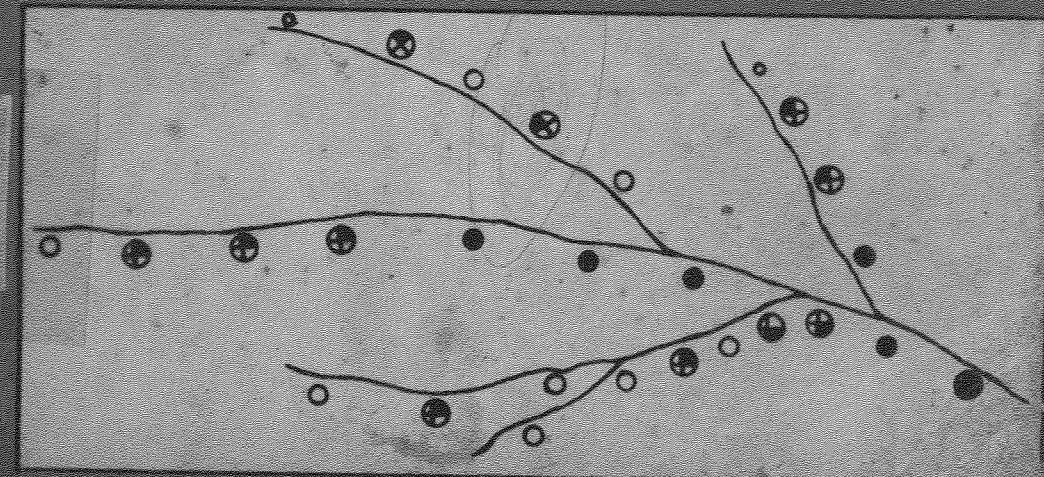
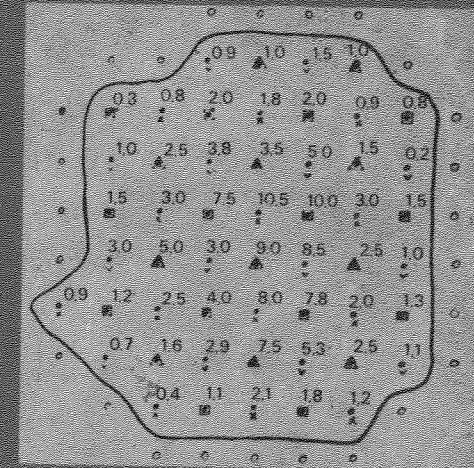
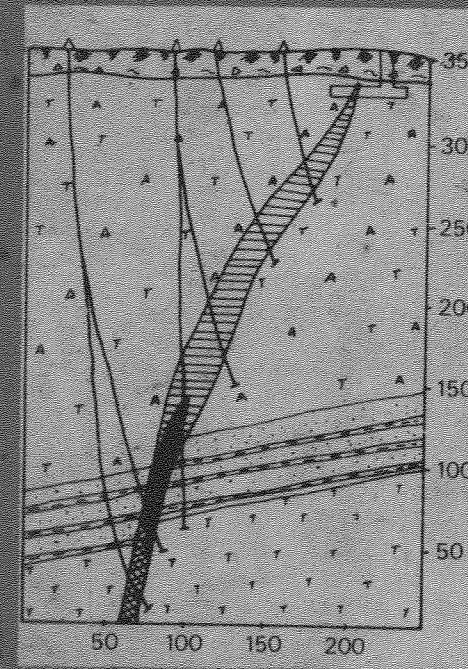


BÚSQUEDA, EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN GEÓLOGO-ECONÓMICA DE YACIMIENTOS MINERALES SÓLIDOS

Primera Parte

Oleg Vladimirovich Lepin
José D. Ariosa Iznaola



BÚSQUEDA, EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN GEÓLOGO-ECONÓMICA DE YACIMIENTOS MINERALES SÓLIDOS

Primera Parte

**C. Dr. Oleg Vladimirovich Lepin
Lic. José D. Ariosa Iznaga**



**Editorial
Pueblo y Educación**

Edición: Ing. Margarita Gordillo Ascanio
Diseño: Lizabeth Álvarez de la Torre
Sonia Acosta Milián
Ilustración: Lic. José Daniel Ariosa Iznaga

DEDICATORIA
A la Gran Revolución Socialista de Octubre y a la Revolución Cubana

Primera reimpresión, 1990

© Oleg Vladimirovich Lepin y José Daniel Ariosa Iznaga, 1986
© Editorial Pueblo y Educación, 1986

EDITORIAL PUEBLO Y EDUCACIÓN
Calle 3ra. A No. 4605, entre 46 y 60,
Playa, Ciudad de La Habana

SNLC: RA 01.27851.7

PRÓLOGO

El contenido de este libro comprende las conferencias que se impartieron durante los años 1980-1983 por Oleg Vladimirovich Lepin, Candidato a Doctor y docente del Instituto de Minas de Leningrado durante sus estancias de trabajo en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM-Moa).

Dicho contenido responde a la necesidad de satisfacer los programas de la asignatura homónima que forma parte del curriculum de la especialidad Geología, en los trabajos que se realizan en nuestro país para el perfeccionamiento de los planes de estudio y programas en la educación superior.

Se revisó críticamente la bibliografía disponible en el Centro de información del ISMM-Moa y todo el material se organizó de forma que respondiera a las exigencias planteadas por nuestros planes y programas.

El texto es voluminoso, por lo que se ha dividido en dos partes.

La organización general y la redacción técnica final estuvo a cargo del licenciado José D. Ariosa Iznaga, Profesor Titular del ISMM y coautor de la obra.

Durante la elaboración del material se realizaron consultas con otros docentes del Departamento de Ciencias Geológicas Aplicadas del ISMM-Moa. Expresamos nuestro agradecimiento a estos compañeros y a todos aquellos que han hecho posible la publicación de este libro.

Particular mención merecen los integrantes del Departamento de Textos del ISMM, bajo cuya responsabilidad estuvo la preparación del texto, figuras, gráficos, tablas, así como a la Editorial Pueblo y Educación, encargada de la edición. Esta obra pretende contribuir con modestia a los esfuerzos que se realizan en nuestro país para elevar el nivel científico técnico de la educación superior y preparar cuadros revolucionarios, capaces de hacer avanzar nuestro desarrollo socioeconómico.

El texto en conjunto puede ser utilizado como consulta por geólogos dedicados a otras ramas, ingenieros geofísicos e ingenieros de minas, así como estudiantes de estas especialidades y todas aquellas personas que se interesen en su contenido. Los autores desean que esta obra, fruto del internacionalismo socialista y de la colaboración entre la URSS y Cuba, constituya un homenaje perdurable a la amistad entre los pueblos soviético y cubano.

Los autores

INTRODUCCIÓN	7
Capítulo 1 Principios y métodos generales de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales	13
1.1 Principios de investigación del subsuelo	13
1.2 Estadios de los trabajos de búsqueda y exploración	16
1.3 Métodos generales de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos de minerales útiles	19
Capítulo 2 Fundamentos teóricos de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales	23
2.1 Variabilidad de los cuerpos minerales y de los yacimientos minerales útiles	23
2.2 Clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales útiles	28
2.2.1 Parámetros geólogo-industriales de los yacimientos minerales y su papel en la clasificación	29
2.2.2 Principios generales de la clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales útiles y sus vías actuales de realización	43
2.3 Fundamentos geológicos de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles	46
2.3.1 Regularidades de la formación y localización de los yacimientos minerales útiles en la corteza terrestre	47
2.3.2 Regularidades de la ubicación espacial de los cuerpos minerales	69
2.3.3 Pronóstico geológico de las variaciones de los parámetros de los cuerpos minerales	70
2.4 Fundamentos matemáticos	75
2.4.1 Propiedades de los objetos geológicos y su posibilidad de información	76
2.4.2 Discriminación de las áreas y objetos favorables	88
2.4.3 Métodos matemáticos para el estudio y pronóstico de la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales de los yacimientos minerales	98
2.4.4 Determinación del número necesario y suficiente de cruces de prospección	150
2.4.5 Evaluación de la exactitud de los resultados de la exploración	154
2.5 Fundamentos económicos	161
2.5.1 Principios de la evaluación de los yacimientos minerales útiles	161
2.5.2 Factores de la evaluación de los yacimientos minerales útiles	166
2.5.3 Precios de los productos de las empresas mineras	170
2.5.4 Condiciones industriales para la materia prima mineral	171

Capítulo 3 <i>Búsqueda de yacimientos minerales útiles</i>	174
3.1 Índices de búsqueda directos	174
3.2 Índices de búsqueda indirectos	205
3.3 Mapas de pronóstico de los yacimientos minerales útiles	219
3.4 Métodos de búsqueda	221
3.5 Complejidad de los trabajos de búsqueda	249
3.6 Búsqueda en diferentes condiciones físico-geográficas	256
3.7 Búsqueda de yacimientos ocultos	259
3.8 Evaluación de los yacimientos y manifestaciones de minerales útiles durante la búsqueda	263
Capítulo 4 <i>Muestreo de minerales útiles</i>	272
4.1 Concepto general sobre la calidad del mineral útil	273
4.2 Tipos de muestreo	278
4.3 Operaciones del muestreo	279
4.4 Métodos de toma de muestras	280
4.5 Particularidades de la toma de muestras durante la exploración de los lugares	298
4.6 Toma de muestras por secciones	301
4.7 Distancia entre las muestras	305
4.8 Tipos de muestras	306
4.9 Tratamiento de las muestras	308
4.10 Análisis y ensayos de las muestras	327
4.11 Determinación de la calidad del mineral útil sin la toma de muestras	334
4.12 Control del muestreo	338
<i>Bibliografía</i>	346

Esta introducción tiene como objetivo dar una idea general sobre el papel de la asignatura Búsqueda y exploración, su relación con otras ramas de la geología y sus tareas básicas, así como esclarecer los conceptos y términos principales de esta ciencia geológica.

En la actualidad se desarrolla en todo el mundo una revolución científico-técnica y uno de sus rasgos característicos es un aumento rápido de los volúmenes de extracción y de utilización de la materia prima mineral. El volumen de explotación de los tipos principales de minerales útiles aumentó dos veces cada diez años. Como consecuencia, la producción de las empresas mineras y la profundidad de explotación crecen muy rápido. Por ejemplo, ya se proyectan minas cuya profundidad es de 2 000 a 3 000 m y la producción anual sobrepasa las 10 000 t. Se elaboran y se utilizan máquinas modernas, potentes y superpotentes, para la extracción, transporte y tratamiento de las menas y se perfecciona la mecanización y automatización compleja de los procesos tecnológicos de la producción minero-metalúrgica. Todo eso exige una gran estabilidad en la calidad de la materia prima extraída, para asegurar un trabajo regular y eficaz de las plantas de beneficio y metalúrgicas; de lo contrario, las variaciones de la calidad de la mena, aunque sean pequeñas, traen consigo grandes pérdidas de componentes útiles durante el tratamiento de esta. En caso de tales variaciones, también pueden empeorarse los índices económicos del tratamiento del mineral útil y provocar un incumplimiento de los planes de producción.

Además, los enormes volúmenes de extracción de los minerales útiles se acompañan por otros, aún más grandes, de destape, de escombreras y de colas. Algunas veces resulta que el precio de esos residuos, incluso los componentes secundarios de las menas, sobrepasa el de los componentes principales extraídos. La utilización completa del subsuelo, claro está, debe aumentar la eficiencia de las inversiones capitales en la minería y la productividad del trabajo en esta rama de la industria.

Para resolver estos problemas importantes de manera correcta y a tiempo, el ritmo de incremento de las reservas exploradas tiene que sobrepasar el de extracción de los minerales útiles y, además, el estudio del subsuelo debe ser completo y complejo.

En los países industriales ya se experimenta el agotamiento de las reservas de la mayoría de los yacimientos principales en las regiones viejas de la industria mi-

nera, lo que plantea una tarea de actualidad: la revelación e investigación de las nuevas áreas productivas y la selección de los mejores objetos para su utilización industrial.

De lo que ya se ha dicho, se deduce el papel tan importante de la búsqueda, exploración y evaluación de los minerales útiles en la economía nacional, ya que las riquezas del subsuelo son muy importantes para el desarrollo de cada país. Los gastos considerables para los trabajos de búsqueda y exploración serán eficientes, solo si estos trabajos se desarrollan utilizando métodos seguros y científicamente argumentados. Por lo tanto, el objetivo esencial del texto es brindar una base teórica para la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles.

El levantamiento geológico, la búsqueda y exploración de los minerales útiles, constituyen una de las etapas importantes de preparación para la construcción de una empresa minera y representan una rama aplicada de la ciencia geológica. Estos trabajos se realizan sobre la base de los conocimientos de otras disciplinas geológicas, como son la geología general, la paleontología, la geología histórica, la geología estructural, la cristalografía, la mineralogía, la petrografía, la geología de los yacimientos minerales y las estructuras de los campos meníferos. Debe destacarse la relación estrecha y dialéctica entre estas ciencias geológicas y su aplicación. Si las ciencias mencionadas se emplean para crear una base teórica de la búsqueda y exploración y ponen en nuestras manos el instrumento necesario para el estudio, los resultados de los trabajos de búsqueda y exploración también permiten extender y profundizar los conocimientos en el dominio de las ciencias geológicas particulares.

Como los trabajos de exploración geológica se ejecutan con el fin de preparar los yacimientos minerales para su utilización industrial, es absolutamente necesario tener en cuenta, en primer lugar, las exigencias de las ramas correspondientes de la economía nacional en cuanto al grado indispensable de estudio del objeto. En un curso general, estas exigencias pueden cumplimentarse con una característica cuantitativa de los parámetros geólogo-industriales principales, los cuales determinan la opción del sistema y del método de explotación del yacimiento, del equipo minero, del esquema tecnológico del tratamiento del mineral útil, de la productividad óptima de la empresa minera y de los índices económicos esenciales del funcionamiento de esta última. Debe señalarse que dicha característica cuantitativa tiene que obtenerse con una debida exactitud, tanto para todo el yacimiento como para sus sectores independientes y para los cuerpos minerales por separado. Eso es necesario para confeccionar el proyecto técnico de la empresa y planificar de manera correcta su trabajo posterior. Los parámetros geólogo-industriales más importantes de un yacimiento son:

- Forma, dimensiones y estructura interna del cuerpo mineral.
- Condiciones de yacencia de los depósitos de minerales útiles.
- Calidad del mineral útil.
- Condiciones hidrogeológicas del yacimiento.
- Condiciones mineras de explotación del yacimiento.

Los datos necesarios acerca de estos parámetros se obtienen por medio de las observaciones, medidas y ensayos en puntos separados colocados de una u otra manera en el espacio. Para tener una idea sobre los valores de dichos parámetros en el conjunto del cuerpo o del yacimiento, se requiere una generalización de los da-

tos iniciales, que tenga en cuenta el carácter de la modificación del parámetro dentro de los puntos de observación. La ubicación espacial de estos últimos debe asegurar una información auténtica acerca del objeto de estudio, así como esclarecer sus propiedades básicas.

Al ejecutar los trabajos de búsqueda y exploración se trabaja, como regla general, con yacimientos de uno u otro mineral útil. Es natural entonces que, en dependencia de las propiedades de esos yacimientos, la eficiencia económica de su utilización industrial sea diferente. Por eso, una selección correcta de los objetos para su estudio y posterior puesta en explotación, resulta una tarea de inmensa importancia.

Sobre la base de todo lo expuesto, se pueden enumerar las tareas principales de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales:

1. Pronóstico científico de la localización de los yacimientos de minerales útiles en la corteza terrestre y selección de las áreas favorables para organizar la búsqueda.
2. Elaboración de métodos eficaces de búsqueda y revelación de los yacimientos minerales útiles dentro de las áreas favorables.
3. Investigación y pronóstico de la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales de los yacimientos.
4. Elaboración y puesta en práctica de sistemas racionales de exploración de los yacimientos minerales.
5. Perfeccionamiento de los índices y métodos de evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales útiles.

Desde el punto de vista de su aplicación práctica, la búsqueda y exploración de minerales útiles resulta una rama muy antigua de la geología, porque el hombre sabía hallar, estudiar y utilizar algunos minerales, rocas y menas en tiempos muy lejanos. La historia humana conoció las épocas de piedra, bronce, oro, hierro, y a cada época correspondió su grupo de minerales útiles extraídos y tratados. Aquella explotación se realizaba con frecuencia a profundidades bastante grandes, hasta 150 a 200 m, incluso en casos de cuerpos minerales ciegos. Es de suponer que esto no habría sido posible sin un estudio preliminar. Aún más, se han encontrado excavaciones mineras de la antigüedad cuyo destino para la búsqueda o exploración no tiene ninguna duda. Claro, que con el tiempo, el desarrollo de la minería trajo consigo el perfeccionamiento de los métodos de búsqueda de los minerales útiles y determinación de su utilidad para su extracción y elaboración. Pero, durante muchos siglos, esos hábitos fueron de carácter puramente práctico. Las primeras síntesis y recomendaciones científicas en el dominio de la búsqueda y exploración de los minerales útiles, se fechan en la Europa occidental del siglo XVI, en el libro de un eminente científico alemán, Georgius Bauer (Agrícola), *Acerca de la minería y la metalurgia* (1550) y en la Rusia del siglo XVIII en las conocidas obras de M.V. Lomonosov. Sin embargo, un progreso considerable en la teoría de la búsqueda y exploración, se manifestó en los comienzos del siglo XX; pero, como disciplina científica, la búsqueda y exploración de los yacimientos de minerales útiles nació en la URSS en la década del treinta del siglo actual. Las condiciones favorables para ello fueron la nacionalización del subsuelo del país y de la industria minera, la concentración de todos los trabajos de búsqueda y exploración en las manos del Estado soviético con la acumulación de sus resultados en un organismo único de cómputo, el desarrollo rápido de la minería y la nece-

sidad de aumentar bruscamente la eficiencia de la búsqueda y la exploración de los yacimientos minerales.

