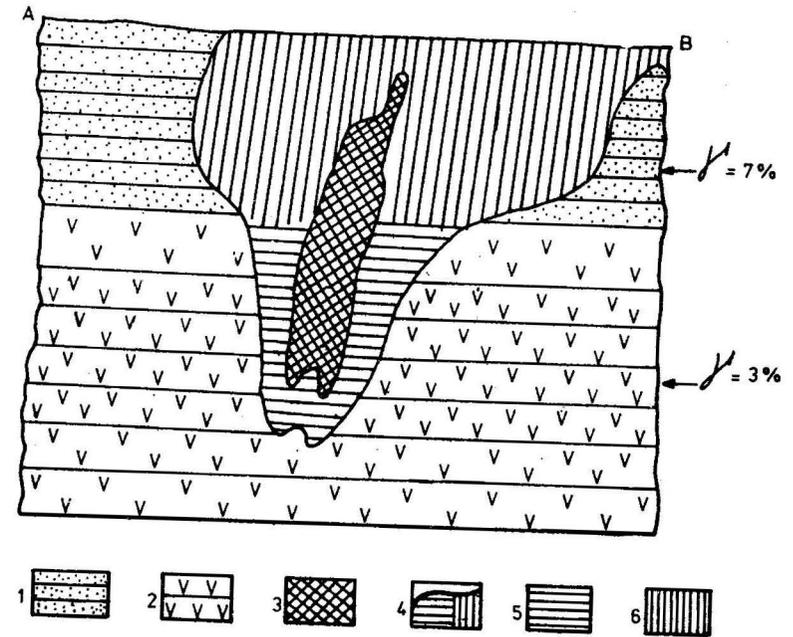


Fig. 8 Aureola primaria desarrollada en rocas encajantes con diferentes grados de porosidad comunicada y similar actividad química: 1. areniscas; 2. tobas; 3. cuerpos meníferos; 4. límite exterior de la aureola; 5. zonas de concentraciones elevadas; 6. zona de concentraciones pequeñas. La porosidad comunicada se expresa en (%)

En las rocas químicamente inertes la dispersión de los elementos ocurrirá a distancias mayores que en las rocas químicamente activas (fig. 9).

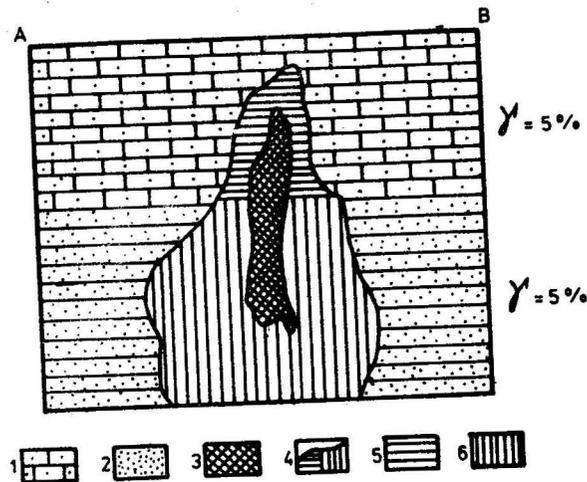


Fig. 9 Aureola primaria desarrollada en rocas encajantes de diferente actividad química y similar porosidad: 1. caliza arenosa; 2. arenisca cuarcífera; 3. cuerpo menífero; 4. límite exterior de la aureola; 5. zona de concentraciones elevadas; 6. zona de pequeñas concentraciones

La influencia de la litología se acentúan aun más cuando existe alrededor del yacimiento la presencia de rocas de distinta composición; esto influye en gran medida en la forma de las aureolas y en la distribución irregular

del contenido de los elementos dentro de sus límites. Las alteraciones hidrotermales premaníferas contribuyen al aumento de la porosidad y permeabilidad de las rocas encajantes, lo que favorece el aumento de las dimensiones de las aureolas ya que éstas guardan relación espacial con dichas alteraciones, aunque son mucho más amplias.

Factores estructurales. Estos factores determinan la posición espacial de las aureolas y ejercen una gran influencia en sus dimensiones y morfología. Las aureolas se sitúan en las mismas estructuras que los cuerpos minerales.

Las aureolas que se desarrollan alrededor de los cuerpos meníferos de yacencia suave se diferencian de las aureolas de los cuerpos que yacen bruscamente por una mayor expansión en el plano donde se desarrollan los cuerpos meníferos y también por una distribución más uniforme de los elementos, lo cual se explica por la infiltración de las soluciones meníferas a través de los horizontes más permeables dentro del paquete productivo.

Todas las particularidades sobre la formación de las aureolas, examinadas hasta ahora, es necesario tenerlas en cuenta durante la interpretación de las mismas.

Estructuras de las aureolas

La estructura de las aureolas se determina por su forma y por el carácter de la distribución en la misma de los elementos químicos meníferos y acompañantes.

La forma de las aureolas primarias depende de la forma de los cuerpos meníferos a los cuales se asocian y principalmente del carácter de la permeabilidad de las rocas encajantes en las proximidades de los cuerpos meníferos; si la permeabilidad es poco variable, las aureolas serán muy regulares por su forma, pero si es muy variable sucede lo contrario. Atendiendo a su forma se pueden dife-

renciar los siguientes tipos de aureolas primarias (fig. 10) .

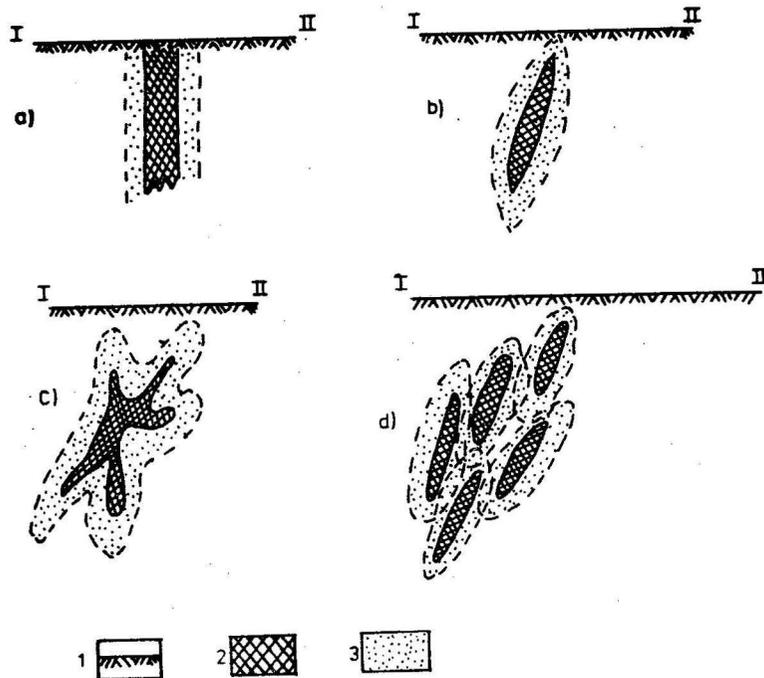


Fig. 10 Relación entre la morfología de las aureolas primarias y la forma de los cuerpos meníferos: a) salbandas alargadas, b) lenticulares, c) irregulares, d) extremadamente irregulares

a) salbandas alargadas asociadas a cuerpos meníferos tabulares y felonianos;

- b) aureolas lenticulares desarrolladas alrededor de los cuerpos meníferos que poseen dicha forma;
- c) aureolas de forma irregular asociadas a zonas de intersección de dislocaciones disyuntivas;
- d) aureolas anchas extremadamente complicadas debido a la intersección de aureolas individuales de cuerpos meníferos contiguos.

La forma de las aureolas para los distintos elementos químicos puede variar en dependencia del tipo genético del yacimiento, de las propiedades de estos elementos que influyen en la difusión e infiltración y de las particularidades de las rocas encajantes.

Las aureolas de los yacimientos endógenos polimetálicos, auriosulfurosos y otros (según N.A. Safronov, 1968) pueden agruparse, de acuerdo a su estructura en: volumétrica, lineales y combinadas, en cuanto a la forma se refiere, pero cada una de ellas, de acuerdo al carácter de la distribución de los elementos químicos dentro de sus límites se pueden clasificar en dos grupos: aureolas con estructura zonal sencilla y aureolas con estructura zonal compleja (fig. 11)

Aureolas volumétricas. Son propias de los cuerpos meníferos que se desarrollan en medios uniformes por sus particularidades físico-químicas. Cuando la yacencia de los cuerpos es abrupta se forman aureolas simétricas, pero cuando la yacencia es suave se originan aureolas asimétricas, debido a un desarrollo más intenso de las aureolas hacia el bloque calzante.

Aureolas lineales. Se originan en aquellos casos en que la forma de dichas aureolas está controlada por dislocaciones tectónicas disyuntivas.

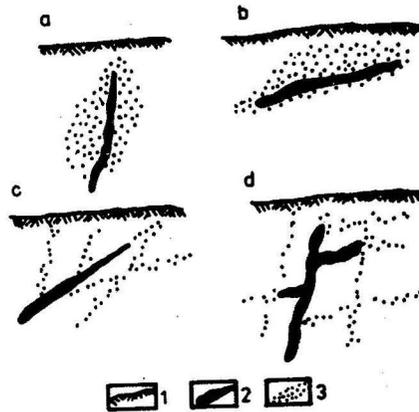


Fig. 11 Representación esquemática de las estructuras de las aureolas primarias (según N.I. Safronov, 1968): a) volumétrica simétrica, b) volumétrica asimétrica, c) lineal, d) combinada. 1. nivel de erosión; 2. cuerpos meníferos; 3. aureolas primarias

Aureolas combinadas. Son aquellas donde se combinan los elementos de las aureolas lineales y de las volumétricas.

Aureolas con estructura zonal sencilla. Estas aureolas pueden pertenecer por su forma a cualquiera de los grupos anteriores y se relacionan con cuerpos meníferos aislados que se han originado como resultado del proceso de deposi-

ción menífera durante una misma etapa, lo que se manifiesta en la distribución zonal sencilla de los elementos meníferos y acompañantes con respecto a los cuerpos minerales.

Aureolas con estructura zonal compleja. Estas aureolas pueden estar relacionadas con cuerpos meníferos originados como resultado de un proceso de mineralogénesis de muchas etapas, lo que conlleva a la distribución zonal compleja de los elementos dentro de sus límites; estas aureolas por su forma pueden clasificarse en cualquiera de los grupos anteriores. La causa de la distribución zonal compleja también puede ser la superposición de aureolas de cuerpos meníferos cercanos.

Importancia de las características de las aureolas primarias para la búsqueda

Dentro de las características de las aureolas primarias que tienen mayor importancia para la búsqueda podemos señalar sus dimensiones y la distribución zonal de los elementos químicos dentro de sus límites.

Las dimensiones de las aureolas primarias exceden grandemente las de los cuerpos meníferos y precisamente esta característica de las aureolas le confiere a las mismas un gran valor para la búsqueda de los cuerpos a los cuales se asocian. Para los cuerpos meníferos que yacen abruptamente las aureolas alcanzan sus mayores dimensiones según el rumbo y según su realce, mientras que su espesor, según la potencia no es muy pronunciado; por el contrario, para los cuerpos meníferos que yacen suavemente, las aureolas se caracterizan por alcanzar un espesor considerable según la vertical.

Las dimensiones de las aureolas dependen de sus mecanismos de formación; a modo de ejemplo podemos señalar que sobre los cuerpos meníferos de los yacimientos magmáticos

de cobre-níquel, las aureolas singenéticas gravitacionales se extienden a decenas de metros de los límites de los cuerpos meníferos; la de níquel hasta 165 metros, la de titanio hasta 24 metros y las de vanadio y manganeso hasta 10 metros (según T. Niuppenen, 1963).

Las aureolas de infiltración se pueden prolongar por su rumbo hasta 2 km de los límites de los cuerpos minerales, por el realce, sobre los cuerpos minerales, hasta 500-1 000 m y según la dirección de la potencia real hasta 200-300 m (yacimientos Irtishk, Altai, URSS).

Las aureolas de difusión solo se prolongan, a lo sumo, unos metros fuera de los límites de los cuerpos meníferos, en cualquier dirección, mientras que las de difusión-infiltración, por el rumbo, se prolongan hasta cientos de metros, por el relieve, algunas decenas y según su potencia real, algunos metros.

Al estudiar las dimensiones de las aureolas hay que tener presente el carácter convencional de sus contornos, sobre todo el exterior. El contorno exterior se puede determinar condicionalmente, tomando como tal el nivel de sensibilidad del método de análisis, cuando éste no es lo suficientemente elevado como para revelar las concentraciones próximas al fondo para un elemento dado; evidentemente si el nivel de sensibilidad del método no es lo suficientemente elevado, las dimensiones de la aureola revelada serán inferiores a las reales, como sucede en el caso de toda una serie de elementos, dentro de los cuales se pueden destacar el cadmio, la plata, el arsénico, el mercurio y otros, para los cuales sus concentraciones, aun en el estado concentrado (decenas y centenas de veces el valor de los fondos geoquímicos), son insignificantes.

El contorno exterior de las aureolas de aquellos elementos para los cuales el método de análisis tiene suficiente sensibilidad como para revelar y medir concentra-

ciones próximas a los valores de fondo, se determina teniendo en cuenta el grado de variabilidad de los valores de fondo o normales, lo que permite estimar, con cierto grado de confiabilidad, el umbral de los contenidos anómalos; de aquí se desprende que las dimensiones de las aureolas estará en dependencia del grado de confiabilidad elegido: a mayor confiabilidad menores serán las dimensiones de las aureolas reveladas y viceversa. En situaciones semejantes el contorno externo suele determinarse mediante la simple observación de la distribución espacial de las concentraciones de los elementos químicos en determinadas secciones (planos y perfiles), teniendo en cuenta criterios completamente convencionales.

Como se ha podido apreciar, existen diferentes procedimientos para establecer los límites de las aureolas geoquímicas, los cuales estudiaremos con la suficiente profundidad a su debido momento, pero ninguno de estos procedimientos permite establecer con certeza los límites reales de las aureolas; los límites obtenidos en todos los casos son puramente convencionales y generalmente las dimensiones obtenidas son inferiores a las reales, esto dificulta hacer predicciones científicamente argumentadas acerca de la posición de los cuerpos meníferos en el corte geológico, sobre todo cuando los contornos exteriores se determinan teniendo en cuenta el nivel de sensibilidad del método de análisis.

Las dimensiones de las aureolas frecuentemente dependen mucho de las particularidades texturo-estructurales de los cuerpos meníferos. Las aureolas formadas alrededor de las menas diseminadas son más anchas que las que se originan alrededor de las menas masivas; por otro lado, las aureolas que se desarrollan asociadas a filones entrelazados son de 5 a 6 veces más anchas que los cuerpos meníferos.

En las zonas de trituración que se desarrollan en las proximidades de los cuerpos meníferos las aureolas son mucho más anchas que en las zonas no trituradas.

De lo visto hasta aquí se desprende que la importancia de las aureolas como índices de búsqueda viene dado en gran medida por sus dimensiones, las cuales exceden notablemente a las de los cuerpos meníferos, por tal razón la efectividad de los trabajos geoquímicos de búsqueda aumentará notablemente en la medida en que sea posible precisar el contorno exterior de dichas aureolas, lo cual será posible con el aumento paulatino de la sensibilidad y la exactitud de los métodos de análisis.

La característica más importante de las aureolas primarias, desde el punto de vista de la búsqueda, es la distribución zonal de los elementos químicos dentro de sus límites, por esto, la distribución zonal de los elementos químicos será estudiado con la suficiente profundidad, de acuerdo con nuestras posibilidades en un acápite aparte.

Zonalidad de las aureolas primarias

Se entiende por zonalidad a la variación regular en el espacio de los parámetros de las aureolas. Desde el punto de vista práctico, la zonalidad más importante es la que se establece según la dirección de movimiento de las soluciones mineralizantes, que en el caso de los cuerpos minerales muy inclinados coincide con la dirección vertical y está expresada por la diferenciación regular de los elementos según esta dirección. Si los cuerpos minerales son poco inclinados (prácticamente horizontales), las aureolas primarias usualmente presentan una marcada elongación a lo largo de la horizontal, observándose también según esta dirección una marcada zonalidad, la cual, como se ha demostrado mediante el estudio de muchos cuerpos minerales, es similar a la zonalidad vertical de las

aureolas primarias de los cuerpos minerales inclinados; por tal razón, a la zonalidad que se desarrolla según la dirección en que se mueven las soluciones se debe denominar longitudinal.

El concepto de zonalidad vertical está muy generalizado debido a que los cuerpos de los yacimientos hidrotermales generalmente yacen abruptamente.

La zonalidad en las aureolas primarias también se puede manifestar según direcciones perpendiculares a la cual se mueven las soluciones. Esta zonalidad recibe el nombre de transversal y generalmente es horizontal; desde el punto de vista de la búsqueda, esta zonalidad tiene menor valor práctico que la longitudinal.

En lo adelante prestaremos la mayor atención a la zonalidad vertical por considerarla como la de mayor valor práctico durante la búsqueda de los cuerpos minerales hidrotermales.

Las causas de la zonalidad está relacionada con las diferencias en la capacidad de migración de los elementos químicos y sus compuestos en las soluciones mineralizantes. La zonalidad de las aureolas es la zonalidad de la deposición de los diferentes compuestos al variar el equilibrio interno de las soluciones formadoras de menas.

Las rocas encajantes, a través de las cuales se mueven las soluciones, desempeñan el papel de una columna cromatográfica que retiene los elementos y compuestos menos estables en la solución.

La zonalidad vertical de las aureolas primarias de los cuerpos meníferos hidrotermales se manifiesta en el hecho de que los elementos químicos ocupan diferentes posiciones, con respecto al cuerpo menífero, de acuerdo a la capacidad de migración de los mismos. De acuerdo con esto, se distinguen elementos meníferos, que se concentran en las aureolas primarias en los niveles ocupados por las me-

nas suprameníferos, que se concentran por encima de las menas y los inframeníferos, que se concentran por debajo de las menas. Los elementos de mayor capacidad de migración, evidentemente, son los suprameníferos y los de menor son los inframeníferos (fig. 12) .

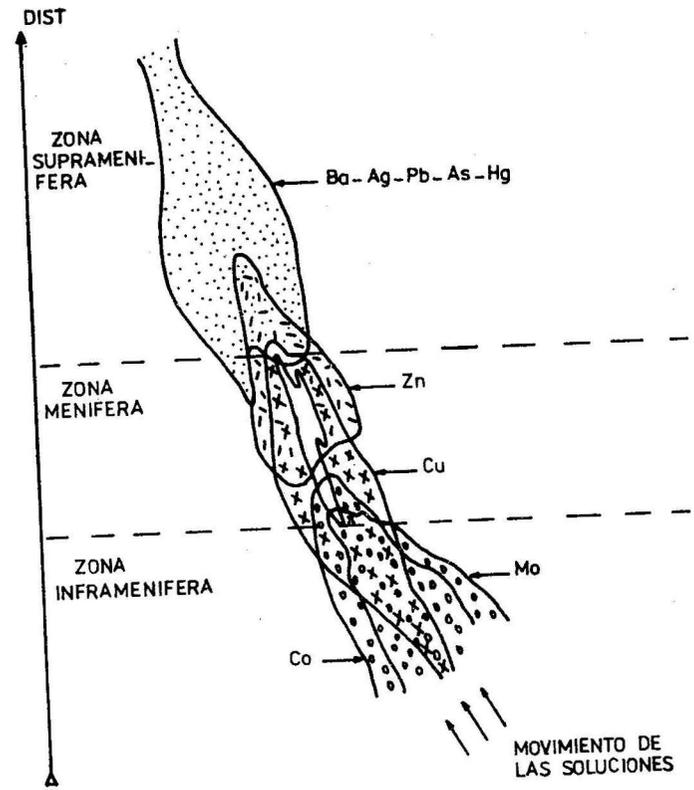


Fig. 12 Esquema de la distribución zonal de los elementos químicos según la dirección en que se mueven las soluciones mineralizantes (zonalidad longitudinal)

Existe toda una serie de parámetros que desempeñan el papel de índices de la zonalidad en las aureolas primarias dentro de los cuales los más importantes son los siguientes:

- a) variación de las concentraciones de los elementos meníferos y acompañantes con respecto a los cuerpos minerales. Este es el parámetro más importante ya que de él se derivan todos los demás (fig. 13) :

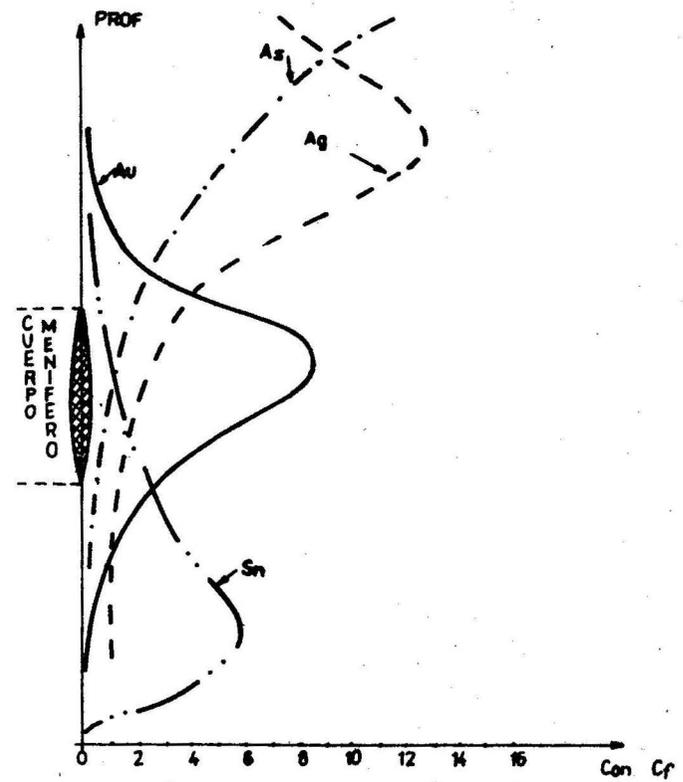


Fig. 13 Gráfico de la variación de la concentración de los elementos indicadores con respecto a los cuerpos meníferos (la concentración se expresa en fondos geoquímicos)

- b) variación de las relaciones entre elementos contrastantes, es decir, entre elementos suprameníferos e inframeníferos (fig. 14) ;

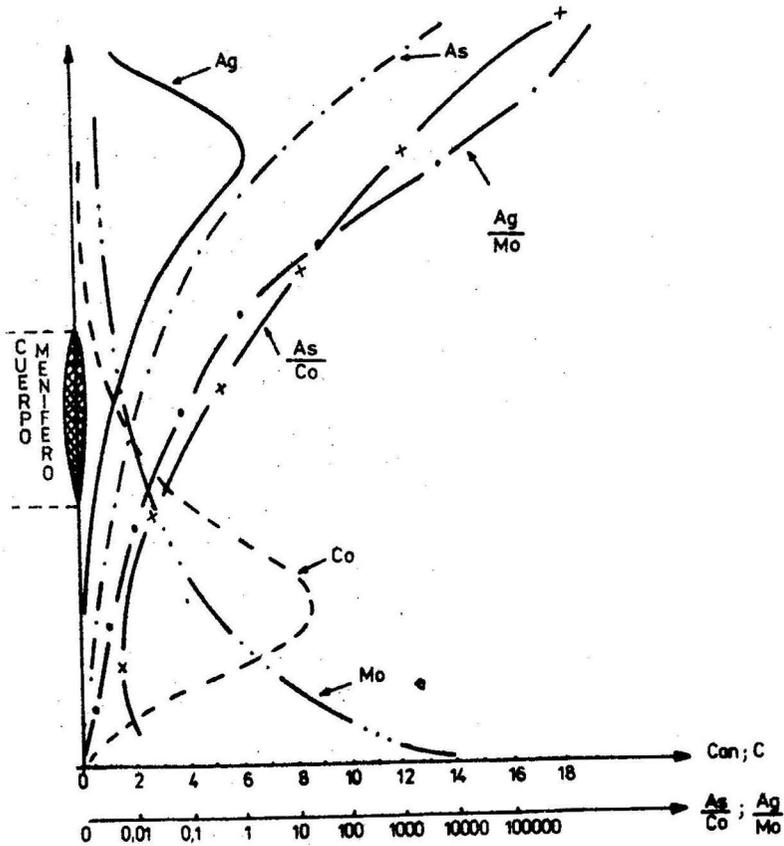


Fig. 14 Gráfico esquemático de la variación de las relaciones entre elementos indicadores con respecto a los cuerpos meníferos.

- c) variación de los coeficientes de correlación entre las concentraciones de los elementos ;
 d) variación de las productividades de los elementos ($m\%$; $m^2\%$) ;
 e) variación de la magnitud del producto de las concentraciones de elementos de características similares.

En calidad de este indicador se toma el producto de las concentraciones de elementos paragenéticos característicos de la zona supramenífera ($Ag \times Pb \times Zn$) y de la zona inframenífera ($Cu \times Bi \times Co$) . (fig. 15) .

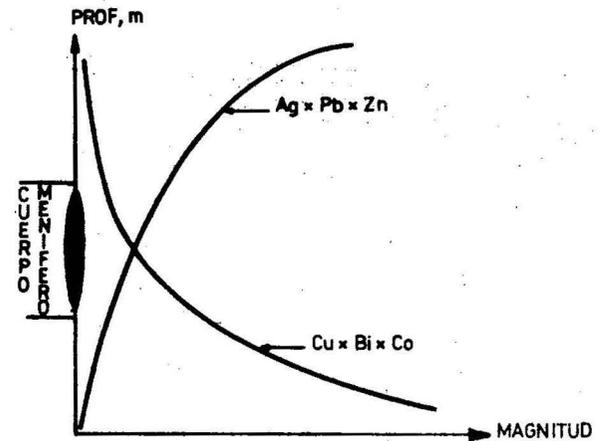


Fig. 15 Gráfico de la variación de los productos de elementos meníferos y suprameníferos con respecto a los cuerpos meníferos (esquema).

relación de las relaciones entre el producto de grupos de elementos supra e inframeníferos. Ejemplo.

$$R = \frac{A_g \times P_b \times Z_n}{Cu \times Bi \times Co}$$

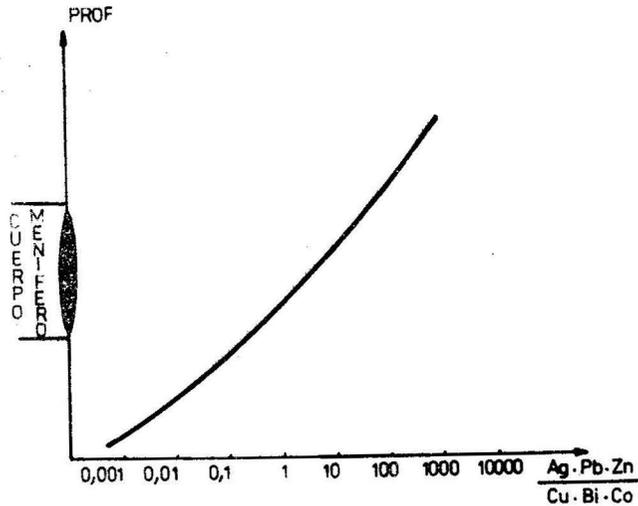


Fig. 16 Curva generalizada de la variación de la relación $\frac{A_g \cdot P_b \cdot Z_n}{Cu \cdot Bi \cdot Co}$ con respecto a los cuerpos meníferos.

En la actualidad los dos últimos indicadores (multiplicativos) son los que tienen mayor importancia práctica. Debemos aclarar que las combinaciones tomadas como ejemplo no son las únicas que pueden servir como indicadores de estos tipos ya que los elementos pueden ser otros, al

igual que el número de ellos en cada grupo; lo que necesariamente los elementos de cada grupo, deben ser afines por su carácter geoquímico.

Existen otros índices de la zonalidad, pero los que se han señalado son los más importantes.

Una investigación comparativa de numerosos yacimientos hidrotermales reveló que, no obstante las diferencias existentes entre ellos en cuanto a composición y condiciones de localización, ellos exhiben el mismo patrón de zonalidad. Esto es ilustrado en la tabla 1 en forma de series de zonalidad, en las cuales se reemplazan los elementos suprameníferos por los inframeníferos de izquierda a derecha. Aquí se observa una notable similitud entre las series de zonalidad de las aureolas, no solo para el mismo tipo, sino también para los yacimientos de diferente composición y de diferentes condiciones de formación; esto ha permitido confeccionar una serie de zonalidad generalizada de los principales elementos indicadores de los yacimientos minerales, la cual exponemos a continuación:

Ba - (Sb, As, Hg) - Cd* - Ag - Pb - Zn - Au - Cu - Bi -
(93) (100) (87) (100) (80) (84) (87) (84) (86)

Ni - Co - Mo - U* - Sn - Be - W
(72) (50) (55) (48) (66) (60) (72)

Como se puede apreciar en la tabla, las series de zonalidad no son absolutamente idénticas, observándose desviaciones específicas para algunos elementos.

Sobre la base de las series de zonalidad parcial de cada uno de los yacimientos, se calculó la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los elementos en las correspondientes divisiones de la serie generalizada. La probabilidad de aparición de los diferentes elementos en la

posición que ocupan dentro de esta serie se expresa, en por ciento, por las cifras entre paréntesis.

Algunos elementos en la serie de zonalidad generalizada poseen una probabilidad relativamente pequeña debido a su desplazamiento en las series de zonalidad parciales de cada uno de los yacimientos. Sin embargo, semejantes desplazamientos son muy cortos, generalmente en una sola división y solo en casos extremadamente raros en dos o más divisiones. Una pequeña probabilidad es mostrada principalmente por elementos que forman aureolas muy pequeñas y de muy bajo contraste (intensidad) como es el caso del níquel, el cobalto, el molibdeno, el berilio y el estaño. Se puede asumir que la pequeña probabilidad es debido en gran medida a las fluctuaciones de los contenidos medios de los elementos, a la redistribución de los mismos y sobre todo a la relativamente baja exactitud de los métodos de análisis empleados; las aureolas de pequeño contraste son más sensibles a los efectos de estos factores.

No obstante la similitud esencial existente entre las series de zonalidad de los cuerpos minerales de los yacimientos hidrotermales, la comparación de la serie generalizada, para estos yacimientos, con las series individuales, revela la existencia en estas últimas de desviaciones específicas, lo cual se debe a la distribución zonal compleja de los elementos químicos dentro de los límites de las aureolas de un gran número de yacimientos, como resultado del carácter "poliformacional" de éstos, que conduce a la superposición de la mineralización producida durante diferentes etapas y por lo tanto, a la superposición de aureolas originadas durante diferentes etapas del proceso de mineralización. A continuación explicaremos las particularidades de las series de zonalidad de algunos yacimientos reflejados en la tabla 1

Tabla 1
SERIES DE ZONALIDAD DE ELEMENTOS INDICADORES

Mineralización	Yacimientos	Serie de zonalidad
Volfrámico-molibdeno en Skarns	Dayron Shurale	Ba, Ag (Pb, Zn), Sn, Cu, W, Mo (Co, Ni), Be Ag, Pb, Zn, Mo, W, Ni, Co
Bismuto en Skarns	Chokadambulek	As Pb Ag Zn (Co Cu Bi) Ni
Polimetálico en Skarns	Kamarsay Aktash Kurusay Altyn-Topkan Carpenger	As, Cd, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi (As, Sb), Ag, Pb (Zn, Cu), Bi, Co, Sn, Mo Ba(As, Sb), Ag, Pb, Zn, Cu, Bi Co (Mo, W), Sn Sb, Cd (Ag, Pb), (Sn ¹ , Zn)Cu, Bi, Ni, (Co, Mo, Sn ² , -W, Be) Sb, Ag, Pb, Zn, Cu, Sn, Bi (Ni, Co, Mo), W

Tabla 1

Mineralización	Yacimientos	Series de zonalidad
Menas de oro	Kochbulak	(Sb,As ¹ ,Ag,Pb), Zn, Au, Mo,Cu,Bi (Co,Ni,Ag ² -W,Be)
	Shholnoye	Sb,As,Ag,Pb,Zn,Au,Cu,Mo,Sn,Bi, Be,W,Co
	Burgunda	Ba,Sb,As,Ag,Pb (Zn,Cu), Au,Mo (Sn,Bi,W)
Cobre porfídico	Almalik	Ba,As,Sb (Ag,Pb,Zn), Au, Bi (Cu,Mo), (Sn,Co,-W,Be)
Cobre	Kafan	Ba,As,Pb,Zn (Ag,Sn), Cu Bi,Co,Ni
Polimetálico	Kanimansur	Ba,As ¹ ,Ag,Pb,Zn,Cu,Bi,Co,Sn, As ² , W

56

Tabla 1

Mineralización	Yacimientos	Series de zonalidad
Uranio	Sumsar	Ba,As,Cu,Ag,Pb,Zn,Co,Ni,Be
Plomo-zinc estratiforme	Simap	Ba,Hg,Ag,Pb,Zn,Cu (Co,Ni,Sn),Mo
Mercurio	Konchoch	Sb,As,Hg,Ag,Pb,Cu (Mo,Bi) (Co,Ni,W,Sn)
	Sakhalin Asiatag	As,Hg,Sb,Pb,Zn,Cu (Co,Ni) As,Hg (Ag,Pb,Sn,Zn) Cu,Co, Ni (Be,Mo,W)
Polimetálico en Skarns	Tutli-I Nikolaiev	Sb,As,Ag,Pb,Zn* As Ag Pb Zn Cu Sn Ni
Antimonio-mercurio	Tereksai Karakamar	As Sb Fg Cu Ag Pb Zn Be Co Ni As Sb Hg Ag Sn Pb Zn Cu Mo (W Co Ni)

57

* En estos casos el análisis de las muestras fue hecho para un número muy limitado de elementos indicadores.

En la serie de zonalidad del yacimiento dayron, en contraste con otros yacimientos minerales, el wolfragmio (W) se localiza hacia la izquierda del molibdeno (Mo); esto se debe al hecho de que este yacimiento contiene una formación independiente de cuarzo-molibdeno, que se manifiesta en los horizontes profundos y provoca que la aureola de molibdeno posea dos máximos claramente definidos, uno encima y otro debajo de los cuerpos meníferos.

El máximo inferior indica la mineralización de cuarzo-molibdeno y el superior la de Skarns-sheelita. En medio de esto, en la serie de zonalidad de la mineralización de Skarns-sheelita el molibdeno desplaza directamente al wolfragmio.

En las series de zonalidad de los yacimientos de Sum-sar y Tevkaoy, en contraste con otros yacimientos, el cobre ocupa altos niveles (por encima del plomo y la plata). Las investigaciones realizadas en estos yacimientos, mostraron que en los mismos, el cobre está contenido en minerales ajenos. Cuando el cobre está representado por calcopirita se localiza en las series de zonalidad hacia la derecha del zinc. Las investigaciones han demostrado la distribución zonal en las aureolas primarias de los diferentes minerales portadores de los mismos elementos químicos.

La distribución zonal de los diferentes minerales portadores de los mismos elementos explica también la doble posición del arsénico en la serie de zonalidad del yacimiento de Kanimansur. En contraste con otros yacimientos, donde el arsénico se concentra en los sectores suprameníferos, en este yacimiento las aureolas intensas de este elemento se observan tanto en la zona supramenífera como en los horizontes meníferos profundos, al nivel donde los cuerpos meníferos se acuñan. Esto se debe a la aparición en los horizontes inferiores de la arsenopirita (en los horizontes superiores el arsénico aparece contenido en

minerales ajenos), junto con la galena y la esfalerita, en las cuales el arsénico alcanza concentraciones de centésimas y décimas de por ciento.

Lo correcto de esta suposición es confirmada por los resultados de una investigación realizada en aureolas de los cuerpos meníferos del yacimiento Sumsar, donde la arsenopirita está ausente, pero el mineral ajeno que contiene arsénico alcanza un amplio desarrollo y extensas aureolas de arsénico de gran intensidad fueron establecidas solamente en las zonas suprameníferas de los cuerpos meníferos.

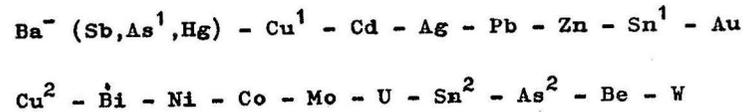
En la serie de zonalidad del yacimiento Altyn-Topkan el estaño (Sn) ocupa dos posiciones bien definidas; esto se debe, de acuerdo con los resultados de los análisis de fase realizados, a la sustitución de la estannita por la casiterita (ver tabla 1) .

La generalización de las series de zonalidad de los elementos indicadores será correcta solamente para los cuerpos minerales donde las formas de ocurrencia de los elementos son constantes. En los casos donde los elementos son contenidos en diferentes formas minerales, ellos pueden ocupar diferentes posiciones en las series de zonalidad, como por ejemplo, el cobre, el arsénico y el estaño.

La presencia de un elemento particular en las aureolas en diferentes formas minerales, evidentemente no siempre conduce a desplazamientos en las series de zonalidad. Semejantes desplazamientos podrán ser observados solamente cuando el contenido del elemento es similar en las diferentes formas minerales presentes y la distribución de las más recientes muestran una marcada diferenciación en el espacio con respecto a las más antiguas, es decir, las formas minerales de diferentes edades ocupan, en este caso, diferentes posiciones en el espacio con respecto a los cuerpos meníferos; esto puede conducir a que el elemento

en cuestión ocupe diferentes posiciones en las series de zonalidad.

De este análisis sobre las características de las series de zonalidad de los diferentes yacimientos, se desprende que la serie de zonalidad generalizada para los yacimientos hidrotermales debe adquirir la siguiente forma:



La serie generalizada refleja el nivel de los conocimientos actuales sobre la zonalidad de las aureolas, sin embargo, a medida que sean adquiridos nuevos datos acerca de la distribución zonal de los elementos químicos, ésta continuará refinándose, pero los cambios no serán sustanciales.

La zonalidad de las aureolas es la zonalidad de la deposición, debido a cambios en el equilibrio interno de las soluciones formadoras de menas. Se observa una marcada concordancia entre la serie de zonalidad generalizada expuesta con anterioridad y la estabilidad de los componentes de las soluciones.

La zonalidad común de las aureolas primarias representa, en cierto grado, el papel de los estadios en la formación de los yacimientos hidrotermales. Todos estos yacimientos son del tipo multiestadios. Diferentes elementos indicadores pueden estar asociados con diferentes estadios, pero sus aureolas muestran una zonalidad común; esto permite asumir que aparentemente no hay una interrupción significativa en el tiempo de ocurrencia de los estadios individuales y que el cambio en la mineralización de los mismos es debido más bien a la diferenciación espacial que a la diferenciación en el tiempo de la solución formadora

de menas, la cual arribó hacia afuera por determinada grieta. La intercepción mutua de los productos de los diferentes estadios es debida, posiblemente, a los movimientos intrameníferos ocurridos en diversos sectores del área menífera.

La zonalidad de las aureolas permite resolver múltiples problemas relacionados con la búsqueda de los cuerpos meníferos, dentro de los cuales se destacan los siguientes:

1 Búsqueda de cuerpos meníferos ciegos. Este problema se resuelve mediante el estudio de las aureolas de carácter supramenífero, que son los que se manifiestan en los sectores donde el corte de erosión se encuentra por encima de los horizontes meníferos, por lo que solamente tiene posibilidad de cortar sus aureolas al nivel de la zona supramenífera.

La (fig. 17) representa un ejemplo de la revelación de un cuerpo menífero ciego a partir de su aureola supramenífera. Primeramente, mediante el muestreo de las rocas frescas en la superficie se reveló una aureola compleja de elementos suprameníferos, dentro de los cuales se destaca el arsénico, posteriormente se perforó un pozo (I) con la finalidad de estudiar esta aureola en profundidad o detectar la pesible mineralización, pudiéndose observar en las rocas encajantes el aumento de la concentración de elementos meníferos; esto obligó a perforar otro pozo (II) con un mayor ángulo, el cual reveló, en las profundidades una mineralización polimetálica. Otro ejemplo está representado en la (fig. 18), pero dentro de los límites de un yacimiento en explotación (fig. 17 y 18) .

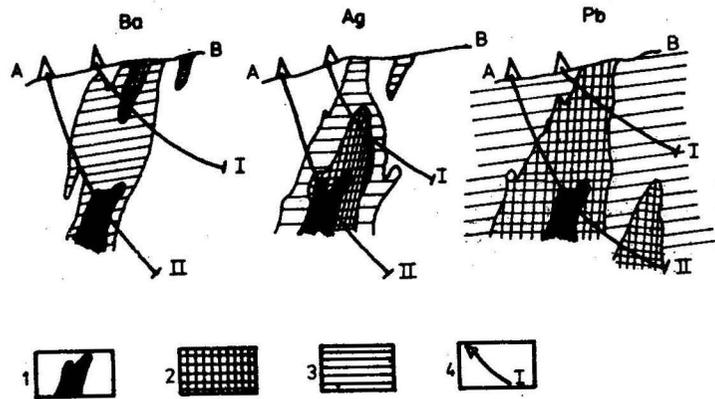


Fig. 17 Revelación de un cuerpo menífero ciego a partir de su aureola primaria supra-menífera: 1. cuerpo menífero; 2. sectores de concentraciones máximas; 3. sectores de concentraciones medias; 4. pozos de perforación.

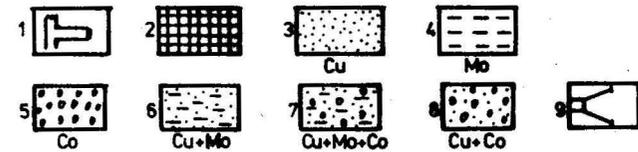
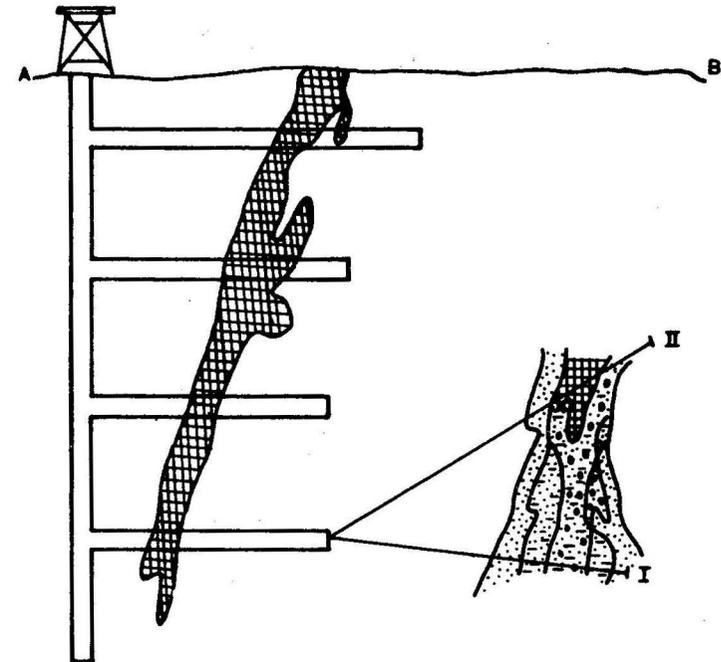


Fig. 18 Revelación de un cuerpo menífero ciego a partir de su aureola primaria infra-menífera dentro de los límites de un yacimiento en explotación: 1. laboreos mineros; 2. cuerpos meníferos; 3.8; distribución de los elementos indicados dentro de los límites de la aureola primaria; 9. pozos de perforación

2. Determinación de la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos. Este es uno de los problemas más importantes durante la realización de los trabajos geoquímicos para la búsqueda. La determinación de la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos se logra mediante el estudio detallado de las concentraciones de los elementos meníferos y acompañantes en las aureolas primarias, al nivel de la superficie; esto permite, de acuerdo con la distribución zonal de los mismos, determinar el carácter de las aureolas primarias (supramenífero, menífero o inframenífero) y por consiguiente la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos.

La determinación de la posición del corte de erosión, entre otras cosas, permite evaluar las perspectivas de las manifestaciones meníferas en profundidad, establecer la correlación entre las aureolas primarias y las secundarias e interpretar correctamente los resultados de la búsqueda geoquímica, lo que por su importancia pasaremos a explicar brevemente a continuación:

- a) evaluación de las perspectivas en profundidad de las manifestaciones meníferas. Durante la búsqueda de los yacimientos minerales se revelan numerosas manifestaciones meníferas; a partir de sus afloramientos, aureolas secundarias, aureolas primarias, etc. Todas las manifestaciones meníferas reveladas no presentan las mismas perspectivas, por lo cual, antes de proyectar y ejecutar nuevos trabajos, con la finalidad de evaluar la mineralización en profundidad, es necesario seleccionar las más perspectivas. Esto se puede lograr mediante la determinación de la posición del corte de erosión en las diferentes manifestaciones y de esta forma precisar si las mismas, al nivel de la superficie son mení-

feros, suprameníferos o inframeníferos; incluso se puede precisar si los afloramientos de los cuerpos meníferos se corresponden con las partes superiores, intermedias o inferiores de los mismos (fig. 19).

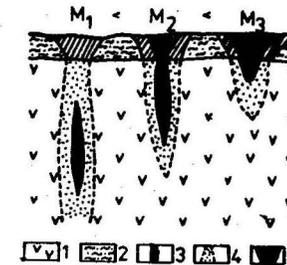


Fig. 19 Diferentes posiciones del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos:
 1. rocas encajantes; 2. eluvio; 3. cuerpos meníferos; 4-5. aureolas secundarias;
 4. zonas de valores mínimos; 5. zonas de valores máximos.
 MI, MII y MIII) productividades lineales de las aureolas secundarias en m % (metro %)

La figura 19 representa un buen ejemplo de la necesidad de precisar la posición del corte de erosión en las diferentes manifestaciones para hacer una correcta valoración de las mismas. En dicha figura se observa la posición del corte de erosión con respecto a tres cuerpos análogos; en el cuerpo I está por encima, afectando solamente a su aureola primaria en la zona supramenífera; en

el cuerpo II está al nivel superior de la zona menífera y en el cuerpo III está al nivel inferior. Sobre el cuerpo I solamente es posible observar la aureola primaria y la posible secundaria muy débil, formada a partir de la primera; sobre el cuerpo II es posible observar su aureola primaria, afloramientos meníferos y la aureola secundaria, al igual que en el cuerpo III. Si al evaluar las manifestaciones correspondientes a los tres cuerpos tomamos en consideración solamente la intensidad de las aureolas secundarias y la presencia de afloramientos meníferos, seleccionaríamos como más perspectiva a la relacionada con el cuerpo III, sin embargo esta es la menos perspectiva debido a que prácticamente todo el cuerpo menífero ha sido erosionado, correspondiéndose con la raíz del mismo. La manifestación con el cuerpo I pasaría inadvertida debido a que presenta una aureola secundaria muy débil y no se observan afloramientos meníferos, sin embargo es la más perspectiva ya que el cuerpo menífero se encuentra intacto en profundidad.

De lo expuesto se desprende que para evaluar correctamente las perspectivas de una manifestación menífera, es indispensable establecer previamente la posición del corte de erosión y que hay que prestarle atención a todos los índices directos de la mineralización, ya que a veces, una manifestación representada por una débil y al parecer insignificante aureola secundaria de dispersión, tiene más perspectiva que las representadas por afloramientos de los cuerpos meníferos.

b) establecimiento de la correlación entre las aureolas primarias y las secundarias. De la misma forma que el carácter de las aureolas primarias varía en dependencia de la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos, las aureolas secundarias litogeoquímicas de dispersión también lo hacen, lo que demuestra la

relación existente entre las mismas. Esto se debe a que las aureolas secundarias se originan a partir de la destrucción de las aureolas primarias o de éstas y las menas; por lo tanto, en la composición de las aureolas secundarias debe quedar reflejada la composición de las aureolas primarias y de las menas. De lo anterior se desprende que las aureolas secundarias correspondientes a un determinado nivel del corte de erosión presentan características muy específicas que las diferencian de las de otros niveles; por ejemplo, las que se asocian al nivel supramenífero se diferencian de las que se asocian al nivel inframenífero o menífero y viceversa. Esto es muy importante para orientar los trabajos de búsqueda e interpretar sus resultados;

c) importancia de las características del corte de erosión para la correcta interpretación de los resultados de la búsqueda geoquímica. Con anterioridad hemos visto que la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos es reflejada por la composición de las aureolas primarias y secundarias que se manifiestan en la superficie; esto es de suma importancia para la correcta elaboración de los datos geoquímicos e interpretación de sus resultados. De acuerdo con esto, al elaborar los datos del muestreo la búsqueda litogeoquímica, mediante las aureolas primarias y secundarias, es necesario construir cartas de aureolas (anomalías complejas de conjuntos de elementos característicos de un determinado nivel con respecto a los cuerpos meníferos, fundamentalmente suprameníferos e inframeníferos. Para establecer los elementos que deben estar representados en cada carta es necesario tener en cuenta la distribución zonal de los mismos en las aureolas.

La confección de cartas de aureolas complejas para elementos característicos de los niveles supra e inframe-

níferos permite determinar el carácter de las manifestaciones meníferas y evaluar sus perspectivas. Esto permite a su vez, evaluar amplias regiones de acuerdo al predominio de un determinado tipo de aureola compleja; si predominan las suprameníferas o meníferas la región será perspectiva, si por el contrario predominan las inframeníferas, las perspectivas serán escasas.

Las cartas de aureolas complejas se pueden construir mediante la superposición de las aureolas de los diferentes elementos o mediante los métodos aditivos y multiplicativos.

En la actualidad ha tomado mucho auge el empleo del método multiplicativo, por que ofrece toda una serie de ventajas que veremos posteriormente, cuando estudiemos la elaboración de los datos geoquímicos.

Formas en que se encuentran los elementos químicos en las aureolas primarias

Los elementos meníferos en las aureolas frecuentemente forman sus propios minerales; así, el uranio, plomo, molibdeno, zinc, cobre y el arsénico pueden ser encontrados respectivamente en forma de uraminita, de galenita, de molibdenita, de esfalerita, de calcopirita y de arsenopirita. La paragénesis mineral en las aureolas tiene una importancia indicadora bastante grande; por ejemplo, para los yacimientos de oro y los polimetálicos de calcopirita es característica la paragénesis de la calcopirita galena, esfalerita, pirita, sericita, clorita, carbonatos y barita; para los yacimientos sulfurosos de uranio la paragénesis más frecuente es la de uraminita, galenita, molibdenita, pirita, hematita, calcedonia y carbonatos.

En las aureolas primarias, los elementos acompañantes tales como la plata, el cadmio, el antimonio y el bismuto frecuentemente están presentes en forma de impurezas en

los demás minerales. Es posible también la penetración de los elementos meníferos en forma de impurezas dentro de minerales ajenos (el cobre en la galena, el plomo en la calcopirita, etc).

En las aureolas de los yacimientos polimetálicos el plomo, además de la galena, está presente en forma de impurezas dentro de minerales meníferos tales como; la pirita, la esfalerita y otros, así como en forma de impureza esamórfica en la sericita (mineral no menífero).

Dentro de los límites de las zonas aureólicas, el bario se puede encontrar en forma de barita, en forma de feldespatos de bario o en forma isomórfica dentro de la sericita.

En general se puede decir que los elementos acompañantes en las aureolas se encuentran en las formas minerales más diversas, mientras que los elementos meníferos se pueden presentar tanto en formas minerales como aminerales, predominando las aminerales a medida que aumenta la distancia con respecto a los cuerpos meníferos.

Interrelación de las aureolas primarias con las zonas de alteración circunmenífera

Las determinaciones circunmeníferas frecuentemente son procesos complejos de muchas etapas, que se pueden desarrollar tanto antes, al mismo tiempo como después del proceso de meniferación. La formación de las aureolas primarias tiene lugar sobre todo durante la deposición de la sustancia menífera; los procesos que dan lugar a la formación de las aureolas primarias actúan sobre las rocas ya alteradas y al mismo tiempo conducen a la ulterior variación de la composición química y mineralógica de éstas. De esta manera, las aureolas, en cierta medida se pueden considerar como formas de manifestación de las alteraciones circunmeníferas.

A pesar de la estrecha relación existente entre las aureolas primarias y las zonas de alteraciones hidrotermales de las rocas con los procesos de formación menífera, entre ellas existen diferencias sustanciales. La más importante de estas diferencias consiste en que durante la formación de las zonas alteradas hidrotermalmente ocurre en las rocas una considerable extracción, introducción y redistribución de las masas de los principales elementos formadores de rocas, mientras que la formación de las aureolas primarias están relacionadas sólo con la adición a las rocas encajantes de cantidades insignificantes de elementos químicos formadores de menas (frecuentemente menos del 1 %), los cuales pueden considerarse como impurezas dentro de la composición de las rocas encajantes, debido a esto, las zonas de las rocas alteradas hidrotermalmente frecuentemente son índices visibles para la búsqueda mientras que las aureolas son invisibles.

Otra diferencia entre las aureolas primarias y las alteraciones circunmenífera está dada por el carácter de la interrelación en el tiempo con respecto a la mineralización; las alteraciones hidrotermales pueden ser; premeníferas, meníferas y postmeníferas, mientras que las aureolas se originan durante las etapas de meniferación.

En la práctica es aconsejable dividir las alteraciones hidrotermales circunmeníferas en dos grupos:

1. Alteraciones que abarcan grandes extensiones (que sobrepasan a los cuerpos meníferos en decenas de veces) alrededor de los cuerpos meníferos y de las dislocaciones encajantes.
2. Alteraciones que ocupan extensiones muy limitadas alrededor de los cuerpos meníferos.

Al primer grupo pertenecen fundamentalmente las zonas de alteraciones premeníferas; las cuales, por sus dimensiones, son semejantes a las aureolas endógenas y su im-

portancia para la búsqueda es particularmente grande.

El segundo grupo de alteraciones es característico para las etapas meníferas y frecuentemente coinciden con las zonas de dispersión visible de los minerales.

De la misma forma que en los diferentes cuerpos minerales se puede establecer el paso paulatino de las menas más ricas a la mineralización diseminada y pobre de esta a las aureolas primarias, es posible observar la transición desde las alteraciones hidrotermales visibles hasta las invisibles. Esto ha sido confirmado por investigaciones petrográficas muy exactas.

La relación de las aureolas con las zonas de alteración premenífera de las rocas encajantes está condicionada por:

- a) el aumento de la porosidad y permeabilidad de las rocas como resultado de las alteraciones premeníferas tales como; la sericitización, la albitización y la skarnitización (V.A. Rosonov, 1961);
- b) la herencia de las vías de circulación de las soluciones durante el proceso multifásico de formación de los yacimientos.

Las aureolas primarias de los cuerpos meníferos siempre están situadas dentro de los límites de las zonas de alteración hidrotermal circunmenífera, pero no necesariamente las zonas de alteración premeníferas tienen que contener ni aureolas ni cuerpos meníferos. El carácter de la relación mutua entre las aureolas primarias y las alteraciones hidrotermales circunmeníferas se pueden observar en la figura 20 .

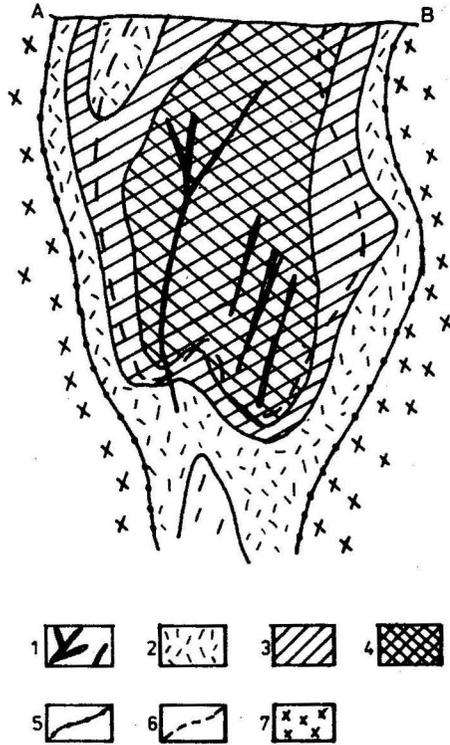


Fig. 20 Relación entre las alteraciones circunmeníferas (clarificación y piritización) con las aureolas de uranio (según I.N. Baronov; 1962): 1. cuerpos meníferos; 2. clarificación de poca intensidad; 3. clarificación de intensidad media; clarificación muy intensa; 5. contorno de la mineralización dispersa de pirita visible a simple vista; 6. contorno de la aureola primaria de uranio; 7. rocas encajantes no alteradas

Las alteraciones circunmeníferas tienen estructura zonal; la intensidad de las alteraciones en las proximidades de los cuerpos meníferos o de los canales por los cuales circularon las soluciones hidrotermales. Como demostró D.S. Korzhinski (1953), tal zonabilidad de las alteraciones de las rocas encajantes está relacionada con la diferente movilidad de los componentes durante el metasomatismo y es una característica propia de todos los procesos metasomáticos.

En calidad de ejemplo de estructura zonal de las alteraciones hidrotermales de las rocas encajantes se puede señalar las características de las zonas circunmeníferas de los cuerpos minerales de un yacimiento de uranio, localizado dentro de porfiritas cuarcíferas (E.M. Enichevski, 1963). El ancho de la banda de rocas que ha sufrido alteración alrededor de los cuerpos meníferos contiguos alcanza los 600 m, formando una franja con dirección noreste. La banda de roca alterada alrededor de los cuerpos independientes alcanza de 80-100 m, logrando sus dimensiones máximas al nivel de los cuerpos meníferos, acunándose bajo dichos cuerpos, convirtiéndose en una banda estrecha de aproximadamente un metro cerca de las dislocaciones meníferas. Más arriba de los cuerpos meníferos, por su realce, las rocas alteradas se prolongan a una distancia de hasta 100-300 m. Se observa una nítida zonabilidad alrededor de los cuerpos meníferos que contienen menas sulfurosas de uranio, tanto por la vertical como por la horizontal.

La zonabilidad de las rocas alteradas alrededor de los cuerpos antes mencionados es de la siguiente forma: paralelamente a los cuerpos meníferos se desarrolla una zona de argilitización, con una potencia que varía de 0,01 hasta 0,1 m, conjuntamente con albita y motmorillonita; después le siguen la zona de cuarsificación (0,1-0,5 m),

la zona de albitización (1-15 m) y la zona de piritización (10-50 m). Sobre los cuerpos meníferos, por las dislocaciones disyuntivas encajantes de menas, la argilitización se extiende hasta unos 20 m; la albitización de 20 a 60 m y la piritización hasta 150-300 m. Dentro de los límites de estas zonas se desarrollan aureolas de toda una serie de elementos tales como el uranio, el molibdeno, el plomo, el cobre, el zinc y la plata.

En calidad de ejemplo de una marcada zonalidad de las alteraciones circunmeníferas se puede señalar el yacimiento polimetálico de acaluevko. Aquí la masa de la sustancia extraída de la zona menífera, debido al metasomatismo, se depositó en la zona supramenífera, dando lugar a las formaciones metasomáticas de composición carbonato-silicia que se extienden hasta más allá de los 100 m sobre los cuerpos meníferos, por el realce. La parte inferior de la zona, situada directamente sobre la terminación superior de los cuerpos meníferos, presenta una composición de cuarzo, carbonatos y micas hidratadas y se caracteriza por la extracción de Ca, Mg y U y la introducción de Si, Al y Ti. La parte central está compuesta por cuarzo y carbonatos y la superior está enriquecida en talco (fig. 21).

En las zonas suprameníferas de los yacimientos de uranio se forman "sonabrerros de sílice, lo que, en principio, puede ser utilizado para pronosticar la mineralización en profundidad.

Frecuentemente dentro de las rocas alteradas hidrotermalmente se forman minerales indicadores no metálicos; así tenemos que en las rocas encajantes de los yacimientos polimetálicos se desarrollan las cloritas magnésicas (19-30 % de MgO), en las rocas alteradas de los yacimientos de calcopirita las cloritas son magnésicas, con un contenido de 12-19 % de MgO y 20-24 % de FeO y en las proximidades de los yacimientos sulfuro-casiteríticos se de-

sarrollan las doritas ferrosas con un contenido de 3-7 % de MgO y de 25-39 % de FeO.

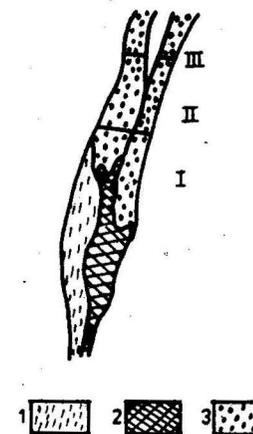


Fig. 21 Zonalidad vertical de las alteraciones hidrotermales sobre la zona menífera del yacimiento polimetálico "Acatuevskoe" (según V.V. Pollicarpochkin y L.V. Tausón, 1970): 1. esquistos carbonato-arcillosos; 2. cuerpo menífero; 3. alteración hidrotermal supramenífera: I. zona inferior; II. zona media; III. zona superior

Las sericitas, que se corresponden por su composición a la moscovita, son característica de los yacimientos hidrotermales de arsénico, oro y estaño.

TEMA 3: AUREOLAS SECUNDARIAS Y FLUJOS DE DISPERSIÓN

A veces la composición del mineral permite establecer el tiempo de su aparición. Así, las cloritas originadas durante las etapas meníferas de los yacimientos polimetálicos de calcopirita de Altai son ricas en alumina en comparación con las cloritas de las etapas premeníferas (A. Pozharitskaya 1958).

La zonalidad de las alteraciones hidrotermales es de gran utilidad para la búsqueda de los cuerpos meníferos ciegos, pero la efectividad de las alteraciones hidrotermales como indicadores de la mineralización aumenta notablemente si además se estudia el desarrollo de aureolas primarias dentro de sus límites, debido a que las aureolas son índices directos de la mineralización mientras que las alteraciones hidrotermales no necesariamente tienen que estar relacionadas con los cuerpos meníferos. Por la relación existente entre las aureolas primarias y las alteraciones hidrotermales de las rocas, durante la búsqueda mediante el estudio de las aureolas primarias se le presta especial atención a los sectores de desarrollo de rocas alteradas hidrotermalmente.

Por último queremos aclarar que la búsqueda de los cuerpos minerales, desde todos los puntos de vista, es mucho más factible mediante el estudio de las aureolas primarias que mediante el estudio de las alteraciones hidrotermales.

Cuando el corte de erosión intercepta a los cuerpos minerales y sus aureolas primarias, se produce el fenómeno de la dispersión de los elementos químicos y acompañantes, dando lugar a la formación de las aureolas secundarias y flujos de dispersión, los cuales aparecen desde el mismo momento en que el corte de erosión intercepta a las aureolas primarias en un nivel que contiene una reserva considerable de metales (productividad).

El concepto de aureola secundaria de dispersión fue formulado por primera vez por N.I. Safronov (1936) de la siguiente manera: "llamamos aureola de dispersión de un yacimiento a la zona de eluvio-deluvio (a veces aluvio) contigua a éste, enriquecida por un elemento valioso o característico para el yacimiento y que se puede encontrar en cualquier fase".

A.P. Salovov (1957, 1963) da la siguiente definición: "Las aureolas secundarias representan en sí zona de carácter local con concentraciones elevadas de elementos valiosos, dentro de las rocas del campo de dispersión, inmediatamente contiguas a los respectivos yacimientos minerales". En esta interpretación, por concepto de rocas del campo de dispersión se entiende las formaciones, preferiblemente, eluviales y deluviales.

A.P. Salovov hace hincapié en la unidad de los procesos de dispersión que se efectúan en cualquier fase (sólida, líquida, gaseosa o biogénica); por tal razón, dentro de los límites de las aureolas de dispersión, los elementos pueden pasar de una fase de dispersión a otra.

Para una correcta caracterización de las aureolas de dispersión es razonable utilizar una definición que reúna las ideas de N.I. Safronov y A.P. Salovov expresadas con anterioridad; de acuerdo con esto se puede dar la siguien-

te definición: una aureola secundaria representa en sí una zona contigua a un yacimiento mineral dado con elevadas concentraciones de elementos meníferos o acompañantes, característicos para dicho yacimiento. Estos elementos pueden estar en cualquier fase, limitada dentro del campo de dispersión, se ha formado como resultado de los procesos de descomposición físico-químico de los cuerpos meníferos y sus aureolas primarias.

En esta definición se subraya que las aureolas secundarias de dispersión se forman debido a los procesos que conducen a la destrucción de los cuerpos meníferos y sus aureolas. En ella se refleja también la posibilidad del paso de los elementos de una fase a otra, o sea, se refleja la interrelación de las diferentes fases dentro de la aureola secundaria de dispersión; de esta forma las aureolas litogeoquímicas, biogeoquímicas, atmogeoquímicas e hidroggeoquímicas es necesario considerarlas no como formaciones independientes, sino como diferentes fases de una aureola de dispersión única para un yacimiento mineral dado (fig. 22).

Además de las aureolas secundarias, durante el proceso de destrucción de los yacimientos minerales se forman los flujos de dispersión; por este concepto A.P. Solovov entiende "una zona con elevados contenidos de elementos valiosos (meníferos y acompañantes) que se desarrolla según una dirección del escurrimiento superficial o subterráneo, líquido, gaseoso o sólido, contigua a la aureola secundaria de un yacimiento dado y que se caracteriza por la disminución paulatina de las concentraciones anómalas del campo de dispersión, según esta dirección (fig. 23).

Con posterioridad estudiaremos con más detalle, las características de los flujos de dispersión y su relación con las aureolas secundarias.

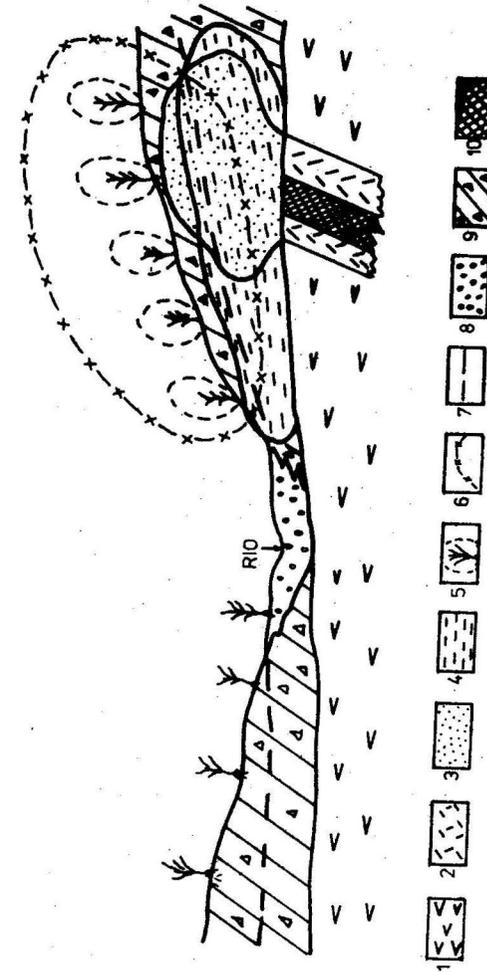


Fig. 22 Interrelación de las aureolas de dispersión de diferentes fases: 1. rocas encajantes; 2. aureola primaria; 3. aureola secundaria litogeoquímica; 4. aureola hidroggeoquímica; 5. aureola biogeoquímica; 6. contorno de la aureola atmogeoquímica (en la atmósfera y en la subterránea); 7. nivel freático; 8. corteza de intemperismo; 9. menas; 10. menas.