En el año 1929, en la URSS fueron creados siete institutos ramales para la búsqueda y exploración de los yacimientos, así como para los trabajos científicos correspondientes. Estos institutos son: el de los metales ferrosos, el de los metales no ferrosos, el de petróleo, el de los minerales útiles no metálicos, el de los trabajos geofísicos y el de hidrogeología e ingeniería geológica.

En el año 1924, en el Instituto de Minas de Petrogrado (hoy de Leningrado), se impartió por primera vez un curso de búsqueda y exploración, y en el año 1930 se organizó allí el departamento de búsqueda y exploración; al poco tiempo un departamento análogo fue creado en el Instituto de Búsqueda y Exploración de Moscú. Durante el período de 1929 a 1940 se publicaron más de diez libros fundamentales de estudio acerca de la búsqueda y exploración de los yacimientos de minerales útiles.

El desarrollo de esta ciencia después de finalizada la Gran Guerra Patria, fue aún más rápido. Hoy se cuenta con once departamentos especializados en los diferentes institutos de la URSS, que preparan especialistas calificados en búsqueda y exploración y realizan trabajos científicos importantes, de carácter tanto teórico como aplicado, en esta dirección. Se han publicado decenas de libros de obras científicas básicas sobre esta materia, manuales, millares de artículos científicos, libros de consulta y guías. Los problemas actuales relacionados con la búsqueda y exploración se tratan regularmente por la revista especial *Exploración y protección del subsuelo*. Los artículos científicos acerca de estas cuestiones se publican además en otras revistas geológicas y en colecciones de materiales de conferencias científicas. Se puede decir, sin exagerar, que la ciencia soviética de la búsqueda, exploración y evaluación de yacimientos minerales ocupa un lugar eminente a escala mundial.

En nuestro país, así como en otros países socialistas, los trabajos de búsqueda y exploración se han desarrollado también ampliamente y su base teórica se encuentra a un nivel muy alto. Ese es el resultado natural de la ayuda que presta la URSS a estos países en el plano técnico y científico, así como en la preparación de los especialistas nacionales, tanto en los institutos de la URSS como en los de dichos países. Una gran parte de los problemas importantes relacionados con la búsqueda, exploración y evaluación de los minerales útiles, se resuelven de manera colectiva y con el uso de métodos uniformes por los países que forman parte del Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME).

Los países capitalistas realizan volúmenes considerables de trabajos de búsqueda y exploración, tanto dentro de su propio territorio como en los países en vías de desarrollo y dentro de la zona del Océano Mundial. A pesar de una buena base técnica de esos trabajos, sus fundamentos teóricos dejan mucho que desear, ya que en dichos países los departamentos especializados de búsqueda y exploración en los institutos no existen prácticamente, sin hablar ya de los institutos especializados. Los problemas relacionados con la búsqueda y exploración de los yacimientos minerales se tratan como capítulos adjuntos a los cursos de geología estructural, geología de yacimientos minerales y otras. Se publican muy pocos manuales de esta asignatura, pero los libros de consulta y las guías son abundantes. Como todos los resultados de búsqueda y exploración son "secretos profesionales" de cada firma o casa comercial, los artículos científicos basados en esos datos se publican raramente en las revistas y cuando esto ocurre, estos artículos contienen poca información útil.

En calidad de disciplina científica, la búsqueda, exploración y evaluación de yacimientos minerales útiles tienen su propio objeto de estudio, objetivos, métodos de investigación, base teórica y terminología.

Esta disciplina tiene por *objeto de estudio*, las acumulaciones naturales de la materia prima mineral, que pueden utilizarse para satisfacer las necesidades de la economía nacional. En los comienzos de los trabajos geológicos, este objeto puede ser, por falta de información, una manifestación mineral sin valor industrial, pero luego estas manifestaciones se van a excluir de manera bien argumentada de la investigación posterior. Por eso, el objeto principal de esta ciencia está constituido por los yacimientos industriales de minerales útiles.

El *objetivo principal* de la búsqueda, exploración y evaluación de yacimientos minerales es satisfacer la economía nacional con una base segura de la materia prima mineral.

Los *métodos de investigación* comprenden la reconstrucción de las condiciones del desarrollo y la historia de los procesos geológicos que dan como resultado la formación de los yacimientos minerales útiles; además, se utilizan métodos geofísicos y geoquímicos, elaboración de los modelos gráficos, matemáticos y económicos de los cuerpos minerales y de los yacimientos, y trabajos experimentales.

La *base teórica* de esta ciencia representa un sistema de ideas y conceptos principales que reflejan las leyes objetivas de la formación y la transformación de los yacimientos de minerales útiles, su localización en la corteza terrestre, y la variación de los parámetros geológico-técnicos de los yacimientos en el espacio. A esos conceptos e ideas se añaden los principios de la tipificación de los yacimientos minerales, los principios y métodos de la investigación de la heterogeneidad del subsuelo, así como la determinación del valor económico del yacimiento.

Los *términos y conceptos principales* de esta disciplina es más conveniente determinarlos a medida de su necesidad en las partes correspondientes del curso. Sin embargo, se deben esclarecer algunos conceptos de significación muy general, indispensables para entender correctamente el material que se propone con posterioridad.

Mineral útil se llama a cada formación mineral natural que puede utilizarse en la economía nacional, en su estado natural o después de una elaboración apropiada. Este término corresponde más o menos al concepto de materia prima mineral. La *mena* es un agregado mineral natural, del cual se pueden extraer minerales, compuestos o elementos químicos.

Se nombra *cuerpo mineral* o *depósito mineral* a una acumulación natural del mineral útil, que se delimita, de manera más o menos clara, de las rocas encajantes estériles. Debe señalarse que la claridad de esos límites es función de las condiciones geológicas de formación del cuerpo.

Se reconoce bajo el nombre de *manifestación del mineral útil* a cada acumulación de este en su yacencia propia.

Un *yacimiento industrial de mineral útil*, es una acumulación de este que puede explotarse técnicamente; dicha explotación resulta conveniente desde el punto de vista económico, de acuerdo con el nivel existente de desarrollo de las fuerzas productivas. Los yacimientos no industriales ocupan una posición intermedia porque no pueden emplearse con eficiencia ahora, pero su utilización es posible en el futuro con un perfeccionamiento de la técnica y la tecnología de explotación y tratamiento de los minerales útiles.

El término *laboreos de búsqueda o de exploración*, debe aplicarse tanto a los pozos de perforación como a las excavaciones mineras, que se realizan para obtener

los datos reales sobre la estructura geológica del terreno y los minerales útiles que se encuentran en sus límites.

El *crucero de exploración* es una intersección completa del cuerpo mineral desde el techo hasta el piso, por medio de un laboreo de exploración. En la mayoría de los casos, este término coincide con el concepto de punto de observación.

Teniendo en cuenta el hecho de que las leyes de localización, las particularidades de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos petrolíferos y de gas, así como los del fondo de los mares y océanos contemporáneos, son bastante específicos, se estudiará solo la teoría de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales sólidos, en tierra firme.

Las partes principales del curso son las siguientes:

Principios y métodos generales de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales.

Fundamentos teóricos de esta ciencia (geológicos, matemáticos y económicos).

Búsqueda de yacimientos de minerales útiles.

Muestreo de los minerales útiles.

Aquí termina la primera parte del texto. En la segunda parte se estudiarán otros temas como son:

Exploración de los yacimientos minerales útiles.

Documentación geológica.

Confección de los proyectos de los trabajos de búsqueda y exploración.

Cálculo de reservas.

Evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales útiles.

Eficiencia económica de los trabajos de búsqueda y exploración.

Exploración durante el funcionamiento de una empresa minera.

Estadio II: *Búsqueda de los yacimientos minerales útiles*

Sub-estadio II-1. Búsqueda orientativa

Sub-estadio II-2. Búsqueda detallada

Sub-estadio II-3. Búsqueda evaluativa.

Estadio III. *Exploración orientativa*

Estadio IV. *Exploración detallada*

Estadio V. *Exploración de yacimientos dentro de los límites del coto minero*

Estadio VI. *Exploración de explotación.*

Los trabajos del primer estadio se organizan con el objetivo de estudiar regularmente la composición geológica de horizontes superiores de la corteza terrestre. Estos trabajos permiten argumentar la selección de las regiones favorables para la búsqueda planificada de minerales útiles. Durante este estadio, la búsqueda no se excluye, pero reviste una importancia secundaria y no se especializa por tipos concretos de materia prima mineral. En dependencia del grado real del estudio del territorio, uno u otro subestadio de los trabajos puede omitirse.

En cuanto al mapeo geológico profundo, este es complicado y costoso; por lo tanto, se realiza en las regiones de industria minera desarrollada o en otras mal investigadas, donde las rocas del fundamento y los yacimientos minerales relacionados con este están recubiertos por una capa potente de depósitos incoherentes.

La base teórica y los métodos de ejecución de los trabajos regionales, tanto geológicos como geofísicos, se tratan en las asignaturas correspondientes; incluso existen muchas instrucciones ramales para la organización y realización de dichos trabajos, por lo cual, en este curso, el estudio detallado de este estadio de los trabajos geológicos no se desarrollará.

El segundo estadio tiene como tarea principal la revelación de los yacimientos minerales concretos. Su primer subestadio, búsqueda orientativa, debe asegurar la selección de las áreas favorables para el descubrimiento de unos u otros minerales útiles. La búsqueda de manifestaciones concretas de minerales útiles no se exige, aunque ellas se pueden hallar como resultado secundario de los trabajos.

La búsqueda detallada se organiza, dentro de las áreas perspectivas o favorables ya conocidas, después de la búsqueda orientativa, para localizar todas las manifestaciones de minerales útiles. Como una parte de estas manifestaciones puede revelarse durante el subestadio anterior, la búsqueda detallada en todo el territorio favorable se completa, con frecuencia, con los trabajos del siguiente subestadio, es decir, la búsqueda evaluativa en los objetos conocidos.

Los trabajos de búsqueda y evaluación constituyen el resumen del segundo estadio y permiten crear los "fondos" de manifestaciones minerales con posibilidades industriales en cada región, lo que asegura una correcta planificación de la exploración orientativa. Todos los objetos que aparentemente carecen de valor industrial se excluyen del estudio posterior sobre la base de los resultados de los trabajos de este subestadio. En cuanto a los objetos posiblemente industriales, el resultado de los trabajos de búsqueda y evaluación debe ser la determinación del tipo geólogo-industrial de la manifestación mineral y de sus reservas pronósticas.

La importancia del estadio de búsqueda es extremadamente grande, porque la eficiencia de la exploración de los yacimientos minerales, así como de su puesta ulterior en explotación, depende en gran parte de lo amplio que sea el número de

objetos propuestos como resultado de la búsqueda. Si se tiene en cuenta la eliminación inevitable de la mayoría de las manifestaciones descubiertas, las tareas de búsqueda siempre implican gastos considerables. Por ejemplo, en la URSS, los gastos para la búsqueda de minerales útiles sobrepasan dos veces a los de la exploración orientativa y la detallada juntas, aunque los trabajos de exploración en un yacimiento concreto sean mucho más costosos comparados con la búsqueda.

La exploración orientativa tiene como objetivos principales: la evaluación geólogo-económica del yacimiento, la determinación del valor industrial de todo el yacimiento o de sus sectores independientes, la sucesión de la búsqueda detallada y la puesta en explotación de diferentes yacimientos de un mismo mineral útil. La importancia y la transcendencia de este estadio en los trabajos geológicos, consiste en que la evaluación del yacimiento llega a ser definitiva:

- a) el yacimiento se declara industrial, se registra en el balance estatal de reservas minerales y se propone para la exploración detallada;
- b) el yacimiento se encuentra en el rango de objetos no industriales y se excluye por mucho tiempo o para siempre de la atención de los trabajos de prospección.

La exploración detallada se realiza en los yacimientos o sectores que recibieron una evaluación positiva como resultado de la exploración orientativa y cuya explotación se planifica en un período inmediato (de 10 a 15 años como máximo). En este estadio se deben presentar a los organismos apropiados todos los datos geológicos y económicos necesarios sobre el yacimiento, para confeccionar el proyecto de la empresa minera, su construcción y asegurar su explotación normal. Al final de la exploración detallada se confecciona el informe geológico final, conjuntamente con el cálculo definitivo de reservas del mineral útil y, después de comprobar estas, el objeto se pasa a la industria para su utilización. A fin de obtener una máxima eficiencia en la extracción y el tratamiento de la materia prima mineral, en primer lugar hay que explorar de manera detallada los mejores yacimientos de cada mineral útil. Por eso se requiere la existencia de un número bastante amplio de objetos preparados por el estadio precedente.

La exploración del yacimiento explotado dentro de los límites del coto minero, acompaña a todo el proceso de explotación del yacimiento. Aún más, estos trabajos empiezan algunas veces al mismo tiempo que la confección del proyecto de la empresa minera. Sin embargo, los trabajos de este estadio no son de carácter constante y obligatorio, sino que se utilizan en la medida necesaria para resolver las tareas específicas relacionadas con: la selección de las áreas para las construcciones industriales, viviendas y escombreras; la precisión de los lugares donde deben situarse los laboreos mineros capitales de la mina; el estudio complementario del yacimiento en caso de reconstrucción supuesta de la empresa; la revalorización del yacimiento a causa de la modificación de las condiciones industriales para la materia mineral, etcétera.

La exploración de explotación se ejecuta, de manera sistemática e ininterrumpida, desde el comienzo de los trabajos mineros preparatorios hasta la extracción completa de las reservas de mineral útil. Sus tareas principales son: la planificación corriente y perspectiva del funcionamiento de la empresa, la extracción regular del mineral útil con la calidad requerida, la garantía de las condiciones de seguridad en los trabajos mineros, así como la utilización completa y compleja del mineral útil. Un rasgo característico de este estadio es que sus trabajos se reali-

zan por el servicio geológico de la empresa minera y con los fondos capitales de esta última.

La división de los trabajos de búsqueda y exploración por estadios y su observación, no significa de ninguna manera que después de acabar cada una de ellas, los trabajos deben interrumpirse; por el contrario, el proceso de búsqueda y exploración de los yacimientos industriales, por lo general es permanente, pero hacia el fin de uno u otro estadio sus resultados pasan al análisis, para argumentar la conveniencia de los trabajos del estadio posterior; se confecciona el proyecto de ejecución suplementario de estos trabajos y se dan las asignaciones correspondientes.

No se puede concluir este capítulo, sin recordar que toda regla tiene sus excepciones y esto también se aplica a los estadios de los trabajos geológicos. Así, para los minerales útiles valiosos, escasos o deficitarios, que se caracterizan generalmente por una variabilidad muy compleja de la meniferación y por pequeñas dimensiones en los cuerpos minerales (piedras preciosas y decorativas, materia prima piezo-óptica, moscovita, oro, etc.), la determinación segura del valor industrial del objeto exige grandes volúmenes de trabajos mineros, la toma y tratamiento de una masa importante de mineral útil y, con frecuencia, la organización de la explotación experimental del yacimiento. Además, la explotación de estos objetos la realizan las empresas mineras de pequeña producción y a veces es una prolongación de la explotación experimental. Todo lo expuesto quiere decir, que dividir con precisión los estadios de los trabajos de búsqueda y evaluación, de la exploración tanto orientativa como detallada, en el caso de dichos minerales útiles, es imposible y algunas veces innecesario.

Con frecuencia la explotación de dichos yacimientos comienza sin la exploración detallada y aún sin terminar todos los trabajos que se consideran como de exploración orientativa.

1.3 Metodos generales de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos de minerales útiles

Como ya se expuso, esta disciplina tiene su metodología, incluso sus métodos de investigación. Seguidamente se tratará de dar una visión más clara de los métodos generales que se utilizan para resolver las tareas de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales.

Desde el principio se señaló que esta parte de la teoría de los trabajos de búsqueda y exploración se divulga poco en las investigaciones y publicaciones especiales. Una idea clara acerca de dichos métodos y sus posibilidades, se encuentra en el manual de V.M. Kreiter [21], mientras que en otros libros de texto este problema no se trata nunca o se sustituye por la consideración de métodos particulares para la solución de tareas más específicas tales como: método de jagua, métodos de análisis de las muestras, métodos matemáticos, cálculos de reservas por el método de cortes, etc. En este caso, no se trata de métodos generales, sino de modos de realización de una u otra variedad de trabajo.