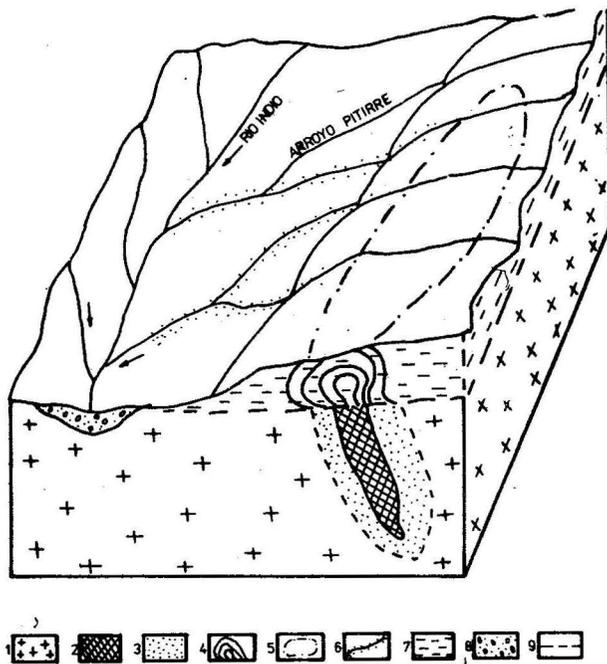


Fig. 23 Bloque-diagrama donde se puede observar la aureola secundaria y los flujos de dispersión litogeoquímica de un cuerpo mineral y la relación entre estos: 1. rocas encajantes; 2. cuerpo menífero; 3. aureola primaria; 4. aureola secundaria en perfil; 5. contorno de la aureola secundaria en la superficie; 6. flujos de dispersión; 7. eluvio; 8. aluvio

Ya esclarecido los conceptos de aureola secundaria y flujo de dispersión, pasaremos a estudiar aspectos fundamentales relacionados con la migración hipergénica de los elementos químicos, los cuales son de gran importancia para el estudio de estos índices de la mineralización.

Características de los procesos hipergénicos

Los procesos hipergénicos que revisten mayor importancia para el estudio de las aureolas secundarias y los flujos de dispersión son el intemperismo y la erosión.

El intemperismo es un proceso que conlleva a cambios en las rocas, cerca de la superficie, debido a la acción de factores físico, químicos y biológicos.

La erosión es un proceso que conduce al arranque y traslado de los productos residuales del intemperismo.

En los sectores donde predomina el intemperismo sobre la erosión, se desarrollan potentes cortezas de intemperismo, si por el contrario, predomina la erosión, entonces los productos del intemperismo no se concentran y los afloramientos de las rocas frescas son muy numerosos.

De acuerdo a los factores que le dan origen se pueden distinguir los siguientes tipos de intemperismo: físico, químico y bioquímico.

Intemperismo físico. Solamente conduce a la trituración mecánica de las rocas y los minerales, debido a agentes físicos tales como oscilaciones bruscas de la temperatura, la congelación del agua y la cristalización de las sales en los espacios vacíos de las rocas y los minerales, la acción de las raíces de las plantas, etc. Los productos del intemperismo físico dan lugar a formaciones mullidas de diferentes tipos y a las aureolas secundarias y flujos de dispersión mecánicos.

El intemperismo físico al producir la trituración mecánica aumenta la superficie activa de las rocas y minerales que facilita la acción del intemperismo químico.

Intemperismo químico. Este da lugar a cambios notables en la composición química y mineralógica de las rocas y los minerales, produciéndose debido a la acción de agentes químicos, dentro de los cuales desempeña el papel fundamental el agua, conjuntamente con el oxígeno y el gas carbónico disueltos en ella. El intemperismo químico ocurre como resultado de las reacciones de hidratación, hidrólisis, oxidación y carbonatación, conjuntamente con los procesos de lixiviación y disolución.

Como resultado del intemperismo químico de las rocas, los elementos químicos contenidos en ellas, en cierta medida, pasan a las aguas de las grietas y poros; de este modo, la concentración relativa de los elementos en la fase acuosa dependerá de la concentración de los mismos en las rocas y de su movilidad geoquímica. A.I. Perelman (1955) propuso utilizar en calidad de parámetro que caracterice la movilidad relativa de los elementos, durante su traslado de la fase sólida a la líquida, al coeficiente de migración acuosa (K_x).

$$K_x = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot C_x}$$

donde:

- C_x - concentración del elemento químico en las rocas, se expresa en % ;
- m_x - concentración del elemento químico en el agua, en mg/l ;
- a - mineralización del agua, en mg/l .

El valor de los coeficientes de migración acuosa para las condiciones oxidantes, que imperan en la superficie terrestre, para una serie de elementos están reflejados en la tabla 2 .

Tabla 2
COEFICIENTE DE MIGRACIÓN ACUOSA DE LOS ELEMENTOS EN UN RÉGIMEN OXIDANTE (SEGÚN A.I. PERELMAN)

Movilidad relativa de los elementos	K_x	Elementos químicos
Muy móviles	20-200	Cl, Br, I, S
Móviles	1-20	F, Na, Mg, Sr, Cu(2,8) Zn(1,6), U (3,6)
Poco móviles	0,05-1,0	Ni, Co, Mo, V, Mn, P, K, Si (0,07)
Inertes o prácticamente inmóviles	< 0,05	Fe(0,04), Al, Ti, Sc, Tr, Zr, Hf, Nb, Ta, Sn

Es necesario aclarar que muchos elementos químicos cambian su capacidad de migración en dependencia de las condiciones, el carácter de la variabilidad de la capacidad de migración de los elementos, de acuerdo a las condiciones del medio, se puede expresar mediante la magnitud del coeficiente de contraste, el cual desde el punto de vista cuantitativo se expresa por la relación existente entre los coeficientes de migración acuosa en condiciones oxidantes y en condiciones reductoras (KC_x).

$$KC_x = \frac{K_x(Ox)}{K_x(Red)}$$

donde:

KC_x - coeficiente de contraste;

$K_x(Ox)$ - coeficiente de migración acuosa en condiciones oxidantes;

$K_x(Red)$ - coeficiente de migración acuosa en condiciones reductoras.

Los elementos con coeficiente de contraste mayor que 1 presentan una mayor capacidad de migración acuosa en las condiciones oxidantes que en las reductoras; dentro de los elementos de este tipo con coeficientes muy elevados podemos señalar los siguientes: uranio, zinc, vanadio, cobre, molibdeno y níquel. El coeficiente de contraste del uranio es de 690, lo que indica que en condiciones oxidantes su capacidad de migración es mucho más elevada que en las condiciones reductoras; desde el mismo momento en que en la tierra se origina una atmósfera oxigenada el uranio comienza a ser lixiviado en la superficie, migrando en solución acuosa hasta los límites de los sectores con condiciones reductoras donde su capacidad de migra-

ción disminuye notablemente, lo que conduce a su concentración, es decir, estos sectores constituyen barreras geoquímicas para el uranio. De esta forma se explica la formación de los yacimientos de infiltración de uranio y de otros elementos.

Entre los elementos que presentan contraste inverso (inertes o poco móviles en condiciones oxidantes y móviles en medios reductores) se destacan los siguientes: hierro, manganeso, cobalto y radio.

Existen elementos que presentan la misma capacidad de migración tanto en medios oxidantes como reductores dentro de los cuales podemos señalar al zirconio y al tántalo.

De acuerdo a su capacidad de migración acuosa en las condiciones superficiales, los elementos químicos formarán como resultado de la migración (durante el intemperismo alrededor de los yacimientos) diferentes tipos de aureolas. Los elementos inertes o prácticamente inmóviles formarán aureolas mecánicas ya que sus compuestos son insolubles y solamente podrán migrar en forma de fragmentos de minerales; los elementos móviles y muy móviles formarán aureolas salinas, debido a la precipitación por determinadas causas de sus compuestos solubles y aureolas hidrogeoquímicas, debido a la permanencia en solución de compuestos solubles.

Intemperismo bioquímico. Se puede considerar como un subtipo dentro del intemperismo químico, donde el papel de agente fundamental es desempeñado por los microorganismos.

Durante los procesos hipergénicos la capa de suelo juega un importante papel en la formación de las cortezas de intemperismo y en la migración de los elementos químicos. El suelo es la zona de manifestación más intensa de los procesos biológicos, debido a que en él habitan una enorme cantidad de microorganismos y es donde siempre se

acumulan cierta cantidad de materia orgánica.

La capa de suelo se desarrolla en aquellos sectores donde el intemperismo es más intenso que la erosión. Ha sido establecido (A.P. Salovov, 1959) que la erosión de los productos residuales del intemperismo prácticamente no se produce en los sectores cubiertos con una capa de suelo, debido a que éstos permiten el amplio desarrollo de la vegetación.

La vegetación desempeña un papel muy importante en la migración de los elementos químicos dentro de los límites de las cortezas de intemperismo dentro de los límites de las cortezas de intemperismo; la cantidad de sustancia, en forma de sales, que son elevadas a los horizontes superiores anualmente como resultado de la actividad vital de las plantas, es del orden de 2,5 hasta 100 t por m². En las zonas septentrionales, donde el sistema de raíces de las plantas penetra hasta una profundidad de 15-20 m, este proceso puede conducir a la formación de aureolas secundarias de dispersión abiertas de la biogénica, sobre los yacimientos cubiertos por bastantes depósitos mullidos.

Trabajos realizados por B.B. Polinov, han demostrado que una gran parte de los componentes minerales de los suelos ha sido formada no como resultado de la descomposición directa de los minerales primarios, sino como causa de la mineralización de los restos de vegetales (por ejemplo, los fragmentos de líquenes).

Uno de los resultados más importantes del intemperismo es la aparición en la zona de hipergénesis de coloides dispersos, es decir, de partículas con un diámetro de 1×10^{-5} hasta 1×10^{-7} cm, tanto como resultado de la trituración como por reacciones químicas. Muchos coloides son formados como resultado de la acumulación y la descomposición de la materia orgánica en la zona de intemperismo.

Migración de los elementos en el perfil del suelo

La migración de los elementos químicos en el perfil del suelo reviste una gran importancia para la formación de toda una serie de aureolas secundarias y para poder revelar y estudiar estas aureolas es necesario conocer los aspectos relacionados con la migración de los elementos químicos en el perfil del suelo; esto es absolutamente indispensable para la realización exitosa de la metalometría, un método geoquímico que se fundamenta en el estudio de las aureolas que se desarrollan en el suelo.

El suelo es la capa superficial que tiene un espesor que oscila entre 0,2 y 2,0 m que se ha formado como resultado de la actividad vital de las plantas y los microorganismos. En el corte vertical del suelo se pueden diferenciar varios horizontes: A₀, A₁, A₂, B y C (fig. 24)

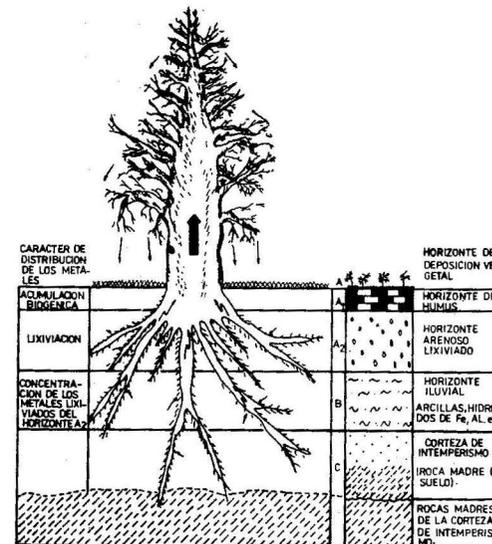


Fig. 24 Migración de los elementos químicos en el perfil del suelo

El horizonte superior (A_0) es la capa vegetal, en la cual se acumulan las partes muertas de las plantas-hojas, cáscaras, etc. - más abajo se encuentra el horizonte de humus (A_1), en el cual se acumula la sustancia húmica, que contiene fulvoácidos y ácidos húmicos solubles, así como un residuo no soluble. Bajo el horizonte de humus se desarrolla el horizonte lixiviado (A_2), empobrecido en coloides orgánicos, partículas arcillosas, bióxido de silicio, etc; luego le sigue el horizonte iluvial (B), en el cual ocurre la acumulación de una parte de las sustancias lixiviadas del horizonte suprayacente; por último, el horizonte inferior del suelo es el C, el cual se corresponde con las rocas primarias intemperizadas, que sirven de fuente de alimentación de las plantas (fig. 25).

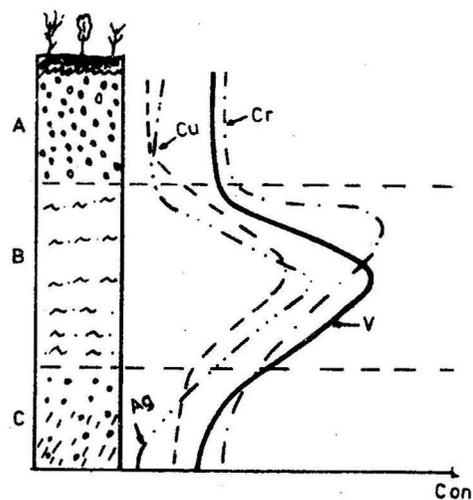


Fig. 25 Esquema generalizado de la distribución de las concentraciones de algunos elementos químicos en el perfil de un suelo laterítico (sin incluir el horizonte húmico).

En los suelos que se desarrollan sobre depósitos eluviales, en sectores donde las aguas subterráneas yacen profundamente y no influyen en los procesos de formación de los suelos, se observan claramente dos procesos completamente opuestos: la extracción y la acumulación biogénica.

La fuente de alimentación de las plantas son los horizontes inferiores del suelo, donde se desarrollan las finas raíces más ramificadas. Después que las plantas se mueren y se descomponen sus restos, en el horizonte superior del suelo, junto con el humus, se acumulan toda una serie de elementos absorbidos por las raíces desde los horizontes inferiores; hablando de otra forma, las plantas actúan como una especie de bomba que traslada los elementos desde los horizontes inferiores del suelo hasta los superiores. Este proceso recibe el nombre de acumulación biogénica.

El fenómeno de la acumulación biogénica es particularmente importante para el cobre y en menor medida para el Co, Ni, Cr, V, etc; otros elementos, dentro de los que se destaca el uranio, no experimentan la acumulación biogénica. Por otro lado, de los suelos son extraídos muchos elementos, en forma de combinaciones fácilmente solubles, por las aguas de las precipitaciones atmosféricas (Cu, Zn, U, etc).

Una parte de las combinaciones lavadas de los horizontes superiores son fijadas en los inferiores, a una profundidad de 0,5-1,0 m, formando el horizonte eluvial (horizonte de acumulación). Este horizonte (B) puede ser enriquecido por sales fácilmente solubles, lixiviadas de los horizontes superiores, por CaCO_3 , por soluciones coloidales de hierro y aluminio, etc. Una parte considerable de los compuestos lixiviados de los horizontes superiores del suelo no se queda en el horizonte eluvial, sino que siguen

más allá con las aguas, a la corteza de intemperismo, a las aguas freáticas y a las fluviales, por ejemplo, el uranio.

La determinación de la posición del horizonte eluvial es de gran importancia para la correcta recolección de las muestras durante la aplicación de la metalometría ya que permite establecer correctamente la profundidad óptima de muestreo.

Los suelos que se desarrollan en sectores donde el manto freático yace muy próximo a la superficie se enriquecen en toda una serie de elementos químicos aportados por las aguas subterráneas (uranio, vanadio, molibdeno, etc); este fenómeno ocurre en las estepas y desiertos dando lugar a las salinas y en los depósitos de turba de las zonas boscosas. En el perfil de estos suelos se desarrolló (bajo el horizonte de humos) el horizonte gleizado, que se caracteriza por su coloración gris azulada y su ambiente reductor.

Tipos genéticos de formaciones mullidas

Para la búsqueda geoquímica tiene una gran importancia el problema de la interrelación entre las rocas mullidas que se forman como resultado del intemperismo y la erosión de las rocas encajantes de menas y los productos de la destrucción de los cuerpos minerales y sus aureolas, es decir, la interrelación entre las formaciones mullidas y las aureolas secundarias y los flujos de dispersión.

En particular es importante diferenciar las formaciones autóctonas (formadas en situ o con poco transporte de los productos del intemperismo) de las autóctonas (con gran transporte).

A las formaciones autóctonas pertenecen, ante todo, los depósitos eluviales, de la corteza de intemperismo que aparecen como un resultado del intemperismo físico y

químico de las rocas.

Teniendo en cuenta el grado de descomposición química, en el perfil de la corteza de intemperismo se pueden distinguir los siguientes horizontes (de abajo hacia arriba).

- a) de grava;
- b) arcilloso-hidromicáceo ;
- c) arcilloso-caolínítico ;
- d) arcilloso-de terra rassa

Las dos últimas se caracterizan por la casi completa extracción de una gran cantidad de elementos químicos. Al mismo tiempo, cuando las cortezas de intemperismo se desarrollan sobre los yacimientos minerales en todos ellos se forman aureolas bien definidas.

Al grupo de las formaciones autóctonas pertenecen también las deluviales, que son productos del intemperismo desplazados por la acción de la fuerza de gravedad y de las precipitaciones atmosféricas. Los depósitos mullidos poco transportados, que conservan una clara relación con las rocas de origen, se denominan eluviales-deluviales. Dentro de estos depósitos se desarrollan aureolas secundarias un poco desplazadas respecto a los afloramientos meníferos.

Los depósitos producidos por los flujos temporales (el flujo de las lluvias en los desiertos y los conos de deyección en las desembocaduras de los arroyuelos de montañas) se llaman proluviales y los depósitos que se desarrollan en los pie de monte se denominan coluviales. Estos depósitos se consideran autóctonos por conservar aun relación con las rocas originarias.

A las formaciones alóctonas pertenecen los depósitos aluviales desarrollados en las llanuras de inundación de los ríos y en los deltas, los depósitos eólicos de las zonas desérticas y los depósitos fluvio-glaciales de las zonas polares. En la mayoría de los casos estos depósitos

juegan un papel negativo durante la búsqueda debido a que recubren los afloramientos de los cuerpos minerales y sus aureolas pero dentro de ellos se pueden desarrollar aureolas secundarias de dispersión superpuestas y en la actualidad se perfeccionan métodos geoquímicos que se fundamentan en estas aureolas.

Procesos de intemperismo sobre los afloramientos de los yacimientos y tipos fundamentales de aureolas secundarias a que dan lugar

Como resultado del intemperismo de los afloramientos de los yacimientos minerales del campo de dispersión hipergénico se forman las aureolas secundarias, cuyos parámetros están determinados fundamentalmente por la composición química y mineralógica de las menas que se destruyen.

Según el grado de estabilidad de las menas al intemperismo, V.I. Smirnov (1960), clasifican los yacimientos en cuatro grupos:

1. Yacimientos de menas de óxido e hidróxido de hierro, manganeso y aluminio; yacimientos de cromita, de casiterita, de wolframita, de mercurio, de oro en cuarzo y de platino.

Los minerales que entran en la composición de las menas de estos yacimientos prácticamente no se alteran, desde el punto de vista químico y mineralógico, durante el transcurso de los procesos de intemperismo. Estas menas, producto del intemperismo físico dan lugar a aureolas secundarias mecánicas y la erosión conduce a la formación de flujos de dispersión mecánicos.

2. Yacimientos de menas carbonatadas de hierro y manganeso, yacimientos de plomo, de arsénico, de bismuto y de antimonio. Bajo los agentes químicos del intemperismo estas menas varían su composición mineralógica, dando

lugar a minerales secundarios estables en las condiciones superficiales, sin una extracción sustancial de metales. La dispersión de las menas ocurre mecánicamente y por tal razón dan lugar a flujos y aureolas de dispersión mecánicas.

3. Yacimientos de menas sulfurosas de zinc, de cobre, de níquel, de molibdeno, de oro y de uranio; en las zonas de oxidación de estos yacimientos los metales pasan a las soluciones acuosas y se introducen por los poros y grietas de las rocas encajantes formando aureolas salinas e hidrogeoquímicas.

4. Yacimientos de calcopirita y polimetálicos; en las zonas de oxidación de estos yacimientos se acumulan elementos que no pertenecen a las menas primarias, formando en los sombreros de hierro aureolas salinas débiles. Dentro de estos elementos podemos mencionar los siguientes: molibdeno, vanadio, arsénico, fósforo, uranio y otros.

Acumulaciones hipergénicas

Paralelamente con el intemperismo y la erosión intensa de las rocas y los yacimientos, en la zona de hipergénesis aparecen acumulaciones secundarias, cuyas dimensiones puede alcanzar a los de los yacimientos industriales. Como magnífico ejemplo de esto pueden servir los yacimientos ferroniquelíferos que se desarrollan en las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas de Cuba, Nueva Zelanda y los Urales.

El estudio de todos los factores que conducen a la concentración de los elementos químicos dentro de los límites de la zona de hipergénesis es de enorme importancia para la correcta interpretación de los resultados de la búsqueda geoquímica en estas condiciones, porque permite la diferenciación de las anomalías geoquímicas originadas

por los procesos de acumulación que no guardan relación con los yacimientos minerales de las aureolas secundarias y los flujos de dispersión que se originan como resultado de la destrucción de los yacimientos y de la dispersión de las sustancias minerales contenidas en ellas, por lo que si guardan relación con los yacimientos y constituyen indicadores directos de los mismos.

A.I. Perelman propone llamar a los sectores de la zona de hipergénesis donde tiene lugar una disminución notable de la capacidad de migración de los elementos químicos barreras geoquímicas, distinguiendo los siguientes tipos: oxidantes, reductores, de neutralización, de absorción, de evaporación y mecánicas o gravitacionales.

1. Barreras oxidantes. Estas barreras están relacionadas con sectores donde existe un elevado potencial de oxidación (Eh); la deposición de los elementos químicos puede ocurrir en aquellos sectores de la superficie hacia donde afluyen las aguas reductoras, como es el caso de las aguas freáticas en general y las sulfhídricas en particular. En los sectores de desarrollo de barreras oxidantes tiene lugar la deposición de azufre, manganeso, cobalto y radio entre otros elementos.

2. Barreras reductoras. Están asociadas a sectores con bajo potencial de oxidación, hacia donde afluyen aguas superficiales enriquecidas en oxígeno; el carácter reductor puede ser cuando por la existencia de sulfuros, ácido sulfhídrico, las combinaciones orgánicas u otras sustancias. Dentro de los límites de los sectores reductores se puede acumular uranio, vanadio, zinc, arsénico, selenio, plomo, plata y otros elementos.

Tanto en los sectores oxidantes como reductores, la acumulación de los elementos ocurre debido a reacciones de oxidación-reducción que se verifican.

3. Barreras de neutralización. Estas barreras se desarrollan en aquellos sectores de la zona de hipergénesis donde ocurre la interacción de soluciones contrastantes por el carácter de su acidez-basidad (Ph); la acumulación de los elementos químicos ocurre debido a reacciones de neutralización. Estas reacciones pueden ocurrir cuando las aguas que circulan por los yacimientos sulfurosos, durante su migración, se ponen en contacto con las aguas básicas y neutras de las rocas encajantes; en estas condiciones tiene lugar la precipitación de los hidróxidos de diferentes metales: Se, Co, Ni, Pb, etc.

4. Barreras de absorción. Estas barreras se desarrollan en aquellos sectores donde existen acumulaciones de coloides naturales, los cuales tienen la propiedad de concentrar grandes masas de elementos químicos. Los coloides cargados negativamente, las arcillas, las turbas, los carbones pardos, los hidróxidos de hierro y manganeso, la sílice y las combinaciones orgánicas, son capaces de sorber los cationes sencillos y complejos de toda una serie de metales. Los coloides cargados positivamente son capaces de absorber los aniones en cuya composición entran elementos tales como uranio, molibdeno, fósforo, arsénico y otros.

5. Barreras de evaporación. Como resultado de la evaporación intensa, en determinados sectores de la superficie terrestre, puede ocurrir la acumulación de muchos elementos químicos; estas barreras geoquímicas se desarrollan fundamentalmente en las regiones desérticas y semidesérticas. En estas regiones, en los sectores donde el manto freático yace muy próximo a la superficie, debido a la intensa evaporación, se desarrollan las salinas, en las cuales se concentran el uranio, el molibdeno, el zinc, el vanadio, el litio y otros elementos.

6. Barreras gravitacionales o mecánicas. Estas barre-

ras constituyen un grupo especial; ellas dan lugar a la acumulación de los minerales estables, al intemperismo y se desarrollan en sectores donde el relieve favorece la deposición de los productos de la erosión. Estas barreras dan lugar a la acumulación de todos aquellos elementos capaces de formar minerales estables en las condiciones hipergénicas.

Las diferentes barreras geoquímicas pueden dar lugar a determinados tipos de yacimientos minerales de importancia económica, pero en la inmensa mayoría de los casos no se conjugan todos los factores necesarios para la formación de un yacimiento y en su lugar se origina un sector de mineralización dispersa sin ninguna importancia desde el punto de vista económico. Estos sectores de acumulación son detectados durante la realización de los trabajos geoquímicos de búsqueda y es de suma importancia diferenciarlos de las aureolas geoquímicas, cuestión que es completamente posible en la actualidad mediante el estudio de las características de las anomalías sobre todo mediante el carácter de la distribución de los elementos químicos.

Durante la realización de los trabajos geoquímicos de búsqueda, mediante el estudio de las aureolas secundarias y los flujos de dispersión, es sumamente importante conocer los diferentes tipos de barreras geoquímicas que se pueden desarrollar en la zona objeto de estudio.

Particularidades de la migración de los elementos en los diferentes paisajes

Una gran importancia para la teoría y la práctica de la búsqueda geoquímica tiene el estudio de la geoquímica del paisaje, hecho por V.V. Polinov. De acuerdo con las concepciones modernas, se denomina paisaje geoquímico elemental a un sector de la superficie terrestre caracterizado por el desarrollo dentro de sus límites de un mis-

mo tipo de suelo, por un mismo tipo de formación mullida y por iguales condiciones de migración de los elementos químicos.

La idea fundamental sobre el estudio de la geoquímica del paisaje, viene dada por la interrelación de la migración de los elementos químicos en un grupo de paisajes situados uno al lado del otro, formando una conjugación geoquímica o un paisaje geoquímico conjugado. Dentro de los límites de las cuencas fluviales se pueden distinguir los siguientes paisajes elementales que forman parte de un paisaje geoquímico conjugado (fig. 26).

1. Eluviales (autóctonos). Este tipo de paisaje se desarrolla en las divisorias de las aguas de las cuencas fluviales; en ellos el manto freático se encuentra a gran profundidad y no influye en la composición de los suelos y las plantas. Como resultado de la erosión, los horizontes superiores del suelo son barridos constantemente, mientras que nuevos espesores de rocas entran en la esfera de acción de los procesos de pedogénesis (formación de suelos). Según la expresión de V.V. Polinov, es como si los suelos de las divisorias de las aguas devoraran las mismas, reduciendo su altura sobre la base de erosión (1958).

En los límites de los paisajes eluviales tiene lugar una intensa oxidación y extracción de los elementos químicos. Los procesos que favorecen la concentración son la evaporación y la sorción.

Las aureolas de dispersión detectados en los paisajes eluviales yacen directamente por encima de los yacimientos a partir de los cuales se originaron.

2. Paisajes transeluviales. Se desarrollan en las laderas de las cuencas fluviales, donde es posible un flujo lateral que posibilita la dispersión de las sustancias en las fases sólida y líquida y las aureolas de dispersión

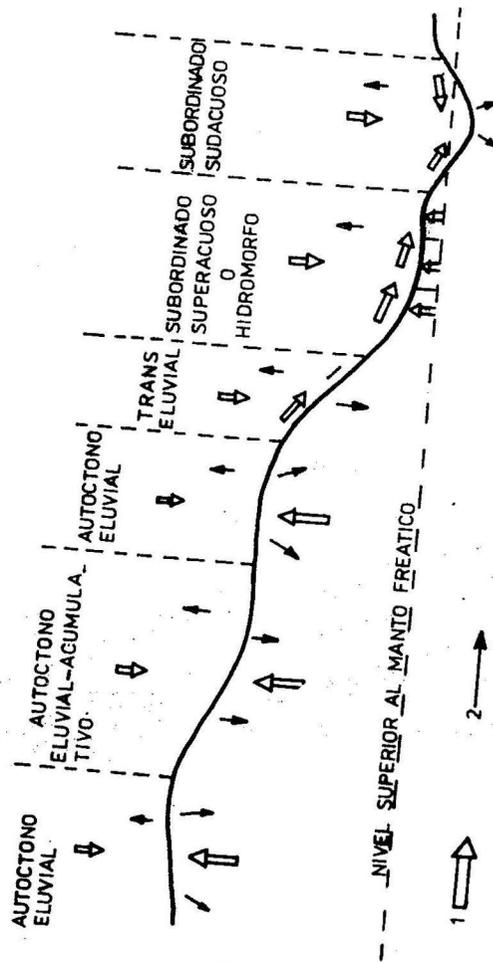


Fig. 26 Paisaje geoquímico conjugado (según B.B. Polinov, modificado por el autor): 1. aporte de sustancia al paisaje (de la atmósfera, de las aguas subterráneas, de las rocas madres, las plantas, etc); 2. extracción de sustancia del paisaje por las aguas subterráneas y superficiales, las plantas, por el aporte hacia la atmósfera, etc .

dentro de este paisaje se caracterizan por su desplazamiento lateral con respecto a los cuerpos minerales laterales abajo.

3. Paisajes eluviales acumulativos. Estos paisajes se desarrollan en los pie de montañas, donde tiene lugar una disminución brusca del proceso de dispersión de los elementos químicos con la consiguiente acumulación de los mismos debido al fenómeno de sorción. En estos paisajes se desarrollan aureolas desplazadas con respecto a los cuerpos meníferos.

4. Paisajes superacuosos o hidromorfos. Se forman en zonas bajas del relieve, donde las aguas subterráneas yacen próximas a la superficie y por capilaridad pueden ascender hasta el sistema radical de las plantas. En estos paisajes ocurre la acumulación de toda una serie de elementos que migran desde los paisajes eluviales vecinos, mediante el escurrimiento líquido y sólido. Aquí la capa de suelo crece de abajo hacia arriba, pudiendo no estar relacionada con las rocas del basamento.

En los paisajes hidromorfos frecuentemente se forman aureolas secundarias de dispersión acumulativas, las cuales constituyen índices para la búsqueda de yacimientos situados en los paisajes eluviales. Debido a la gran dependencia de los paisajes hidromorfos de los eluviales, con frecuencia se les denominan paisajes subordinados.

5. Paisajes subacuáticos. Estos paisajes concuerdan con los depósitos de agua (ríos y lagos), en los cuales se acumulan los productos móviles del intemperismo como resultado de la sorción por parte de los sedimentos de fondo limo-arcillosos; debido a esto en los cauces de los ríos se crean flujos de dispersión salinos y en los fondos de los lagos se crean anomalías acumulativas.

La diferencia en la concentración de los distintos elementos entre los paisajes eluviales (autóctonos y los

subordinados (superacuados o hidromorfos) determina el contraste geoquímico del paisaje conjugado, que permite evaluar el grado de extracción de un elemento dado de las áreas elevadas de las cuencas fluviales y su posterior acumulación en las partes bajas del relieve.

La interpretación correcta de las particularidades geoquímicas de los diferentes paisajes permite elegir la variante óptima de los métodos para la búsqueda geoquímica y además constituyen el fundamento para la interpretación de las anomalías reveladas. Con este fin se confeccionan mapas de paisajes geoquímicos de las diferentes regiones, donde se reflejan el espesor y la composición de las cortezas de intemperismo y de otros depósitos mullidos, la distribución de las anomalías geoquímicas en los diferentes horizontes de los depósitos mullidos y otras particularidades de los paisajes geoquímicos.

Clasificación de las aureolas secundarias de dispersión litogeoquímicas

Después de haber estudiado los aspectos fundamentales relacionados con los procesos hipergénicos en la superficie terrestre pasaremos al estudio de la clasificación de las aureolas secundarias litogeoquímicas, las cuales, dentro de las aureolas secundarias, son las más importantes porque brindan la información más objetiva respecto a la existencia de la mineralización, por otro lado, estas aureolas son más fáciles de revelar y de interpretar que las otras aureolas secundarias de dispersión.

Las aureolas secundarias de dispersión se pueden clasificar atendiendo a toda una serie de factores como son: la forma en que migran y se encuentran los elementos indicadores, la relación genética de las aureolas con el medio encajante, el mecanismo de formación, la relación espacial con respecto a los afloramientos de los cuerpos mi-

nerales, la accesibilidad a su descubrimiento, etc.

A continuación pasaremos a la clasificación general en detalle:

- 1) por la forma en que se dispersan y se presentan los elementos indicadores las aureolas se clasifican en mecánicas y salinas;
- a) mecánicas. Estas aureolas se forman debido a la dispersión mecánica de los elementos indicadores, en forma de fragmentos de minerales estables en las condiciones superficiales. Ellas se desarrollan fundamentalmente en los depósitos eluviales y deluviales;
- b) salinas. Estas aureolas se originan debido a la dispersión de los elementos indicadores en forma de compuestos solubles, disueltos en las aguas. La masa fundamental de los elementos indicadores se presentan en forma de minerales secundarios dentro de los poros y grietas, debido a la precipitación de las sales o sorcionados dentro de las arcillas, los coloides y otros compuestos que tienen la capacidad de concentrar los elementos que migran disueltos en las aguas, fundamentalmente debido a la sorción de los cationes simples o complejos de los diferentes metales.

Las aureolas salinas se relacionan tanto con formaciones autóctonas como alóctonas; son complejas por su composición y dentro de sus límites las aureolas de los elementos por separado presentan diferentes dimensiones, debido a sus diferentes capacidades de migración en las condiciones superficiales; pero las áreas de máxima concentración de cada una de ellas coinciden, determinando los hipercentros de las aureolas complejas, los cuales precisan la posición de los yacimientos minerales.

2. Por su relación genética con el medio encajante las aureolas secundarias se clasifican en singenéticas o residuales y epigenéticas o superpuestas. (fig. 27) .

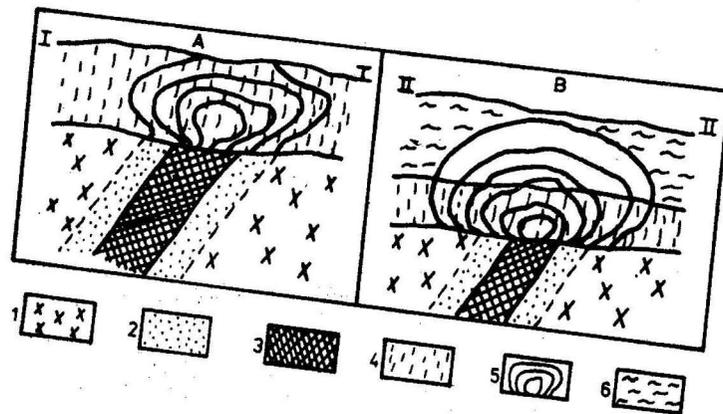


Fig. 27 Aureolas secundarias litogeoquímicas de dispersión: A, singenética (residual), B, epigenética (superpuesta); 1. rocas encajantes; 2. aureola primaria; 3. mecnicas; 4. sedimentos autóctonos eluviales; 5. aureolas secundarias; 6. sedimentos alóctonos (aluvio);

a) singenéticas o residuales. Estas aureolas se desarrollan en las formaciones mullidas autóctonas, originándose conjuntamente con ellas en los secto-

res donde afloran los cuerpos meníferos o sus aureolas primarias; pueden ser tanto mecánicas como salinas;

b) epigenéticas o superpuestas. Se desarrollan en los depósitos alóctonos que recubren los afloramientos de los cuerpos minerales y sus aureolas secundarias residuales; se originan como resultado de los procesos de difusión e infiltración de los elementos contenidos en los cuerpos minerales y sus aureolas secundarias residuales y también como resultado de la migración biogénica de dichos elementos, debido a la actividad vital de las plantas. Las aureolas superpuestas como regla general son salinas, conociéndose casos muy aislados de aureolas mecánicas de este tipo, formadas como resultado de la actividad de animales excavadores (guanos, topos, cangrejos, etc) que al construir sus madrigueras transportan materiales desde los depósitos autóctonos hacia los alóctonos.

3. Por su relación espacial con los cuerpos minerales las aureolas secundarias de dispersión se clasifican en circunmeníferas y desplazadas (fig. 28) .

a) circunmeníferas. Se desarrollan alrededor de los afloramientos de los cuerpos minerales, dentro de las formaciones eluviales (fig. 28 A). Pueden ser tanto salinas como mecánicas ;

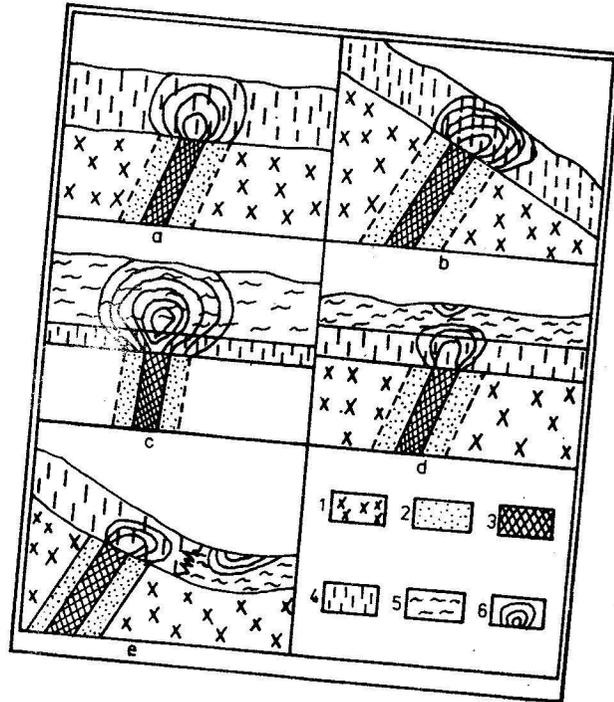


Fig. 28 Tipos de aureolas secundarias de acuerdo a su relación espacial con los cuerpos meníferos: A) circunmenífera, B) desplazada supramenífera, D) desplazada supramenífera acumulativa, E) acumulativa desplazada lateralmente. 1. rocas encajantes 2. aureola primaria; 3. mena; 4. depósitos autóctonos (eluvio); 5. depósitos alóctonos (aluvio); 6. aureola secundaria.

b) desplazadas. Los componentes de estas aureolas han experimentado un marcado desplazamiento en sentido lateral o verticalmente. La traslación lateral de los elementos indicadores, según la dirección del escurrimiento sólido o líquido por las laderas, se puede efectuar mecánicamente, en la fase sólida, dando lugar a aureolas mecánicas o en forma de sales disueltas en las aguas, dando lugar a aureolas desplazadas salinas (fig. 28 B). Si el desplazamiento de los elementos indicadores se realiza de abajo hacia arriba, debido a la difusión o a la infiltración, entonces, las aureolas desplazadas se denominan suprameníferas (fig. 28 C).

Las aureolas desplazadas lateralmente se desarrollan en las formaciones eluviales-deluviales y deluviales; las suprameníferas están contenidas en formaciones alóctonas, es decir, son superpuestas.

Un tipo especial dentro de las aureolas desplazadas son las acumulativas. Estas aureolas en los sectores donde, por determinados motivos, ocurre una disminución notable de la capacidad de migración de los elementos indicadores y pueden ser tanto suprameníferos como desplazados lateralmente y en ambos casos son superpuestos.

Las aureolas desplazadas suprameníferas acumulativas (fig. 28 D) se originan debido a la concentración, en determinados sectores, de los elementos que provienen de las zonas donde se produce una dispersión intensa, por tal razón entre las zonas de dispersión intensas y las de acumulación existen sectores intermedios de bajas concentraciones.

Las aureolas acumulativas desplazadas lateralmente se producen debido a la concentración, en las áreas de desarrollo de los paisajes subordinados de los elementos indicadores que migran desde las áreas de dispersión inten-

sa, representadas por los paisajes eluviales (autóctonos). Al igual que en el caso anterior, entre las áreas de dispersión intensa y las de acumulación se crean sectores de concentraciones bajas (o normales) fig. 28 E.

Es muy importante aclarar que las aureolas acumulativas, aunque se forman debido a la existencia de las barreras geoquímicas en las condiciones superficiales, se diferencian notablemente de las acumulaciones hipergénicas (sectores de acumulación) por el carácter de su formación. Las acumulaciones hipergénicas son un producto de la migración en el sentido de la concentración, es decir, desde las áreas de bajas concentraciones hacia un sector donde existe una determinada barrera geoquímica, mientras que las aureolas acumulativas son un producto de la capacidad de migración contrastante de los elementos indicadores durante el proceso de dispersión de los mismos desde los yacimientos minerales donde se encuentran concentrados, es decir, son un producto de la tendencia a la concentración de estos elementos, bajo determinadas condiciones, durante el proceso general de dispersión de los elementos desde las áreas de altas concentraciones hacia las de bajas concentraciones.

4. Por la accesibilidad a su descubrimiento las aureolas secundarias de dispersión litogeoquímicas se clasifican en abiertas y cerradas.

- a) abiertas. Dentro de este grupo se incluyen todas las aureolas secundarias litogeoquímicas que afloran directamente a la superficie o que se encuentran cubiertas por formaciones mullidas con un espesor inferior a los 2 m ;
- b) cerradas. Dentro de este grupo se incluyen todas las aureolas secundarias litogeoquímicas estudiadas con anterioridad, pero que se encuentran cubiertas por formaciones mullidas con un espesor superior a los 2 m , distinguiéndose las lixiviadas y las cubiertas (fig. 29)

106

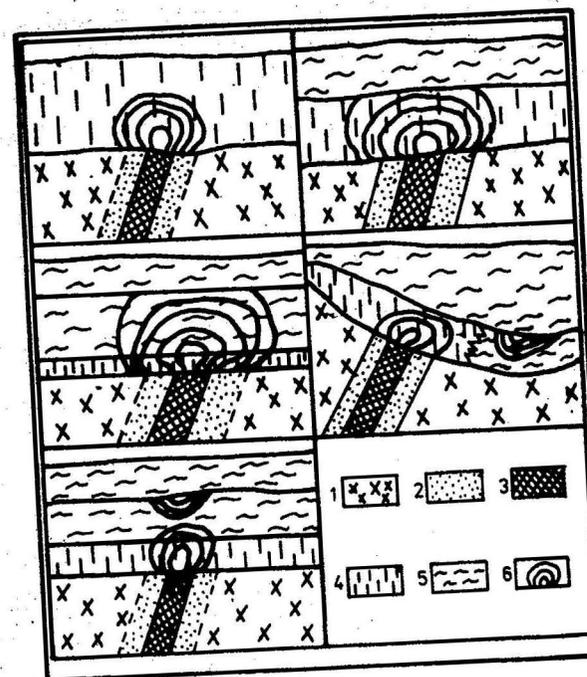


Fig. 29. Tipos de aureolas secundarias de dispersión litogeoquímicas cerradas. A) lixiviada, B) residual cubierta, C) desplazada supramenifera cubierta, D) acumulativa desplazada lateralmente cubierta, E) acumulativa desplazada supramenifera cubierta: 1. rocas encajantes; 2. aureolas primarias; 3. mena; 4. depósitos autóctonos; 5. depósitos alóctonos; 6. aureolas secundarias

TEMA 4 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS GEOQUÍMICAS

Consideraciones generales

Una de las particularidades característica de los métodos geoquímicos para la búsqueda es el muestreo masivo de diversas formaciones naturales y la determinación en las muestras recolectadas de las concentraciones relativamente bajas de los elementos químicos, cercanas a los valores de fondo o un poco más elevadas, pero que no alcanzan el nivel de los contenidos mínimos en las menas.

Actualmente, durante la realización de los trabajos geoquímicos para la búsqueda, se utilizan los más diversos métodos de análisis: espectral, fotométrico de llama, químico, palorográfico, luminiscente, radiométrico, de activación neutrónica, etc.

La efectividad práctica de la búsqueda geoquímica depende de la posibilidad de utilizar métodos de análisis que posean las siguientes características: alta sensibilidad, suficiente exactitud, alta productividad y bajos costos.

La sensibilidad de un determinado método de análisis está dada por la menor cantidad de sustancia que éste es capaz de detectar y medir; esta concentración mínima que es capaz de revelar y medir constituye el límite o umbral de sensibilidad del método de análisis. Para la búsqueda geoquímica tiene una importancia fundamental la determinación de las concentraciones de toda una serie de elementos meníferos y acompañantes sumamente dispersos, por lo que se hace necesario emplear métodos de análisis altamente sensibles (con umbrales muy bajos) para poder revelar las concentraciones al fondo e incluso anómalos.

La sensibilidad de los métodos de análisis puede ser diferente para los distintos elementos; así tenemos que el

Las aureolas lixiviadas. Se encuentran cubiertas por espesores superior a los 2 m de materiales autóctonos. Estas aureolas se desarrollan en las cortezas de intemperismo de aquellos yacimientos cuyas menas experimentan una meteorización química intensa, lo que da lugar a que los elementos que conforman las aureolas residuales sean lavados de la parte superficial y arrastrados hacia las profundidades. A veces en la zona de lixiviación se desarrollan aureolas abiertas de determinados elementos satélites (fig. 29 A).

Las aureolas cubiertas. Son aquellos, como su nombre lo indica, cubiertas por formaciones alóctonas con espesores superior a los 2 m (fig. 29 B-C-D-E). Es bueno señalar que existen aureolas cerradas, cubiertas por rocas sedimentarias de períodos geológicos antiguos, asociadas a superficies de discordancias (fig. 30).

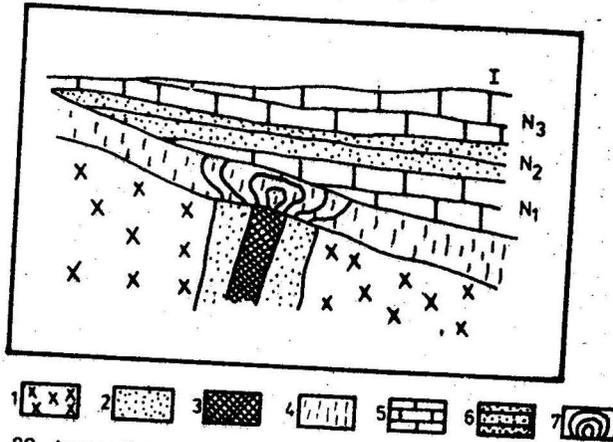


Fig. 30 Aureola secundaria desarrollada en una antigua superficie de erosión cubierta por sedimentos consolidados del neógeno y más antiguos: 1. rocas encajantes; 2. aureola primaria; 3. mena; 4. antigua corteza de intemperismo; 5. calizas; 6. areniscas; 7. aureola secundaria

análisis espectral de emisión posee bastante sensibilidad para la determinación del cobre, el plomo, la plata y otros elementos, mientras que la sensibilidad es muy baja para el antimonio, el wolframo, el oro, el tántalo, el uranio y otros.

Para elevar la sensibilidad del método de análisis frecuentemente se utiliza el enriquecimiento o beneficio previo del elemento en la muestra por medio del intercambio iónico, de la cosedimentación, de la sublimación o de la extracción mediante el empleo de disolventes.

La exactitud de un determinado método de análisis está dada por la diferencia existente entre la concentración real de una sustancia en una muestra dada y la concentración revelada por el método de análisis; si la diferencia es muy grande la exactitud es baja y viceversa.

La exactitud en la determinación de un mismo elemento por distintos métodos puede ser diferente. Así, para la determinación de las concentraciones de cobre, cobalto y níquel, el análisis a la gota y la cromatografía poseen una exactitud satisfactoria, la calorimetría alta y el método roentgenoespectrométrico dan la exactitud más elevada.

Durante la realización de los trabajos de búsqueda es posible la utilización de métodos de análisis que posean una exactitud satisfactoria, pero durante la ejecución de trabajos experimentales y además en la interpretación y evaluación de las anomalías, la exactitud del análisis de las muestras geoquímicas debe ser elevada.

El costo de los análisis es uno de los aspectos más importante durante los trabajos geoquímicos de búsqueda debido a que durante los mismos se hace necesario determinar la concentración de toda una serie de elementos indicadores en un gran número de muestras geoquímicas (miles y decenas de miles). El bajo costo de los análisis

aumenta considerablemente la efectividad de la búsqueda geoquímica.

El aspecto de los costos de los análisis tiene una importancia muy grande cuando existe la necesidad de adquirir equipos de laboratorio de precios elevados; pero si la cantidad de muestras a analizar es bastante grande, el costo de una determinación, utilizando métodos de análisis instrumental puede resultar el más bajo.

Es muy importante que la metodología de análisis sea simple y pueda realizarse por un personal de calificación media. Una particularidad positiva de los métodos de análisis es la portatividad del equipamiento necesario y la posibilidad de realizar los análisis en un laboratorio de campo, cerca del sector donde se realiza la búsqueda.

En su aspecto general, la metodología para la determinación de las bajas concentraciones de los elementos en las muestras geoquímicas comprende cuatro etapas:

- a) elaboración de la muestra y preparación para su transportación y almacenamiento;
- b) desintegración parcial o total de la muestra con el fin de separar el elemento que se analizará en forma cómoda para su análisis;
- c) separación de los componentes que interfieren la realización del análisis;
- d) determinación de la concentración del elemento objeto de estudio.

Durante la utilización de algunos tipos de análisis pueden ser omitidas una o dos de las etapas intermedias señaladas con anterioridad, o algunas etapas pueden unirse en una sola operación.

La elección de un método concreto se determina teniendo en cuenta las propiedades de los elementos a analizar, la forma en que se encuentran en el material de la muestra, la sensibilidad y exactitud necesaria y los lí-

índices técnico-económicos (productividad y costos).

La forma en que se encuentra el elemento en la muestra determina el método de desintegración de la misma. Si el elemento a analizar se encuentra dentro de la red cristalina de los minerales primarios silicatados (feldespatos, piroxenos, anfíboles, etc) se utiliza la desintegración completa de la muestra mediante su fusión con hidróxidos alcalinos, mediante la evaporación en el arco eléctrico o por medio de la disolución con agua regia o con ácido fluorhídrico. Si el elemento está presente en un mineral que se desintegra relativamente fácil (sulfuro, magnetita, etc) basta con utilizar un ácido orgánico concentrado o diluido. Las formas no isomórfica y sorbida de los elementos en las rocas se llevan a solución mediante un disolvente débilmente alcalino o con agua destilada.

La desintegración de la muestra deberá propiciar la detección del elemento de forma cómoda. En particular, para la aplicación del método colorimétrico es necesario que el elemento esté en solución acuosa y en forma iónica; los elementos que interfieren el análisis se eliminan mediante su fijación en forma de iones complejos. La determinación con suficiente exactitud por medio del análisis roentgenoespectral es posible sólo en aquellos casos en que el contenido de hierro en las muestras es lo suficientemente bajo; por tal razón, habitualmente se hace necesario separar el hierro previamente mediante el empleo de disolventes orgánicos.

Análisis espectral de emisión

Para la determinación de las concentraciones de los elementos químicos en la fase sólida el método más frecuentemente utilizado es el espectral de emisión, el cual se basa en el estudio del espectro de la radiación luminosa de la materia. Este método reúne toda una serie de

características que lo hacen ser el más eficaz para la búsqueda geoquímica; estas características son las siguientes: elevada sensibilidad para un número elevado de elementos indicadores; suficiente exactitud para cumplir los objetivos de la búsqueda geoquímica; gran complejidad, que le permite determinar simultáneamente hasta 35 elementos en cada muestra; alta productividad y bajo costo de los análisis de las muestras individuales.

Dentro de otras particularidades del análisis espectral de emisión se debe señalar que éste no requiere de personal altamente calificado y que sus resultados, en forma de espectrogramas, se pueden almacenar y reinterpretar en caso de que sea necesario.

Por todas las características mencionadas con anterioridad, el método de análisis espectral de emisión es de importancia fundamental para los trabajos de búsqueda e investigaciones geoquímicas, se puede afirmar que el desarrollo exitoso de los métodos geoquímicos para la búsqueda no hubiese sido posible sin la existencia del análisis espectral de emisión.

En la práctica de la búsqueda geoquímica se utilizan diversos tipos de análisis espectral. Según el método de deciframiento de los espectrogramas se distinguen el análisis espectral cuantitativo y el semicuantitativo.

1. El análisis espectral semicuantitativo tiene las siguientes variantes:

- a) método de los espectros de comparación. Este se basa en la comparación de las líneas espectrales más características para el elemento dado (analíticas). Su exactitud es de 30-50 % ;
- b) método de la aparición y amplificación de las líneas espectrales. La esencia de este método consiste en que con el aumento del contenido del elemento que se examina aparecen nuevas líneas analíticas.

ticas. La aparición de líneas de cierta longitud de onda se corresponde con el contenido concreto del elemento que se determina; al mismo tiempo, las líneas que se corresponden con los contenidos más bajos se hacen más intensas. La exactitud de este método es de 25-40 %.

La desventaja de este método está dada por la necesidad de examinar unas cuantas líneas espectrales para cada elemento;

c) Método del debilitamiento gradual de los espectros. Su esencia consiste en que la intensidad de la iluminación de la hendidura del espectrógrafo por la llama del arco, que contiene los productos de la evaporación de la muestra, se debilita, por medio de un sector giratorio o del debilitador de platino, en tres órdenes (10^3 veces). Como resultado de esto, cada una de las líneas espectrales en el espectrograma se divide en una serie de sectores (hasta diez) de intensidad decreciente, limitado por el umbral de sensibilidad de la placa fotográfica. Por este método, sobre la base del examen de una o dos líneas del elemento en cuestión, se determina su contenido dentro de límites bastante amplios (desde n.0,001 hasta n.1 %) con una exactitud de 12-20 %.

2. Los métodos cuantitativos del análisis espectral se basan en la medición óptica de la intensidad absoluta del ennegrecimiento de las líneas espectrales de los diferentes elementos, la cual es proporcional a la concentración del elemento que se analiza en la muestra.

El análisis espectral cuantitativo se realiza sólo para un elemento dado. Su exactitud es de 5-12 %.

A los efectos de la búsqueda geoquímica, de ambos tipos de métodos de análisis espectral (cuantitativo y semicuantitativo) el más importante es el semicuantitativo, el cual, como ha demostrado la práctica, permite resolver los problemas y tareas de la búsqueda y cumplir sus objetivos. Esto se debe a que las aureolas geoquímicas se caracterizan fundamentalmente, por una pequeña intensidad y por su carácter complejo; por tal razón se hace necesario el empleo de un método de análisis que sea lo suficientemente sensible y que además brinde la posibilidad de detectar un grupo grande de elementos indicadores con una exactitud relativamente baja, con la finalidad de revelar y estudiar las aureolas geoquímicas. Esto es posible satisfactoriamente mediante el empleo del análisis espectral semicuantitativo. Por el método de los espectros de comparación.

El análisis espectral cuantitativo se emplea fundamentalmente durante la realización de investigaciones experimentales y además, durante los trabajos detallados, con la finalidad de precisar y evaluar determinadas anomalías, para lo cual se hace necesario realizar algunos análisis de elevada exactitud para un reducido número de elementos.

En particular, es indispensable la utilización del análisis espectral cuantitativo para el estudio de la especialización geoquímica de los complejos intrusivos, específicamente para la determinación de Sn, Zn, Pb, F y B.

La sensibilidad del análisis espectral semicuantitativo puede considerarse suficiente si su relación con el fondo geoquímico o con el clarke es menor que la unidad. Para lograr la sensibilidad necesaria para un número más amplio de elementos se hace necesario regular las condiciones de excitación de su espectro variando, la intensi-

dad de la corriente, el tiempo de exposición de la muestra, el método de introducción del material de la muestra a la llama del arco, etc. En la tabla se muestran las condiciones óptimas de excitación del espectro para diferentes metales.

Tabla 3
CONDICIONES ÓPTIMAS DE EXCITACIÓN DEL ESPECTRO PARA DIFERENTES METALES

Condiciones de análisis	ELEMENTOS			
	Zn, Cd, As, Pb, Bi, Na	Ag, Cu, Sn Sb, Cr, Co	Mo, Be, Ta, Nb, Zr, Tl, Pt	Au
Intensidad de la corriente en ampere	6-8	9-12	13-20	
Temperatura de ebullición °C	1 500	1500-3000	3 000	
Tiempo de exposición, s	30	60	120	
Diámetro del canal del electrodo, mm	2	3	4	
Profundidad del canal del electrodo, mm	6	4	3	

Según las condiciones óptimas de excitación de los espectros se distinguen las siguientes variantes del análisis espectral, los cuales se diferencian además atendiendo a la productividad.

1. Método de evaporación rápida y completa del canal del electrodo; 50-150 muestras por jornada.
2. Método de vertimiento de las muestras en forma de polvo, 300-500 muestras por jornada.
3. Métodos especiales para la determinación de algunos elementos, 60-100 muestras por jornada.
4. Métodos para la determinación de los elementos por grupos (lantánidos, calcófilos, alcalinos, etc), 40-200 muestras por jornada.

Con la evaporación completa y rápida del material de la muestra contenida en el canal del electrodo, lo cual dura cerca de dos minutos, habitualmente se revelan tres espectros de cada muestra para obtener un resultado de cada uno de los elementos en condiciones tales que proporcionen la sensibilidad máxima para su revelación.

Con la evaporación completa y rápida del canal del electrodo se logra una sensibilidad satisfactoria en la determinación de elementos tales como vanadio (0,007); aluminio (0,003); berilio (0,15); cobre (0,1); estaño (0,2); plomo (0,6); wolframio (1,0); titanio (0,0016); cromo (0,2); zirconio (0,5); cobalto (1,0); sodio (0,04); magnesio (0,0005); níquel (0,2); bario (0,2); germanio (1,4) e itrio (1,0). La sensibilidad del método de análisis para los diferentes elementos, representados por las cifras entre paréntesis, están dadas por la relación existente entre el límite de sensibilidad del método para el elemento en cuestión y su clarke en la litosfera, es decir, se expresa en clarkes.

El método de vertimiento de la muestra en forma de polvo consiste en introducir el polvo de la muestra en la

zona del arco eléctrico por medio de su vertimiento. Este método asegura una alta estabilidad en el régimen de combustión del arco alimentado por corriente alterna, debido a lo cual, aumenta en un orden la sensibilidad en la determinación de los elementos volatizados y al mismo tiempo aumenta acentuadamente la productividad, debido a que la evaporación de la muestra dura tan solo 15-30 s.

Con el método de vertimiento se logra una sensibilidad óptima en la determinación de elementos tales como estaño (0,2); cobalto (1,0); molibdeno (0,7) y níquel (0,05). Una sensibilidad satisfactoria se logra en la determinación del molibdeno (1,1); plomo (0,5); cromo (0,4) zirconio (0,6); escandio (1,0) y zinc (2,0).

Los métodos especiales se han elaborado para toda una serie de elementos que prácticamente no se detectan mediante la aplicación de los métodos tradicionales descritos con anterioridad, con la finalidad de revelar los mismos durante la realización de los trabajos geoquímicos dado su gran importancia como indicadores.

Un método especial para la determinación, mediante análisis espectral de emisión del mercurio, fue elaborado por E.A. Sergueev y P.A. Stepanov. Este método posee una sensibilidad para el mercurio de $2 \cdot 10^{-6}$ (0,3 de su clarke); esto se logra mediante la alteración de la forma y el tamaño de los electrodos de acero, el calentamiento previo de los electrodos y el aumento del peso de la muestra.

Se han ideado métodos especiales muy originales para el análisis espectral del oro, mediante el enriquecimiento previo, utilizando procedimientos electroquímicos y de sorción; de esta forma la sensibilidad en la determinación del oro se eleva en 500 veces, pudiéndose revelar concentraciones hasta de $2 \cdot 10^{-6}$ (4 clarkes).

Se conocen métodos especiales además para la determinación de bario (0,002); boro (0,7); selenio (5) y fluor (2).

Dentro de los métodos de análisis espectral para grupos de elementos revisten una gran importancia aquellos utilizados para la determinación de los elementos calcófilos, debido a que permiten el estudio de forma óptima de las aureolas de toda una serie de importantes elementos indicadores como el bismuto (0,15); galio (0,007); germanio (0,014); indio (1,0); cadmio (0,6); antimonio (0,1); arsénico (0,02); estaño (0,03); plomo (0,006); plata (0,1); talio (0,03); fósforo (0,04) y zinc (0,04). (E.A. Sergueev y P.A. Stepaniv, 1968).

El método de grupos para la determinación de los elementos alcalinos raros permite detectar con gran exactitud el litio (0,03); rubidio (0,007) y cesio (0,3).

Con ayuda del método de grupos para la determinación espectral de los lantánidos, es posible medir, con una elevada sensibilidad, las concentraciones de gadolinio (0,1); nobelio (0,2); europio (0,25); terbio (0,03); itrio (0,003); lantano (0,017); lutecio (0,3); samario (1,0) y escandio (0,015).

La sensibilidad del análisis espectral, hasta el momento, resulta insuficiente para la determinación de toda una serie de elementos indicadores, tanto meníferos como acompañantes, tales como el wolframio (10); habnio (30); oro (4); niobio (2); platino (2 000); selenio (50); tantalio (100); telurio (1 000); uranio (300) y cerio (10). Esto dificulta notablemente el empleo de los métodos geoquímicos para la detección de aureolas de wolframio, telurio, selenio y otros elementos, para los cuales aún no se han elaborados otras metodologías de análisis de alta sensibilidad.

Una de las variantes del análisis espectral es el método de la fotometría de llama, que se utiliza para la determinación rápida y con alta exactitud del sodio, potasio, calcio, litio, rubidio y cesio, es decir, este método es muy efectivo para la determinación de las concentraciones de los elementos alcalinos y alcalino-térreos. Este método es de mucha importancia durante el estudio de las alteraciones hidrotermales, sobre todo para la caracterización de las mismas desde el punto de vista cuantitativo.

Dentro de las nuevas direcciones del análisis espectral la más perspectiva es la relacionada con el método de análisis microespectral de los minerales; directamente en las secciones delgadas. Esta dirección fue elaborada por N.V. Koroliov y A.V. Arnautov. Este método permite determinar en los granos minerales, de hasta un diámetro mínimo de 0,05 mm, las impurezas de determinado elemento químico que se encuentre presente hasta en una cantidad total mínima de 10^{-9} g.

El método de análisis microespectral permite realizar la búsqueda geoquímica mediante las aureolas primarias, mediante el estudio de las impurezas de los elementos meníferos y acompañantes en los sulfuros y otros minerales, sin la trituration previa de las muestras ni la separación de fracciones monominerales. En la URSS, para el análisis microespectral se utiliza el microscopio SMLU-501 con cabeza de láser.

El análisis espectral es el fundamental para el estudio analítico de la fase sólida de las aureolas de dispersión, pero también es de suma importancia para el análisis de las cenizas de las plantas y de los residuos secos de las muestras de agua.

Actualmente se conocen procedimientos de campo para la obtención de concentrados de microelementos de las

aguas, con la finalidad de analizar posteriormente estos concentrados mediante el análisis espectral de emisión. Dentro de estos procedimientos se destacan los siguientes:

- a) obtención de residuo seco mediante la evaporación del agua;
- b) sedimentación conjunta (cosedimentación) con el sulfuro de cadmio, del Be, B, W, Ge, Co, In, As, Cu, Mo, Ni, Sn, Sb, Pb, Ag, Te, Ti, Zn;
- c) cosedimentación con el hidróxido de aluminio;
- d) cosedimentación con el carbonato de calcio;
- e) concentración por medio de intercambio iónico según el método de "las partículas hundidas" (R.I. Lebina y otros, 1957);
- f) concentración mediante el empleo de disolventes orgánicos (E.A. Sergueiv, 1957);
- g) concentración mediante el empleo de una mezcla de sorbentes.

Como resultado de estos procedimientos fue posible la determinación con una elevada exactitud (en g/l) de bismuto ($2 \cdot 10^{-7}$); berilio ($0,01-0,3 \cdot 10^{-3}$); cadmio ($1 \cdot 10^{-6}$); cobalto ($0,5 \cdot 10^{-6}$); litio ($1 \cdot 10^{-8}$); cobre ($1 \cdot 10^{-8}$); molibdeno ($1 \cdot 10^{-8}$); germanio ($0,3 \cdot 10^{-6}$); wolframio ($2 \cdot 10^{-6}$); estaño ($0,5 \cdot 10^{-6}$); níquel ($2 \cdot 10^{-6}$); oro ($5 \cdot 10^{-8}$); niobio ($1 \cdot 10^{-6}$); rubidio ($1 \cdot 10^{-7}$); plomo ($4 \cdot 10^{-7}$); plata ($1 \cdot 10^{-8}$); antimonio ($2 \cdot 10^{-6}$); talio ($3 \cdot 10^{-6}$); circonio ($1 \cdot 10^{-6}$); arsénico ($1 \cdot 10^{-6}$); vanadio ($2 \cdot 10^{-6}$); telurio ($5 \cdot 10^{-6}$).

Hasta aquí hemos explicado los aspectos del análisis espectral que interesan al geólogo que se dedica a la búsqueda de los yacimientos minerales sólidos, fundamentalmente metálicos. El geólogo, como es natural, no necesita conocer la técnica necesaria para realizar los análisis espectrales; pero es indispensable que conozca los problemas que puede resolver este tipo de análisis, sus

ventajas, limitaciones, etc.

Además del análisis espectral los métodos geoquímicos se auxilian de otros métodos de análisis, pero la importancia de éstos con respecto al espectral es insignificante. Dentro de estos métodos podemos señalar los siguientes:

Métodos químicos de análisis. Los más difundidos son los métodos colorimétricos, que se basan en la obtención de reacciones coloreadas entre los compuestos del metal investigado y determinado reactivo. Estos métodos, al no requerir de un equipamiento muy voluminoso, complicado y costoso, brinda la posibilidad de realizar los análisis directamente en el campo.

Dentro de las variantes de los métodos colorimétricos se destacan aquellos que permiten determinar las concentraciones de los elementos químicos mediante el empleo de espectrofotómetros, capaces de determinar las concentraciones a partir de la densidad óptica de las soluciones.

Una de las variantes del análisis calorimétrico utilizado es el método de determinación a la gota, que consiste en la determinación de la presencia y concentración de un determinado elemento (en fase sólida o en solución) a partir de la aparición de una determinada reacción coloreada, al añadir gota a gota un volumen dado de un determinado reactivo.

Entre los métodos químicos de análisis que se utilizan para la búsqueda geoquímica es necesario señalar el de la cromatografía al papel. Mediante este método es posible la determinación simultánea, en una muestra dada, de las concentraciones de cobre, níquel y cobalto con una sensibilidad de hasta 20 g/t. Este método está basado en la distribución zonal de los elementos químicos en el papel cromatográfico al difundirse el solvente orgánico hacia arriba (mezcla de esometil-butyl-cetona con ácido

clorhídrico). Después de la neutralización por medio de amoníaco la hoja de papel cromatográfico es tratada con una solución al 0,1 % de ácido rubeánico, como resultado de lo cual aparecen franjas azul púrpura, verde olivo y amarillo-anaranjado de níquel, cobre y cobalto respectivamente.

Los métodos químico son utilizados además para el control de la calidad de los análisis espectrales.

Métodos físico-químicos de análisis

En el grupo de los métodos físico-químico entran aquellos que contemplan el tratamiento químico previo de las muestras y la determinación física del contenido del elemento analizado; dentro de este grupo de métodos podemos incluir los siguientes: polarográficos, luminiscentes, radioquímicos y otros.