V.M. Kreiter propuso, muy acertadamente, considerar como métodos de los trabajos de búsqueda y exploración más generales, los procedimientos de solución de las tareas básicas relacionadas con la búsqueda, exploración y evaluación de minerales útiles.

Estas tareas son las siguientes;

Tipificación de los objetos geológicos y los métodos de su investigación.

Revelación de las acumulaciones naturales de minerales útiles.

Estudio de la morfología de los cuerpos minerales y de sus condiciones de yacencia.

Estudio de la calidad y cantidad del mineral útil.

Establecimiento del valor industrial del objeto.

Conforme a estas seis tareas se puede hablar de seis métodos principales de búsqueda, exploración y evaluación de yacimientos minerales. Cada uno de esos métodos tiene sus propios fundamentos teóricos y sus procedimientos concretos para un debido cumplimiento de los trabajos.

Método de analogía

La tipificación de los objetos geológicos y los métodos de su investigación constituyen la base de toda la teoría de ejecución de los trabajos de búsqueda y exploración. Esta tipificación parte del hecho de que cada yacimiento mineral muestra una semejanza considerable con otros yacimientos formados por procesos geológicos similares en condiciones parecidas, aunque cada objeto tiene también sus rasgos específicos propios. Dicha semejanza se observa como norma en la morfología del cuerpo, las condiciones de yacencia, la calidad del mineral útil y las dimensiones del objeto, y permite pronosticar con más precisión la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales del yacimiento. En consecuencia, la búsqueda y exploración de yacimientos o sectores nuevos puede realizarse utilizando los métodos de estudio que resultaron más eficientes, en caso de objetos análogos ya explorados. Deben evitarse los errores cometidos durante el estudio de yacimientos semejantes.

Método de búsqueda

Para revelar las acumulaciones minerales naturales, se utilizan diferentes modos de estudio de la heterogeneidad del subsuelo. Ellos permiten, tanto pronosticar con detalles diferentes la localización de manifestaciones o yacimientos en la corteza terrestre, como hallar directamente dichos objetos. Es tradicional atribuir a dichos modos el nombre de método (por ejemplo, método hidroquímico de búsqueda, métodos técnicos de búsqueda, etc.) lo cual es incorrecto. Sin embargo, esta terminología está aceptada y sería completamente irracional cambiarla; por lo tanto nos limitaremos a señalar la existencia de este *método general de trabajos geológicos*, que aproximadamente coincide con el concepto bien conocido de *búsqueda de minerales útiles*, sin insistir en la utilización de la definición propuesta.

Método de secciones

El estudio de la morfología y de la posición espacial de los cuerpos minerales durante la búsqueda, y sobre todo en el curso de la exploración, no puede realizarse por medio de observaciones directas dentro de todo el volumen menífero, porque los objetos geológicos se encierran, totalmente o en su mayor parte, en la corteza terrestre. Por eso, como ya se señaló antes, solo se obtienen las ideas generales sobre estas propiedades de los depósitos minerales, sobre la base de las observaciones y mediciones en puntos separados que se llaman *cruceros de exploración*.

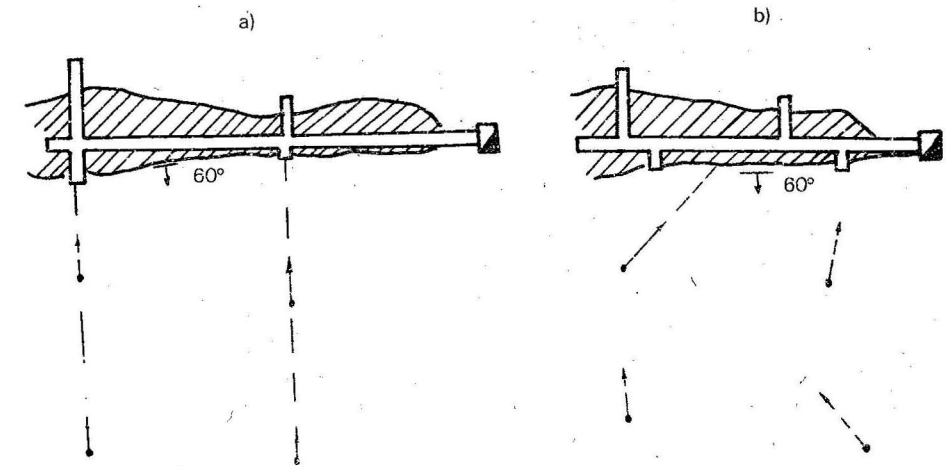


Fig. 1.1 Labores de prospección de acuerdo con el método de secciones: a) ubicación correcta; b) ubicación incorrecta

Como los objetos geológicos tienen con mucha frecuencia una forma muy irregular y variable y sus condiciones de yacencia son mutables, su representación geométrica es difícil y se logra solo a partir de cortes imaginarios de la figura real, compleja, con un sistema de planos que permiten estudiar con detalles las manifestaciones particulares de la morfología del cuerpo. Esta es la esencia del método de secciones, según el cual los labores de prospección deben situarse en el espacio, de manera que respondan a un sistema de cortes diferentes orientados. Para cumplirlo, es necesario que en cada corte los cruceros de exploración se hallen en un mismo plano (fig. 1.1).

Todo lo expuesto no significa, en absoluto, que algunos labores de prospección no se puedan realizar fuera de los planos de las secciones principales. Pero si tal es el caso, los labores se utilizarán solo para resolver tareas específicas de estudio (por ejemplo, para precisar los contornos geológicos, la posición espacial de fallas, los límites de acúmulo o de ramificación del depósito mineral, etc.) y no son más que un complemento del sistema general de ubicación en los puntos de observación.

Método de muestreo

Este método tiene como objetivo el estudio de la calidad del mineral útil. Debe admitirse que los datos auténticos sobre este parámetro geólogo-industrial son totalmente necesarios, porque las menas industriales se destacan de las rocas encajantes únicamente por su calidad. El estudio de la calidad del mineral útil se realiza por medio de cruceros de exploración, y los datos obtenidos se extienden a todo el volumen del cuerpo mineral. De este modo, las muestras deben representar, necesariamente, la calidad del mineral útil en los puntos de toma. Además, hace falta tratar estas muestras, así como analizarlas de manera que el resultado corresponda bien a las propiedades de la muestra inicial.

Para resolver estas tareas importantes se aplican diferentes procedimientos de muestreo, argumentados teóricamente.

Cálculo de reservas

Todos los métodos descritos anteriormente brindan los datos iniciales para determinar la cantidad de mineral útil y el grado de estudio del cuerpo mineral; es decir, para calcular las reservas de mineral útil. Sobre la base de este método se elige el modelo pronóstico del objeto explorado y la variante correspondiente de su geometrización o de sustitución de la forma compleja del cuerpo natural por una u otra figura geométrica simple de volumen equivalente. En consecuencia, se puede calcular fácilmente el volumen del cuerpo y utilizar diferentes modos de cálculo de los valores promedio del peso volumétrico y del contenido de componentes útiles en la mena; además, se obtiene el peso de mineral útil o del componente útil en dicho volumen.

Método de cálculos técnico-económicos

Este último método utiliza las relaciones entre las propiedades naturales del yacimiento y los índices de su eficiencia económica de explotación, lo que permite calcular, por una u otra fórmula, las características técnico-económicas fundamentales de la futura empresa minera. Al comparar dichas características con otros índices de las empresas en operación o proyectadas, se establece el valor industrial del yacimiento explorado y su importancia relativa. Por otra parte, dicho método ofrece la posibilidad de determinar los límites, económicamente argumentados, entre la mena y la roca encajante, así como las dimensiones del cuerpo y las condiciones de yacencia admisibles desde el punto de vista económico.

Hay que señalar que los trabajos de búsqueda y exploración, deben tener como resultado una caracterización completa del yacimiento desde todos los puntos de vista, por cuanto, los seis métodos generales descritos, deben utilizarse conjuntamente, ya que estos se complementan. Por ejemplo, el estudio de la morfología de los cuerpos minerales por medio del método de secciones, permite, al mismo tiempo, aplicar en los laboreos de prospección el método de muestreo, y utilizar estos laboreos como un modo del método de búsqueda para revelar los cuerpos paralelos todavía ignorados. El método de muestreo algunas veces se usa para contornear el cuerpo mineral; o sea, sirve para estudiar su morfología. El cálculo de reservas no solo representa una síntesis de datos obtenidos por otros métodos y una base para el método de los cálculos técnico-económicos, sino que también depende directamente de la argumentación técnico-económica de los valores límites de los factores geólogo-industriales, a partir de los cuales se pueden revelar los depósitos o sus sectores industriales.

CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales

Como se sabe, para lograr el éxito durante la búsqueda y exploración se utilizan varios métodos generales, con su correspondiente base teórica, sobre la cual se elaboran las formas concretas de realización de los trabajos. Como cada método general asegura el estudio de uno u otro aspecto del mismo objeto geológico, las bases teóricas de estos métodos se complementan mutuamente o hasta cierto punto pueden coincidir. Por lo tanto, es más racional reunir los fundamentos teóricos de todos los métodos y tratarlos de manera detallada antes de comenzar el estudio de las vías y procedimientos concretos de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles.

2.1 Variabilidad de los cuerpos minerales y de los yacimientos minerales útiles

La variabilidad de los objetos geológicos es su rasgo más característico. Con este nombre se conoce la inestabilidad de los valores de uno u otro índice del objeto observado en puntos diferentes del espacio. Es esto lo que crea las dificultades más grandes durante la búsqueda, exploración y evaluación de yacimientos minerales y complica la extrapolación de los datos reales obtenidos en los puntos separados para el volumen del cuerpo entre esos puntos. Por eso, la tarea más importante del prospector consiste en establecer correctamente la variabilidad del objeto y escoger, para esta, los mejores métodos de estudio y evaluación.

Si la variabilidad no existiera, una sola observación en cualquier punto del objeto sería suficiente para obtener un criterio claro y preciso. Pero este caso no se encuentra en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración.

Por lo general, los resultados de las observaciones en diferentes puntos son variados y, por eso, la generalización de los datos reales requiere el conocimiento de los límites de variación de un determinado parámetro y de la ley según la cual se modifican sus valores en el espacio. Es también importante conocer el volumen del cuerpo mineral, dentro del cual dicha ley es válida. Como las diferentes partes de los objetos geológicos muestran con frecuencia diferentes tipos de variabilidad, el estudio de la amplitud y la ley de modificación de cada parámetro debe

realizarse independientemente para cada sector del cuerpo. De acuerdo con esto, el concepto de variabilidad comprende tres factores o elementos: grado, carácter y estructura.

El *grado de la variabilidad*, se manifiesta como la amplitud de las variaciones de los valores observados del parámetro en cuestión. Se determina a menudo por las diferencias entre los datos medidos y su valor promedio. Sobre la base del grado de variabilidad, los depósitos minerales se subdividen en cinco grupos, según la proposición de V.M. Kreiter y N.V. Baryshev (1940). Estos grupos son:

Cuerpos minerales muy regulares.

Cuerpos regulares.

Cuerpos irregulares.

Cuerpos muy irregulares.

Cuerpos extremadamente irregulares.

El *carácter de la variabilidad* es el modo de variación de los valores del parámetro en el espacio. Tiene gran importancia, ya que si se conocen las leyes de modificación del parámetro se pueden pronosticar con seguridad los valores correspondientes a cada punto del cuerpo mineral.

La figura 2.1 presenta dos casos diferentes desde el punto de vista del carácter de la variabilidad, aunque su grado es el mismo. Se puede ver de manera clara y demostrativa, que para un carácter más complejo de esta, se requiere un número mayor de puntos de observación para estudiar los objetos con el mismo grado de variabilidad.

En el primer caso, dos medidas en cualesquiera de los puntos serían suficientes para tener una idea clara sobre el comportamiento de la potencia del cuerpo dentro del intervalo estudiado, mientras que en el segundo caso, para lograrlo se necesitan las seis observaciones. Además, en caso de variabilidad simple, los puntos de observación pueden situarse de manera arbitraria y si es compleja, estos puntos deben coincidir con las inflexiones de la superficie del cuerpo. La variabilidad simple da la seguridad de que no solo el valor promedio del parámetro se determina correctamente y sin errores, sino que también pueden pronosticarse con confianza los valores particulares en diferentes puntos, tanto en la parte del cuerpo investigada como fuera de sus límites. La variabilidad compleja es un caso totalmente opuesto y los valores pronosticados, así como el valor promedio del parámetro, no son absolutamente exactos, porque las modificaciones de dicho parámetro entre los puntos de observación, evidentemente no tienen un carácter rectilíneo, el cual es obligatorio suponer.

El carácter de la variabilidad puede ser de dos tipos principales: ocasional y regular. En el primer caso, los valores del parámetro observados en puntos contiguos son independientes, mientras que en el caso de variabilidad regular estos valores se someten a una ley de modificación. En función de la manera en que se manifiesta dicha ley, es posible distinguir tres tipos de variabilidad regular, que se llama también variabilidad coordinada:

Variabilidad simple, cuando el parámetro se modifica conforme a la ley de la línea recta.

Variabilidad compleja, cuya ley se expresa con una curva de segundo orden.

Variabilidad muy compleja, que se revela solamente como una tendencia de regularidad y puede expresarse con curvas más complejas de órdenes más altos.

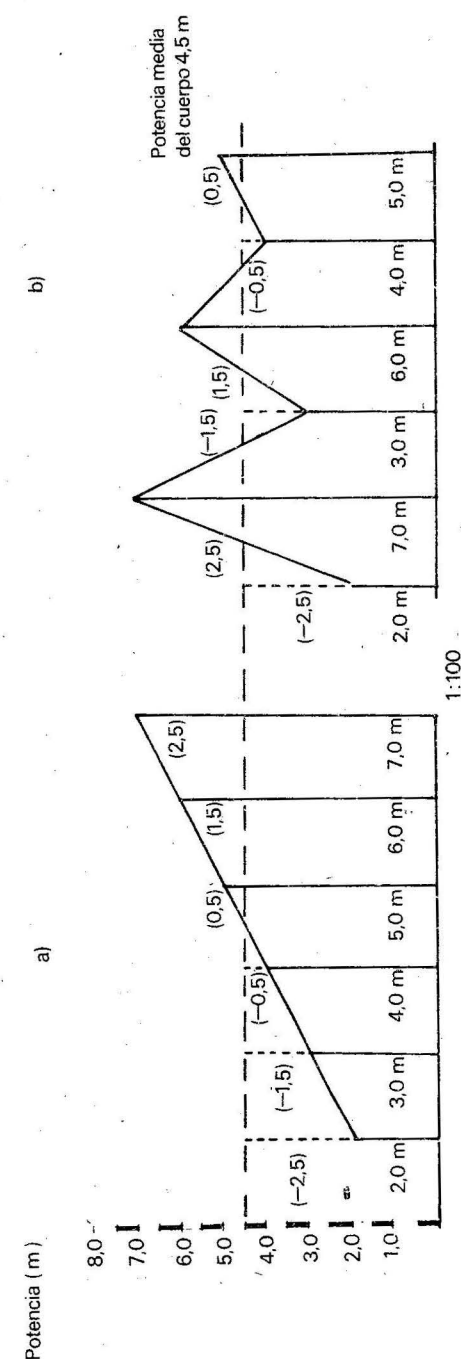


Fig. 2.1 Variabilidad de la potencia de un cuerpo mineral al ser equivalente el grado de variabilidad (las cifras entre paréntesis indican las desviaciones de la potencia de su magnitud promedio): a) carácter simple; b) carácter complejo

Según esta clasificación la variabilidad ocasional se denomina extremadamente compleja.

Es importante aclarar que la naturaleza conoce pocos casos donde se manifieste independientemente la variabilidad regular u ocasional. De manera general, su influencia es combinada y la tarea que se plantea es la de subdividir este conjunto en sus partes: regular y ocasional. Esto es necesario porque cada tipo de variabilidad influye de manera diferente sobre la opción de los métodos de estudio del objeto y sobre su evaluación. Además, el grado de manifestación de la ley de variabilidad, salvo el caso de variabilidad simple, depende de la distancia entre los puntos de observación: mientras mayor es esta distancia, menos clara es la regularidad visible de la variabilidad. Esta dependencia tiene una gran importancia durante la argumentación del sistema racional de estudio del yacimiento.

Con el nombre de *estructura de la variabilidad* se conoce la diferencia del grado o de la estructura de esta (o de ambos factores al mismo tiempo) que puede observarse para diferentes sectores del mismo objeto. Casi siempre se puede afirmar que la estructura compleja de la variabilidad refleja la estructura compleja natural del objeto geológico, la cual es el resultado de la acción conjunta de los procesos geológicos causantes de la formación del yacimiento mineral y su transformación posterior. Se pueden señalar innumerables ejemplos, como: las columnas de menas, tanto primarias como secundarias; las zonas de alteración epigenética de mineral útil; los estrechamientos y ensanchamientos del cuerpo mineral; las fallas con desplazamientos de los bloques, etc. Los sectores del estrato de carbón que aparecen en la figura 2.2, se caracterizan por diferentes estructuras de variabilidad de su potencia.