• Polarografía. Este método consiste en la aplicación creciente y gradual de potencial a dos electrodos introducidos en una determinada solución objeto de análisis. Como resultado de la reducción de los iones, surge una corriente muy débil que permite determinar el contenido de los iones que se hallan en la solución; el potencial con el cual se produce la reducción permite determinar el tipo de iones de los diferentes metales.

La determinación polarográfica del cobre, zinc, plomo, bismuto y cadmio fue propuesta por A.A. Reznikov en 1938.

Método luminiscente. Este se utiliza ampliamente para la búsqueda geoquímica de los yacimientos uraníferos, mediante la determinación del uranio en las rocas, los suelos, las cenizas de las plantas y las aguas naturales. La concentración de uranio se determina por la intensidad de

la luminiscencia bajo los rayos ultravioletas que inciden sobre las perlas de fluoruro de sodio enriquecidas en uranio. La sensibilidad en la determinación del uranio en las rocas y cenizas de las plantas es de 1×10^{-5} hasta $1 \times 10^{-4} \%$.

Métodos radioquímicos. Se utiliza para la determinación de las concentraciones de los elementos radioactivos de corta vida, que son producto de la desintegración del uranio y del thorio. Sobre la base de los resultados de estos análisis se determinan las relaciones entre los elementos radioactivos, lo que permite estudiar las condiciones de migración de estos elementos químicos. Las relaciones isotópicas de los elementos radioactivos en las aguas naturales han hallado aplicación práctica en la interpretación de las anomalías biogeoquímicas y radiohidrogeoquímica (hidrogeoquímicas de elementos radioactivos).

La sensibilidad en la determinación de las concentraciones de los elementos radioactivos es muy elevada (desde $n \times 10^{-9}$ hasta $n \times 10^{-15}$).

Métodos físicos y físico-nucleares. Estos métodos se fundamentan en el estudio de las propiedades físicas de las sustancias tales como el magnetismo, la radioactividad natural e inducida, los espectros ópticos, etc. Dentro de estos métodos se pueden señalar los siguientes: análisis espectrales, los cuales se fundamentan en el estudio de los espectros ópticos y que ya fueron tratados como un grupo independiente por su gran importancia; método de la susceptibilidad magnética, métodos radiométricos para el estudio de las anomalías geoquímicas de elementos radioactivos; métodos radiométricos de análisis de los elementos no radioactivos; otros métodos.

Determinación de la susceptibilidad magnética. Todas las muestras litogeoquímicas recolectadas durante la búsqueda por las aureolas secundarias de dispersión abiertas (metalometría), son analizadas con la finalidad de determinarles la susceptibilidad magnética, lo que permite resolver toda una serie de tareas que serán explicadas con posterioridad.

Para la determinación de la susceptibilidad magnética mediante el empleo de capámetros de inducción se realiza con la ayuda de la siguiente fórmula:

$$H = K_{i,n,p}$$

donde:

K - es la apreciación del capámetro;

P - es el peso de la muestra en g;

n - es la mayor de las tres desviaciones del galvanómetro.

La apreciación del capámetro se determina por medio de la medición de patrones de diferentes susceptibilidades.

Métodos radiométricos para el estudio de las anomalías de los elementos radiactivos

A las muestras litogeoquímicas, además de la susceptibilidad magnética, se le determina la radioactividad por medio de radiómetros. La radioactividad se determina a las muestras recolectadas al aplicar la metalometría y el método de los sedimentos de fondo.

Estos métodos radiométricos permiten, a partir de la radioactividad, determinar las concentraciones de uranio, radio, thorio y potasio en las muestras. Por ejemplo, la sensibilidad de este método para el radio es de $1 \times 10^{-10} \%$.

Los productos gaseosos de las desintegraciones radioactivas del radio y el uranio (las emanaciones de radón, actín y thoron) se analizan por el método de emanación, mediante el empleo de cámaras de ionización. En dichas cámaras ocurre la ionización del aire debido a los productos de la desintegración de estos elementos gaseosos de corta vida.

La sensibilidad para la determinación del radón es muy alta, 1×10^{-13} curie (un curie es la cantidad de radón que está en equilibrio con un gramo de radio).

La ventaja fundamental de los métodos radiométricos está dada por la posibilidad de su utilización para el análisis directo de la concentración de radio en las paredes de los pozos de perforación (carotage gamma) así como el registro ininterrumpido de radio, thorio y potasio en la superficie de las rocas, mediante la gamma espectrometría, a bordo de un automóvil o de un avión. La sensibilidad de esta determinación es muy elevada, lo que permite revelar concentraciones inferiores al fondo y solucionar un grupo de grandes problemas geoquímicos.

Métodos radiométricos de análisis de los elementos no radioactivos. Estos métodos tienen un gran valor práctico para la búsqueda de toda una serie de elementos que no presentan radioactividad natural; los mismos se fundamentan en el estudio de la radioactividad inducida en toda una serie de elementos químicos.

Dentro de los problemas que se resuelven mediante estos métodos se destacan los siguientes: el estudio de la distribución de berilio, por el método fotoneutrónico (gamma-neutrón); la revelación de aureolas de estaño por medio de la radiación gama; determinación de las concentraciones mediante el método de activación neutrónica, de toda una serie de elementos que por otros métodos son muy

difíciles de revelar, etc.

El método de activación neutrónica ofrece grandes perspectivas para las investigaciones geoquímicas; con este método es posible la determinación de las concentraciones de arsénico, antimonio, selenio, telurio, platino, oro y tántalo. Actualmente, sobre la base de la activación neutrónica, se están elaborando los equipos y las metodologías para el estudio ininterrumpido de las concentraciones de níquel, cobre, aluminio y manganeso en los pozos de perforación. Existen premisas para la determinación, de forma continua de las concentraciones de Na, As, Se, F, Ag, Sb, Hg, Au, Mo, Hf, Ta, Cs y Pt en los pozos de perforación, por el método de activación neutrónica, con la utilización de espectrómetros multicanales.

Sobre la del efecto fotoneutrónico se han creado berilómetros de campo para el estudio de las concentraciones de berilio en las rocas y suelos.

En la actualidad se utilizan para la determinación de las concentraciones de los elementos químicos con número atómico mayor que 25, mediante el método de análisis roengenoradiométrico.

La tecnología de los métodos de análisis se perfecciona constantemente, lo que conlleva al perfeccionamiento de los métodos geoquímicos conocidos y al surgimiento de nuevas metodologías, basadas en el empleo de equipos portátiles, capaces de efectuar los análisis directamente en el campo, con elevada precisión y sensibilidad. A modo de ejemplo podemos señalar la búsqueda de los yacimientos, a partir de las aureolas de mercurio, lo cual es posible gracias al empleo de los mercurómetros. Los mercurómetros actuales son capaces de medir las concentraciones de mercurio, elemento sumamente disperso, permitiendo revelar sus aureolas de emanación, las cuales se desarrollan siempre sobre los yacimientos hidrotermales a gran dis-

tancia de los mismos, tanto en las rocas encajantes como en los depósitos de cobertura.

TEMA 5 ELABORACIÓN DE LOS DATOS GEOQUÍMICOS

Para la realización exitosa de la búsqueda geoquímica es indispensable la correcta elaboración de los datos geoquímicos. La elaboración de los datos geoquímicos contempla el cálculo de los fondos geoquímicos y los umbrales anómalos para los diferentes elementos, la confección de cartas geoquímicas y otras tareas más que pasaremos a explicar a continuación.

Determinación del contenido de fondo y los umbrales anómalos. La determinación de estos parámetros es la tarea más importante durante la elaboración de los datos geoquímicos; esta tarea permite resolver todas las demás. Los métodos para la determinación del fondo y los umbrales anómalos de un elemento dado dependen en gran medida de la sensibilidad del método de análisis utilizado para medir las concentraciones de dicho elemento; si el método de análisis es lo suficientemente sensible como para revelar las concentraciones de fondo o normales, entonces estos parámetros se pueden determinar de las siguientes formas:

- a) mediante cálculos estadísticos;
- b) por simple observación de la distribución de los valores.

A continuación pasaremos a explicar detalladamente ambas formas.

Determinación del fondo mediante cálculos estadísticos. Para calcular el fondo y los umbrales anómalos estadísticamente lo primero que se debe hacer es establecer la correspondencia de los valores de fondo o normales con una ley de distribución dada. La práctica ha demostrado que las concentraciones de los elementos químicos en los diferentes sistemas y objetos geoquímicos responden a la

ley de distribución normal o a la lognormal (normal logarítmica).

De teoría de las probabilidades se conoce que una ley de distribución es aquella que expresa la probabilidad de aparición de los diferentes valores de una variable aleatoria. La expresión gráfica de las leyes de distribución normal y lognormal se representan en la figura 31 .

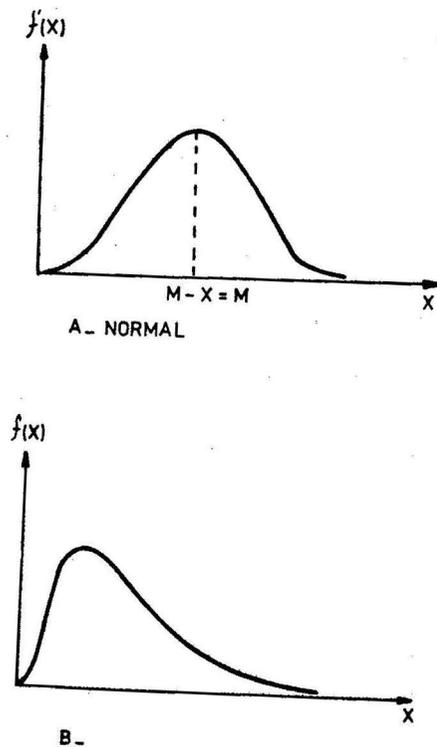


Fig. 31 Leyes de distribución más importantes a las que responden los elementos químicos en la naturaleza.

La determinación de la correspondencia de la distribución de los valores de fondo con la ley normal o lognormal, permite calcular el fondo y los umbrales anómalos con una precisión más elevada. El contenido de fondo, desde el punto de vista estadístico, se corresponde con el valor medio, que en el caso de la distribución normal se corresponde con la moda y con la mediana; es decir, el fondo es una medida o valor central alrededor del cual se sitúan todos los valores de la distribución de fondo. La figura 32 ilustra este concepto (fig. 32) .

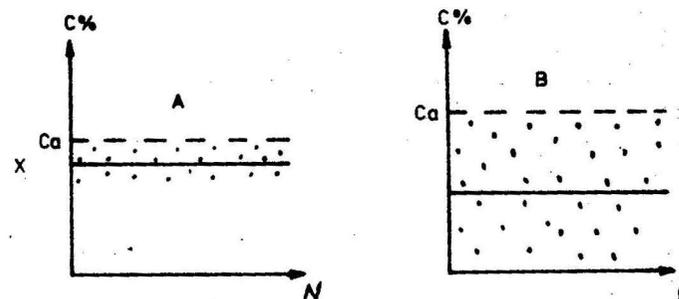


Fig. 32 Representación gráfica de los conceptos de valor medio (fondo) y dispersión: A, pequeña dispersión, b, gran dispersión

Si la distribución de los valores de fondo se considera normal, entonces su valor promedio o fondo se calcula

$$X = \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n X_i$$

donde:

X - es el contenido medio o fondo (C);
 n - frecuencia total o número total de muestras a las que se les determinó la concentración del elemento dado;

X_i - concentración del elemento dado en la i - esima muestra.

Esta fórmula se utiliza cuando el número de muestras es pequeño y no hay necesidad de agrupar los datos.

Si el número de muestras es muy elevado, para facilitar los cálculos, los resultados de los análisis se agrupan en clases o en intervalos de clases, utilizándose entonces la siguiente fórmula:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^K n_i X_i$$

donde:

n - frecuencia total ($n = \sum_{i=1}^K n_i$);

n_i - frecuencia de la i - esima clase o intervalo de clase;

X_i - valor de la clase o valor medio del intervalo de clase.

Si la distribución responde a la ley lognormal, entonces resulta más conveniente utilizar las siguientes expresiones:

$$\overline{\log X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log X_i \quad (\text{datos no agrupados})$$

$$\overline{\log X} = \frac{1}{n} \sum_{C=1}^K N_i \log X_i \quad (\text{datos no agrupado})$$

Los parámetros n, n_i, X_i y K tienen el mismo significado que en las ecuaciones anteriores.

El valor medio de x (\bar{X}) se determina mediante el anti logaritmo de $\overline{\log X}$.

$$\bar{X} = \text{antlg } \overline{\log X}$$

Conociendo el fondo geoquímico, se procede a la determinación de los umbrales, para lo cual es necesario conocer el grado de dispersión de los valores de la distribución de fondo con respecto al fondo o valor medio. Esto es posible mediante el cálculo de la desviación típica (standard) o desviación medio - cuadrática (S).

Después de conocer la desviación típica se procede a la determinación de los umbrales anómalos, teniendo en cuenta el grado de confiabilidad con que se pretende revelar los sectores anómalos dentro de los límites de los valores de fondo. Como regla general, a los efectos de la búsqueda, se calculan tres umbrales que se caracterizan por sus diferentes grados de confiabilidad: Ca₁, Ca₂ y Ca₃.

Si la distribución responde a la ley normal se emplean las siguientes fórmulas:

$$Ca_1 = C + S ; \text{ para un } 84 \%$$

$$Ca_2 = C + 2 S ; \text{ para un } 95 \%$$

$$Ca_3 = C + 3 S ; \text{ para un } 99 \%$$

Los por cientos representan la probabilidad de que los valores Ca_1 , Ca_2 y Ca_3 pertenezcan a los valores anómalos; la probabilidad de que pertenezcan a los valores de fondo es de 16, 5 y 1 % respectivamente. La mayor confiabilidad la posee Ca_3 y la menor Ca_1 ; por lo tanto, son más confiables las anomalías contorneadas por Ca_3 que por Ca_1 .

Si el conjunto de valores de fondo o normales se distribuyen según la ley lognormal, entonces los umbrales se calculan por las siguientes fórmulas:

$$Ca_1 = C \cdot E ; \text{ para un } 84 \% \text{ de probabilidad}$$

$$Ca_2 = C \cdot E^2 ; \text{ para un } 95 \% \text{ de probabilidad}$$

$$Ca_3 = C \cdot E^3 ; \text{ para un } 99 \% \text{ de probabilidad}$$

E - es el antilogaritmo de la desviación standard de los logaritmo de X ($S \log X$) y desempeña el papel de factor de estandarización;

$$E = \text{Antlog } S \log x$$

En todos los casos C es igual al contenido de fondo ($C = C = X$).

Si la distribución de los valores de fondo se ajustan a la ley normal, la desviación estandar (típica) se determina por las siguientes fórmulas:

$$S = \sqrt{V} ; \text{ donde } V \text{ es la varianza}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} ; \text{ para datos no agrupados}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{c=1}^K N_i (X_i - \bar{X})^2} ; \text{ para datos no agrupados}$$

Si la distribución se corresponde con la ley lognormal se emplean las siguientes expresiones:

$$S \log_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{c=1}^n (\log X_i - \overline{\log X})^2} ; \text{ para datos no agrupados}$$

$$S \log_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{c=1}^K n_i (\log X_i - \overline{\log X})^2} ; \text{ para datos no agrupados}$$

Los parámetros n, n_i , K y X_i mantienen el mismo significado que en las ecuaciones para el cálculo del valor medio.

En la figura 32 se puede apreciar, de forma gráfica los conceptos de dispersión y umbral de contenidos anómalos.

Como regla general, el fondo y los umbrales de contenidos anómalos se determinan mediante el empleo de un mé-

todo gráfico analítico. Este método permite calcular de forma rápida y exacta estos parámetros a partir de los análisis espectrales semicuantitativos.

Se ha comprobado que las concentraciones de los elementos químicos medidos mediante el método de análisis espectral semicuantitativo, se ajustan a la ley de distribución log-normal; por tal razón, al aplicar el método gráfico analítico se utiliza el papel probabilístico log-normal.

El cálculo del fondo y los umbrales, mediante el método gráfico analítico, consta de los siguientes pasos:

1ro. Se determina la frecuencia de aparición (n_i) de los diferentes valores de las concentraciones del elemento dado (X_i).

2do. Se determina la frecuencia relativa porcentual ($R\%$) para los diferentes valores mediante la siguiente expresión:

$$R\% = \frac{N_i \cdot 100}{n}$$

n - frecuencia total (número de muestras utilizadas para calcular el fondo);

3ro. Para cada valor (X_i) se determina su frecuencia acumulativa porcentual ($F_A\%$).

4to. Se plotea en el papel probabilístico los diferentes valores X_i contra sus respectivas frecuencias acumulativas porcentuales, obteniéndose un diagrama de dispersión a partir del cual se traza una recta promedio, de forma tal que la diferencia de frecuencia acumulativa porcentual (y) entre los diferentes puntos del diagrama de dispersión y la recta sea mínima (fig. 33).

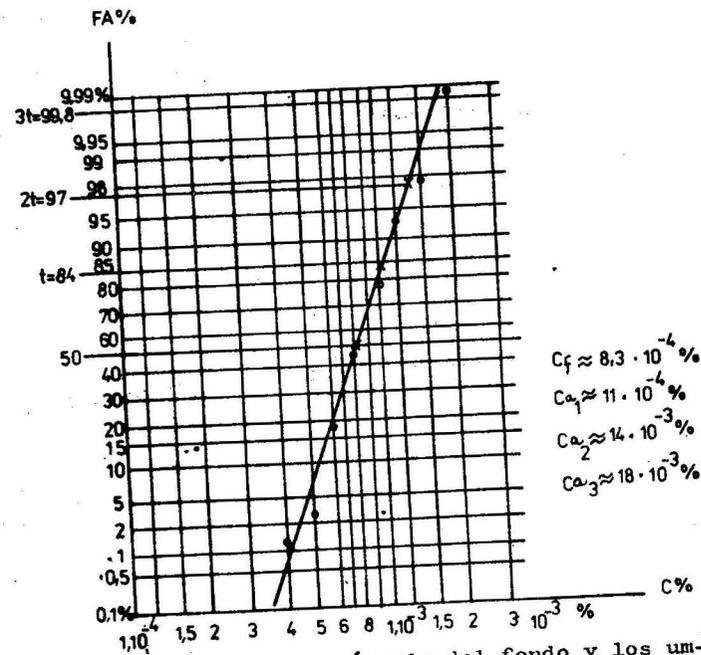


Fig. 33 Ejemplo del cálculo del fondo y los umbrales con el empleo del patrón de probabilidades de N.K. Razumovski

5to. Se procede a la comprobación de la correspondencia de la distribución de los valores de fondo con la ley lognormal, aplicando el criterio de Kolmogorov, mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{y_{\max} \cdot n}{100} = 1,25 \quad (\text{con una probabilidad del } 95\%)$$

y_{\max} - es la diferencia de frecuencia acumulativa porcentual del punto más alejado con respecto a la recta.

Si λ es menor o igual que 1,35, existe una probabilidad de un 95 % de que exista correspondencia con la ley lognormal; si es mayor no existe correspondencia y por lo tanto, no es posible calcular el fondo y los umbrales mediante este método.

6to. Si existe correspondencia de los valores de fondo con la ley lognormal, entonces se procede a la determinación del fondo y los umbrales; el contenido correspondiente al 50 % de la frecuencia acumulativa porcentual es el fondo y los que se corresponden con el 84,97 y 99 % son respectivamente Ca_1 , Ca_2 y Ca_3 (ver figura 33).

Veamos un ejemplo práctico de como calcular el fondo y los umbrales mediante el método gráfico-analítico. El problema consiste en calcular estos parámetros a partir de un total de 155 muestras seleccionadas de un sector del área objeto de estudio, donde las concentraciones del elemento analizado (Pb) son claramente normales (ver tabla 4).

Después de confeccionar la tabla de distribución de frecuencias de los valores de fondo para el plomo se procede a la estimación del fondo y los umbrales de forma gráfica, mediante el empleo de papel probabilístico lognormal (patrón de probabilidades de N.K. Razumovski). La figura 33 representa el patrón de probabilidades de Ruzumovski; de acuerdo con dicha figura Y_{max} , toma un valor de 6,4 % de donde se desprende que:

$$\lambda = \frac{Y_{max}}{100} \cdot \sqrt{n} \leq 1,35$$

$$\lambda = 0,79 \leq 1,35$$

Tabla 4
DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS PARA LOS VALORES DE PLOMO

Número de orden	X_i 10^{-4} % Pb	N_i	Ri %	FA %
1	4	2	1,3	1,3
2	5	3	1,9	3,2
3	6	24	15,5	18,7
4	8	40	25,8	44,5
5	10	52	33,6	78,1
6	12	23	14,8	92,9
7	15	9	5,8	98,7
8	20	2	1,3	100,0

$\sum_{i=1}^8 n_i = 155$ $\sum_{i=1}^8 Ri = 100$

Como la distribución se corresponde con la ley lognormal es posible la estimación del fondo y los umbrales. Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\bar{C} = 8,3 \cdot 10^{-4} \%$$

$$Ca_1 = 12 \cdot 10^{-4} \%$$

$$Ca_2 = 17 \cdot 10^{-4} \%$$

$$Ca_3 = 22 \cdot 10^{-4} \%$$

$$E = \frac{Ca_3}{\bar{C}} = 1,35$$

Estimación del fondo y los umbrales mediante la simple observación de la distribución de los valores de las concentraciones

Cuando no se exige una elevada precisión de la revelación y contorno de las anomalías, sobre todo cuando estas son altamente contrastante con respecto a los valores de fondo, es posible la estimación del fondo y los umbrales mediante, la simple observación de la distribución de las concentraciones del elemento dado en planos y perfiles. Para esto es necesario representar en cada punto de muestreo las concentraciones obtenidas; después de realizada esta operación resulta muy fácil diferenciar los valores normales o de fondo de los valores anómalos. Los valores de fondo son bajos, están distribuidos de una forma muy homogénea en la mayor parte de la superficie mues-

treada y presentan una gran frecuencia de aparición; los valores anómalos, por el contrario, son elevados, se presentan con muy baja frecuencia y se concentran en sectores relativamente pequeños dentro de los límites del área muestreada. De esta forma, el fondo se corresponde con el valor más frecuente y los umbrales se eligen de acuerdo con la magnitud de los valores anómalos arbitrariamente.

Determinación del fondo y los umbrales cuando la sensibilidad de los análisis es baja

Cuando la sensibilidad del método de análisis no es lo suficientemente elevada, como para revelar las concentraciones próximas al fondo, éste se estima a partir del umbral de sensibilidad; concretamente se supone igual a la mitad de dicho umbral. Esto es muy característico para toda una serie de elementos indicadores, para los cuales el método de análisis espectral semicuantitativo posee muy baja sensibilidad, dentro de los cuales podemos señalar los siguientes: Ag, As, Sb, Ba, etc.

En estos casos los umbrales de contenidos anómalos se estiman arbitrariamente, multiplicando el umbral de sensibilidad por determinadas cifras; por ejemplo, dos, cuatro y seis, para el primer, segundo y tercer umbral respectivamente.

Después de estimar el fondo y los umbrales es posible la revelación y contorno de las anomalías geoquímicas de cada elemento por separado (monoelemento) y la confección de las cartas geoquímicas.

Confección de cartas geoquímicas monoelementos

Estas cartas se confeccionan a partir de la revelación de los sectores anómalos y el contorno de las anomalías mediante el trazado de las isolíneas correspondiente a Ca_1 , Ca_2 y Ca_3 ; para esto es necesario que previamente se plo-

teen los diferentes valores de las concentraciones del elemento dado en los respectivos puntos de muestreo. Los sectores limitados por las isolíneas se diferencian mediante colores o mediante rayados diferentes. El rayado se utiliza con mayor preferencia; el sector limitado entre el primero y el segundo umbral se raya verticalmente, entre el segundo y el tercero horizontalmente y el sector comprendido dentro del tercer umbral se raya donde, es decir, vertical y horizontalmente (ver fig. 34).

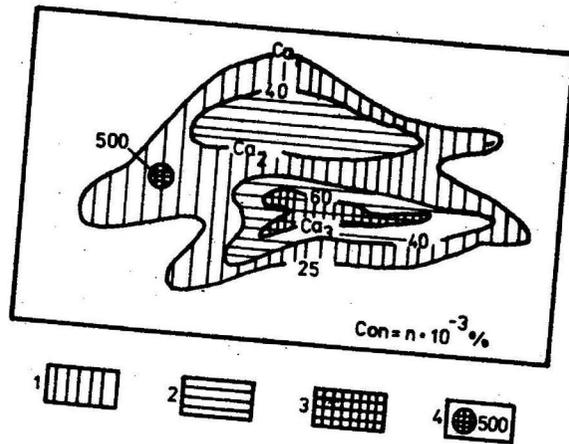


Fig. 34 Contorneo de una aureola de cobre:
 1. valores bajos ($25 \cdot 10^{-3} \leq Cu \leq 40 \cdot 10^{-3}$);
 2. valores medios ($40 \cdot 10^{-3} \leq Cu \leq 60 \cdot 10^{-3}$);
 3. valores elevados ($Cu \geq 60 \cdot 10^{-3} \%$);
 4. puntos con valores sumamente anómalos

Confección de cartas de anomalías complejas

Estas cartas se pueden confeccionar, mediante el método de superposición a partir de las cartas de anomalías mono-elementos. Al superponer dichas cartas, en determinados sectores puede ocurrir la coincidencia de los valores anómalos de diferentes elementos químicos, lo cual se debe a que las anomalías geoquímicas son complejas por su composición y en la mayoría de los casos representan una paragénesis de elementos químicos, sobre todo si se corresponden con aureolas geoquímicas.

Al concluir las cartas de anomalías complejas es necesario representar en las diferentes intersecciones que se producen debido al solapamiento de las anomalías mono-elementos, la presencia y las concentraciones de los elementos químicos; esto se puede resolver mediante el empleo del rayado y los colores. Cada sector se raya de acuerdo con la máxima concentración presente en el mismo: si la concentración máxima es $\geq Ca_3$, el sector se raya doble, si es mayor que Ca_2 y menor que Ca_3 , se raya horizontalmente y si es mayor que Ca_1 y menor que Ca_2 , se raya verticalmente. La densidad del rayado se puede corresponder con la magnitud de las concentraciones.

Después de rayar cada sector, se colorea con el color del elemento que presenta la máxima concentración (para cada elemento se adopta un color determinado). Se puede dar el caso de que en un sector dado coincidan las mismas concentraciones para dos o más elementos; dado esta situación, la presencia de dichos elementos se señala mediante sus respectivos colores. Si las concentraciones (C) son bajas ($Ca_1 \leq C \leq Ca_2$), se colorean las franjas verticales, de forma sucesiva, con los colores de los diferentes elementos; si las concentraciones son medidas ($Ca_2 \leq C \leq Ca_3$), se procede de la misma forma con las franjas horizontales; por último, si las concentraciones

son elevadas ($C \geq Ca_3$), se colorean los cuadritos de acuerdo con los elementos que presentan dichas concentraciones elevadas.

Si en un sector determinado los elementos presentan concentraciones diferentes, éste se colorea totalmente con el color del elemento que presenta la concentración anómala más elevada; la presencia y magnitud de las concentraciones del resto de los elementos se señala mediante sus respectivos símbolos químicos. Las dimensiones de los símbolos se adoptan de acuerdo con la magnitud de sus concentraciones; es decir, las concentraciones medianas se representan por un símbolo mediano y las bajas por un símbolo pequeño. Si algún elemento se destaca, dentro de los diferentes sectores, por presentar concentraciones muy elevadas, es útil representar las mismas con la ayuda de un símbolo grande del elemento y un sub-índice.

Para comprender mejor todos los aspectos relacionados con la confección de las cartas de anomalías complejas observe la fig. 35 .

Las cartas geoquímicas de anomalías complejas se confeccionan para grupos de elementos con características geoquímicas afines, como regla general estas cartas se confeccionan para grupos de elementos paragenéticos con determinado tipo de mena, para grupos de elementos característicos de determinada posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos, etc.

Confección de cartas de anomalías complejas con la utilización de índices multiplicativos

En la actualidad se utiliza con mucha frecuencia la confección de cartas geoquímicas de anomalías complejas mediante el empleo de los índices multiplicativos. Este método es mucho más efectivo y menos trabajoso que el de superposición (fig. 36).

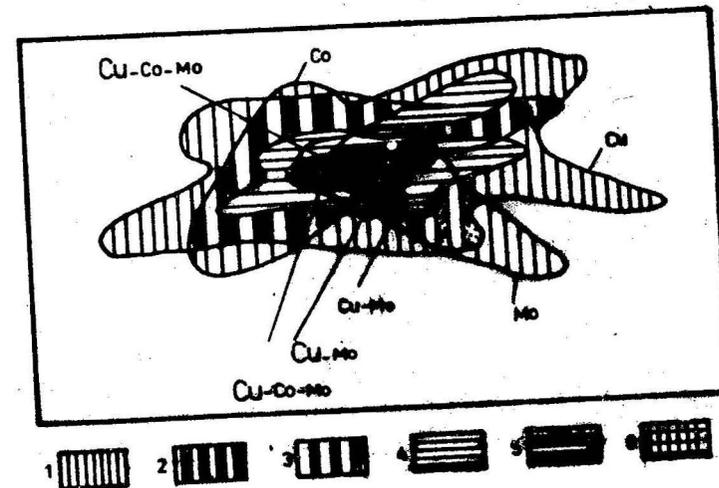


Fig. 35 Aureola compleja de Cu-Co-Mo : 1-3, sectores de valores bajos: 1. para un solo elemento; 2. para Cu-Co; 3. para Cu-Mo; 4-5, sectores de valores medios; 4. para un solo elemento; 5. para Cu-Co; 6. sectores de valores elevados para un solo elemento

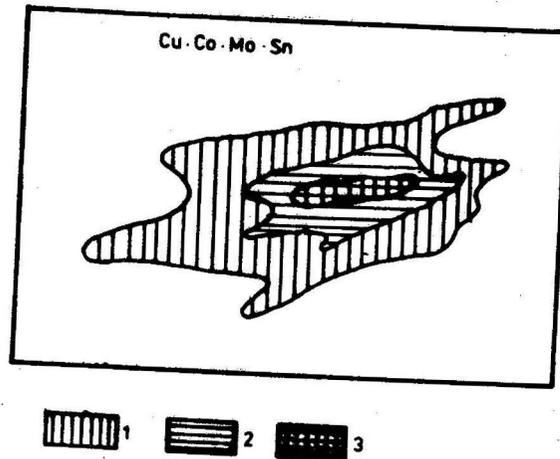


Fig. 36 Aureola compleja de Cu Co Mo y Sn contorneada por el método multiplicativo:
 1. valores bajos; 2. valores medios;
 3. valores máximos.

El método multiplicativo es utilizado para confeccionar las cartas de anomalías complejas, a partir de los resultados del análisis espectral semicuantitativo de las muestras recolectadas durante los trabajos de búsqueda, tanto por las aureolas primarias como por las secundarias. Dentro de sus ventajas sobre el método de superposición podemos señalar las siguientes:

1. Como regla general solamente es necesario, para resolver los problemas de la búsqueda, confeccionar dos cartas geoquímicas: una para elementos suprameníferos y otra para elementos inframeníferos. Por el método de superposición hay que confeccionar una para cada elemento por separado y luego las complejas.

2. La información es obtenida por diferentes canales (las concentraciones de los diferentes elementos utilizados) y amplificada, por lo que el efecto negativo creado por los ruidos (errores propios del análisis espectral semicuantitativo) es prácticamente eliminado; es decir, la relación ruido-síñal disminuye notablemente. Esto permite revelar anomalías de muy pequeño contraste, lo que eleva en gran medida la efectividad de los trabajos geoquímicos.
3. Las anomalías reveladas fijan de una forma la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos. Esto permite hacer una valoración más exacta del carácter y las perspectivas de dichas anomalías en los horizontes profundos. Por otro lado, este método permite diferenciar, de una forma muy precisa, las anomalías relacionadas con los diferentes tipos de mineralización a la que éstas se asocian; sobre todo permite diferenciar las aureolas relacionadas con los sectores de mineralización dispersa de las propiamente meníferas.

Para aplicar correctamente el método de los índices multiplicativos, es necesario conocer las características de la distribución zonal de los elementos químicos en las aureolas primarias de los yacimientos, por lo que se requiere la realización de trabajos experimentales previos para determinar las series de zonalidad de los yacimientos y de esta forma precisar cuales son los elementos meníferos y cuales los inframeníferos (fig. 37).

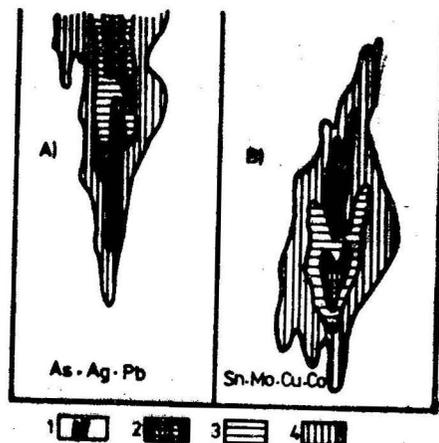


Fig. 37 Aureolas multiplicativas alrededor de un cuerpo menífero: A) asociación de elementos suprameníferos (As, Ag, Pb), B) asociación de elementos inframeníferos (Sn, Co, Mo, Cu), 1. cuerpo menífero; 2. zona de valores máximos; 3. zona de valores medios; 4. zona de valores mínimos

Nota: Obsérvese la distribución zonal de las magnitudes de los indicadores multiplicativos.