Los sectores del depósito mineral con estructura de variabilidad uniforme, se denominan bloques geológicos homogéneos o simplemente bloques geológicos. La subdivisión del cuerpo mineral en tales bloques es muy importante para observar el principio del estudio equivalente; conforme a dicho principio, el sistema debe diferenciarse en función del carácter de los bloques geológicos.

Hasta ahora se ha tratado la variabilidad de diferentes parámetros del cuerpo mineral, que pueden ser su potencia, acimut y ángulo de buzamiento, contenido de uno u otro componente, etc. Es natural que la variabilidad del cuerpo no coincida con la de un parámetro y represente un fenómeno resumen. Por ejemplo, si la variabilidad de la potencia del cuerpo es sencilla y la de su calidad es compleja, como consecuencia el cuerpo mineral tiene variabilidad compleja; si, además, las condiciones de yacencia se caracterizan por una variabilidad compleja, el cuerpo debe considerarse como muy variable. Los mismos razonamientos se utilizan para establecer el tipo de variabilidad de todo el yacimiento a partir de la variabilidad de sus sectores o de los cuerpos minerales que lo componen.

Por otra parte, la variabilidad del mismo parámetro del cuerpo, por ejemplo su potencia, resulta diferente en función del volumen de espacio dentro del cual este parámetro se investiga. Por ejemplo, en un solo crucero de exploración (un pozo de perforación) la variabilidad de este parámetro no existe; en los límites de un bloque geológico dicha variabilidad es menor que para todo el cuerpo; la variabilidad de la potencia para un perfil es diferente que para un volumen determinado del cuerpo, etcétera.

Lo expuesto significa que la característica de la variabilidad se relaciona estrechamente con el grado de estudio del objeto, así como también con el grado de generalización de los datos obtenidos sobre los parámetros del depósito mineral.

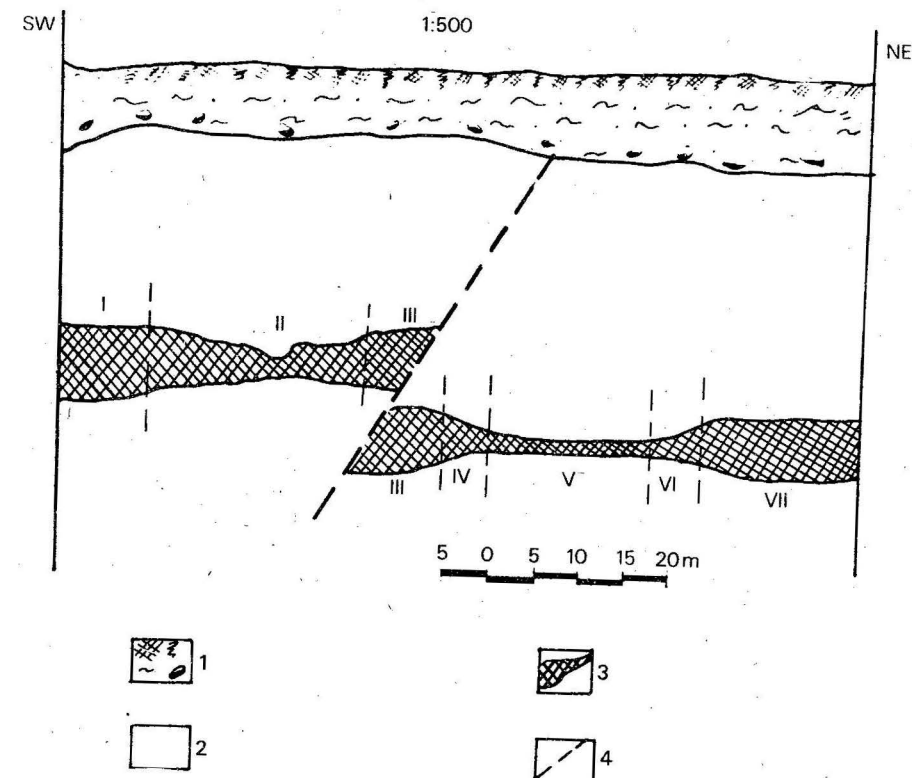


Fig. 2.2 Estructura de la variabilidad de un estrato de carbón: I, V y VII - variabilidad sencilla, muy regular; II - variabilidad compleja, irregular; III - variabilidad compleja, discontinua regular; IV y VI - variabilidad sencilla irregular; 1 - suelo y depositos friables del Cuaternario; 2 - rocas areno-arcillosas del Carbonífero inferior; 3 - estrato de carbón; 4 - falla.

En la actualidad se entiende la variabilidad del objeto geológico como un sistema de niveles diferentes subordinados de variabilidad, cada uno de los cuales corresponde a uno u otro grado de estudio y de generalización de los datos reales. Los niveles principales, según el aumento del grado de generalización de los datos, son:

- Mineral.
- Agregado mineral.
- Crucero de exploración.
- Bloque geológico.
- Cuerpo mineral.
- Yacimiento.
- Zona de meniferación o zona productiva.
- Campo menífero o provincia metalogénica.

A cada uno de estos niveles corresponde su propio objeto de estudio, que se considera entonces como convencionalmente homogéneo y se llama elemento de heterogeneidad (mineral, tipo natural de mena, cuerpo mineral, etc.), así como las respectivas propiedades de estudio de la variabilidad. Por ejemplo, para estudiar la variabilidad del contenido de cadmio en las menas polimetálicas, se utilizan muestras monominerales para el primer nivel, muestras ordinarias para el segundo nivel, muestras agrupadas para el tercer nivel, muestras combinadas para el cuarto nivel, y así sucesivamente.

La correcta elección del nivel necesario de estudio de la variabilidad, y la utilización conveniente de sus resultados durante la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles, constituye un problema de gran importancia. Hay que recordar siempre que es absolutamente inadmisibles aplicar conclusiones sobre la variabilidad del objeto, obtenidas a un nivel de estudio, para resolver las tareas prácticas de otro nivel. Así, el grado y el carácter de variabilidad del contenido del componente útil, que se determinan sobre la base de las muestras ordinarias, no pueden servir para escoger la densidad de la red de muestreo. Para resolver esta tarea se necesita el estudio de la variabilidad de la calidad, al nivel de cruceros de exploración. Finalmente debe señalarse que el nivel de estudio de la variabilidad se escoge teniendo en cuenta las tareas concretas que se plantean en uno u otro estadio de los trabajos de búsqueda y exploración.

2.2 Clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales útiles

Como se dijo anteriormente, el método de analogía constituye la base de los trabajos geológicos. Su empleo requiere la generalización amplia de los datos reales sobre los objetos geológicos ya conocidos, la revelación de rasgos típicos de estos objetos y la creación, sobre esta base, de un sistema de modelos con los cuales se pueda comparar el objeto de estudio. La vía principal para resolver este problema es la elaboración de las clasificaciones geólogo-industriales de los yacimientos minerales, cuyos tipos deben desempeñar el papel de modelos confiables.

Algunos manuales [30] tratan dichas clasificaciones como fundamentos económicos de la búsqueda-exploración, al partir del hecho de que el concepto de yacimiento industrial o de parámetro geólogo-industrial, se basa en las exigencias económicas. Sin embargo, otros autores afirman que estas clasificaciones deben considerarse como fundamentos geológicos, ya que ellas utilizan las regularidades geológicas empíricamente establecidas [14]. Los autores de este texto consideran que ambos puntos de vista son erróneos.

La clasificación geólogo industrial representa una síntesis de las características del yacimiento, tanto geológicas como económicas, y por eso existen razones de peso para considerarla como un fundamento independiente de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales.

La clasificación geólogo-industrial de los yacimientos, se desarrolla sobre la base de que cada yacimiento representa un conjunto de diferentes parámetros geólogo-industriales en su manifestación concreta. Las diferentes combinaciones de estos parámetros corresponden a los diferentes tipos o grupos de yacimientos, cada uno de los cuales se caracteriza por semejanzas desde el punto de vista de los métodos eficaces de búsqueda y exploración, sistemas de explotación, produc-

ción de la empresa minera y eficiencia económica de utilización industrial del yacimiento. Por lo tanto, es necesario estudiar con detalles, en primer lugar, la base de la clasificación, es decir, los parámetros geólogo-industriales de los yacimientos minerales útiles.

2.2.1 Parámetros geólogo-industriales de los yacimientos minerales y su papel en la clasificación

Como parámetros geólogo-industriales pueden utilizarse numerosos indicadores o rasgos de los cuerpos minerales; sin embargo, aquí se estudiarán solo los fundamentales que se utilizan más en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración, y que son los siguientes:

- Morfología y estructura interna de los depósitos minerales.
- Condiciones de yacencia del cuerpo mineral.
- Calidad del mineral útil.
- Composición y propiedades de las rocas encajantes.
- Escala del yacimiento y concentración de reservas.
- Condiciones de explotación del yacimiento.

Morfología y estructura interna de los depósitos minerales

En el curso de Geología de yacimientos minerales útiles, los cuerpos minerales se subdividen, según su forma, en tres tipos principales; isométricos, tabulares y tubulares. Existe también un grupo suplementario de cuerpos complejos. Este agrupamiento es lógico, universal, tiene en cuenta los cuerpos de forma intermedia y no requiere explicaciones. No obstante, para escoger los métodos racionales de búsqueda y exploración del yacimiento, es insuficiente. En efecto, entre los cuerpos tabulares, se encuentran objetos tanto grandes como pequeños, regulares e irregulares, continuos y discontinuos. Por lo tanto, desde el punto de vista de la búsqueda y exploración, la morfología del cuerpo se caracteriza generalmente por los dos índices siguientes:

- Forma de la proyección del cuerpo en algún plano.
- Potencia del cuerpo (con más frecuencia la potencia normal al plano de proyección).

Al estudiar la forma de la proyección del cuerpo mineral, hay que tener en cuenta propiedades importantes tales como la complejidad del contorno exterior del cuerpo, la discontinuidad del cuerpo dentro del área delimitada por dicho contorno y el grado de linealidad de la forma de proyección.

La complejidad del contorno exterior del cuerpo mineral se puede evaluar al comparar el largo total de este contorno (L_c) con el largo del contorno de alguna figura geométrica sencilla (L_0), con una superficie equivalente y el mismo grado

de anisotropía. V.M. Kozak, propuso como tales figuras, el círculo para las superficies isométricas y la elipse para las alargadas (fig. 2.3). Para los objetos muy alargados cuya longitud sobrepasa su ancho más de cinco veces, es mejor utilizar el rectángulo en lugar de la elipse, ya que el rectángulo en este caso es la figura con el largo mínimo del contorno.

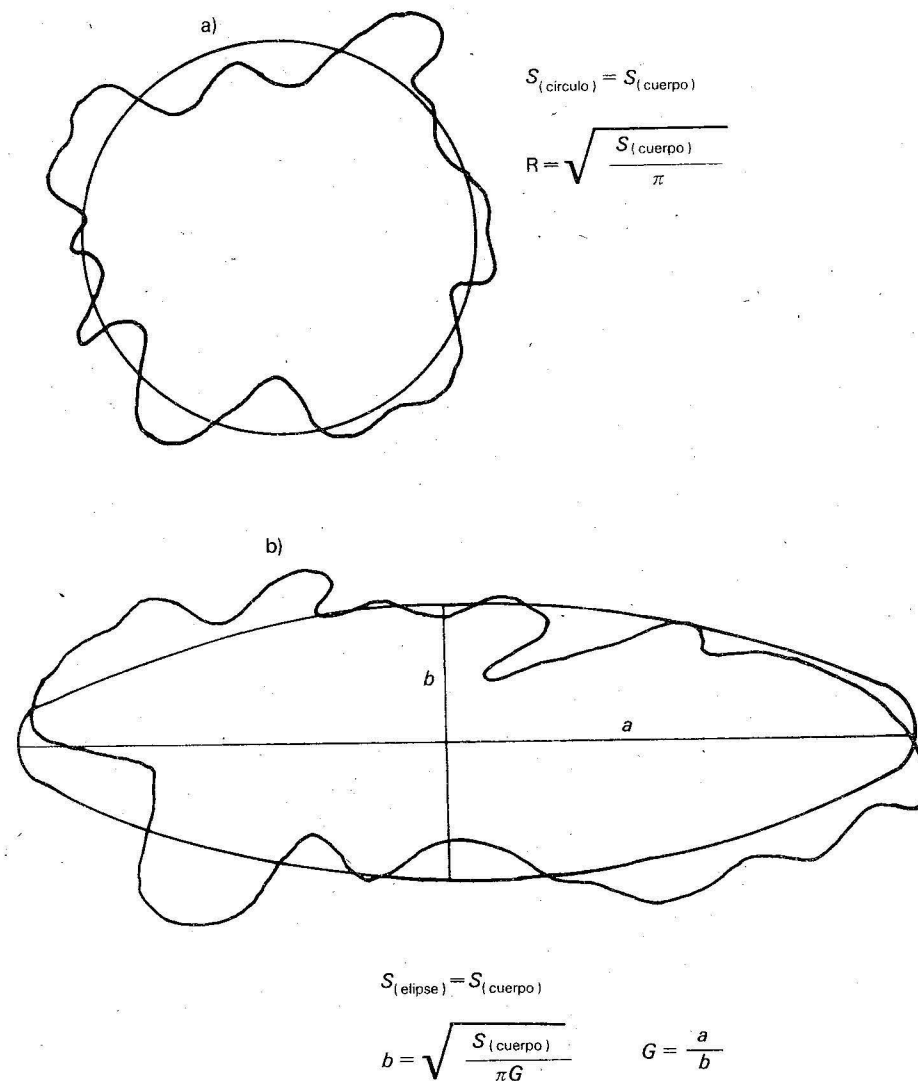


Fig. 2.3 Remplazo de la configuración real de la proyección del cuerpo mineral con figuras equivalentes para evaluar la complejidad de su contorno exterior: a) círculo para cuerpos isométricos; b) elipse para cuerpos alargados

El índice de complejidad del contorno exterior se llama simplemente índice de contorno (I_c) y se calcula por la fórmula:

$$I_c = \frac{L_k}{L_0} \quad (1)$$

Para determinarlo, hay que proceder de la siguiente manera:

1. Medir, con el curvímeter, el largo del contorno exterior de la proyección del cuerpo investigado (L_k).
 2. Medir, con el planímetro o de otra manera, la superficie de la proyección del cuerpo (S).
 3. Establecer el grado de linealidad de la forma de proyección del cuerpo (G_a) como la relación aproximada entre su largo (A) y su ancho (B).
- $$G_a = \frac{A}{B} \quad (2)$$
4. Escoger el tipo de figura sencilla equivalente. Si $A : B$ es menor que $3 : 2$, la figura recomendada es el círculo. Si esta relación varía desde $3 : 2$ hasta $5 : 1$, es preferible la elipse, y si sobrepasa $5 : 1$, la mejor figura es el rectángulo.
 5. Calcular el largo del contorno de la figura escogida mediante las fórmulas siguientes:

$$\text{Para el círculo: } L_0 = 2\sqrt{\pi S} \quad (3)$$

$$\text{Para la elipse: } L_0 = 1,5 \sqrt{\frac{\pi S}{G_a}} (G_a + 1) - \sqrt{\pi S} \quad (4)$$

$$\text{Para el rectángulo: } L_0 = 2 \sqrt{\frac{S}{G_a}} (G_a + 1) \quad (5)$$

6. Calcular el índice de contorno según la fórmula (1). Hasta ahora no existe una clasificación de los contornos en función de su complejidad que sea admitida por todos; sobre la base de muchos experimentos ejecutados para los contornos de diferentes grados de complejidad, se puede proponer el siguiente agrupamiento de los depósitos minerales según el valor del índice de contorno:

Cuerpos minerales de forma sencilla: $I_c = 1,0 - 1,2$.

Cuerpos minerales de forma relativamente sencilla: $I_c = 1,2 - 1,5$.

Cuerpos minerales de forma compleja: $I_c = 1,5 - 2,0$.

Cuerpos minerales de forma muy compleja: $I_c > 2,0$.

La discontinuidad del depósito mineral (D), se caracteriza generalmente por la relación entre la suma de la superficie (S_a) de los sectores donde el mineral útil falta o tiene potencia no industrial ("lagunas" estériles o no industriales) y la superficie total dentro del contorno exterior del depósito (S).

$$D = \frac{S_a}{S} \quad (6)$$

Sin embargo, para clasificar los cuerpos minerales en función de este índice, se utiliza el concepto opuesto, denominado estabilidad del cuerpo, el cual se caracteriza por el índice de estabilidad (E). Este índice se determina por:

$$E = 1 - D \quad (7)$$

Según el valor del índice de estabilidad se conocen cuatro grupos de depósitos minerales:

Estables (continuos): $E = 1,00$.

Relativamente estables (poco discontinuos): $E = 0,75 - 1,00$.

Inestables (discontinuos): $E = 0,50 - 0,75$.

Extremadamente inestables (muy discontinuos): $E < 0,50$.

Estos grupos de depósitos se muestran esquemáticamente en la figura 2.4.

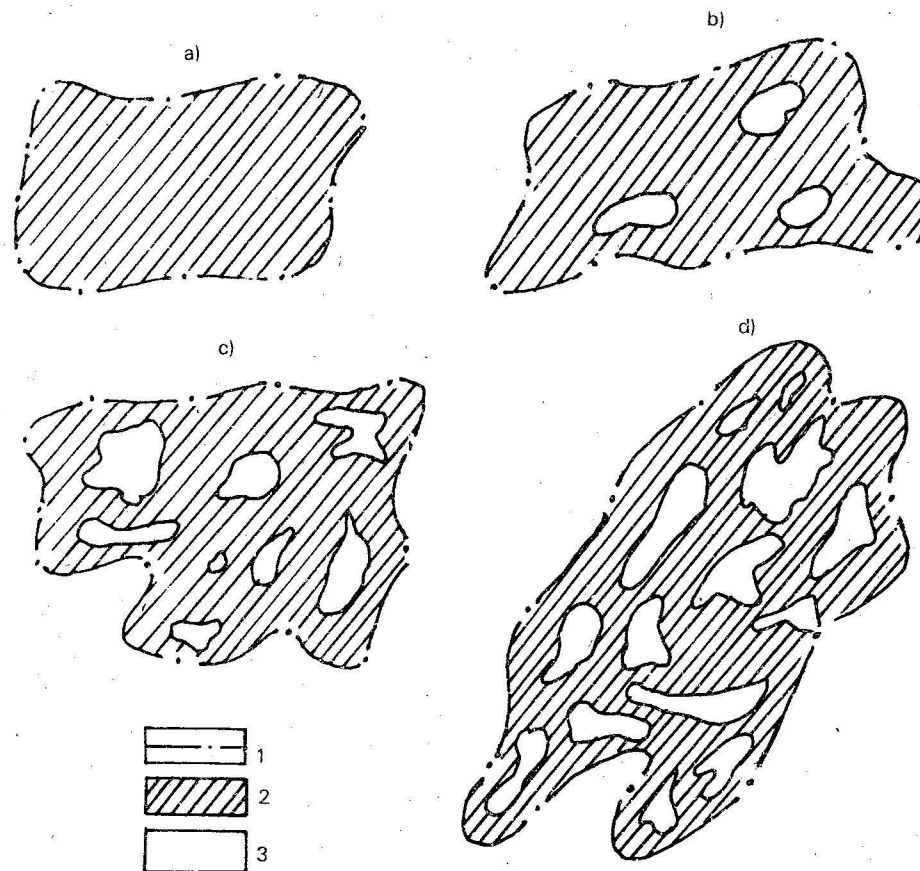


Fig. 2.4 Diferentes tipos de cuerpos minerales según la estabilidad de su morfología: a) cuerpos continuos; b) cuerpos relativamente continuos; c) cuerpos discontinuos; d) cuerpos extremadamente discontinuos; 1- contorno exterior del cuerpo; 2- sectores donde la potencia del cuerpo es superior a la mínima industrial; 3- sectores industriales por su potencia

Es fácil advertir que el crecimiento de la discontinuidad del cuerpo mineral tiene como consecuencia la aparición de contornos suplementarios. Estos contornos, que se llamarán posteriormente contornos inferiores, deben revelarse y trazarse con bastante precisión durante la exploración del objeto. De esa forma, se puede determinar cualitativamente el efecto total de la complejidad del contorno exterior del cuerpo y de su discontinuidad (el cuerpo de forma sencilla se clasifica como complejo si es discontinuo, y el cuerpo poco discontinuo de forma relativamente sencilla se clasifica como poco complejo). Sin embargo, es preferible evaluar este efecto cuantitativamente con ayuda del índice de contorno corregido I_c , el cual tiene en cuenta el largo total del contorno exterior y de los interiores (L_i). Este índice se determina según la fórmula:

$$I_c = \frac{L_k + L_i}{L_0} \quad (8)$$

Para clasificar los cuerpos minerales se utilizan los límites de los valores de este índice, mencionados anteriormente.

El grado de linealidad de la forma de proyección del cuerpo se caracteriza por la relación de los lados del rectángulo equivalente y no influye sobre la complejidad de dicha forma; pero, conforme al principio del estudio equivalente, puede determinar el sistema de ubicación espacial de los labores de prospección, sobre todo si con la anisotropía de la forma de proyección se relaciona la anisotropía de la variabilidad de otros parámetros geólogo-industriales del cuerpo.

La potencia del cuerpo mineral es uno de sus índices más importantes. La autenticidad y la precisión de su valor promedio determinan en gran parte la exactitud del cálculo de reservas del mineral útil dentro del área estudiada. La precisión del valor promedio de la potencia del cuerpo depende, en primer lugar, del grado y del carácter de la variabilidad de este parámetro, los cuales pueden evaluarse y clasificarse sobre la base de los conocimientos del capítulo anterior.

No obstante, para escoger el sistema de apertura y de explotación del yacimiento mineral, el valor promedio de la potencia del cuerpo en sí mismo es suficiente. La estructura de la variabilidad, o sea, las particularidades de las variaciones de este parámetro en toda el área del cuerpo, tiene mayor importancia. En este sentido, es necesario conocer la posición y la configuración de las zonas de potencia no industrial, así como los sectores de paso de una a otra clase industrial. Los dos casos son complicados, por cuanto implican la modificación de la tecnología de extracción del mineral útil.

En minería, los depósitos minerales, según su potencia, se subdividen en los cinco grupos siguientes:

	buzamiento abrupto	buzamiento suave
Cuerpos finos	menos de 1,0 m	menos de 1,5 m
Cuerpos medios	1,0 - 3,0 m	1,5 - 4,0 m
Cuerpos potentes	3,0 - 8,0 m	4,0 - 10 m
Cuerpos muy potentes	8,0 - 50 m	10 - 50 m
Cuerpos superpotentes	más de 50 m	más de 50 m

Si la potencia del cuerpo mineral varía dentro del mismo grupo, la explotación se realiza sin complicaciones y este caso corresponde a la variabilidad sencilla. Las variaciones de la potencia que abarcan dos grupos contiguos, represen-

tan la variabilidad compleja y si estas variaciones son de una amplitud de tres o más grupos la variabilidad es muy compleja.

La estructura interna del cuerpo mineral se determina por la existencia, dentro de este, de partes estériles o no industriales, así como por sus regularidades de localización espacial. Desde este punto de vista, los cuerpos minerales simples no contienen nunca partes estériles o no industriales; los cuerpos relativamente complejos se caracterizan por la distribución regular y estable en toda el área de inclusiones de rocas o de menas no condicionadas y los cuerpos complejos muestran una ubicación desordenada en sus partes estériles.

Antes de concluir el estudio de este parámetro geólogo-industrial, debe señalarse que la morfología y las estructuras internas del depósito mineral, así como también todos los demás parámetros, son conceptos no solo geológicos sino también económicos. En efecto, la delimitación del cuerpo, la posición y la configuración de su contorno exterior, así como su discontinuidad, se relacionan estrechamente con el valor mínimo de la potencia considerada como industrial. Como este valor se modifica, la forma de la proyección del cuerpo varía también inevitablemente. Por otra parte, la potencia del cuerpo mineral depende de su estructura interna y de las exigencias industriales en cuanto al contenido mínimo admisible del componente útil en la mena y a la potencia máxima posible de las partes estériles dentro del cuerpo. Esto quiere decir que las particularidades de la morfología y de la estructura interna del cuerpo mineral, deben utilizarse siempre en conjunto para clasificar los yacimientos minerales útiles. La variabilidad de estos índices debe evaluarse por su influencia total.

Condiciones de yacencia del cuerpo mineral

Se conoce bien que la profundidad a la cual se encuentra el depósito mineral, su acimut y ángulo de buzamiento, la dirección y el ángulo de su pendiente, son factores de gran importancia e influyen mucho sobre la elección del sistema de apertura y de explotación del yacimiento mineral.

En minería, en función del ángulo de buzamiento, los depósitos minerales se subdividen generalmente en:

- | | |
|---|---------------------------------------|
| a) horizontales, muy suaves y de
muy poca pendiente, 0-5°; | c) inclinados, 25-45°; |
| b) de poca pendiente, 5-25°; | d) abruptos, 45-60°; |
| | e) muy abruptos y verticales, 60-90°. |

Existen sistemas eficientes de explotación para cualquier ángulo de buzamiento. Por eso, si dicho ángulo varía dentro de la misma clase, las condiciones de yacencia del cuerpo son sencillas; si las variaciones se observan en dos clases contiguas, estas condiciones hay que considerarlas como complejas; si el ángulo de buzamiento se modifica muy rápido y se manifiesta en tres o más clases, las condiciones de yacencia son muy complejas.

No se puede hablar de modificaciones del ángulo de buzamiento sin precisar las dimensiones del sector dentro del cual estas se manifiestan. Por ejemplo, de manera general una flexura representa condiciones de yacencia muy complejas, porque el buzamiento en esta estructura geológica puede variar desde horizontal hasta vertical. Sin embargo, esto es válido solo en caso de flexura relativamente pequeña. Si cada ala de la gran flexura puede explotarse por una mina independiente, estas condiciones, por el contrario, son sencillas.

Si se parte de lo expuesto y se tiene en cuenta el hecho de que durante la explotación del yacimiento, es difícil e irracional cambiar el sistema de extracción

de la mena más de una vez por año, las condiciones de yacencia se pueden llamar sencillas, siempre que sus modificaciones no salgan fuera de los límites de la misma clase industrial, dentro del bloque cuyas reservas garantizan la producción anual de la empresa minera. Se comprende bien que para diferentes tipos de minerales útiles, así como para los yacimientos de diferente escala del mismo mineral útil, el tamaño de dicho bloque es diferente y tiene que determinarse siempre en función de propiedades concretas del objeto geológico.

Para evaluar el papel de las fallas se aplican razonamientos análogos. Si ellas están bastante separadas, se pueden delimitar algunos bloques tectónicos como campos de minas independientes, aunque la amplitud de las fallas sea grande. Esto significa que las condiciones de yacencia no se complican desde el punto de vista industrial. Además, estas fallas se revelan fácilmente durante la búsqueda y, por lo general, para precisar su posición y su amplitud no se necesitan laboreos de prospección suplementarios.

Las fallas que se manifiestan con más frecuencia y permiten subdividir el yacimiento en bloques correspondientes a la producción anual, caracterizan las condiciones de yacencia como complejas y las fallas que se encuentran dentro de esos bloques las caracterizan, a su vez, como muy complejas.

Las condiciones de yacencia, la forma del cuerpo mineral y la calidad del mineral útil, pueden transformarse también bajo la influencia del magmatismo postmenífero. En este caso, la complejidad de la variabilidad del parámetro correspondiente debe evaluarse en función de la frecuencia con la cual se manifiestan los cuerpos magmáticos y las zonas de alteración relacionadas con ellos, dentro del campo de mina o del bloque que garantiza la producción anual de la empresa minera; es decir, de la misma manera que en los casos de dislocaciones plicativas y disyuntivas.

La evaluación final de la variabilidad de las condiciones de yacencia se obtiene, naturalmente, al tener en cuenta la influencia total de las deformaciones plicativas, fallas, manifestaciones magmáticas, y a veces también de las dislocaciones provocadas por los procesos cársicos de deslizamiento.

La profundidad de yacencia de los cuerpos minerales es muy importante para escoger el sistema de explotación del yacimiento y sus medios técnicos. No obstante, este índice no puede determinar la metodología general de estudio del objeto, salvo la utilización de unos u otros medios técnicos de exploración. En caso de yacencia horizontal del cuerpo, la profundidad, o la cota absoluta de su techo, se conoce fácilmente con ayuda de un solo laboreo de prospección y es válida para todo el yacimiento. Si las cotas absolutas del techo o del piso del cuerpo son variables, esto corresponde a las dislocaciones plicativas, disyuntivas y otras referidas anteriormente.

La profundidad de yacencia se utiliza principalmente durante la evaluación de yacimientos explorados. En este caso, es útil recordar que la explotación a cielo abierto puede realizarse si el coeficiente de destape (relación entre la potencia de destape y la del mineral útil) es inferior a 40 : 1 para los metales no ferrosos; 10 : 1 para los ferrosos, y 3 : 1 para la materia prima de construcción. También hay que tener en cuenta que la profundidad máxima de la cantera proyectada no debe sobrepasar de 500 a 1 000 m de acuerdo con el tipo de mineral útil, mientras que la materia prima para construcción se explota hasta una profundidad de varias decenas de metros. La explotación subterránea es posible actualmente, desde el punto de vista técnico, hasta 3 500 a 4 000 m de profundidad, pero generalmente sus límites se encuentran entre 1 000 y 1 500 m.

Calidad del mineral útil

La búsqueda y exploración de yacimientos minerales tiene como fundamento la posibilidad real de destacar el mineral útil de la roca estéril. Esta diferencia se determina sobre la base del estudio de la calidad de la materia prima mineral. Claro que la calidad del mineral útil es un concepto no solo natural sino también económico y por eso puede modificarse con el tiempo. Por ejemplo, en el yacimiento de menas polimetálicas Sadón en la URSS, la mena, que al comienzo del siglo actual se consideraba como no industrial, y se utilizaba como roca para rellenar los minados antiguos, en la década del 50 llegó a ser industrial como consecuencia del perfeccionamiento de la tecnología del beneficio y el cambio de la situación económica general.

Sin embargo, a cada período histórico concreto corresponde un concepto determinado de calidad del mineral útil y este parámetro tiene un papel de suma importancia, por cuanto con mucha frecuencia se utiliza para contornear los cuerpos minerales y por consiguiente influye sobre su forma, estabilidad, potencia, etc. Por lo tanto, cada clasificación geólogo-industrial de yacimientos minerales tiene que considerar este parámetro como uno de los más importantes.

Como se mostrará con posterioridad en el capítulo dedicado al muestreo, la calidad del mineral útil es un concepto complejo que se determina por el conjunto de su composición, tanto química como mineralógica, y sus propiedades petrográficas, físico-técnicas y tecnológicas. Es natural que para clasificar los minerales útiles según este parámetro, hay que utilizar sus propiedades más generales e informativas. Estas propiedades son las siguientes:

Composición mineralógica de la mena que determina el método de su tratamiento

Contenido promedio del componente útil, del cual dependen las reservas de mineral útil y la eficiencia económica de explotación del yacimiento

Variabilidad del contenido de componente útil (o más generalmente variabilidad de la calidad), la cual influye sobre la precisión y autenticidad de las reservas calculadas, sobre la regularidad y eficiencia del funcionamiento de las fábricas de beneficio y las plantas metalúrgicas.

La composición mineralógica del mineral útil y sus propiedades petrográficas, determinan uno u otro *tipo natural de menas*. El número de estos tipos y sus relaciones espaciales recíprocas, influyen considerablemente sobre la variabilidad de la calidad del mineral útil. Si el número aumenta y su geometrización se complica, la exploración del yacimiento resulta más difícil. El cálculo de reservas de cada tipo de mena es, por consiguiente, menos exacto y la garantía de calidad estable en la mena enviada a la planta de beneficio, es poco confiable.

El contenido promedio de componente útil se caracteriza con frecuencia por el concepto *riqueza de la mena*, que da una idea general sobre el valor relativo de esta. Como regla, se pueden destacar, según este índice, las menas ricas, ordinarias, pobres y muy pobres. Las menas muy pobres, en la mayoría de los casos, son no industriales y las ricas pueden utilizarse algunas veces en el proceso metalúrgico sin beneficio (menas de hierro, manganeso, cromo y otras). La riqueza de la mena es una característica bastante relativa y para diferentes tipos de minerales útiles es totalmente distinta, lo que se demuestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1
DIVISIÓN DE LAS MENAS DE DIFERENTES MINERALES ÚTILES, SEGÚN SU CALIDAD

Mineral útil	Componente útil	Unidad de medida	Contenido del componente útil en las menas		
			Ricas	Ordinarias	Pobres
Menas de hierro	Fe	%	Más de 50	30-50	22-30
Cromita	Cr ₂ O ₃	%	" 45	30-45	24-30
Menas de cobre	Cu	%	" 3	1-3	0,5- 1
Menas polimetálicas	Pb - Zn	%	" 15	5-15	2-5
Estaño	Sn	%	" 3	1-3	0,5- 1
en filones	Sn	%	" 1	0,3-1	0,1-0,3
en stockworks	Sn	kg/m ³	10	1-10	0,3-1
en placeres	Sn	kg/m ³			
Oro	Au	g/t	10	5-10	3- 5
primario	Au	g/m ³	5	1- 5	<1
en placeres					
Molibdeno	Mo	%	Más de 1	0,5- 1	0,1-0,5
en filones	Mo	%	" 0,3	0,1- 0,3	0,05- 0,1
en stockworks	U	%	" 0,3	0,1- 0,3	0,05- 0,1
Uranio	Diamante	quilates/t	" 1	0,3- 1	0,1- 0,3
Diamante					
Micas	flogopita	kg/m ³	100	50 - 100	10 - 50
flogopita	moscovita	kg/m ³	" 100	20 - 100	6 - 20
moscovita	P ₂ O ₅	%	" 25	16 - 25	8 - 16
Apatito y Fosforita					

La variabilidad de contenido del componente útil, se puede evaluar teniendo en cuenta su grado, o sea, mediante la agrupación en cinco tipos de cuerpos, al igual que en el caso de variabilidad de la potencia. Además, la variabilidad de la calidad se caracteriza por la proporción y la estabilidad en el espacio de los tipos naturales o clases industriales de mineral útil. Esta proporción se expresa con el coeficiente de calidad K_c , el cual representa el resultado de la división del volumen total, superficie total o potencia total de mena de la clase industrial predominante, por el volumen (superficie, potencia) total del mineral útil. Si el valor de este coeficiente se encuentra entre 0,95 y 1,0 la calidad del mineral útil, según este índice, es estable; si dicho coeficiente varía entre 0,75 y 0,95 la calidad se considera como relativamente estable; si oscila entre 0,50 y 0,75 como inestable y si es inferior a 0,50 como muy inestable. La variabilidad total de la calidad de la materia prima mineral debe ser el resultado de la influencia conjunta, tanto del grado de variaciones como de las modificaciones de la proporción, de las clases industriales del mineral útil.