Conocida la zonalidad de los yacimientos que se desarrollan en la región que se desea estudiar, se está en condiciones para aplicar el método multiplicativo. Para construir las cartas geoquímicas, primeramente se determinan los productos de las concentraciones de los grupos de elementos seleccionados en cada una de las muestras; por ejemplo Pb x Zn x Ag (suprameníferos) y Cu x Co (in-

frameníferos), luego los valores obtenidos en cada muestra se plotean en los respectivos puntos de muestreo, se determina el fondo y se contornean las anomalías. La posición de las anomalías con respecto a los cuerpos meníferos, así como la relación de estas con la mineralización se puede precisar mediante la magnitud de los índices de zonalidad multiplicativos, dado por la relación existente entre los productos de las concentraciones de los elementos supra e inframeníferos, por ejemplo:

$$K_z = \frac{Pb \times Zn \times Ag}{Cu \times Co \times Mo}$$

La magnitud de los índices de zonalidad (K_z) se determina durante la realización de los trabajos experimentales para las diferentes condiciones.

Este texto solamente persigue dar a conocer los aspectos más generales relacionado con el método de los índices multiplicativos; los detalles del mismo caen fuera del alcance de nuestro curso (fig. 38 y 38 A).

Algunas recomendaciones metodológicas para la determinación del fondo y los umbrales anómalos

1. Estos parámetros se deben determinar independientemente para todos los tipos de variedades litológicas fácilmente diferenciables y que alcanzan amplia distribución en el área estudiada.
2. Para calcular estos parámetros las muestras deben ser seleccionadas de sectores o líneas alejados de las anomalías; es decir, de concentraciones normales.
3. El número de muestra óptimo, para cada caso, debe oscilar entre 80 y 200.

4. De los conjuntos de muestras seleccionados para el cálculo del fondo y los umbrales se deben desagregar aquellas con valores manifiestamente anómalos, es decir con valores muy elevados y que se presentan con una frecuencia muy baja.

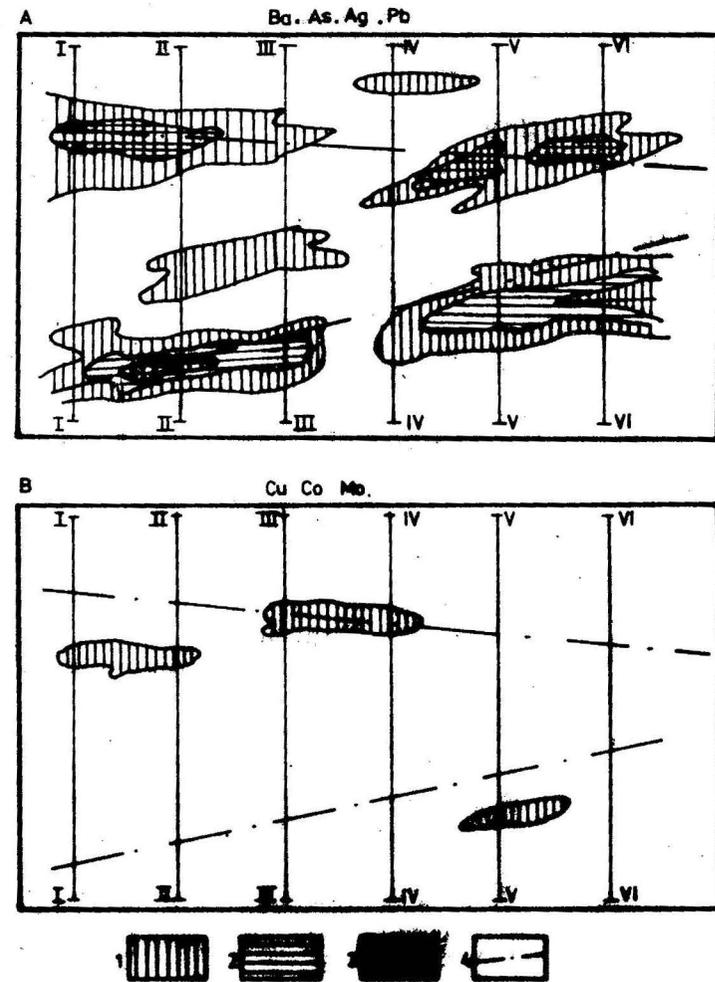


Fig. 38 Cartas de anomalías complejas del flanco sur del campo menífero Catamará. Construidas por el método multiplicativo (sector perspectivo): A, supra-menífera, B, infra-menífera, 1. valores bajos; 2. valores medios; 3. valores máximos; 4. fallas

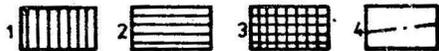
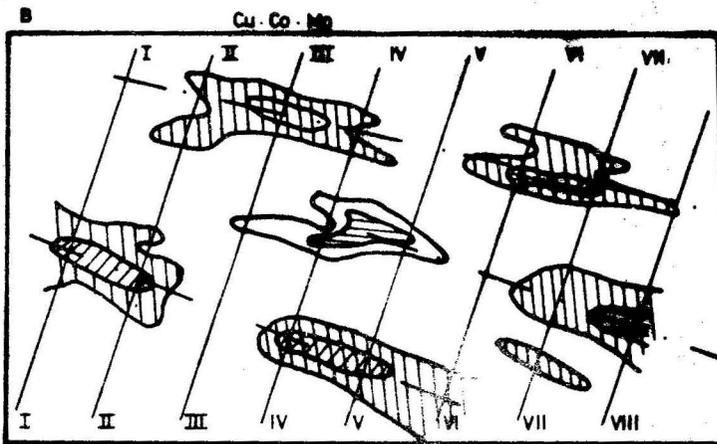
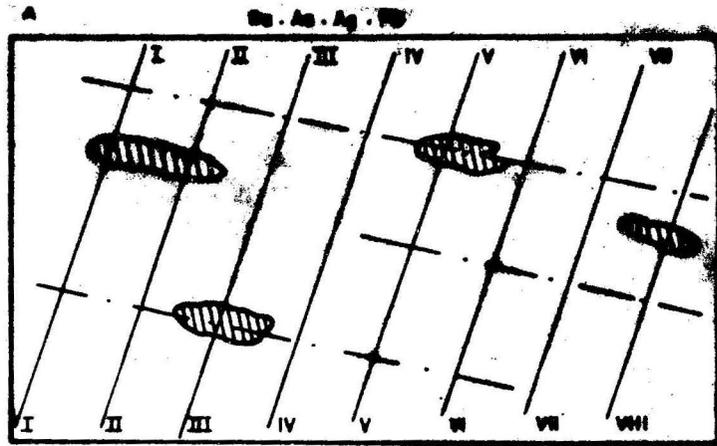


Fig. 38 A Cartas de anomalías complejas del sector de búsqueda detallada Castelo construidas por el método multiplicativo (sector no perspectiva): 1. valores bajos; 2. valores medios; 3. valores máximos; 4. fallas

TEMA 6 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS ANOMALÍAS GEOQUÍMICAS

Durante la ejecución de los trabajos geoquímicos de búsqueda se revelan numerosas anomalías geoquímicas, las cuales hay que interpretar y evaluar. Es necesario tener siempre en cuenta que la interpretación de las anomalías geoquímicas es uno de los aspectos más importantes de los trabajos de búsqueda; precisamente, durante la interpretación de las anomalías podemos hallar respuesta a la pregunta de si será descubierto un nuevo yacimiento o no. La vía más importante para la interpretación y evaluación de las anomalías geoquímicas es su clasificación; al mismo tiempo, solo podemos evaluar correctamente el valor prospectivo de las anomalías en aquellos casos en los que exista una idea clara sobre las condiciones de su formación. Por tal razón como base de la clasificación se debe tener en cuenta el aspecto genético.

Por sus dimensiones las anomalías geoquímicas se pueden clasificar en regionales y locales. Las de mayor importancia para la búsqueda son las locales, una parte de las cuales se relacionan directamente con los yacimientos minerales. Las anomalías regionales se relacionan con las provincias geoquímicas, con las series y horizontes encajantes de menas, con las intrusiones generadoras de menas, con los campos de rocas alterados hidrotermalmente, etc.

Las anomalías regionales por su valor para la búsqueda se corresponden con los criterios geoquímicos y están acondicionadas por la manifestación de los procesos de concentración de poca intensidad a escala regional.

Las anomalías regionales por su relación genética con las rocas encajantes se clasifican en singenética y epigenética.

Las singenéticas se forman debido a la distribución primaria constitucional de los elementos químicos en las rocas durante el proceso de petrogénesis.

En calidad de ejemplo podemos citar los macizos de granitos normales de las regiones estanníferas de Indonesia e Indochina, mucho más elevadas que los macizos similares de las regiones no estanníferas.

En el cuarzo de los granitos donde se desarrollan yacimientos industriales de pegmatitas de metales raros, el contenido de litio supera unas cuantas veces el de los granitos no meníferos.

Los granitos estanníferos del Noreste de la URSS se caracterizan por los contenidos anómalos de estaño, boro y tierras raras, mientras que para los granitos estanníferos del lejano oriente de la URSS son característicos las concentraciones anómalas de estaño, rubidio, fluor, galio y plomo.

En los conglomerados y cuarcitas encajantes de los yacimientos uraníferos de Blind-River (Canadá), las concentraciones anómalas de uranio (hasta 0,002 %) se detectan en un área de centenas de kilómetros cuadrados, fuera de los límites de los cuerpos meníferos.

Las epigenéticas regionales pueden surgir como resultado de la influencia en las rocas de procesos hidrotermales superpuestos en condiciones endógenas y de infiltración en condiciones exógenas.

Un buen ejemplo de anomalía epigenética regional lo constituye la que se desarrolla en la región cobaltífera de Blachird (Idaho, USA) que tiene un área de 7,7 km², contorneada por la isolínea del umbral anómalo de 30 g/t para el cobalto y 80 g/t para el cobre. Esta anomalía está relacionada con procesos hidrotermales.

Las anomalías geoquímicas locales por sus dimensiones se corresponden con los yacimientos o con cuerpos meníferos.

ros aislados. Este grupo de anomalías posee el mayor valor práctico constituyendo en muchos casos los índices directos y más confiables para la búsqueda de los yacimientos; precisamente, para las anomalías locales la clasificación genética es indispensable.

Clasificación genética de las anomalías geoquímicas locales

Hasta los últimos tiempos existía el concepto de que todas estas anomalías estaban acondicionadas, bien por los afloramientos directos de los cuerpos meníferos y sus aureolas primarias, dentro de las rocas encajantes, o bien por sus aureolas de dispersión en los depósitos de cobertura; es decir, todas estas anomalías catalogadas como aureolas geoquímicas.

En la teoría de la búsqueda geoquímica no se consideraba de ningún modo la posibilidad de deposición en las formaciones hipergénicas de acumulaciones secundarias de metales meníferos. Sin embargo, la práctica ha demostrado que durante la búsqueda geoquímica se revelan multitud de anomalías que no guardan relación con la mineralización en las rocas madres (de las formaciones hipergénicas). Esto causó grandes dificultades en la interpretación de las anomalías y condujo a gastos excesivos y a volúmenes exagerados de trabajos en la evaluación de anomalías no perspectivas. De ahí que se hiciera evidente la necesidad de elaborar una clasificación genética de las anomalías geoquímicas.

Según la opinión de diversos autores, todas las anomalías geoquímicas locales deben subdividirse en dos tipos genéticos, diferenciándose por la dirección predominante de los procesos de migración que le dan origen. Éstos son:

- I. Sectores de acumulación (zonas de mineralización dispersa).

II. Aureolas de dispersión

Dentro de ambos tipos genéticos, las anomalías se pueden subdividir atendiendo a los siguientes aspectos:

1. Según la fuente energética que da lugar a la migración de los elementos químicos.
 - a) primarias (endógenas);
 - b) secundarias (exógenas)
2. Según su posición en el corte geológico:
 - a) en las rocas litificadas del fundamento (rocas madres);
 - b) en los diferentes horizontes de la corteza de intemperismo;
 - c) en los diversos horizontes de los depósitos sedimentarios jóvenes.
3. Según las relaciones con el medio encajante.
 - a) epigenéticas (superpuestas);
 - b) singénicas
4. Según la interrelación espacial con los cuerpos meníferos
 - a) meníferos;
 - b) desplazadas (supramineral, trasladada acumulativa, flujos de dispersión).
5. Según la fase en que se encuentran los elementos químicos.
 - a) litogeoquímicos (fase sólida)
 - b) atmogeoquímicos (fase gaseosa)
 - c) biogeoquímica (fase biogénica)
6. Según la accesibilidad de su descubrimiento
 - a) abiertas
 - b) cerradas (cubiertas y enterradas).

TEMA 7 BÚSQUEDA LITOGEOQUÍMICA
ETAPAS DE LOS TRABAJOS LITOGEOQUÍMICOS PARA
LA BÚSQUEDA Y TAREAS QUE SE RESUELVEN EN CADA
UNA DE ELLAS

Al efectuar la búsqueda de los yacimientos minerales surge el agudo problema de seleccionar las áreas perspectivas, donde la localización de las acumulaciones de materia prima mineral es más probable, conjuntamente con el descubrimiento de los yacimientos. Los yacimientos minerales, dentro del fondo general de la distribución de los elementos químicos, se descubren muy raramente, por lo que la realización de la búsqueda, obviando las áreas perspectivas, aplazaría el tiempo de aparición de nuevos yacimientos minerales en muchos años. Por otro lado, no todas las manifestaciones minerales reveladas durante los trabajos de búsqueda cumplen con los parámetros cuantitativos y cualitativos que satisfacen las exigencias industriales; por tal razón, la evaluación de las manifestaciones minerales, con la finalidad de seleccionar las de más perspectivas, requiere de la ejecución de determinados trabajos, para lograr un mayor grado de detalle.

De acuerdo con lo dicho en el párrafo anterior, el proceso de la búsqueda se subdivide en diferentes subestadios, de acuerdo al estudio cada vez más detallado de los sectores favorables para el desarrollo de la mineralización y la consiguiente exclusión de las áreas que no tienen perspectivas.

La búsqueda litogeoquímica, de acuerdo con el grado de detalle, se subdividen en los siguientes subestadios: de búsqueda orientativa, de búsqueda detallada y de búsqueda evaluativa.

1. Subestadio de búsqueda orientativa. Durante este subestadio los trabajos se realizan en las escalas

1:100 000 y menores. Sus tareas fundamentales son el establecimiento de la especialización geoquímico-metalogénica de la región objeto de estudio y el descubrimiento de las anomalías geoquímicas de carácter regional, lo que sirve de criterio para la fundamentación de la búsqueda sistemática de los yacimientos minerales en áreas perspectivas relativamente locales; al mismo tiempo, la búsqueda de reconocimiento, se plantea la tarea de detectar una parte de los yacimientos minerales más grandes, a partir de sus aureolas y flujos de dispersión. Los objetivos de este subestadio se pueden considerar plenamente cumplidos, si mediante sus resultados se detectan áreas con perspectivas dentro de la zona que se estudia, aunque no se descubran nuevos yacimientos minerales.

2. Subestadio de búsqueda detallada. Durante el mismo, los trabajos se realizan en escala 1:25 000 - 1:50 000 dentro de los límites de las áreas con perspectivas reveladas durante el subestadio de búsqueda orientativa, así como dentro de los límites de las regiones meníferas que contengan yacimientos minerales industriales conocidos. Dentro de las tareas de este subestadio está el descubrimiento de nuevos yacimientos minerales, pequeños, medianos y grandes, a partir de sus aureolas y flujos de dispersión, así como el establecimiento de las regularidades que rigen la distribución de los mismos.

3. Subestadio de búsqueda evaluativa. Durante el mismo, los trabajos se efectúan en escala 1:10 000 - 1:2 000 dentro de los límites de los campos meníferos, de los yacimientos ya explorados y en sus flancos, así como en los sectores perspectivas revelados durante el subestadio de búsqueda detallada. Dentro de las tareas a resolver durante este subestadio se destaca la deli-

mitación y determinación de los parámetros de las aureolas y de los cuerpos relacionados con ésta, con el fin de evaluar los diferentes objetos y seleccionar los de mayor perspectivas para su posterior reevaluación mediante pozos de perforación y laboreos mineros, los cuales permitirán seleccionar los objetos que posean mayores posibilidades de ser industriales, para evaluarlos durante el estadio de la exploración preliminar.

Los trabajos litogeoquímicos no se limitan solamente al estadio de búsqueda de los yacimientos minerales; durante todo el proceso de prospección de los yacimientos minerales se efectúan investigaciones geoquímicas. Aunque el interés fundamental de este curso recae en las investigaciones geoquímicas que se enmarcan en el estadio de exploración, creemos necesario explicar algunos aspectos de las investigaciones geoquímicas durante los subestadios de levantamiento geológico y durante los estadios de búsqueda.

Investigaciones geoquímicas durante los estadios de exploración. Estas se efectúan en las escalas 1:2 000 y mayores consisten en el muestreo de todo el volumen ocupado por los yacimientos explorados o en explotación. Estas investigaciones se realizan con la finalidad de descubrir cuerpos meníferos ocultos que yacen en los flancos y en las profundidades de los yacimientos minerales. El muestreo se efectúa en los laboreos mineros y pozos de perforación regularmente distribuidos en el espacio.

Investigaciones geoquímicas durante los subestadios de levantamiento geológico. Las investigaciones geoquímicas son indispensables durante los diferentes subestadios de levantamiento geológico. El objetivo fundamental de estas investigaciones es el estudio de la distri-

bución singenética de todos los elementos químicos en la litósfera, lo que permite resolver las más diversas tareas geológicas.

Dentro de las tareas más importantes que se resuelven mediante las investigaciones geoquímicas durante los subestadios de levantamiento geológico, se destacan las siguientes:

- a) revelación de las anomalías geoquímicas regionales que se relacionan con los diferentes cuerpos intrusivos, provincias geoquímicas y metalogénicas, regiones meníferas, horizontes controladores de menas etc ;
- b) determinación de la especialización geoquímica y metalogénica de los cuerpos intrusivos y evaluación de la capacidad menífera de los mismos, teniendo en cuenta el enriquecimiento de las diferentes intrusiones o de sus contactos activos en determinados elementos meníferos (evaluación directa) o mediante la comparación de sus espectros geoquímicos, es decir, por analogía con respecto a otros intrusivos (evaluación indirecta) ;
- c) determinación del nivel del corte de erosión con respecto a los cuerpos intrusivos, mediante el estudio de la composición química de éstos en la superficie ;
- d) diferenciación e identificación de variedades litológicas .

Métodos litogeoquímicos para la búsqueda de acuerdo a su objeto de estudio

Durante el estadio de búsqueda de los yacimientos minerales se emplean toda una serie de métodos geoquímicos, los cuales se fundamentan en diferentes indicadores de la mineralización (aureolas y flujos de dispersión litogeo-

químicos). De acuerdo al objeto de estudio se distinguen los siguientes métodos litogeoquímicos para la búsqueda.

- a) método de los sedimentos de fondo (búsqueda mediante los flujos de dispersión ;
- b) método metalométrico (búsqueda por las aureolas secundarias de dispersión abiertas);
- c) Método de búsqueda por las aureolas secundarias de dispersión cubierta;
- d) métodos de búsqueda por las aureolas primarias;

A continuación explicaremos los aspectos fundamentales de los diferentes métodos litogeoquímicos por separado.

Método de los sedimentos de fondo

El método de los sedimentos de fondo consiste en el muestreo sistemático de los sedimentos limoarcillosos de los cauces de los pequeños ríos y arroyos, con la finalidad de revelar los flujos de dispersión y las aureolas acumulativas desplazadas. Tanto las aureolas acumulativas desplazadas como los flujos de dispersión son indicadores de las aureolas secundarias y yacimientos que se desarrollan dentro de los límites de los paisajes eluviales y deluviales de la cuenca fluvial objeto de estudio.

El método de los sedimentos de fondo se utiliza durante los subestadios de búsqueda orientativa y detallada. Durante el subestadio de búsqueda orientativa, el método de los sedimentos de fondo, se efectúa en regiones debilmente estudiadas, cuando en ellas existen criterios sobre la existencia de yacimientos minerales. Este método se efectúa conjuntamente con el de jagua, en las regiones montañosas sometidas a una erosión intensa; en las regiones húmedas, con relieve llano, se efectúa conjuntamente con el método hidroggeoquímico. Como regla, el método de los sedimentos de fondo durante este subestadio se efectúa simultáneamente con el levantamiento geológico (fig. 39 y fig. 40) .

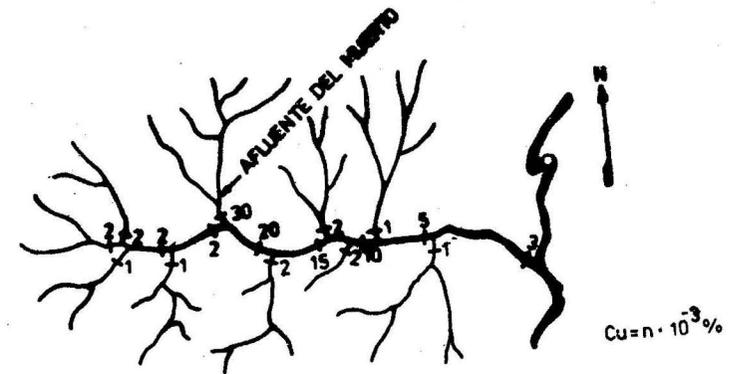


Fig. 39 Carta esquemática donde se muestran los resultados de la búsqueda geoquímica de reconocimiento por el método de los sedimentos de fondo en una región de Filipinas. Los contenidos anómalos de cobre evidentemente son producto del material arrastrado por el afluente del Muerto.

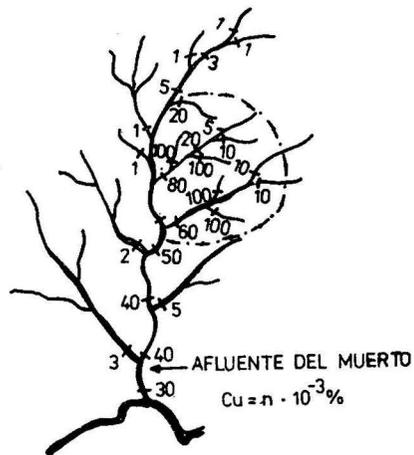


Fig. 40 Formas de representar los contenidos de los elementos indicadores revelados en las muestras de los sedimentos de fondo: 1. mediante bandas; 2. mediante círculos; 3. mediante círculos con sectores; 4. mediante cifras (ej. $n \cdot 10^{-3}$).

En todas las regiones con una red fluvial bien desarrollada se puede efectuar la búsqueda por el método de los sedimentos de fondo, conjuntamente con el método de jagua y el hidrogeoquímico.

La búsqueda litogeoquímica por el método de los sedimentos de fondo se ejecuta por medio del muestreo sistemático de toda la región objeto de estudio; la densidad de los itinerarios de búsqueda depende del grado de desarrollo (densidad) de la red fluvial y de la escala en que se realizan los trabajos (ver tabla 5).

Tabla 5
DENSIDAD DE LA RED DE MUESTREO PARA LA BÚSQUEDA MEDIANTE EL MÉTODO DE SEDIMENTOS DE FONDO

Escala	RED		Cantidad de muestras por cm^2 de la carta	Cantidad de muestras por km^2
	Distancia entre arroyos o ríos a muestrear (km)	Distancia entre los puntos de toma de muestra (m)		
BÚSQUEDA ORIENTATIVA				
1:500 000	5	500	10	0,4
1:200 000	2	500 - 250	4 - 8	1 - 2
1:100 000	1	250 - 200	4 - 5	4 - 5
BÚSQUEDA REALIZADA				
1:50 000	0,5	100	5	20

Los flujos de dispersión de los grandes yacimientos industriales que se desarrollan dentro de las regiones que en la actualidad experimentan una intensa erosión, como regla general alcanzan longitudes superiores a un kilómetro. Por tal razón, al efectuar la búsqueda orientativa, estos flujos pueden descubrirse con toda seguridad con un paso de muestreo de 0,2-0,5 km. Los yacimientos medianos y pequeños, así como algunos yacimientos grandes para los cuales la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos minerales no es lo suficientemente profundo, se pueden pasar por alto con un paso de muestreo de 200 m y más; por esto, para el descubrimiento de los mismos se hace necesario realizar trabajos de búsqueda más detallados en escala 1:50 000 con un paso de muestreo de 100 m.

Al realizar la búsqueda por el método de los sedimentos de fondo se muestran los ríos y arroyos menores de 15 km, tomando en cada punto de muestreo una porción de 50-100 g del material limo-arcilloso que se deposita en los cauces. Las muestras se toman directamente de la superficie o a una profundidad de 15-20 cm dentro de los límites secos de la zona de inundación de las corrientes de agua temporales y permanentes, o bien de las acumulaciones de fondo, de acuerdo con las condiciones locales.

De manera semejante que en el levantamiento de jagua, la toma de las muestras, al emplear el método de los sedimentos de fondo, comienza desde las desembocaduras de los pequeños ríos y sus afluentes, terminando en los nacimientos de los pequeños arroyos, cauces secos, etc. Los cauces con una longitud inferior a la del paso de toma de muestra establecido, se muestran solamente en sus desembocaduras. Los cauces pantanosos y anchos se deben muestrear por sus dos riveras; se deben de muestrear además los conos de dirección y practicar itinerarios aislados por los pies de

montes donde existan afloramientos de las aguas freáticas.

Las muestras se depositan en saquitos, los cuales deben tener una numeración ascendente, de acuerdo con el orden de distribución de los puntos de muestreo. Simultáneamente con el asentamiento de las muestras en la libreta de campo, el colector anota la situación geológica y las particularidades geomorfológicas locales, situando los puntos de muestreo en la carta topográfica donde está reflejada la red fluvial. El colector debe prestar especial atención a la presencia de cantos rodados de rocas alteradas hidrotermalmente, derrubios de minerales meníferos y de otros índices de la mineralización; ante la presencia de estos indicadores se hace indispensable densificar el paso de muestreo de 2-4 veces.

Los itinerarios efectuados, diariamente, se llevan en el campamento a un esquema de la red fluvial. A las muestras recolectadas se les determina la susceptibilidad magnética, la radioactividad y la concentración de una serie de elementos mediante el método de análisis espectral semicuantitativo.

Al elaborar los datos, los contenidos de los diferentes elementos analizados se agrupan en intervalos de clases, de acuerdo al crecimiento progresivo geométrico. En el primer intervalo se incluyen las posibles oscilaciones de los valores de fondo, hasta el límite inferior de los valores anómalos. Los límites de los sucesivos intervalos se seleccionan mediante la multiplicación por una magnitud constante, que puede ser el coeficiente de la progresión geométrica. Por ejemplo: 0-30 . 10⁻⁴ % , 30 - 10⁻⁴ %

100 - 300.10⁻⁴ % , 300 - 1 000.10⁻⁴ % , etc .

Las concentraciones de los elementos pueden ser representado mediante círculos o cuadrados, en los cuales la intensidad de las concentraciones se representa mediante el sombreado de diferentes sectores de los círculos o cuadrados, etc. Los resultados se llevan a un mapa geológico con una representación completa de la red hidrográfica (fig. 41).

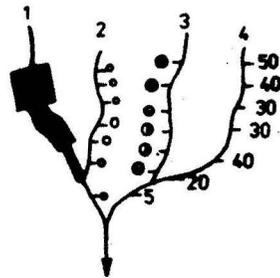


Fig. 41 Formas de representar los contenidos de los elementos indicadores revelados en las muestras de los sedimentos de fondo: 1. mediante bandas; 2. mediante círculos; 3. mediante círculos con sectores sombreros; 4. mediante cifras (ej. $n \cdot 10^{-3}$).

Además de los mapas de distribución de elementos aislados, se confecciona un mapa resumen, en el cual los flujos de dispersión de cada elemento se expresan mediante líneas de un determinado color, trazadas paralelamente al cauce muestreado. La longitud de cada línea representa la prolongación del flujo de dispersión y su grosor va-

riable es proporcional a las concentraciones del elemento en cuestión. La carta resumen se confecciona sobre una base geológica y en ella se delimitan las áreas más probables para el desarrollo de yacimientos minerales, es decir, las áreas de perspectivas sujetas a un estudio más detallado.

Método metalométrico

Este método tiene como finalidad la búsqueda de los yacimientos minerales a partir de sus aureolas secundarias abiertas, fundamentalmente residuales. La efectividad de este método ha sido confirmada por la práctica de muchos años de realización de levantamientos metalométricos en la mayoría de las regiones meníferas de la URSS.

La realización de la búsqueda por el método metalométrico es una tarea indispensable durante todos los estadios de búsqueda y exploración de los yacimientos minerales sólidos, en las regiones cuyas condiciones naturales permitan una exitosa aplicación de este método.

La densidad de la red de muestreo durante la búsqueda metalométrica depende en lo fundamental del grado de detalle de los trabajos (ver tabla 6).

La metalometría, durante el subestadio de búsqueda orientativa, se efectúa en regiones plegadas y desmembradas de clima árido, donde no resulta posible la aplicación del método de los sedimentos de fondo.

La búsqueda metalométrica detallada se efectúa en las laderas de los valles fluviales, en los cuales fueron revelados flujos de dispersión durante el subestadio de búsqueda orientativa y dentro de los límites de las regiones meníferas conocidas. En las regiones cubiertas de las zonas húmedas, conjuntamente con la metalometría se realizan investigaciones hidrogeoquímicas, en la misma escala o en una más pequeña.

Tabla 6
 DENSIDAD DE LA RED DEL MUESTREO METALOMÉTRICO DE ACUERDO AL
 GRADO DE DETALLE

Escala	R E D		Densidad de puntos de muestreo por la carta	Número de muestras por km ²
	Distancia entre perfiles (m)	Distancia entre puntos de muestreo (m)		
BÚSQUEDA ORIENTATIVA				
1: 200 000	2 000	100	20	5
1: 100 000	1 000	100 - 50	10-20	10-20
BÚSQUEDA DETALLADA				
1: 50 000	500	50	10	40
1: 25 000	250	50 - 25	5-10	80-160
BÚSQUEDA EVALUATIVA				
1: 10 000	100	25 - 20	4-5	400-500
1: 5 000	50	20 - 10	2,5-5	1 000-2 000
1: 2 000	20-25	10	1,6-2	4 000-5 000

La búsqueda metalométrica evaluativa se lleva a efecto en áreas pequeñas, en los flancos de los yacimientos ya explorados, así como dentro de los límites de las manifestaciones de menas metálicas reveladas como resultado de los trabajos de búsqueda detallada. Durante este subestadio, la metalometría se realiza con el fin de establecer los límites de los campos y yacimientos minerales; contar las aureolas secundarias de dispersión de los yacimientos, cuerpos y zonas meníferas, con vista a su evaluación.

Al efectuar la búsqueda metalométrica es obligatorio proyectar y ejecutar un muestreo uniforme en toda la superficie del área objeto de estudio. De acuerdo con las instrucciones metodológicas existentes, se prohíbe la ejecución de levantamientos detallados en pequeños sectores aislados dentro de los límites de un determinado campo menífero, si los mismos no tienen un carácter experimental. Es muy importante señalar que todo género de ideas geológicas preconcebidas y subjetivas sólo pueden conducir a entorpecer el logro de nuevas y objetivas informaciones sobre el territorio investigado y el descubrimiento de nuevos yacimientos; esto ha sido confirmado por la práctica en repetidas ocasiones.

Al seleccionar la red del muestreo metalométrico es necesario tener muy en cuenta las dimensiones mínimas, la configuración y la orientación de las aureolas.

En las regiones poco estudiadas, difíciles para la búsqueda, la metalometría se orienta hacia el descubrimiento de los yacimientos grandes y únicos. En las regiones desarrolladas, desde el punto de vista minero-industrial, la metalometría se proyecta con la finalidad de descubrir las aureolas secundarias de dispersión de todos los yacimientos grandes y medianos, así como la mayor parte de las mismas asociadas a los yacimientos pequeños.

Las dimensiones geométricas de las aureolas de dispersión secundarias se determinan por la superficie dentro de cuyos límites la concentración de un elemento metálico dado sobrepasa el valor tomado como límite inferior de las concentraciones anómalas (Ca_1).

En las condiciones de las regiones montañosas, las aureolas secundarias litogeoquímicas de dispersión de los grandes yacimientos industriales de metales no ferrosos y raros, cortados por la superficie de erosión actual, tienen dimensiones de 1 000 por 2 00 m y más; de acuerdo con esto, al orientar las líneas de búsqueda perpendicularmente al rumbo de las zonas anómalas, éstas se pueden revelar mediante una red de 500 por 100 m y al mismo tiempo, con esta red, es posible la revelación de una parte de los yacimientos medianos y pequeños.

Las aureolas secundarias formadas a partir solamente de las aureolas primarias pueden ser reveladas únicamente mediante una red más densa que en el caso señalado con anterioridad.

Al efectuar los trabajos metalométricos, durante el subestadio de búsqueda orientativa, las líneas de búsqueda se orientan perpendicularmente al rumbo de las principales estructuras controladoras de la mineralización. Para lograr una elevada confiabilidad de los trabajos, en la revelación de los objetos de una dimensión dada, la distancia entre líneas (1) tiene que ser inferior al largo de las aureolas asociadas a dichos objetos (L); más exactamente, 1 tiene que ser menor que $0,9 L$. La distancia entre puntos de toma de muestra, en las líneas, tiene que ser menor que la mitad del ancho mínimo de dichas aureolas. Esto permite que las aureolas secundarias de dispersión sean reveladas por dos o más líneas contiguas y por no menos de tres puntos de muestreo.

La selección de la escala del muestreo metalométrico, durante el subestadio de búsqueda evaluativa, se efectúa de acuerdo con la morfología y el tipo genético de los yacimientos estudiados. Teniendo en cuenta estos aspectos, los puntos de muestreo se distribuyen según una red básica; luego, con la finalidad de lograr un mayor grado de detalle, esta red básica se densifica con líneas adicionales, generalmente más cortas y con un paso de muestreo más denso.