Para muchos tipos de materia prima mineral que se utilizan en la economía nacional como rocas, o sea, sin extraer de esta unos u otros minerales o elementos (materiales refractarios y para construcción, materia prima cerámica), el contenido promedio de cualquier componente y el grado de su variabilidad no tienen ningún sentido práctico y no pueden influir sobre la argumentación de la metodología racional de estudio y de evaluación del objeto. Para estos tipos de minerales útiles, los mejores resultados se obtienen utilizando conjuntamente el coeficiente de condicionalidad K_k , el cual caracteriza la utilidad industrial del depósito mineral y el coeficiente de calidad.

El coeficiente de condicionalidad se calcula como la relación entre el volumen (superficie, potencia) que ocupa el mineral útil de calidad condicionada y el volumen (superficie, potencia) total del cuerpo. En función de los valores de este coeficiente, los cuerpos minerales se subdividen en cuatro grupos, que son los mismos que en el caso de utilización del coeficiente de calidad. La variabilidad total se evalúa teniendo en cuenta el efecto total de ambos coeficientes. Por ejemplo, para los cuerpos estables, los valores de estos coeficientes deben ser superiores a 0,95; si el coeficiente de condicionalidad es superior a 0,95 y el de calidad es igual a 0,60 la calidad del mineral útil resulta inestable; si el primer coeficiente disminuye hasta 0,85 la calidad llega a ser muy inestable.

Composición y propiedades de las rocas encajantes

En primer lugar, la composición de las rocas encajantes refleja las condiciones geológicas de formación del mineral útil y, como consecuencia, puede servir como base segura para escoger los métodos racionales de estudio del objeto geológico y para su correcta evaluación.

Los yacimientos industriales de magnesita con depósitos minerales grandes y estables se encuentran solamente dentro de formaciones dolomíticas muy potentes. Los mayores yacimientos estratiformes de cobre se relacionan con las formaciones terrígenas jaspeadas; prácticamente todos los yacimientos de espato de Islandia están ubicados dentro de rocas magmáticas básicas de la formación de *trapps*.

En segundo lugar, la composición y las propiedades de las rocas encajantes son muy importantes para proyectar la explotación del yacimiento. Ellas determinan: el carácter de la sección transversal de las excavaciones mineras; el modo

de su entibamiento y sostenimiento; el contenido de polvo en el aire de las excavaciones subterráneas y el peligro de silicosis; la necesidad de dejar pilares de protección en las zonas de rocas inestables, tomar medidas contra los golpes mineros, la hinchazón de las rocas arcillosas, etcétera.

Además, el grado de estabilidad de los cortes geológicos y la existencia de horizontes guías, determinan con mayor grado la autenticidad de la correlación e interpolación de los datos obtenidos en puntos de observación distantes, la exactitud de la identificación de los cuerpos minerales que se encuentran en diferentes laboreos de prospección y la confiabilidad de la interpretación de la estructura geológica del terreno.

Hasta ahora, la clasificación cuantitativa de la manifestación de este importante parámetro no existe. Por consiguiente, la variabilidad de la composición y de las propiedades de las rocas encajantes se caracteriza cualitativamente en forma de descripciones lógicas.

Escala del yacimiento y concentración de reservas

Las dimensiones del yacimiento mineral, constituyen uno de sus rasgos más importantes, por cuanto determinan la producción anual posible de la empresa minera, el costo de producción, las dificultades de estudio del objeto y la exactitud de la evaluación de los resultados obtenidos.

En los grandes yacimientos, los costos, tanto de exploración como de explotación, son inferiores a los de los objetos pequeños del mismo mineral útil, aunque estén formados en condiciones geológicas semejantes. Las dimensiones del yacimiento se reflejan en las reservas del mineral útil, lo cual se entiende como la cantidad de mineral útil en el subsuelo, expresada en unidades de peso y volumen, sin tener en cuenta las pérdidas y la dilución posible durante la explotación.

Para clasificar los yacimientos de minerales útiles, se utiliza el valor relativo de sus reservas que se denomina *escala del yacimiento*. Se conocen cuatro grupos de yacimientos, conforme a la importancia relativa de los objetos para la economía mundial o nacional: únicos, grandes, medios y pequeños.

Yacimientos únicos. Su número, a escala mundial no sobrepasa algunas unidades. No obstante, estos yacimientos tienen una importancia predominante en cuanto a las reservas y con frecuencia en cuanto a la producción del mineral útil correspondiente. Se pueden mencionar como ejemplos los siguientes yacimientos: de manganeso, Nikopol y Tchiaturia (URSS); de hierro, KMA (URSS) y Nimba (Guinea); de níquel, Moa, Nicaro (Cuba) y Sudbury (Canadá); de oro y uranio, Witwatersrand (África del Sur); de bauxita, Tugué y Boké (Guinea) y otros.

Yacimientos grandes. Ocupan un lugar importante en la economía nacional y su número total en el mundo es del orden de unas decenas. Estos yacimientos sirven como base para las empresas mineras principales de las ramas correspondientes de la industria. Tales son los yacimientos Krivoy Rog (URSS) para hierro; Río Tinto (España), para mercurio; Pechenga (URSS) para el níquel; Kindia (Guinea) para la bauxita.

Yacimientos medios. Son importantes para grandes regiones económicas y sobre su base funcionan numerosas empresas mineras que son ordinarias para las ramas correspondientes de la industria. Los yacimientos de este grupo se encuentran con mucha frecuencia.

Tabla 2.2
AGRUPACIÓN DE YACIMIENTOS MINERALES EN FUNCIÓN DE SUS RESERVAS

Mineral útil	Reservas de mineral útil, t			
	Yacimientos únicos	Yacimientos grandes	Yacimientos medios	Yacimientos pequeños
Carbón	$n \cdot 10^{11}$	$n \cdot 10^9$	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^7$
Menas de hierro-apatito	$n \cdot 10^{11} n \cdot 10^9$	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^6$
Menas de manganeso, cobre, bauxita, arcillas refractarias	$n \cdot 10^8$	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^5$
Menas de plomo, cinc, níquel, magnesita, pegmatita cerámica	$n \cdot 10^7$	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^5$	$\bigcirc \cdot 10^4$
Menas de wolframio, estaño, molibdeno, micas	$n \cdot 10^6$	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^3$
Menas de mercurio, antimonio, cadmio, cobalto, uranio	$n \cdot 10^5$	$n \cdot 10^4$	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^2$
Oro	$n \cdot 10^3$	$n \cdot 10^2$	$n \cdot 10$	$n \cdot 10^1$
Materia prima piezoóptica (cuarzo, espato de Islandia, fluorita)	$n \cdot 10$	$n \cdot 1$	$n \cdot 10^{-1}$	$n \cdot 10^{-2}$

Yacimientos pequeños. Tienen importancia solo para la industria local y se explotan generalmente por las empresas mineras pequeñas, a veces semiartesanales. Las empresas más o menos grandes, pueden construirse algunas veces sobre la base de un grupo de tales yacimientos cercanos.

Como regla, los yacimientos de grupos contiguos del mismo mineral útil se diferencian, según sus reservas, aproximadamente en diez veces, pero este concepto es muy relativo y no se puede hablar de la escala del yacimiento sin precisar el tipo de mineral útil. En efecto, un yacimiento único de oro, por ejemplo, no puede compararse desde el punto de vista de las reservas con los yacimientos pequeños de plomo, cobre y tampoco de hierro o manganeso. Esto se muestra en la tabla 2.2.

Hay que recordar que la importancia del yacimiento se determina no solo por sus reservas, sino también por la calidad de la mena, sus condiciones minero-técnicas de explotación y la situación geográfico-económica de la región. Por lo tanto, el papel de algunos yacimientos en la extracción de los tipos correspondientes de minerales útiles, no coincide exactamente con su papel en las reservas totales. Así, la participación de los yacimientos pequeños en la producción de mineral útil, sobrepasa siempre la proporción de dicho mineral en sus reservas totales (5 veces para el oro; 3 veces para el hierro, wolframio y molibdeno y 1,5 veces para el cobre, plomo y cinc). Al mismo tiempo disminuye la parte de yacimientos grandes y algunas veces medios en la producción de uno u otro mineral útil.

La escala del yacimiento no da una completa idea sobre su valor, pues la misma cantidad de reservas puede concentrarse en un cuerpo compacto y potente o distribuirse en una gran superficie en forma de un estrato de poca potencia. Estos casos son diferentes en cuanto a las inversiones económicas necesarias, el costo de producción del producto final y la contaminación del ambiente. Por eso la escala del yacimiento hay que complementarla con la *concentración de las reservas (CR)* dentro del área productiva. Este concepto expresa la cantidad de reservas por unidad de superficie del yacimiento.

$$CR = \frac{R}{S} \quad (9)$$

donde:

R- reservas de mineral útil;
S- superficie del yacimiento.

Además, se puede utilizar la *productividad del yacimiento o del cuerpo mineral (p)* que representa la concentración de reservas por cada metro de profundidad.

$$p = \frac{CR}{H} \quad (10)$$

donde:

H- profundidad de la meniferación dentro del área productiva.

La concentración de las reservas y la productividad del yacimiento son índices de gran importancia que a veces determinan la posibilidad de explotación y el valor relativo de diferentes sectores del yacimiento. Sin embargo, no existe una clasificación especial de los objetos sobre la base de estos índices. No se recomienda tampoco utilizarlos en el concepto de tipo geólogo-industrial de yacimiento, ya que dichos índices son artificiales y reflejan al mismo tiempo las

particularidades de la morfología y estructura interna del cuerpo, y las condiciones de yacencia y riqueza de la mena. Estos parámetros geólogo-industriales y su papel en la clasificación de los yacimientos minerales útiles ya fueron tratados anteriormente y por lo tanto son conocidos.

Condiciones de explotación del yacimiento

Las condiciones de explotación del yacimiento son muy importantes para proyectar la futura empresa minera y, por consiguiente, deben estudiarse de manera confiable durante la exploración. Estas condiciones abarcan, además de las propiedades de las rocas encajantes y la profundidad de yacencia del mineral útil, tratadas anteriormente, las condiciones hidrogeológicas e ingeniero-geológicas del yacimiento y su régimen termal y gasífero.

Para las condiciones hidrogeológicas existe una clasificación independendiente, que debe observarse durante los trabajos de búsqueda y exploración. Según esta, todos los yacimientos se subdividen en cuatro grupos.

Yacimientos sencillos. La afluencia total de agua en la mina o en la cantera es inferior a 200 m³/h. No se necesitan trabajos especiales para desaguar el yacimiento.

Yacimientos medios (u ordinarios). La afluencia total de agua varía desde 200 hasta 500 m³/h. Se toman medidas simples para desaguar el yacimiento y para disminuir la presión de las aguas subterráneas.

Yacimientos complejos. La afluencia de agua varía desde 500 hasta 1 000 m³/h. Se debe desaguar el yacimiento antes de empezar su apertura y disminuir considerablemente la presión de las aguas subterráneas. Además, es necesario tomar medidas permanentes en este sentido durante la explotación.

Yacimientos muy complejos. La afluencia de agua sobrepasa 1 000 m³/h. Las condiciones del yacimiento son complejas.

Las condiciones hidrogeológicas para los dos primeros grupos se esclarecen fácilmente, al mismo tiempo que se estudian otros parámetros geólogo-industriales, con ayuda de las observaciones en los puntos de la red de exploración general. Para los yacimientos del tercero y cuarto grupos, esto se logra solo mediante trabajos especiales y observaciones realizadas fuera del sistema general de estudio del objeto. Como consecuencia, la complejidad de dichas condiciones no se relaciona nunca con las propiedades naturales y la variabilidad de otros parámetros importantes tales como la morfología del cuerpo, la calidad del mineral y sus reservas. Por este motivo, la utilización de estas condiciones para determinar el tipo geólogo-industrial de yacimiento es irracional.

Lo mismo se aplica a las condiciones ingeniero-geológicas de explotación que se relacionan estrechamente con la composición y las propiedades de las rocas encajantes. Estas condiciones, para su investigación, exigen métodos que se diferencian totalmente de los que se utilizan para los demás parámetros geólogo-industriales.

El régimen termal del yacimiento, la abundancia y composición de los gases y otras particularidades de este género, se revelan sin dificultades por medio de los laboreos de prospección que se utilizan para resolver otras tareas de búsqueda

y exploración. Así pues, estas particularidades no pueden influir sobre el sistema general de estudio del objeto y no tienen que tomarse en consideración para clasificar los yacimientos minerales útiles.

Resumiendo, puede decirse que los parámetros más importantes, sobre los cuales debe elaborarse la clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales, son los que siguen:

Morfología y estructura interna del cuerpo mineral.

Calidad del mineral útil.

Condiciones de yacencia de los cuerpos minerales.

Composición y propiedades de las rocas encajantes.

Escala del yacimiento.

Sin embargo, los parámetros enumerados no son equivalentes. El papel principal lo desempeñan los que se relacionan con las condiciones iniciales de formación del yacimiento, por cuanto en ese momento se crea la infraestructura de la morfología del cuerpo, la calidad del mineral útil y se determina la escala del objeto. Los procesos secundarios de transformación del yacimiento solo pueden empeorar estos parámetros y complicar las condiciones de estudio y explotación del yacimiento, pero nunca pueden transformar el objeto, inicialmente complejo, en sencillo. Este razonamiento hay que tenerlo en cuenta al elaborar cualquier esquema de clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales útiles.

2.2.2 Principios generales de la clasificación geólogo-industrial de los yacimientos minerales útiles y sus vías actuales de realización

La naturaleza conoce pocos yacimientos minerales perfectamente semejantes, pues cada objeto geológico tiene sus rasgos característicos y sus propiedades. No obstante, algunos yacimientos del mismo mineral útil, y a veces de diferentes minerales útiles, pueden ser hasta cierto punto análogos. Para crear la clasificación de los objetos geológicos, en primer lugar, hay que revelar sus rasgos típicos que determinan el tipo geólogo-industrial de yacimiento. Con este objetivo se pueden utilizar las particularidades de los objetos relacionados tanto con sus condiciones geológicas de formación como con su sistema de explotación. Estas particularidades se aplican por separado o en conjunto y conforme a esto se conocen los tipos genéticos, industriales y geólogo-industriales de yacimientos. Los últimos, según el criterio de V.M. Kreiter (1940), son los que aseguran más de 1% de la producción mundial total del mineral útil correspondiente.

Las clasificaciones genética e industrial de los yacimientos no garantizan la correcta selección de la metodología de búsqueda, exploración y evaluación de los minerales útiles, ya que en un mismo tipo genético del mismo mineral útil, se encuentran yacimientos desde únicos, hasta pequeños y no industriales (KMA, Krivoi Rog, Olenagorsk, Gingsansk, en el tipo de yacimientos metamorfogénicos de hierro; Kuzbas, Suchan, yacimientos de Georgia, en el tipo de yacimientos geosinclinales de carbón, etc.), y desde ricos hasta pobres desde el punto de vista de la calidad del mineral útil. Dentro del mismo tipo industrial, que se determina so-

bre la base de la semejanza de los sistemas y métodos de apertura y explotación del mineral útil, se pueden reunir yacimientos de diferentes tipos genéticos.

La única vía para resolver este problema consiste en agrupar los yacimientos, sobre la base de la analogía de las condiciones geológicas de formación de una parte y de las propiedades de la metodología de búsqueda, exploración, evaluación y utilización industrial de los yacimientos de otra. Al hacerlo, se aplica la idea de las relaciones correlativas entre los tipos genéticos e industriales de yacimientos, la cual se manifiesta en que a cada tipo genético corresponden, con frecuencia, tipos industriales determinados de yacimientos, mientras que otros tipos no se encuentran o son muy raros. Por ejemplo, los yacimientos sedimentarios que se forman dentro de las plataformas, como regla, son grandes o únicos y se caracterizan por la estabilidad de la morfología, la calidad y las condiciones de yacencia de los cuerpos minerales. Por otra parte, los yacimientos de greissen, en la mayoría, son de forma compleja y con meniferación irregular o muy irregular.

En la actualidad se admiten todos los principios generales para la distinción de los tipos geólogo-industriales de yacimientos minerales, que son los siguientes:

Tipo genético o formacional de yacimiento.

Morfología de los cuerpos minerales.

Estructura del yacimiento.

Composición mineralógica del mineral útil y riqueza de la mena.

Composición y propiedades de las rocas encajantes.

Estos principios fueron propuestos por V.I. Smirnov, en el año 1957. Desafortunadamente, no abarcan todo el conjunto de parámetros geólogo-industriales más importantes, y excluyen la escala del yacimiento y la variabilidad de los parámetros. Esto es lo que, hasta ahora, no permite crear clasificaciones geólogo-industriales confiables, teóricamente argumentadas y cómodas para aplicarlas en la práctica de la búsqueda y exploración.

Lo expuesto anteriormente, no significa de ninguna manera que dichas clasificaciones no existan, aunque la solución final de este problema todavía no está lograda. Sin embargo, en la URSS existen tres vías diferentes, que suministran resultados particulares admisibles, y que se analizan a continuación.

Elaboración y perfeccionamiento de las clasificaciones de los yacimientos minerales útiles, sobre la base de los índices genéticos y formacionales

Estas clasificaciones se utilizan en las instrucciones de la comisión estatal para las reservas de minerales útiles, que se publican para diferentes tipos de materia prima mineral (instrucciones de CER). Dichas clasificaciones se aplican también en diferentes guías para la evaluación de los yacimientos de diferentes minerales útiles durante la búsqueda y exploración y en manuales y libros de consulta. Son muy importantes para resolver las tareas principales de la búsqueda, pero su eficiencia resulta pequeña durante la exploración, por cuanto ellas no pueden dar una característica cuantitativa de los parámetros geólogo-industriales, así como de su variabilidad.

Clasificaciones geólogo-industriales para diferentes tipos de minerales útiles que se dan en las instrucciones de CER

Se utilizan con gran éxito para escoger la metodología general de la búsqueda y exploración del objeto y para evaluar su grado de preparación para la puesta en explotación. No obstante, estas clasificaciones no aseguran la evaluación geólogo-económica exacta del yacimiento. Además, son demasiado esquemáticas y generalmente no ofrecen criterios cuantitativos precisos para determinar con confianza el tipo geólogo-industrial del objeto que se va a estudiar.

En estas clasificaciones existen dos grupos de yacimientos según su variabilidad:

Yacimientos regulares, desde el punto de vista de su estructura, potencia y calidad del mineral útil.

Yacimientos irregulares, desde el punto de vista de su estructura, potencia y calidad del mineral útil, o tectónicamente perturbados.

Cada grupo se subdivide en dos subgrupos: yacimientos grandes y yacimientos medios. Además, esta clasificación propone la subdivisión independiente de los yacimientos minerales útiles o sus sectores, según la complejidad, en tres grupos que son los siguientes:

Yacimientos y sectores de estructura simple con potencia regular de los cuerpos minerales y repartición regular de los componentes útiles.

Yacimientos y sectores de estructura compleja con potencia inestable de los cuerpos minerales y repartición regular de los componentes útiles.

Yacimientos y sectores de estructura muy compleja con potencia muy variable de los cuerpos minerales o el contenido de componentes útiles extremadamente irregular.

Estos dos agrupamientos de yacimientos del mismo mineral útil no se relacionan en las instrucciones de la CER y no se comparan con su clasificación genética. La subdivisión de los yacimientos según la regularidad de su estructura, potencia y calidad del mineral útil carece de detalles; dos grupos de yacimientos según su escala son insuficientes y no se hace concreto el concepto del yacimiento tectónicamente perturbado.

Para determinar el tipo del yacimiento que se va a explorar, este debe compararse con yacimientos modelo de uno u otro tipo que se dan como ejemplos en dicha clasificación. Esto necesita un conocimiento completo y profundo de tales modelos, cuestión que el geólogo que realiza la exploración de algún objeto nuevo a veces no puede lograr. Hay que añadir que la comparación del objeto que se va a estudiar con un modelo, tiene siempre un carácter cualitativo y subjetivo.

Estos defectos de la clasificación geólogo-industrial de la CER muestran claramente su imperfección, pero no significan que esta es inaplicable. Por el contrario, durante muchos años se ha utilizado con gran resultado para resolver tareas importantes, tales como la argumentación de la densidad de la red de exploración, la metodología del muestreo del mineral útil, la delimitación de los cuerpos minerales y la determinación del grado de conocimiento alcanzado en el estudio.

Clasificaciones geólogo-industriales para diferentes tipos de minerales útiles elaborados por los institutos o sectores científicos

Estas clasificaciones se crean a diferentes niveles, desde un laboratorio científico hasta el instituto ramal de investigaciones científicas. Ellas desarrollan, complementan y concretan las clasificaciones de la CER, lo que trae como resultado que dichas clasificaciones corresponden perfectamente al nivel existente de los conocimientos sobre la teoría de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales; son bastante detalladas, exactas y cómodas para aplicarlas prácticamente. Se pueden encontrar en las instrucciones y guías metodológicas ramales, guías e instrucciones del Ministerio de Geología de la URSS e informes sobre investigaciones científicas.

Como regla, estas clasificaciones son estrechas y se especializan para garantizar la solución correcta y exacta de algunas tareas en los trabajos de búsqueda y exploración. Para muchos tipos de materia prima mineral, estas clasificaciones son aún incipientes.

En la literatura científica sobre la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles, más de una vez se ha manifestado la idea de que la creación de una clasificación geólogo-industrial única debe remplazar las clasificaciones particulares elaboradas para diferentes tipos de minerales útiles. En estos últimos años, algunos autores sostienen que la solución definitiva de este problema se obtendría por medio de la clasificación de los yacimientos según el principio de sus relaciones con diferentes formaciones geológicas, y en realidad la idea es correcta.

Sin embargo, esta idea, todavía no se ha llevado a la práctica y la aplicación de las formaciones geológicas en las clasificaciones geólogo-industriales (por ejemplo, la de A.B. Kazhdán, 1977) tiene poca ventaja sobre las clasificaciones genéticas tradicionales y al mismo tiempo mantiene todos sus defectos. Al parecer, es irracional reunir en una clasificación diferentes tipos de materia prima mineral, porque en este caso, muchas de las características más importantes del yacimiento (escala, riqueza de la mecha, morfología de los cuerpos minerales, composición de las rocas encajantes) inevitablemente llegarán a ser incomparables. Claro, que el resultado será una clasificación muy esquemática o, en términos más precisos, muy complicada e incómoda para su utilización práctica.

Aparentemente, la mejor vía para obtener el resultado deseado, es concretar, perfeccionar y establecer la correlación mutua de las clasificaciones geólogo-industriales particulares para cada tipo de mineral útil, cuyo conjunto podría garantizar la solución racional y científicamente argumentada de todas las tareas de búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles.

2.3 Fundamentos geológicos de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales útiles

La localización de los minerales útiles en la corteza terrestre, la morfología y posición espacial de los cuerpos minerales y la variabilidad de los parámetros

geólogo-industriales de los yacimientos, reflejan las particularidades de diferentes procesos geológicos de formación de los yacimientos minerales útiles y su transformación posterior. Estos procesos se estudian por otras ciencias geológicas. Sin embargo, las regularidades principales establecidas en el dominio de dichas ciencias, se utilizan como base teórica de la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales.

2.3.1 Regularidades de la formación y localización de los yacimientos minerales útiles en la corteza terrestre

El conocimiento de las regularidades mencionadas anteriormente y la utilización correcta de las leyes de comportamiento de los elementos químicos y sus combinaciones, en diferentes condiciones físico-químicas, pueden garantizar el éxito en cuanto a la búsqueda, tanto de los campos meníferos como de los cuerpos minerales independientes. (Por lo tanto, estas regularidades se llaman más frecuentemente *criterios geológicos de búsqueda*. Este término, que se generaliza paulatinamente, corresponde perfectamente a las regularidades geológicas de formación y localización de las acumulaciones naturales de minerales útiles, así como también a los objetivos que se logran con ayuda de estas regularidades. No obstante, lo expuesto no significa que los criterios de búsqueda no pueden aplicarse para explorar y evaluar los yacimientos minerales ya conocidos, porque para cada estadio de estudio del objeto geológico, se hacen los pronósticos principalmente sobre la base de dichas regularidades.

Todos los criterios de búsqueda se pueden agrupar de la siguiente manera:

Criterios estratigráficos. ✕

Criterios litólogo-faciales.

Criterios magmáticos.

Criterios estructuro-tectónicos. ✕

Criterios geoquímicos. ✕

Criterios metamórficos. ✕

Criterios geomorfológicos. ✕

Es evidente que durante la búsqueda, exploración y evaluación de los yacimientos minerales, hay que tener en cuenta la influencia conjunta de todos los grupos de criterios. Pero la importancia de unos u otros criterios de búsqueda para diferentes tipos de minerales útiles es totalmente distinta y, además, no es obligatorio que en cada caso concreto se manifiesten todos los criterios al mismo tiempo. Entonces resulta racional revisar estos grupos de criterios por separado para su mejor estudio.

Criterios estratigráficos

Los yacimientos de minerales útiles surgieron en determinadas etapas de la historia geológica de la Tierra. Es decir, los diferentes tipos de minerales útiles se formaron, en su mayoría, en momentos favorables de dicha historia, y en otros períodos prácticamente no ocurrió esa formación. Como ejemplo de esto puede ci-

tarse el hecho de que las menas metamorfológicas de hierro y los yacimientos de magnesita cristalina, se encuentran solo en las formaciones geológicas precámbricas. Como consecuencia, los yacimientos minerales, geológicamente, se sitúan dentro de las rocas de una edad determinada o se relacionan con estas en el espacio. El conocimiento de determinadas regularidades, permite pronosticar de manera argumentada las posibilidades de la búsqueda de unos u otros minerales útiles, a partir de la existencia o la ausencia de rocas de la edad correspondiente en la región de estudio.

➤ Se deduce fácilmente que los criterios estratigráficos son los más importantes para la búsqueda de yacimientos de origen exógeno, por cuanto estos minerales útiles representan variedades de rocas de una edad determinada, que ocupan una posición concreta en el corte estratigráfico. Esto también se aplica a los yacimientos de minerales útiles metamorfolizados. En estos casos, los criterios estratigráficos pueden subdividirse, según el carácter de su manifestación, en universales, regionales y locales.

Los criterios estratigráficos universales se manifiestan en todo el globo terráqueo y corresponden a las épocas de mineralización más importantes en la historia de la Tierra. Como estas épocas duraban mucho tiempo, el intervalo estratigráfico de dichos criterios se determina sin gran precisión, por lo general, un sistema (período). Por consiguiente, las áreas favorables que se delimitan con ayuda de estos criterios son muy amplias y sirven para planificar la búsqueda general. Como ejemplos, además de las relaciones de las menas metamorfológicas de hierro y de magnesita con las rocas precámbricas, se pueden mencionar los conglomerados auríferos y uraníferos y los yacimientos de cianita, que se encuentran también dentro de las formaciones de esta edad; cuencas importantes de sales minerales que se conocen en los sedimentos del Cámbrico, Devónico y Pérmico; carbones que no existen en rocas más antiguas que las del Carbonífero, etcétera.

➤ Los criterios estratigráficos regionales son válidos dentro de las grandes regiones de la corteza terrestre. Ellos corresponden a los períodos y etapas de mineralización de importancia secundaria, que se manifiestan dentro de áreas bastante limitadas. El intervalo estratigráfico de estos criterios es más estrecho (una serie o un piso). Por lo tanto, los criterios regionales resultan exactos y concretos, y sirven como base para planificar y ejecutar la búsqueda, tanto general como detallada. En este caso, los ejemplos son numerosos: la yacencia de los depósitos de menas de manganeso solo en las rocas del Oligoceno, en los yacimientos de Nikopol y Tchiaturia; las arcillas refractarias del Donbás en el piso Poltaviano del Paleógeno; los carbones de la cuenca de Petchora, en la serie Vortchanskaya del Pérmico inferior; las bauxitas del Kazajastán del norte en el piso Cenomaniense del Cretácico superior y muchos otros.

➤ Los criterios estratigráficos locales son más frecuentes. Estos reflejan los procesos de mineralización de corta duración que se manifiestan dentro de pequeñas áreas y por esta razón tienen un papel predominante durante la búsqueda detallada y los trabajos de búsqueda evaluativa. Estos criterios también se aplican con gran resultado para resolver algunas tareas de exploración de los yacimientos minerales. La precisión de los límites estratigráficos en dichos criterios, varía desde el piso hasta el horizonte o estrato (capa). Como regla general, cada región mineraliza muestra sus criterios estratigráficos locales que no pueden aplicarse en otras regiones. Por eso, se considera irracional señalar ejemplos particulares.

Para buscar algunos tipos de minerales útiles sedimentarios es preciso prestar una gran atención a las series transgresivas de rocas que se forman después de las

interrupciones prolongadas en la sedimentación. En las partes inferiores de esas series, se encuentran con frecuencia importantes yacimientos de bauxita (Ural del norte, Kazajastán del norte, región de Leningrado, Karelia, etc.); manganeso (Ural del norte, Tchiaturia, Nikopol); fosforita (centro de la parte europea de la URSS); hierro (Kerch); placeres enterrados de rutilo-ilmenita-circón (Kazajastán del norte, Ucrania, Siberia Oeste) o de oro (noreste de la URSS).

➤ La determinación de la existencia de interrupciones en la sedimentación y de la edad geológica de las series sedimentarias transgresivas, puede servir como criterio estratigráfico regional de gran importancia. ✕

Dichas interrupciones regionales también desempeñan un papel fundamental durante la búsqueda de yacimientos de la corteza de intemperismo. Si se conoce el intervalo estratigráfico de formación de la corteza de intemperismo en una u otra región pueden delimitarse, mediante el mapa geológico, las áreas de su posible presencia que son las más favorables para la búsqueda de: bauxita (Kazajastán del norte, KMA., región de Krasnoyarsk); caolín primario (Ucrania, Ural del Sur); arcillas refractarias (Ucrania, Ural, Kazajastán del norte); menas residuales de hierro y níquel (Ural del sur, Guinea, Moa-Baracoa en Cuba).

➤ Para los yacimientos magmatogénicos y en parte los metamórficos, los criterios estratigráficos se manifiestan por la yacencia de los minerales útiles dentro de las rocas encajantes de una edad geológica determinada, aunque esta edad no coincida con la del mineral útil. Además, los yacimientos minerales de este origen pueden relacionarse con intrusiones de esa misma edad.

Como se mostrará posteriormente, las diferentes rocas se comportan de distinta manera durante los procesos de mineralización. Algunas rocas encierran con más frecuencia minerales útiles y otras representan barreras impenetrables, cerca de las cuales puede acumularse el material menífero. En ambos casos, el conocimiento de la edad geológica de tales rocas permite seleccionar sus áreas de existencia dentro de la región que se va a estudiar, disminuir el volumen de los trabajos de búsqueda y hacerlos más eficientes. Como ejemplo se puede señalar que todos los yacimientos polimetálicos del Altai se encuentran en las rocas del Devónico medio, los yacimientos magnetíticos del Kazajastán del norte en los sedimentos del Carbonífero inferior; las pegmatitas con moscovita de Karelia del norte en las rocas de la serie Chupinskaya del Arqueozoico, etcétera.

Los macizos de rocas intrusivas del mismo tipo, pero de edad geológica diferente, muestran con frecuencia propiedades geoquímicas distintas y diferente especialización metalogénica, lo que implica la diferencia de los complejos de yacimientos minerales útiles relacionados con ellos. Las regularidades de este género fueron establecidas para muchas regiones del Kazajastán, Yakutia, noreste de la URSS, Extremo Oriente. Por ejemplo, en la región de Baley, en Siberia oriental, los yacimientos de molibdeno y oro-wolframio, se relacionan con granitos de Jurásico inferior; los yacimientos de oro-antimonio y antimonio-mercurio con las rocas del Cretácico inferior, mientras que las intrusiones graníticas del Paleozoico y del Jurásico superior, casi no se encuentran acompañadas por la mineralización industrial.

➤ Desde el punto de vista del carácter de su manifestación, los criterios estratigráficos, en el caso de yacimientos endógenos, generalmente son regionales y solo algunas veces locales. ✕

Como conclusión debe señalarse que los criterios estratigráficos favorables de cualquier nivel, tanto universales como regionales y locales, no significan todavía que el mineral útil correspondiente tiene que encontrarse dentro del área de es-

tudio, ya que las relaciones de los minerales útiles con las rocas de edad geológica determinada son tendencias que no se someten a leyes estrictas. Por eso, no es obligatorio que las rocas del Pérmico encierren siempre sales minerales fósiles o las del Carbonífero carbones. La existencia de rocas de una edad determinada representa un factor favorable y permite esperar el hallazgo del mineral útil correspondiente, mientras que la ausencia de dichas rocas permite suponer con confiabilidad que no existe el mineral útil.