Para los yacimientos minerales estratiformes, filonianos, de menas diseminadas y otros, los cuales se caracterizan por presentar afloramientos de cientos de metros, cuando la mineralización en ellos está distribuida con relativa uniformidad, una red para la toma de muestra de 100 por 20 m, en la mayoría de los casos, es suficiente para cumplimentar las tareas de la metalometría durante el subestadio de búsqueda orientativa (carbonatitas, cupro-piríticas, cupro-niquelíferas, areniscas cupríferas, filones cupropiríticos entrelazados y otros).

Para los yacimientos filonianos pequeños, de riffs y otros, los cuales se caracterizan por sus pequeñas dimensiones según el rumbo (decenas y primeras centenas de metros), por la irregularidad de sus formas y por una distribución muy poco uniforme de las menas, al realizar la búsqueda evaluativa, una red de 50 x 10 ó 25 x 10 m es suficiente para efectuar un muestreo metalométrico efectivo (yacimientos filonianos de wolframio, estaño, oro, mercurio y otros).

La realización de la búsqueda metalométrica contempla un aumento paulatino del grado de detalle del muestreo en los sectores perspectivas, aunque no necesariamente hay que aplicar todas las posibles escalas de levantamiento metalométrico. Así tenemos que; por ejemplo, después de efectuada la búsqueda por el método de los sedimentos de

fondo en la escala 1:200 000, en las áreas reveladas como perspectivas se realiza la búsqueda metalométrica detallada en escala 1:50 000; posteriormente se procede a la ejecución de levantamientos metalométricos de escala 1:10 000 en los sectores de desarrollo de aureolas litogeoquímicas secundarias de dispersión, enmarcados dentro del subestadio de búsqueda evaluativa.

Los levantamientos metalométricos a escala 1:10 000 son concluyentes para determinados tipos de yacimientos minerales y conjuntamente con los resultados de los trabajos geofísicos en la misma escala, permiten proyectar los trabajos de perforación y laboreos mineros correspondientes al subestadio de búsqueda evaluativa. Para la búsqueda de tipos de yacimientos más complejos y de cuerpos minerales ciegos, después de establecer los límites del campo menífero mediante el levantamiento metalométrico en escala 1:10 000, la red de muestreo puede ser densificada hasta la escala 1:5 000 e incluso hasta 1:2 000 en algunos sectores aislados.

En las regiones minero-industriales, donde el desarrollo de la mineralización es una realidad, los levantamientos metalométricos pueden comenzarse directamente en escala 1:50 000 con el subsiguiente paso a levantamientos más detallados en escala 1:10 000 y mayores.

Muestreo metalométrico

La muestra metalométrica debe poseer un peso mínimo tal que le permita reflejar con la mayor certeza posible las concentraciones de los diferentes metales en las formaciones muestreadas, es decir, debe ser representativa de dichas formaciones. La profundidad de toma de muestras debe ser la mínima posible, de forma tal que permita revelar con suficiente nitidez las aureolas secundarias de dispersión abiertas y al mismo tiempo lograr la mayor efec-

tividad económica de la búsqueda metalométrica. La profundidad mínima en la cual las aureolas secundarias de dispersión presentan la mayor amplitud y suficiente intensidad como para ser reveladas con toda seguridad recibe el nombre de horizonte representativo de búsqueda (según A.N. Eremeev, 1963).

El horizonte representativo puede coincidir con el horizonte de humus del perfil del suelo, a una profundidad de 10-20 cm, o con el horizonte iluvial, a una profundidad de 50-150 cm. En las regiones húmedas, los elementos de baja capacidad de migración en solución acuosa forman aureolas en el horizonte superior del perfil del suelo, mientras que los móviles resultan lixiviados de los horizontes superiores y concentrados en el horizonte iluvial; en estos casos la profundidad de muestreo debe corresponder con la profundidad del horizonte representativo de los principales elementos formadores de menas, los cuales constituyen el objeto principal de la búsqueda.

El peso de las muestras debe ser superior a los 50 g, tomados de la fracción areno-arcillosa de las formaciones eluvio-deluviales. Cuando las muestras se toman de fracciones gruesas (de más de 0,5 mm) su peso debe ser de 200-300 g.

Las muestras tomadas se embasan en cartuchos de papel correctamente numerados y se asientan en la libreta de campo, señalando el número, ubicación y sus principales características. Al mismo tiempo, el colector debe describir las principales características geológicas y geomorfológicas de los puntos de muestreo, prestando especial atención a la composición y potencia de las formaciones mullidas, presencia de indicadores de la mineralización tales como fragmentos de menas y rocas alteradas hidrotermalmente, alteraciones superficiales, etc.

Si a lo largo de una línea de muestreo se revela la existencia de indicadores de la mineralización, el colector está obligado a densificar el paso de muestreo en dicha línea y se toman muestras por dos líneas intermedias complementarias, trazadas paralelamente a ambos lados de la principal. Si existen fragmentos de rocas alteradas hidrotermalmente o de menas, el colector debe tomar muestras de los mismos.

Durante el desarrollo de los levantamientos metalométricos es estrictamente obligatorio que el colector plasme en el libro de muestras metalométricas de la brigada (todos los resultados) del trabajo diario, reflejados en la libreta de campo; esto constituye una importantísima medida de seguridad, ya que en caso de pérdida de la libreta de campo, lo que suele ocurrir con mucha frecuencia, no se pierden los resultados del trabajo diario debido a que éstos se encuentran muy bien resguardados en la brigada. En el plano de líneas de muestreo se señala mediante sus respectivos números, la ubicación de las muestras recolectadas.

Análisis de las muestras metalométricas

Las muestras metalométricas recolectadas durante el subestadio de búsqueda orientativa son sometidas al análisis espectral semicuantitativo, con la finalidad de determinar las concentraciones de una gran cantidad de elementos indicadores, tanto meníferos como acompañantes. El conjunto de elementos a analizar es aproximadamente de 35, los cuales relacionaremos según el orden de sus números atómicos: Li, Be, F, P, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, La, Te, Ta, W, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U .

Dentro del conjunto de elementos a analizar no se incluyen los radioactivos de corta vida, los raros y disper-

sos tales como Se, Rb, Ga, Cd, Yn, Hf, y Re; los principales elementos formadores de rocas; los platinoides, fáciles de detectar mediante el método de jagua; los elementos gaseosos y los halógenos, con excepción del fluor, elemento formador de yacimientos industriales de fluorita.

A todas las muestras metalométricas recolectadas se les determina la radioactividad alfa y la susceptibilidad magnética; esta última facilita la búsqueda de yacimientos de magnetita, titanomagnetita y de metales no ferrosos acompañados de magnetita, además permite delimitar tubos de kimberlita, diques, macizos de rocas ultrabásicas y solucionar otras tareas relacionadas con el mapeo geológico y la búsqueda.

Durante el subestadio de búsqueda detallada las muestras metalométricas se analizan con el fin de determinar las concentraciones de 12 a 15 elementos solamente, seleccionados de acuerdo con las particularidades metalogénicas de la región estudiada. Las particularidades metalogénicas se establecen sobre la base de la información geológica y geoquímica brindada por los trabajos precedentes. El resto de los elementos indicadores (hasta 35) se analizan sólo desde el punto de vista cualitativo, para revelar la presencia de dichos elementos, analizándose semicuantitativamente dado la presencia de concentraciones de los mismos.

Al llevar a cabo la búsqueda evaluativa en escala 1:10 000 y mayores, el análisis espectral se efectúa para un grupo de 6-8 elementos químicos, meníferos o acompañantes, característicos para un tipo de yacimiento dado, los cuales deben ser capaces de caracterizar la metalogenia, la estructura y la zonalidad del campo menífero.

En el proceso de análisis de las muestras metalométricas resulta de gran importancia determinar la existencia de posibles correlaciones estables entre elementos indica-

dores; en caso de que éstas existan, se procede a la determinación de las concentraciones de los elementos para los cuales el análisis resulta más económico, estimándose las concentraciones de los más raros mediante las ecuaciones de regresión.

Independientemente del subestadio de búsqueda y de la escala del muestreo metalométrico, en cada muestra que manifieste concentraciones anómalas de un metal dado se debe determinar las concentraciones de los elementos raros y dispersos que son acompañantes comunes de dicho metal.

Ejemplos:

Pb y Zn	_____	Ag, Cd, La, Yn y Cu
Mo	_____	Re
Zr	_____	Hf

Elaboración de las muestras metalométricas

La elaboración de las muestras metalométricas consta de tres operaciones fundamentales: secado, cernido y trituración.

Las dos primeras operaciones es preferible efectuarlas directamente en la brigada.

El secado de las muestras se lleva a cabo en un ambiente de aire seco, ya sea directamente al sol (en verano) o en estufas especiales, en caso de no poder utilizar la energía solar.

El tamizado (cernido) se efectúa mediante un tamiz de acero de 0,5 mm. La utilización de tamices de bronce, latón o estaño no se permite.

El tamizado se realiza sobre una lámina de aluminio muy limpia.

Al efectuar la búsqueda en regiones áridas, donde es posible un empobrecimiento de las muestras, debido a la

adición de material eólico, es necesario realizar un tamizado previo con un tamiz de 0,1 mm; es decir, en este caso al análisis se somete el material con un tamaño de los granos entre 0,1 y 0,5 mm.

En todos los casos el peso del material tamizado debe ser igual a 12-15 g; que es el volumen de la muestra que se lleva a la siguiente operación, la trituración.

La trituración de las muestras se debe efectuar con la ayuda de molinos de barras, de laboratorio, o en morteros manuales de ágata o porcelana. Al moler la muestra en molinos de barras de acero, la determinación de la susceptibilidad magnética se efectúa previamente.

La molienda de las muestras se efectúa hasta lograr que las partículas posean un diámetro de 0,07 mm, lo que se establece como regla general al tacto.

Control del muestreo metalométrico

La exactitud del muestreo se controla mediante toma de muestras de control, las cuales deben de constituir alrededor del 3 % del total de muestras recolectadas. El muestreo de control debe realizarse en las líneas elegidas por el colector de más experiencia y calificación.

La calidad del muestreo metalométrico debe ser controlada periódicamente por el jefe de la brigada, mediante la revisión del mismo a lo largo de diferentes líneas. El control del muestreo es necesario en los puntos de muestras anómalas aisladas, después de confirmar el carácter anómalo de las mismas mediante la repetición de los análisis; también es necesario efectuar muestreo de control en las líneas o en los sectores donde se alteren las regularidades del campo de dispersión y por tal razón existan dudas.

La calidad de la búsqueda metalométrica se evalúa por la magnitud de los errores medio cuadrático y medio rela-

tivo. Para cada uno de los elementos determinados en las muestras metalométricas, se debe calcular por separado el error medio relativo y el medio cuadrático.

La calidad de la búsqueda metalométrica no se considera satisfactoria en los siguientes casos:

- a) desviaciones del proyecto no argumentadas;
- b) muestreo por encima del horizonte representativo;
- c) insuficiente cantidad de muestras de control;
- d) desviaciones no permisibles de los resultados de las muestras de control con respecto a las fundamentales;
- e) baja sensibilidad de los análisis;
- f) información primaria deficiente;
- g) ausencia en el laboratorio de los espectrogramas y las muestras;
- h) otras desviaciones de la metodología, que ponen en duda la calidad de los resultados.

Interpretación de los resultados de la metalometría

Para la correcta interpretación de los resultados de la metalometría se hace necesario un análisis detallado en el campo de los diferentes sectores anómalos revelados mediante la aplicación de este método, con la finalidad de revelar otros índices de la presencia de la mineralización tales como fragmentos de menas, afloramientos de minerales meníferos y rocas alteradas hidrotermalmente, alteraciones superficiales, etc.

Es también muy importante estudiar la relación entre las anomalías geoquímicas reveladas por el método metalométrico y los horizontes y estructuras tectónicas controladores de la mineralización, lo que permite hacer una mejor interpretación de dichas anomalías.

Al interpretar y evaluar las anomalías reveladas por el método metalométrico es de gran utilidad, e indispensable,

comparar éstas con los resultados de los trabajos geofísicos, ya que el análisis conjunto de estos índices ofrecen una mayor información sobre la perspectiva del sector anómalo. Hay que tener presente que las aureolas secundarias y la mineralización coinciden con sectores anómalos de determinados campos físicos (eléctricos, magnéticos, gravitacional, radioactivo, etc).

Durante la interpretación y evaluación de las anomalías metalométricas es muy importante tener en cuenta la paragénesis de elementos característicos de las mismas; esto brinda información sobre el tipo de mineralización a la cual se asocia la anomalía y sobre la posición del corte de erosión con respecto a las menas. Con la finalidad de precisar algunos detalles, durante la evaluación de las anomalías geoquímicas, se pueden realizar algunos trabajos adicionales, los cuales permitirán una mejor evaluación de las anomalías, y a la larga harán más económica y efectiva la búsqueda. Estos trabajos adicionales, relativamente poco costosos, permitirán seleccionar los objetos más перспекivos y evitará la proyección y ejecución de trabajos innecesarios en los objetos no перспекivos, lo que sin duda aumenta la efectividad de la búsqueda desde todos los puntos de vista dentro de los objetivos fundamentales de estos trabajos adicionales está la determinación del carácter menífero de las anomalías y precisan la posición del corte de erosión con respecto a los cuerpos meníferos.

Al interpretar las anomalías metalométricas es necesario tener en cuenta la relación de éstas con los diferentes paisajes geoquímicos; esto permite una interpretación más efectiva.

Trabajos experimentales

La búsqueda metalométrica en nuevas regiones y en nuevos objetos obligatoriamente deben de comenzar con la rea-

lización de toda una serie de trabajos experimentales. En el programa de los trabajos experimentales se incluye el establecimiento de las concentraciones de fondo, de las dimensiones geométricas de las aureolas, de la variabilidad de las aureolas en el plano y en el perfil, la posición del horizonte representativo, la distribución de los elementos indicadores en las diferentes fracciones granulométricas, es decir, todas las cuestiones básicas relacionadas con la metodología de la búsqueda metalométrica.

Los trabajos experimentales tienen la finalidad de establecer los parámetros óptimos del muestreo metalométrico tales como densidad óptima de la red de muestreo para revelar, con una elevada probabilidad de éxito, los diferentes objetos; profundidad óptima de muestreo, donde las aureolas de los elementos indicadores poseen las mayores dimensiones y suficiente intensidad como para ser reveladas; fracción granulométrica que se debe analizar para lograr las mejores determinaciones de las concentraciones de los elementos químicos, etc. Además de establecer los parámetros óptimos del muestreo, los trabajos experimentales tienen como finalidad obtener toda una serie de informaciones que permitirán hacer un correcto análisis de los resultados de la búsqueda metalométrica, sobre la base del estudio de la composición de las anomalías y de la zonalidad geoquímica, lo que se manifiesta en la paragénesis (asociación) de elementos de dichas anomalías; esto permite precisar la posición del corte de erosión, con respecto a los cuerpos meníferos, teniendo en cuenta la zonalidad geoquímica; establecer la composición de los cuerpos meníferos, por las asociaciones de elementos, y diferenciar las anomalías meníferas de las no meníferas (como las que se relacionan con los sectores de mineralización dispersa), sobre la base de las paragénesis de elementos y de la zonalidad.

Los trabajos experimentales se llevan a cabo dentro de los límites de campos meníferos y yacimientos conocidos, dentro de los cuales se desarrollan aureolas secundarias abiertas; los resultados de los trabajos experimentales se consideran óptimos, si permiten revelar las aureolas de las manifestaciones meníferas conocidas y de otras aún no conocidas; establecer la zonalidad menífera del campo o yacimiento mineral y precisar las regularidades generales que rigen la distribución de la mineralización dentro de sus límites (horizontes y estructuras controladoras de menas, etc). Si la metodología de los trabajos experimentales es capaz de resolver estas tareas, entonces puede ser extensiva a sectores con características similares.

Método de búsqueda por las aureolas primarias

La búsqueda mediante las aureolas primarias consiste en el estudio de la distribución de los elementos indicadores en las rocas encajantes de menas, mediante el muestreo sistemático de las mismas. Esto permite resolver exitosamente las siguientes tareas:

1. Evaluación perspectiva del contenido menífero de los horizontes profundos y de los flancos de los yacimientos conocidos, así como la revelación de cuerpos meníferos ciegos dentro de sus límites.
2. Evaluación del contenido menífero en profundidad de las manifestaciones meníferas y anomalías reveladas.
3. Búsqueda de cuerpos meníferos ciegos dentro de los límites de las áreas favorables por sus peculiaridades geológicas, distribuidas tanto dentro de los límites de los campos meníferos conocidos como de las provincias en proceso de estudio.

En los casos favorables la búsqueda por las aureolas primarias permite revelar cuerpos meníferos ciegos que yacen en una profundidad de hasta 300 m .

La búsqueda mediante las aureolas primarias se realiza durante los subestadios de búsqueda detallada y evaluativa. También durante los diferentes estadios de exploración de los yacimientos minerales se efectúan trabajos de búsqueda mediante el estudio de las aureolas primarias.

La búsqueda detallada por las aureolas primarias se efectúan en escala 1:50 000 y 1:25 000, dentro de los límites de las áreas privadas de depósitos mullidos de cobertura. La red de muestreo al efectuar la búsqueda en escala 1:50 000 es de 500 x 50 m y en escala 1:25 000 es de 250 x 20 m. En las zonas caracterizadas por una distribución irregular de los afloramientos, las líneas de muestreo se trazan por los lugares que presentan el mayor grado de afloramientos, permitiéndose desviaciones de la red indicada de hasta un 30 %; es decir, en este caso se utiliza una red de muestreo no sistemática;

Durante la búsqueda detallada por el método de las aureolas primarias se le presta especial atención a los sectores de rocas alteradas hidrotermalmente (skarnitizadas, greisinitizadas, etc) y de otras formaciones relacionadas con los procesos postmagmáticos, donde existen mayores posibilidades de revelar yacimientos hidrotermales.

En las áreas cubiertas, el muestreo geoquímico con la finalidad de revelar las aureolas primarias, durante el subestadio de búsqueda detallada, se efectúa en todos los pozos estructurales de búsqueda y de mapeo. Esto permite con certeza evaluar las anomalías geofísicas, determinar la presencia de la mineralización por debajo de los pozos, evaluar el contenido menífero del espacio próximo al pozo y orientar correctamente la ubicación de nuevos pozos. El muestreo de todos los pozos es estrictamente obligatorio ya que esto puede ofrecer valiosas informaciones sobre la presencia de la mineralización que de otra forma no pueden ser obtenidas, además, hay que tener presente que el

costo de un pozo de perforación es muy elevado, por tal razón es sumamente necesario obtener del mismo el mayor volumen de información posible, lo cual no se cumple si no se efectúa el muestreo geoquímico. La no realización del muestreo geoquímico en los pozos de perforación y labores mineros ha impedido, en muchos casos, la revelación de cuerpos minerales ciegos.

Particularidades del muestreo litogeoquímico

Como se señaló con anterioridad, la búsqueda mediante las aureolas primarias consiste en el muestreo sistemático de las rocas encajantes (rocas frescas). Si el muestreo se realiza en los afloramientos naturales, las muestras se toman mediante una red de puntos distribuidores en toda la superficie del afloramiento; de cada nodo de la red se toma un fragmento de dos a tres cm, los cuales reunidos constituye la muestra que debe tener un peso de 200 a 300 g. Si en el afloramiento existe más de un tipo de litología se debe de tomar una muestra independiente para cada una de ellas. Aunque no es la forma más efectiva, durante el muestreo litogeoquímico de los afloramientos se toma un solo fragmento del tamaño aproximado a un puño, el cual por si solo constituye la muestra.

El muestreo de los pozos de perforación y labores mineros se efectúa por el método (o modo) de surcos punteados. Este método consiste en lo siguiente: la longitud (paso) de muestreo se divide en pequeños intervalos de 10 ó 20 cm cada uno, en el punto medio de cada intervalo se toma un pequeño fragmento de 2 a 3 cm, luego todos los fragmentos se unen constituyendo la muestra litogeoquímica con un peso de 200 a 300 g. La longitud de cada muestra (paso) es variable, dentro de los límites de las rocas encajantes, la longitud de las muestras, como regla general, es de 5 ó 10 m; si dentro de un mismo paso de

muestreo existe más de un tipo de litología, entonces hay que tomar una muestra independiente para cada una de ellas. Dentro de los límites de las rocas alteradas hidrotermalmente y en las proximidades de los cuerpos meníferos la longitud de muestreo se disminuye hasta un m o menos (0,5 m).

Durante la realización del muestreo se hace indispensable la documentación minuciosa de cada paso de muestreo, destacando la particularidades litológicas, alteraciones hidrotermales, presencia de mineralización, etc. Las muestras deben ser cuidadosamente embasadas, numeradas y ubicadas en el espacio; se deben de realizar croquis de muestreo y mantener en orden la libreta de muestras litogeoquímicas.

Después de realizado el muestreo se procede a la elaboración de las muestras y al análisis de las mismas. Al igual que en el método metalométrico, las muestras se analizan mediante el análisis espectral semicuantitativo para un total de 18 elementos, durante la búsqueda detallada, mientras que durante la búsqueda evaluativa y durante los trabajos de búsqueda dentro de los estadios de exploración se analizan de 6 a 8 elementos, capaces de caracterizar la zonalidad de las aureolas y las particularidades metalogénicas de los yacimientos.

Antes de concluir con la búsqueda por las aureolas primarias queremos señalar que, al igual que en el método metalométrico, previo a la realización de las mismas se hace necesario realizar trabajos experimentales, con el fin de precisar las características de las aureolas primarias (morfología, dimensiones, zonalidad, etc) y de esta forma establecer la red óptima de muestreo, el conjunto de elementos a analizar, las paragénesis de elementos característicos para las diferentes partes de las aureolas con respecto a los cuerpos meníferos, etc. A partir de los re-

sultados de los análisis se confeccionan cartas y perfiles geoquímicos siguiendo la misma metodología descrita con anterioridad en el capítulo correspondiente a la elaboración de los datos geoquímicos. Durante la elaboración de los datos de la búsqueda por las aureolas primarias es más efectivo el método de los índices multiplicativos, el cual es más rápido y permite hacer una interpretación más eficaz.

Método de búsqueda por las aureolas litogeoquímicas de dispersión cubiertas. Generalidades

La búsqueda de los yacimientos minerales a partir de sus aureolas cubiertas (búsqueda profunda) solo se realiza dentro de los límites de las provincias metalogénicas y regiones meníferas conocidas o en regiones poco estudiadas pero de grandes perspectivas para el desarrollo de determinados tipos de yacimientos minerales. Al efectuar este tipo de búsqueda es indispensable tener en cuenta las regularidades establecidas acerca de la distribución de la mineralización y los criterios de búsqueda más sólidos; además, es necesario disponer del mapa geólogo-estructural esquemático del área objeto de estudio, al nivel de la superficie de las rocas madres.

La confección de los mapas geólogo-estructurales esquemáticos en las zonas cubiertas chocea con toda una serie de dificultades, las cuales pueden ser superadas con relativo éxito mediante la conjugación de investigaciones geológicas, geofísicas y geoquímicas, con la ayuda de trabajos de perforación y laboreos mineros.

Los principales índices para la búsqueda profunda de los yacimientos son sus aureolas litogeoquímicas de dispersión cubiertas: residuales lixiviadas, residuales cubiertas y superpuestas cubiertas. Para poder revelar y estudiar estos índices, en cada una de las regiones objeto

de estudio, es necesario determinar correctamente la posición del horizonte representativo, el cual se corresponde, en la mayoría de los casos, con algunos de los horizontes de las antiguas cortezas de intemperismo; en algunos casos se corresponde con el nivel superior de las aguas freáticas.

La búsqueda exitosa mediante las aureolas cubiertas sólo es posible cuando se tiene una idea acerca de los tipos genéticos de formaciones mullidas, el carácter del relieve enterrado, de las formas en que se encuentran los elementos indicadores en las aureolas y de otros factores que determinan el tipo, la morfología y las dimensiones de las aureolas.

La selección de los medios técnicos necesarios, y a veces la racionalidad de la búsqueda profunda se determinan por el espesor y la composición de las formaciones mullidas que yacen por encima del horizonte representativo. De aquí que, una condición indispensable para que la búsqueda profunda se realice correctamente, desde el punto de vista metodológico, está dada por la necesaria subdivisión de las áreas por categorías, de acuerdo al grado de dificultad para la búsqueda. Para esto es necesario dividir las áreas en sectores con espesores de las formaciones mullidas desde 0 hasta 2 m ; desde 2 hasta 5 m ; desde 5 hasta 20 m y de más de 20 m .

Para la subdivisión de las áreas en sectores, de acuerdo a la magnitud del espesor de los depósitos mullidos, es necesario primeramente construir los mapas de isopacas a partir de los datos de S E V, laboreos mineros y perforaciones; después se trazan con líneas rectas los límites de los diferentes sectores. Los espesores límites máximos de los depósitos mullidos de cobertura se seleccionan condicionalmente, teniendo en cuenta las posibilidades de los medios técnicos que se posean para la búsqueda.

Las características de los sectores de diferentes categorías de dificultad, así como los métodos que se utilizan para el estudio de los mismos se resumen en la tabla 7 .

Estadios de los trabajos de prospección profunda de los yacimientos minerales

El proceso de prospección de los yacimientos que se desarrollan en las áreas cubiertas y que no presentan en la superficie índices directos que revelen la existencia de los mismos se lleva a cabo en diferentes estadios y subestadios. Las tareas más importantes se resuelven durante el estadio de levantamiento geológico y trabajos geofísicos regionales y durante el estadio de búsqueda.

Después de seleccionar las áreas perspectivas sobre la base de los datos existentes (mapas geológicos, metalogénicos, geofísicos, geoquímicos, etc) se procede a la ejecución del mapeo geológico profundo (subestadio I-4) , mediante el cual se confecciona el mapa geológico y el espesor de las formaciones de cobertura en escala 1:50 000 prestando especial atención a la revelación de los factores controladores de la mineralización característica para los yacimientos perspectivas de la región objeto de estudio. Luego se procede a la realización de la búsqueda mediante el empleo de un complejo de métodos, incluyendo los geoquímicos en los sectores más perspectivas.

La escala más racional para la búsqueda de los yacimientos grandes y medianos es de 1:50 000 (red de 500 x 40 m); mientras que para los pequeños es de 1:25 000 (red de 250 x 20 m) . La densidad de la red se elige de forma tal que las aureolas secundarias puedan ser elevadas por lo menos por dos líneas de búsqueda y por tres puntos de muestreo.

En los flancos de los yacimientos conocidos la búsqueda profunda detallada se efectúa en la escala 1:10 000 (red de 100 x 20 m). Con esto la búsqueda se efectúa paralelamente con los trabajos para el estudio de la estructura del fundamento (rocas encajantes). En este caso la perforación tiene un carácter de búsqueda y mapeo; con la ayuda de métodos geofísicos es posible la revelación y contorno de diques y fallas, así como la resolución de otras tareas relacionadas con el mapeo geológico.

Tabla 7

DIVISIÓN DE LAS AREAS EN SECTORES DE ACUERDO A LAS CATEGORÍAS DE DIFICULTAD PARA LA BÚSQUEDA (SEGÚN A.N. EREMIEV, 1963)

Categoría de dificultad para la búsqueda	Breves características de los depósitos mullidos	Tipos de aureolas secundarias de dispersión	Métodos y medios técnicos para la búsqueda
1	Sectores con un grado de afloramiento considerable de las rocas madres y con una cobertura de depósitos mullidos, aluviales y deluviales 0,5 m	Abiertas de intensidad normal	Búsqueda litogeométrica por las aureolas secundarias abiertas (metalometría) y por aureolas primarias, métodos geológicos visuales, levantamiento gamma (aereo y automotriz)

Tabla 7 (cont.)

2	Sectores cubiertos por espesores de hasta 2 m de depósitos eluviales y deluviales	Lixiviadas en la superficie	Búsqueda metalométrica con la ayuda de labores mineros hasta una profundidad de 1-5 m, métodos radiométricos, etc.
3	Sectores cubiertos por espesores de 2 a 5 m de depósitos mullidos principalmente alóctonos	Fuertemente lixiviadas y no profundamente enterradas	Búsqueda por las aureolas cubiertas (profunda) y radiometría, con la ayuda de labores mineros hasta una profundidad de 5-6 m
4	(Idem), con espesores de los depósitos mullidos de 5 hasta 25 m	Enterradas	Búsqueda por las aureolas cubiertas y carotaje gamma, con la ayuda de pozos de perforación

190

Tabla 7 (Cont.)

5	(Idem), con espesores de los depósitos mullidos de más de 25 m	Profundamente enterrados	Búsqueda profunda mediante el muestreo de testigos y lodos de perforación y carotaje gamma de los pozos de perforación. Los pozos de perforación pueden alcanzar profundidades de hasta 100 m
---	--	--------------------------	---

191

TEMA 8 BÚSQUEDA HIDROGEOQUÍMICA

El método hidrogeoquímico tiene como objetivo fundamental la búsqueda de los yacimientos minerales a partir de sus aureolas y flujos de dispersión hidrogeoquímicos; por tal razón, la búsqueda hidrogeoquímica se lleva a cabo mediante el muestreo sistemático de las aguas naturales, con el fin de estudiar en las mismas la distribución de elementos y compuestos indicadores (fig. 42).

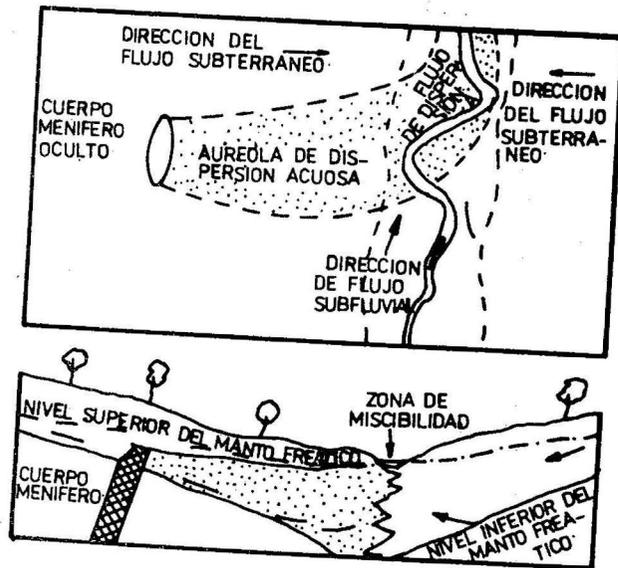


Fig. 42 Esquema de la formación de una aureola y un flujo de dispersión hidrogeoquímico en las proximidades de un río (según H.E. Hawkes y J.S. Webb)

La utilización del método hidrogeoquímico es posible para la búsqueda de yacimientos cuyas menas al oxidarse forman compuestos solubles en agua. Este método es muy efectivo para la búsqueda de yacimientos sulfurosos y en menor grado para la búsqueda de yacimientos no sulfurosos de uranio, berilio, boro, litio y otros elementos.

La particularidad más importante del método hidrogeoquímico es su gran profundidad de penetración, debido a que las aureolas y flujos de dispersión hidrogeoquímicos no solo se originan a partir de los yacimientos abiertos sino también a partir de los yacimientos que no afloran a la superficie, pero que son drenados por las aguas subterráneas que posteriormente afloran a la superficie; de ahí que la tarea más importante del método hidrogeoquímico sea la búsqueda de los yacimientos ocultos que yacen profundamente. En la actualidad existe experiencia acumulada sobre la revelación de yacimientos ocultos que se encuentran a una profundidad de 70-150 m, por medio de las aureolas de dispersión hidrogeoquímicas que afloran a la superficie en forma de manantiales (fig. 43).

Tareas que se resuelven mediante el método hidrogeoquímico

Al aplicar el método hidrogeoquímico durante la búsqueda de los yacimientos minerales se pueden resolver las siguientes tareas:

1. Revelación de yacimientos ocultos dentro de los depósitos sedimentarios de las zonas de plataforma, mediante el muestreo sistemático de las aguas de los diferentes horizontes.
2. Revelación de yacimientos ocultos que yacen profundamente en las rocas de las zonas plegadas (geosinclinales) relacionados con horizontes acuíferos que ascienden a la superficie a través de fisuras (fallas).

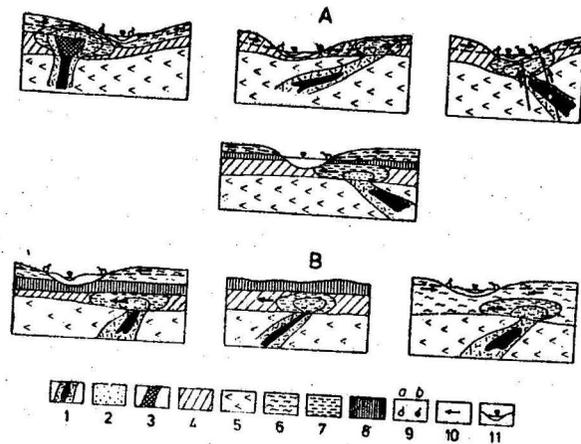


Fig. 43 Tipos de aureolas hidrogeoquímicas de dispersión : A) abiertas, B) cerradas.
 1. cuerpo menífero y su aureola primaria;
 2. aureola secundaria; litogeoquímica;
 3. mena oxidada; 4. corteza de intemperismo;
 5. rocas encajantes de menas; 6. rocas sedimentarias; 7. aureola hidrogeoquímica;
 8. rocas impermeables; 9. manantiales con concentraciones de fondo;
 A) anómalas, B) dirección del flujo de las aguas subterráneas, 11. nivel de base de erosión.

3. Revelación de cuerpos meníferos ocultos dentro de los límites de las áreas de desarrollo de aureolas secundarias litogeoquímicas.
4. Contorneo de los campos meníferos y de algunos cuerpos por separado dentro de éstos.
5. Argumentación de los lugares donde han de efectuarse pozos de prospección y laboreos mineros.
6. Obtención de información complementaria para la evaluación de las anomalías y manifestaciones de la mineralización reveladas por los métodos de búsqueda geofísicos litogeoquímicos, geólogo-mineralógico, etc.

Además de estas tareas relacionadas con la búsqueda de los yacimientos minerales, el método hidrogeoquímico es capaz de resolver otras tareas muy específicas relacionadas con las particularidades geológicas, metalogénicas y geoquímicas de la región objeto de estudio como son:

1. Estudio de la distribución de los elementos químicos en diferentes tipos de rocas, tanto por su edad como por su composición petrográfica.
2. Revelación de sectores donde se manifiestan procesos hidrotermales.
3. Revelación de dislocaciones tectónicas con desarrollo de rocas alteradas hidrotermalmente.

Ventajas y limitaciones del método hidrogeoquímico con respecto a los litogeoquímicos

1. Mayor capacidad de penetración
2. Las aureolas y flujos de dispersión hidroquímicos poseen mayores dimensiones, tanto en área como en volumen, que los litogeoquímicos. Esto ofrece la posibilidad de revelar los yacimientos minerales con una red de muestreo más enrarecida.

Está claro que ambas ventajas están relacionadas con la gran capacidad de migración del agua, y con ella los

componentes disueltos, en la parte superior de la corteza terrestre.

Desventajas

1. El método está limitado a las regiones húmedas, donde existe una cantidad relativamente grande de manantiales y corrientes de aguas superficiales. En las regiones áridas el método hidrogeoquímico sólo se puede efectuar con la ayuda de pozos de perforación.
2. Debido a la gran variabilidad de los valores absolutos de los índices hidrogeoquímicos de búsqueda en el tiempo, se hace necesario realizar observaciones del régimen de variación e introducir las correspondientes correcciones.
3. La gran variabilidad de la intensidad y composición cualitativa de las aureolas hidrogeoquímicas en el tiempo y en el espacio crean dificultades en su interpretación.
4. Debido a la baja concentración de los metales en las aguas se hace necesario la utilización de métodos de análisis y sensibles para medir las mismas.
5. Las muestras de agua son muy voluminosas, difíciles de transportar y almacenar; por tales razones, se hace necesario el empleo de equipos de análisis portátiles, situados en las proximidades de los lugares de toma de muestras.

Particularidades de las aguas de fondo

Las anomalías hidrogeoquímicas se revelan dentro del fondo general disperso de las aguas naturales; es decir, se desarrollan dentro de los límites de las aguas de fondo o normales.

La composición química de las aguas de fondo depende de las características geológicas e hidrogeológicas de la

región, sin la influencia de las manifestaciones y yacimientos minerales.

Los factores regionales que influyen en la composición de las aguas de fondo son los siguientes:

1. Composición química y grado de intemperismo de las rocas encajantes

La composición química de las aguas de fondo está relacionada fundamentalmente con la disolución de los minerales formadores de rocas. Como resultado de esto, la composición de las aguas puede ser utilizada en la cartografía geológica. Así tenemos que:

- a) con las serpentinitas se corresponden las aguas magnésico-cálcicas ;
- b) con los gabros los cálcico-magnésicas ;
- c) con las dioritas las calco-sódicas;
- d) con los granitos los sódico-cálcico-sulfatadas;
- e) con las calizas las cálcico-magnésico-hidrocarbonatadas.

Por otro lado podemos señalar que las aguas relacionadas con rocas silicatadas, como regla general, poseen una mineralización 1,5-2 veces más baja y menores valores del P_H que las aguas de las rocas carbonatadas. Evidentemente está relacionado con la mayor solubilidad de los componentes de las rocas carbonatadas.

El grado de intemperismo es un factor que influye de una forma muy notable en la composición de las aguas naturales; a mayor grado de intemperismo la mineralización de las aguas se hace más intensa, debido a que pasa a la solución un mayor volumen de componentes; por lo tanto, las aguas relacionadas con las rocas que se meteorizan con mucha facilidad, como regla, poseen mayor mineralización que aquellas que se meteorizan con mucha dificultad.

2. Desmembración del relieve

Se ha comprobado que la mineralización de las aguas

guarda relación con el grado de desmembración del relieve, a medida que éste aumenta se reduce considerablemente la mineralización de las aguas. Por ejemplo, en las regiones montañosas alpinas, como los Urales meridionales, la mineralización es de 50-100 mg/l (zona muy desmembrada) mientras que en las regiones de colinas aisladas éstas llega a veces hasta 300-400 mg/l.

3. Característica de los paisajes geoquímicos

El paisaje geoquímico influye notablemente en la composición de las aguas naturales. Dentro de los límites de los paisajes autóctonos (eluviales y deluviales) que se corresponden con las zonas de alimentación de las aguas subterráneas, la mineralización de estas aguas es pequeña. Lo mismo sucede con las aguas superficiales.

En los paisajes transeluviales (zona de transición) se produce el crecimiento paulatino de la mineralización, la cual es directamente proporcional al tiempo de contacto de las aguas con las rocas.

La mayor mineralización se observa en los paisajes subordinados, los cuales se corresponden con las zonas de descarga de las aguas de la región.

El crecimiento de la mineralización en pequeños ríos, con un gasto de 2-10 m³/s, puede ser de 3-4 veces mayor con respecto a los manantiales.

4. Zonalidad climática

Además de todos los factores estudiados, la zonalidad climática desempeña un importante papel en la composición de las aguas naturales; no presentan la misma composición las aguas de una zona húmeda que las de una zona desértica aunque sean semejantes por las demás características.

Particularidades de la formación de las aureolas hidrogeoquímicas de dispersión

Durante el estudio de la distribución de los elemen-

tos químicos en las aguas de fondo, inevitablemente nos encontramos con las anomalías hidrogeoquímicas. Como regla general las anomalías más importantes están relacionadas con las estructuras controladoras de la mineralización, con los yacimientos, con los cuerpos meníferos y con sus aureolas de dispersión litogeoquímicas.

Las aureolas y los flujos de dispersión hidrogeoquímicos se forman como resultado de la oxidación de las menas y la disolución de los macro y microcomponentes que se encuentran en ellas (fig. 42).

Los agentes que conducen a la oxidación de las menas son los siguientes:

1. Inundación de los yacimientos y temperatura de las aguas.
2. Concentración en las aguas de agentes oxidantes: oxígeno, ácido carbónico, etc.
3. Solución electroquímica.
4. Actividad bacteriana.

La presencia de la humedad y el calor está condicionada por factores regionales, dentro de los cuales se destaca el clima. En particular, el papel del clima se reduce al cambio de la cantidad de precipitaciones atmosféricas que llega a la zona de oxidación del yacimiento, a mayor cantidad de precipitaciones más intensa será la oxidación. Los cambios de temperatura por otro lado, aceleran o hacen más lento el proceso de oxidación.

El proceso de oxidación de los sulfuros y su transformación en sulfatos muy solubles es una reacción exotérmica y por eso puede realizarse sin ningún tipo de limitación en las condiciones de bajas temperaturas. La transformación de sulfatos en carbonatos y la descomposición de los silicatos se pueden verificar solamente con la absorción de calor (reacciones endotérmicas, por tal razón, estos procesos no se desarrollan en condiciones de bajas

temperaturas.

Dentro de los factores locales que influyen en los parámetros de las aureolas de dispersión hidrogeoquímicas se distinguen los geológicos y los hidrogeológicos.

Factores geológicos. Composición química y mineralógica de los cuerpos meníferos, grado de oxidación de las menas, textura y estructura de las menas, carbonaticidad del ambiente, etc.

Factores hidrogeológicos. Permeabilidad de las menas y rocas encajantes, zonalidad hidrogeológica, intensidad de intercambio de agua, etc.

Las aureolas más claras y de composición más variada son las de los yacimientos de menas sulfurosas. A modo de ejemplo podemos señalar que las menas de los yacimientos calcopiríticos de los Urales meridionales están compuestos por pirita, calcopirita, esfalerita, galena, tetraedrita y barita, presentan en su composición el siguiente complejo de elementos:

Cu, Zn, Fe, Sb, S, Ba, Cd, Mo, Mn y Co. Esto se refleja en la composición de sus aureolas hidrogeoquímicas, las cuales se caracterizan por una elevada mineralización de hasta 40 000 mg/l ; por contenidos elevados del ion $\text{SO}_4^{=}$ (hasta 1 000 - 15 000 mg/l) ; Cu (hasta 750 mg/l) ;

Zn (hasta 300 mg/l) ; Cd (hasta 40 mg/l) ; Fe (hasta 2 000 mg/l) ; Co (40 mg/l) y Mn (hasta 40 mg/l) .

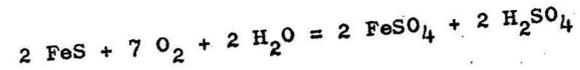
En la composición y dimensiones de las aureolas hidrogeoquímicas influyen grandemente las aureolas primarias de los yacimientos endógenos y las acumulaciones circunmeníferas de los yacimientos de génesis sedimentarias. Las aureolas primarias elevan en las aureolas hidrogeoquímicas las concentraciones del ion $\text{SO}_4^{=}$ y de los elementos volátiles tales como: As, Bo, F, Li, Hg y Cl .

Las aureolas hidrogeoquímicas que se forman a partir de las primeras suelen ocupar grandes áreas.

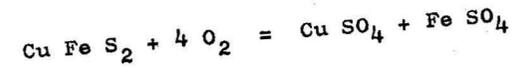
Particularidades de la formación de las aureolas hidrogeoquímicas de los yacimientos sulfurosos

En estos casos es de suma importancia el papel que desempeña la oxidación de los sulfuros; en las condiciones de temperatura ambiente la solubilidad de los sulfuros es muy baja, no excediendo los $6 \cdot 10^{-6}$ g/l, pero al oxidarse dan lugar a compuestos mucho más solubles.

Hay casos como el de la pirita, marcasita, y la arsenopirita que al oxidarse liberan ácido sulfúrico según la reacción:

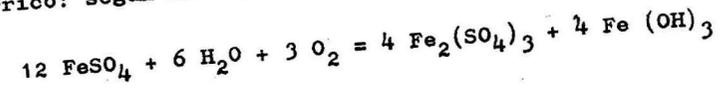


Otros sulfuros como la calcopirita al oxidarse sólo forman sulfatos:



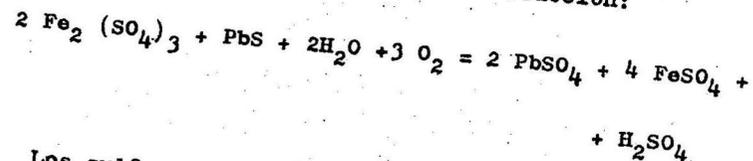
El H_2SO_4 acelera grandemente el proceso de la desintegración de los sulfuros; por tal razón, los cuerpos meníferos que contienen pirita se oxidan más rápidamente.

Si existe exceso de oxígeno el sulfato ferroso pasa a férrico: según la siguiente reacción:

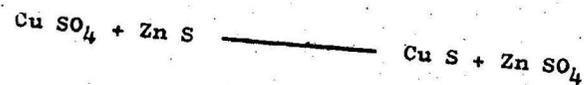


Esta reacción se acelera enérgicamente por la actividad vital de las bacterias.

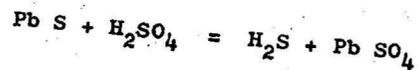
El sulfato férrico a su vez influye energicamente sobre los sulfuros, según la siguiente reacción:



Los sulfuros se oxidan energicamente bajo la influencia del $\text{SO}_4 \text{Cu}$:



La influencia acelerante del ácido sulfúrico en la disolución de los sulfuros se puede expresar por medio de la reacción:



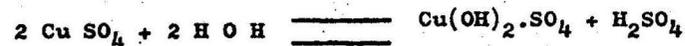
Bajo los efectos del H_2SO_4 los minerales filonianos y formadores de rocas se descomponen y pasan a solución: ej. Si, Na, K, Mg, etc.

Con la disociación del ácido sulfúrico en las aguas ocurre la acumulación de los iones H^+ y el P_H del agua se reduce.



También ocurre cierta reducción del P_H como resultado de la hidrólisis, durante la interacción de los sulfatos

con las aguas alcalinas e hidrogenocarbonatadas.



Tales reacciones se producen en un intervalo de P_H entre 5 y 7 .

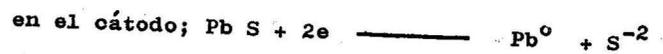
Como consecuencia de la disminución del P_H ocurre la desaparición del ión hidrogenocarbonato y en las aureolas hidrogeoquímicas se acumula el ácido carbónico.

A medida que aumenta la concentración del CO_2 y se reduce el P_H , las aguas aumentan su agresividad y por ende ocurre una disolución complementaria de los minerales no sulfurosos de la masa filoniana y de las rocas encajantes; de esta forma las aguas aureólicas se enriquecen en gases tales como H_2S , CO_2 , H_2 , en metales pesados, en el ión sulfato (SO_4^-) y en los metales Na, Ca, Mg Al, etc. Paralelamente con este proceso ocurre una disminución notable del ión hidrogenocarbonato.

En las aureolas hidrogeoquímicas de algunos yacimientos las concentraciones del ion cloro alcanza elevados valores de hasta 2 000 mg/l ; en otros su concentración no es grande.

La descomposición de los sulfuros se acelera debido al efecto de disolución electroquímica. Este efecto consiste en que dos minerales sulfurosos diferentes por su composición y contiguos por su solubilidad, forman un par galvánico (cátodo - ánodo).

El mineral que funge como ánodo posee el potencial más bajo, lo cual está condicionado por su mayor solubilidad; así tenemos que en el par galena-esfalerita, se disuelve mejor la esfalerita. Durante este proceso el paso del Zn a la solución ocurre como resultado de las siguientes reacciones:



Este efecto de la disolución electroquímica fue estudiado detalladamente en los años 1961 - 1967. Estos estudios arrojaron la siguiente serie de sulfuros en orden decreciente de los potenciales de electrodos: esfalerita - galena - arsenopirita - perrotina - calcopirita - piritamarcocita.

Las relaciones entre las magnitudes de los potenciales de electrodo de los minerales citados, y por consecuencia la velocidad de la disolución electroquímica depende del P_H , de la intensidad del intercambio del agua y de la presencia de oxígeno.

El estudio de las particularidades de las soluciones electroquímicas tiene gran importancia para la investigación de las aureolas hidroggeoquímicas.

Hasta aquí hemos hablado de los aspectos más importantes del método hidroggeoquímico que consiste en el muestreo directo y sistemático de las aguas naturales. Antes de concluir queremos señalar que en los últimos años se han desarrollado nuevas variantes del método hidroggeoquímico de búsqueda, pero las mismas no se explicarán por caer fuera de los objetivos de este curso.

TEMA 9 BÚSQUEDA BIOGEOQUÍMICA.

La Búsqueda biogeoquímica se realiza mediante la aplicación de los métodos biogeoquímicos. Estos métodos se fundamentan, desde el punto de vista teórico, en la biogeoquímica: ciencia que estudia los procesos de migración de los elementos químicos con la participación de los organismos vivos, ciencia creada por V.I. Vernadski y A.P. Venogradov.

La esencia de los métodos biogeoquímicos consiste en el estudio de la relación entre la composición química del medio (habitat) y las especies (morfología, distribución de los elementos químicos, etc).

Se destacan dos tipos de métodos biogeoquímicos: el biogeoquímico propiamente dicho y el geobotánico.

Método biogeoquímico. Este se basa en la revelación de las aureolas de dispersión de los yacimientos en las plantas mediante el estudio de la distribución de las concentraciones de los elementos químicos en las mismas.

Son conocidos numerosos casos de acumulación por parte de los organismos de elementos tales como: boro, manganeso, hierro, cobalto, níquel, cinc, cobre, molibdeno, uranio, etc.

El proceso de circulación de los elementos químicos en el suelo y en las plantas tiene el siguiente orden:

Roca _____ suelo _____ plantas _____ suelo _____
roca _____ . . .

Prácticamente las plantas desempeñan el papel de bombas únicas en su género que extraen los metales en grandes volúmenes de las rocas, elevándolos a la superficie y facilitando de esta forma la revelación de los yacimientos.

En las proximidades de las raíces de las plantas se producen fuertes reacciones de intercambio catiónico; estas reacciones poseen un carácter ácido y ocurren alrededor de las raíces como resultado de la hidrólisis del bióxido de carbono. De esta forma, las plantas son capaces de disolver y asimilar compuestos difícilmente solubles en cantidades considerables.

Si el límite de asimilación es elevado, la concentración del elemento dado en las plantas puede aproximarse o ser proporcional a su contenido en el suelo. La acumulación biogénica de los elementos meníferos y acompañantes se observa no sólo en las plantas sino también en los productos de su descomposición (follaje caído y humus).

El follaje al caer al suelo sirve de alimento a roedores, insectos, lombrices, protozoarios (bacterias y algas), etc. Como resultado de la actividad vital de estos organismos se origina una sustancia orgánica estable, el humus.

En el horizonte de humus se observa la acumulación de toda una serie de elementos, en comparación con los horizontes inferiores, lo que se explica por la acumulación selectiva de los mismos en las cenizas de las plantas.

El efecto de acumulación biogénica se puede observar para los siguientes elementos: vanadio (1,9), cromo (1,9) níquel (1,7), cobalto (1,3), boro, litio, sodio, fósforo, potasio, cobre, azufre, selenio, bromo, etc.

La acumulación biogénica se revela sobre todo, de forma clara, en aquellas plantas con un amplio desarrollo del sistema radical.

A menudo los contenidos de cobre en la capa húmica y en el follaje caído 0,1 %, mientras que el boro llega hasta 1,8 % .

La profundidad de penetración del método biogeoquímico es grande, llegando hasta los 50 m . La profundidad de penetración depende de los siguientes factores:

- Potencia de las aureolas secundarias de dispersión.
- Profundidad de yacencia de las aguas subterráneas.
- Altura del ascenso capilar de las aguas subterráneas.
- Profundidad del sistema radical.

Al aplicar el método biogeoquímico es necesario tener muy en cuenta las condiciones del medio; por ejemplo, en condiciones áridas, como resultado de la salinización, los compuestos de cobalto resultan imposibles para la alimentación de las plantas por ser prácticamente insolubles en dichas condiciones. Al mismo tiempo, el molibdeno y el uranio forman molibdatos y complejos uranilos - carbonatados, los cuales son fácilmente solubles y pueden ser asimilados y concentrados por las plantas.

Cuando las condiciones son húmedas, el molibdeno forma compuestos solubles, pero el uranio da lugar a compuestos orgánicos que no son asimilados por las plantas. Debido a esto, el método biogeoquímico de búsqueda según las aureolas de uranio es efectivo solamente en las regiones de clima árido.

Además del clima es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

1. Sorción desigual de los elementos químicos por los diferentes tipos de plantas.
2. Concentración heterogénea de los elementos químicos en las diferentes partes de las plantas.
3. Variabilidad de la concentración de los elementos con la estación y la edad de las plantas.
4. Dependencia de la concentración de algunos elementos químicos en las plantas, de la composición química y del tipo de suelo.

Particularidades metodológicas del método biogeoquímico

Debido a la caída del follaje, las aureolas biogeoquímicas se reflejan de una manera u otra en los suelos; en tales casos no es aconsejable la utilización del método biogeoquímico ya que la mineralización puede ser revelada con mayor facilidad por las aureolas que se desarrollan en los suelos, mediante la aplicación de la metalometría. El método biogeoquímico debe ser utilizado en aquellos casos en que sus ventajas sobre los métodos geoquímicos se manifiesta, o sea, hay que demostrar previamente la ineffectividad total de la metalometría, de lo contrario no es recomendable la aplicación de este método.

Para fundamentar la superioridad de un método sobre otro es necesario realizar trabajos experimentales y análisis comparativos de la efectividad de ambos. Como premisas fundamentales debemos de tener en cuenta dos cuestiones:

- a) la acumulación de los elementos en los dos horizontes más importantes del perfil del suelo, desde el punto de vista de la búsqueda, el horizonte de humus (0-20 cm) y el iluvial (50-150 cm);
- b) relación de las concentraciones de los elementos meniferos y acompañantes en las cenizas de las plantas con respecto a los horizontes de humus e iluvial.

Hay una cuestión evidente y es que en muchos casos el muestreo de las plantas puede arrojar resultados más efectivos que la toma de muestras litogeoquímicas a gran profundidad, como sucede en las regiones húmedas (tropicales y subtropicales) donde los elementos móviles son fuertemente lixiviados.

También resulta racional el empleo del método biogeoquímico en regiones pantanosas donde las rocas encajantes de menas yaczan a profundidades entre 2 y 10 m. En estas condiciones hay que prestar atención a las anomalías desarrolladas en las turbas, las cuales pueden ser un producto de la acumulación biogénica o del enriquecimiento epigenético debido a la gran capacidad de sorción de las turbas.

Un ambiente favorable para el empleo del método biogeoquímico lo constituyen las zonas áridas. En dichas zonas el manto vegetal es pobre y el volumen del follaje caído anualmente no crea las condiciones para el desarrollo de aureolas biogénicas en el suelo. Sin embargo se destacan de una forma muy clara las aureolas biogeoquímicas, relacionadas con las plantas que presentan un profundo sistema radical. Esto permite utilizar la búsqueda por las aureolas biogeoquímicas en los sectores de desarrollo de aureolas litogeoquímicas enterradas.

Durante la comparación de la efectividad del método biogeoquímico con respecto al metalométrico, mediante trabajos experimentales, es de suma importancia establecer el coeficiente de acumulación biogénica de los elementos (CAB), el cual se expresa por la siguiente fórmula:

$$CAB = \frac{C_P}{C_S}$$

donde:

- C_P - es la concentración media del elemento en las cenizas de las plantas, en % ;
- C_S - es la concentración media del elemento en el medio de alimentación de las plantas (suelo), en % .

Para determinar el C A B es necesario realizar un muestreo conjugado de las plantas y del suelo por dos o tres líneas que pasen perpendicularmente por la zona aureólica del yacimiento o manifestación dada. El C A B se determina para un total de 16-20 puntos de muestreo. Luego se comparan los C A B correspondiente a la zona anómala con los de fondo, se comparan las concentraciones anómalas de las muestras de suelo y plantas con sus respectivos fondos así como las dimensiones de las zonas anómalas contorneadas a partir de las muestras bio y litogeoquímicas respectivamente.

Los coeficientes de acumulación biogénica se caracterizan por las siguientes cifras: radio (2-5 A⁰), uranio (0,1-2), boro (3-10), potasio (7-8), molibdeno (2-5), etc.

Las plantas que se enriquecen de forma selectiva por algún elemento, independientemente de su contenido en el medio de alimentación, no pueden ser tomadas para la realización de la búsqueda biogeoquímica a pesar del alto contenido del elemento dado en ellas. Estas plantas, debido a la asimilación selectiva de determinado elemento, siempre presentarán valores anómalos del mismo.

En algunos casos para evaluar la efectividad del método biogeoquímico con respecto a los litogeoquímicos, es necesario tener en cuenta los índices técnico-económicos. Así tenemos que en las áreas con desarrollo de aureolas litogeoquímicas abiertas también se presentan aureolas biogeoquímicas, pero la búsqueda basada en estas últimas es más laboriosa y complicada, además, las aureolas biogeoquímicas son menos objetivas ya que son el resultado de un proceso de dispersión más complejo (de 2do. grado), la migración biogénica. Es evidente que en estos casos es mucho más efectiva la utilización de la búsqueda litogeoquímica, específicamente la metalometría.

Profundidad del método en las diferentes zonas climáticas

Con anterioridad señalamos algunos aspectos que influyen en la profundidad de penetración del método biogeoquímico; el factor más importante es la profundidad del sistema radical.

En zonas de clima húmedo la profundidad del sistema radical no excede los 5 m ; en las regiones de tundra y taigá, con congelación perpetua de los suelos, la profundidad del sistema radical alcanza de 50-70 cm .

En zonas de transición de bosques y estepas húmedas, de suelos negros y grises, la profundidad se determina por el sistema radical de hierbas y árboles, llegando hasta 10-15 m .

En los límites de las estepas secas la profundidad del sistema radical de las plantas no sobrepasa los 25 cm por tal razón, es más racional el empleo del método metalométrico.

En los desiertos, donde el horizonte de humus está prácticamente ausente, el sistema radical en algunos casos llega hasta 20-30 m . En estas condiciones resulta útil la aplicación del método biogeoquímico para la búsqueda de las aureolas enterradas y de los yacimientos relacionados con ellas.

En los bosques tropicales y subtropicales la profundidad del sistema radical alcanza hasta 10 m ; por otro lado ocurre una lixiviación muy intensa, originándose los suelos lateríticos. En estas condiciones el método biogeoquímico puede arrojar mejores resultados que los litogeoquímicos.

Muestreo biogeoquímico

La búsqueda biogeoquímica en regiones poco estudiadas es necesario comenzarla con trabajos experimentales, en

cuyo programa se incluye:

- a) selección del objeto a muestrear (árboles, hierbas, follaje caído, turba, etc) ;
- b) determinación de los tipos de plantas más distribuidas, las cuales serán utilizadas para la toma de muestras ;
- c) demostración de la ausencia de aureolas litogeoquímicas.

La búsqueda biogeoquímica es racional realizarla en las siguientes escalas:

Detallada ; 1:50 000 y 1:25 000

Evaluativa; 1:10 000

La densidad de la red de toma de muestras es de 500 x 40, 250 x 20 y 100 x 20 para las escalas 1:50 000, 1:25 000 y 1:10 000 respectivamente. Las desviaciones de las líneas de muestreo no deben exceder los 10-20 m .

Durante la realización del muestreo biogeoquímico hay que tener en cuenta que:

1. Las plantas seleccionadas están lo suficientemente distribuidas como para satisfacer las exigencias de un muestreo sistemático.
2. Los tipos de plantas a muestrear deben ser fácilmente identificables.
3. Las plantas a muestrear deben poseer la misma edad, lo cual se determina por el diámetro del tronco.
4. Para el muestreo hay que seleccionar aquellas plantas que no sean concentradoras del elemento buscado (de forma selectiva).

Durante el muestreo se le debe dar preferencia a las plantas herbáceas perennes ya que como regla general poseen concentraciones mucho más elevadas de microelementos que las anuales.

Con la finalidad de eliminar las oscilaciones de las concentraciones de los elementos en las plantas, éstas se

deben muestrear en toda la parte que aflora a la superficie.

Como regla general se toma un sector dentro de los límites de un campo normal donde crezcan las plantas que se muestrean, realizándose en el mismo observaciones periódicas y comparando los resultados con los obtenidos en otras áreas; esto permitirá, además de establecer el fondo biogeoquímico, estudiar las fluctuaciones de las concentraciones en el tiempo, es decir, el régimen de variación de las concentraciones.

Debido a que la concentración de los metales en los órganos de las plantas aumenta en la segunda mitad del verano, las muestras del follaje deben tomarse en otoño.

Quando se inicia la primavera se pueden muestrear las plantas herbáceas del año anterior y en invierno se muestrean los brotes anuales de las coníferas. En sentido general, cuando se muestrean los árboles las muestras se toman de los brotes de dos o tres años de edad, donde las variaciones no son grandes.

El tiempo más favorable para el muestreo de las plantas herbáceas y las hojas secas son los largos períodos de seca.

El peso de la muestra debe ser lo suficientemente elevado como para permitir la realización de los análisis ordinarios y de control. Habitualmente se toma un peso de material de la planta viva que oscila entre 20 y 200 g .

Durante la búsqueda biogeoquímica es necesario realizar un mínimo de observaciones geobotánicas, meteorológicas y del suelo, que influyen la determinación de los tipos de plantas que se muestrean y las asociaciones vegetales, determinación del tipo de suelo, registro de las lluvias, etc.

En muchos casos la determinación del tipo de planta se realiza por especialistas en botánica. En lo adelante esta especie de planta debe ser reconocida por los colectores sin preparación especial en botánica.

Para la caracterización de las plantas que se muestrean es necesario reconocer sus características principales en las diferentes fases de su desarrollo.

Una especial atención durante la búsqueda biogeoquímica se le debe prestar a existencia de índices geobotánicos que evidencian la posible existencia de yacimientos minerales útiles.

Tales índices pueden ser:

- a) aparición de asociaciones vegetales, inexplicables desde el punto de vista de los cambios de las condiciones externas del hábitat (medio) ;
- b) aparición de plantas indicadoras específicas;
- c) cambios en la apariencia de las plantas (aparición de formas de hojas impropias en las plantas, flores alteradas, gigantismo, raquitismo, etc) ;
- d) desviaciones en el ritmo de desarrollo de las plantas (floreamiento temprano, o por el contrario tardío, caída de las hojas temprana o tardíamente, etc) ;
- e) índices de marchitamiento, resecaamiento o falta de vegetación, inexplicable por otras razones.

Elaboración de las muestras

La elaboración de las muestras para la realización de los análisis consta de 3 etapas: secado, trituración e incineración.

Las muestras muy polvorosas se lavan previamente con agua de lluvia, o de río y en el mejor de los casos con agua destilada.

El secado de las muestras se realiza al aire libre o en estufas especiales. Después de secada, la muestra se tritura hasta una dimensión de 2-3 mm.

La incineración se realiza hasta la quema completa de la materia orgánica, lo que se determina por el color gris o blanco de la ceniza. La incineración es bueno realizarla en dos subetapas; la primera se lleva a cabo directamente en la brigada hasta obtener una ceniza de color oscuro y la segunda se realiza en hornos, hasta que la ceniza obtenga una coloración de gris a blanco.

La incineración se efectúa en crisoles durante 4 horas. Hay que tener presente que durante la incineración los componentes volátiles escapan de las muestras (Hg, As, etc), por lo tanto, si se desea determinar las concentraciones de los mismos hay que hacerlo antes de la incineración.

Durante la búsqueda de menas radioactivas, las muestras biogeoquímicas se someten a análisis radiométrico y luminiscentes.

Método geobotánico

Este método se basa en la utilización de las plantas y sus características como indicadoras de la mineralización; se describen, como índices de búsqueda. Una variante de este método es el microbiológico (bacterial) basado en el desarrollo de determinados tipos de bacterias.

Las plantas, como se ha demostrado, son indicadoras de determinados tipos de rocas; así tenemos que en los Urales del Sur, sobre los macizos graníticos crecen bosques de pinos; mientras que sobre las rocas efusivo-sedimentarias crecen abedules. En Cuba, sobre las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas se desarrollan pinos y sobre las calizas las palmas reales.

En la actualidad existe una gran cantidad de información sobre las plantas como indicadores de determinados tipos de mineralización. A continuación expondremos algunos ejemplos de plantas indicadoras de la presencia de concentraciones de determinados elementos.

Zinc _____ violeta (viola calaminaria)
Cobre _____ vicaria (vicaria policarpia)
Selenio _____ arveja venenosa
Oro _____ madre selva y clavel

Dentro de las plantas indicadoras se distinguen las universales y las locales.

Las plantas indicadoras universales se caracterizan por su exacta coincidencia con un determinado ambiente químico. Son los indicadores más exactos de determinado tipo de mineralización.

Las plantas indicadoras locales son aquellas que tienen la capacidad de adaptarse a diversos ambientes químicos, aunque se desarrolla con más frecuencia sobre un ambiente específico. Los indicadores locales se pueden encontrar tanto sobre los yacimientos como sobre sus rocas encajantes.

Además de la existencia de un determinado tipo de planta, se puede utilizar como indicador de la mineralización otras cuestiones relacionadas con la vegetación, como es el caso específico de la variación del aspecto externo de las plantas, fundamentalmente su morfología. Estas cuestiones fueron indicadas con el fin de orientar la búsqueda ya desde el año 1763 por el sabio ruso Lomonosov. En esta época Lomonosov escribió que los árboles y las hierbas que se desarrolla sobre los lugares donde existen minas, habitualmente no son sanos.

Este fenómeno se manifiesta algunas veces sobre determinados yacimientos; las hierbas suelen ser pálidas, los

árboles presentan gigantismo o enanismo, las copas de los pinos se resecan, etc.

El cambio de la forma y el color de las flores de las plantas herbáceas puede ser considerado como indicio de la mineralización, por otro lado, las concentraciones elevadas de determinados elementos puede conducir a alteraciones de las hojas. Por ejemplo: el cambio de color azul de la corola, de la amapola, por el amarillo o el verde, es producto del exceso de Zn; la aparición de manchas blancas en las hojas puede ser producto del exceso de Cu y Co.

Hay que tener presente que las variaciones en las formas de las especies vegetales se puede deber a otros factores que no necesariamente tienen que estar relacionados con la mineralización; éstas se pueden deber a la iluminación, tipos de suelos, enfermedades, etc.

La utilización del método geobotánico habitualmente se presupone en forma de observaciones complementarias geobotánicas que se realizan simultáneamente con la búsqueda biogeoquímica; sin embargo, en aquellas casos en que se ha establecido que en la región objeto de estudio es posible la revelación de los yacimientos con suficiente seguridad a partir de los frutos geobotánicos, se puede plantear la realización del método geobotánico en vez del biogeoquímico.

Antes de finalizar queremos señalar que los animales poseen muy poco valor como indicadores de la existencia de la mineralización debido a que se desplazan constantemente y por tal razón el carácter del medio local no influye prácticamente sobre los mismos; sin embargo, en los últimos años se ha comprobado la predilección de ciertos insectos por determinados ambientes químicos. A modo de ejemplo podemos señalar la predilección de las termitas por el oro; en determinadas regiones de África se han revelado sectores de mineralización de oro a partir del material

extraído desde grandes profundidades por las termitas (hor
migas).

En muchos países se entrenan perros para la búsqueda de menas sulfuradas a partir de sus aureolas gaseosas, esta variante "caninobiogeoquímica" ha arrojado buenos resultados.

En la actualidad el método geobotánico se perfecciona cada vez más, incluso se están desarrollando nuevas variantes, basadas en el estudio de las características de las plantas a partir de fotos cósmicas.