Criterios litólogo-faciales

Como se deduce de su nombre, relacionan mutuamente la composición y las condiciones de formación de las rocas encajantes, de una parte, y las acumulaciones de minerales útiles que estas pueden contener, de otra. Claro que estos criterios son de gran importancia para los minerales útiles sedimentarios, ya que estos no son más que *facies* específicas dentro de las formaciones sedimentarias. Sin embargo, la composición y las propiedades de las rocas encajantes representan un criterio muy importante también en el caso de yacimientos endógenos, puesto que determinan en gran parte la localización espacial de los cuerpos minerales, la morfología y las condiciones de yacencia de estos últimos.

La subdivisión litológica de los complejos de rocas sedimentarias y la determinación del tipo facial de cada variedad litológica, permiten reconstruir la situación paleogeográfica durante la sedimentación antigua, determinar la posición del litoral de los depósitos de agua importantes (mares, lagunas, lagos, etc.) y su grado de salinidad; formarse una idea general sobre el relieve del fondo y de la tierra firme adyacente, establecer la dirección del desplazamiento del material detrítico desde el continente y la de las corrientes marinas, el clima de la época de sedimentación, etcétera.

Si se conoce lo anterior y se tienen en cuenta las reglas generales de la sedimentación, es posible determinar los tipos de minerales útiles que pueden aparecer en estas condiciones, así como las áreas favorables para su búsqueda.

Para formular las leyes generales de formación de los minerales útiles sedimentarios, es posible utilizar los resultados de las investigaciones especiales del académico soviético N.M. Strajov [41], desarrolladas posteriormente por sus discípulos. Dichas leyes se manifiestan de diferente manera en condiciones climáticas distintas.

Clima tropical húmedo. En este caso, en el continente, dentro de las zonas de relieve accidentado, predomina la erosión y el desplazamiento del material detrítico; algunas veces pueden formarse los yacimientos en placeres. Las zonas de peniplanicie, son favorables para la formación de la corteza de intemperismo y yacimientos de bauxita, hierro y níquel relacionados con esta. En la zona del litoral, tanto del continente como del mar, así como en las lagunas, se forman con frecuencia yacimientos de carbón o de esquistos combustibles; en la zona litoral del mar se puede observar la formación de yacimientos de arena y, en algunos casos, de placeres. Dentro de la plataforma continental son posibles las calizas organógenas, fosforitas y en ocasiones menas de hierro o manganeso, las cuales se encuentran más lejos del litoral. En alta mar se acumulan las arcillas (margas) silíceas, jaspes y esquistos combustibles.

Clima caluroso seco (árido). Las zonas de relieve accidentado no poseen prácticamente yacimientos minerales útiles. En la zona litoral del mar pueden formarse

yacimientos de arena y algunas veces placeres. En cuanto a las lagunas, en ellas se acumulan el yeso, la dolomita y sales minerales. La plataforma continental puede ser el lugar de formación de las calizas organógenas, dolomitas, arcillas silíceas y esquistos combustibles, y en alta mar se forman también las arcillas silíceas y esquistos combustibles, así como las calizas y jaspes.

Las regularidades expuestas en el párrafo anterior tienen un carácter universal, o sea, son válidas para cualquier región del globo terráqueo y cualquier edad geológica del período de sedimentación. No obstante, el complejo total de minerales útiles mencionado no se observa prácticamente en una región concreta. Aún más, como regla, el proceso de sedimentación se desarrolla de manera selectiva y como consecuencia los minerales útiles que se forman en condiciones faciales semejantes, pueden separarse en el espacio. Por ejemplo, los yacimientos grandes de bauxita y de manganeso no se encuentran en conjunto. También hay que añadir que la existencia de facies favorables no quiere decir que el mineral útil correspondiente se ha formado. Por este motivo, los criterios litólogo-faciales universales tienen que concretarse de acuerdo con las particularidades de la constitución geológica de la región, lo que permite establecer criterios regionales más exactos y confiables.

Para resolver este problema se aplican investigaciones especiales litológicas y faciales que tienen como resultado el complejo de mapas, esquemas y perfiles litólogo-faciales. Dichas investigaciones son obligatorias durante el levantamiento geológico complejo en las cuencas carboníferas y de sales minerales, regiones favorables para la bauxita y la fosforita y menas sedimentarias de hierro y manganeso.

La influencia de la composición litológica y las propiedades de las rocas encajantes sobre la mineralización endógena, es bien conocida. Desde este punto de vista, todas las rocas pueden subdividirse de manera más o menos convencional en favorables, inertes e impenetrables. En las primeras, se encuentran con más frecuencia las acumulaciones de minerales útiles. Las rocas inertes son desfavorables para la mineralización y en la mayoría de los casos no contienen concentraciones industriales de minerales útiles. Las rocas impenetrables representan las pantallas que obstaculizan la circulación de las soluciones mineralizadas y provocan la deposición de la materia menífera cerca de las barreras. Estas propiedades tan diferentes de las rocas dependen de su composición mineral, estructura, textura, porosidad, fragilidad, plasticidad y competencia.

En cuanto a la composición mineral, las rocas carbonatadas son más favorables para la meníferación, pues ellas entran fácilmente en reacciones químicas, sobre todo con las soluciones mineralizadas ácidas. Esto se aplica igualmente a las rocas clásticas (conglomerados, brechas, areniscas) con cemento carbonatado. Los *skarn* también son muy favorables para la meníferación. En las rocas intrusivas básicas y sus tobas, los procesos de reacción química se desarrollan de manera menos intensa. Por otra parte, las rocas magmáticas ácidas y ultrabásicas, así como las metamórficas y sedimentarias de composición silicatada, generalmente son inertes.

X La composición de las rocas encajantes y subyacentes influye mucho sobre la de las soluciones mineralizadas que las atraviesan y, por consiguiente, determina la posibilidad de formación de unos u otros minerales útiles y su localización espacial. Así, las pegmatitas que yacen dentro de las rocas metamórficas pobres en potasio (los plagiogneiss) encierran con mucha frecuencia concentraciones industriales de moscovita, mientras que los filones pegmatíticos dentro de las rocas ri-

cas en potasio o hierro y magnesio (gneiss con microclina, anfibolitas) nunca contienen moscovita que corresponda a las exigencias industriales. El caso análogo es la localización de los cuerpos minerales dentro de los horizontes de rocas carbonatadas o bituminosas, las cuales provocan el cambio del potencial de oxidación o de reducción de las soluciones mineralizadas.

El papel de la porosidad y la fisuración (agrietamiento) de las rocas es muy importante durante el proceso de meniferación. Estas cavidades sirven no solo como vía de circulación de las soluciones mineralizadas, sino también como espacios donde los minerales útiles pueden formarse por medio de su cristalización en las cavidades abiertas.

La porosidad efectiva es la más importante, ya que la total no caracteriza el comportamiento de las rocas durante el proceso de mineralización endógena. Por eso, las arcillas y los esquistos arcillosos, cuya porosidad es de tipo aislado, se comportan como rocas impenetrables y las areniscas con cavidades abiertas encierran a menudo minerales útiles endógenos, aunque su porosidad total sea inferior a la de las arcillas. Incluso se ha comprobado más de una vez que las rocas favorables se pueden tornar inertes y no contener cuerpos minerales si están desprovistas de poros y fisuras abiertas. Como ejemplo es posible citar el caso de las calizas. Ellas muestran una débil plasticidad y fluencia bajo altas presiones y como consecuencia los poros y fisuras desaparecen. Por esta razón, las calizas de la región de Salair en la URSS, se comportan como inertes y allí todas las menas polimetálicas se acumulan en las formaciones silicatadas porosas.

La fragilidad de las rocas provoca la creación de sistemas de fisuras secundarios, al ser sometidas a diferentes dislocaciones tectónicas y este fenómeno resulta favorable para la meniferación posterior. Las rocas competentes y compactas, así como las plásticas, por el contrario, permanecen sólidas y poco penetrables durante el plegamiento.

El caso más favorable para formar los cuerpos minerales es la deformación plicativa de las rocas frágiles y competentes o plásticas en capas intercaladas. El resultado es la creación de las zonas de agrietamiento junto a los horizontes pantalla y las cavidades de exfoliación en los pliegues discordantes (fig. 2.5).

Las texturas heterogéneas de las rocas (manchadas, brechiformes, bandeadas y otras) generalmente son más favorables para la meniferación metasomática que las macizas y homogéneas, aunque se mantienen equivalentes el resto de las condiciones.

Como conclusión debe destacarse que los criterios litólogo-faciales, en el caso de los yacimientos endógenos, son de carácter regional y local. Ellos no pueden alcanzar importancia universal, pues en diferentes regiones, los mismos tipos de rocas se comportan de manera totalmente distinta durante la meniferación, en dependencia de las condiciones geológicas concretas.

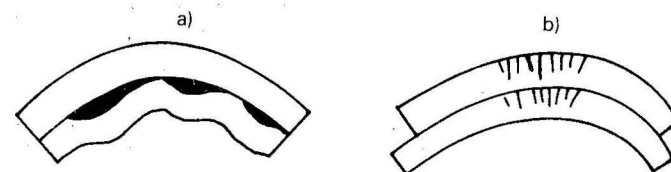


Fig. 2.5 Esquema de la formación de cavidades y zonas de agrietamiento en la charnela del pliegue anticlinal durante el plegamiento: a) sin desviación relativa de capas; b) con deslizamiento

Criterios magmáticos

Estos criterios se basan en las relaciones que existen entre las manifestaciones de la actividad magmática y la localización de las acumulaciones de minerales útiles. Ellos son más importantes para la búsqueda de yacimientos minerales de origen magmatogénico, aunque también se pueden aplicar durante el estudio de minerales útiles residuales y, en parte, durante la búsqueda de los placeres.

En el caso de minerales útiles magmatogénicos, dichas relaciones pueden manifestarse de diversas formas, con más o menos claridad, y expresarse en que los yacimientos minerales son los derivados de las rocas magmáticas correspondientes, o también en la yacencia de los minerales útiles directamente dentro de los macizos de dichas rocas. D.I. Gorgevskiy y V.N. Kozerenko [44] han propuesto llamar a las relaciones de primer tipo *genéticas lejanas* y a las de segundo tipo *genéticas próximas*. Además, en el caso en que las relaciones entre las rocas magmáticas y los minerales útiles se establecen difícilmente, ellos han sugerido las *relaciones paragenéticas*. Si estas últimas se manifiestan muy débilmente y solo se suponen, sin comprobarlo, estos autores las llaman *telegenéticas*. Ellos sostienen también que las relaciones genéticas, tanto próximas como lejanas, existen entre los minerales útiles y los macizos concretos de rocas magmáticas, mientras que las paragenéticas se manifiestan por la existencia de fuentes magmáticas profundas comunes, aunque la formación de las rocas intrusivas y de los minerales útiles, como regla general, se separan en el tiempo.

Conforme a esta clasificación, las relaciones de los yacimientos minerales útiles con las rocas volcánicas, subvolcánicas y vulcanógeno-sedimentarias, son telegenéticas y más raramente paragenéticas. Al mismo tiempo, se conocen bien las relaciones espaciales bastante estrechas entre los aparatos volcánicos, tanto jóvenes como antiguos, y diferentes tipos de minerales útiles endógenos (oro, plata, estaño, hierro, cobre, menas polimetálicas, carbonatitas), cuyos ejemplos demostrativos se dan en las figuras 2.6 y 2.7. Hay que añadir que para los yacimientos exhalativos, algunas veces se revelan las relaciones genéticas próximas. De manera semejante, todos los yacimientos más importantes de espato de Islandia se encuentran dentro de las rocas básicas de la formación de *trapps* y sus relaciones genéticas próximas no tienen duda alguna. Como regla, el espato de Islandia rellena las cavidades en lavas globosas y subglobosas dentro de los mantos basálticos, en los cuerpos abovedados de dolerita, o se relaciona con las fallas que atraviesan las rocas tobáceas.

Las rocas hipoabisales y abisales (ultrabásicas, básicas y alcalinas), se caracterizan por sus relaciones genéticas próximas con los yacimientos minerales correspondientes. Además, las dimensiones del yacimiento, como regla, dependen directamente de las del macizo intrusivo, aunque las excepciones son posibles. Los macizos de rocas ultrabásicas, tanto frescos como alterados, pueden encerrar cuerpos de cromita, titanomagnetita, acumulaciones industriales de platino y platinoideas. Para organizar la búsqueda de manera correcta y eficaz, hay que tener en cuenta las variedades petrográficas de estas rocas. Así, los yacimientos de cromo y de platino se relacionan generalmente con las dunitas, mientras que los de titanomagnetita se relacionan a su vez con las piroxenitas. En las zonas de contacto tectónico de la dunita o peridotita con las intrusiones ácidas más jóvenes, se encuentran con frecuencia los yacimientos de asbesto crisotílico y a veces los de asbesto antofilitico o tremolítico. Con las kimberlitas de los tubos de explosión, se relacionan todos los yacimientos primarios de diamante.

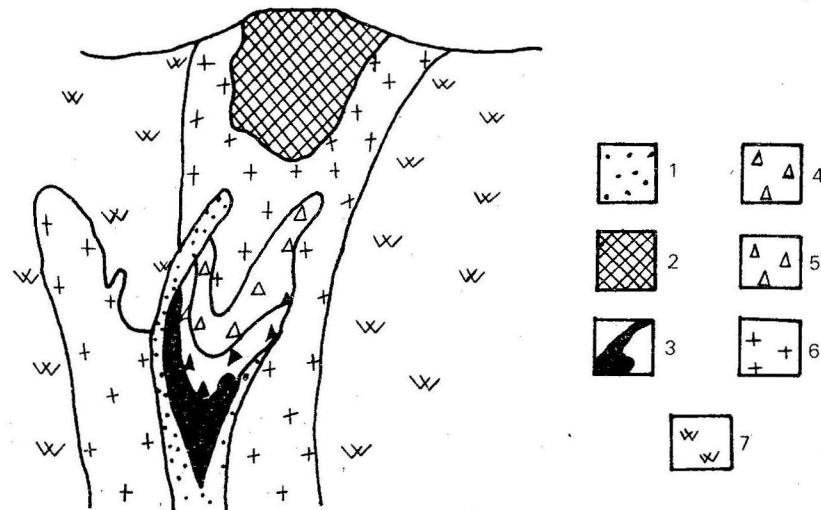


Fig. 2.6 Estructura de cráter cónico en el yacimiento Cananea, Colorado, EE.UU. (Según Emmons y Bilingsley): 1- pórfido cuarcífero alterado; 2- mena diseminada; 3- mena masiva; 4- brecha; 5- brecha menífera; 6- pórfido; 7- toba

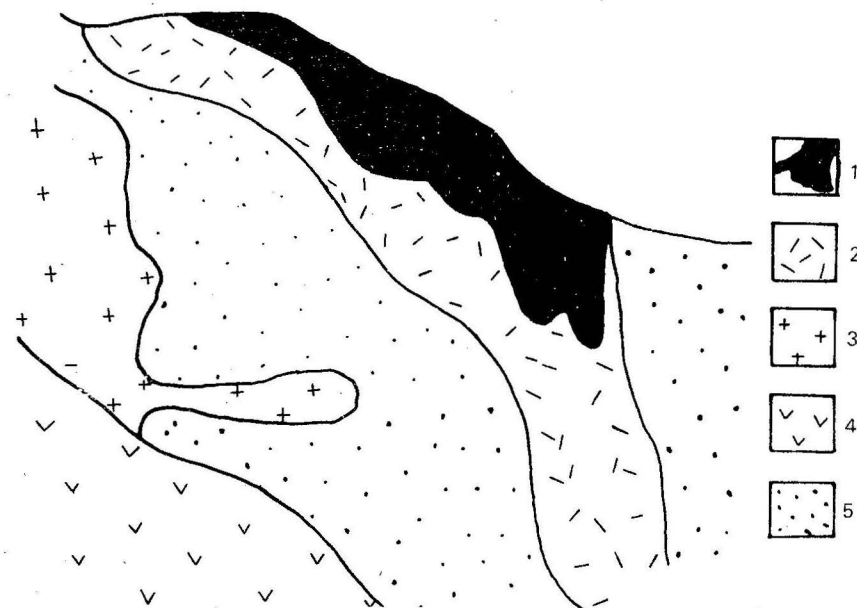


Fig. 2.7 Estructura de cráter tubular en el yacimiento de estaño Khingansk (según G.V. Icicsón): 1- cuerpo mineral; 2- brecha de explosión; 3- granito porfídico; 4- pórfido cuarcífero; 5- rocas alteradas sericito-clorito-cuarcíferas

Las intrusiones bien diferenciadas de composición básica, o intermedia entre básica y ultrabásica (gabro, gabronorita) son muy favorables para buscar los yacimientos de menas sulfurosas de cobre y níquel con platino, paladio y a veces cobalto (Sudbury en Canadá, Norilsk y Pechenga en la URSS, Insizwa en África del Sur). En general, las menas diseminadas de dichos yacimientos se acumulan en las partes inferiores del macizo magmático, cerca de su fondo y, sobre todo, en las cavidades de este último. Sin embargo, ellos pueden formar también cuerpos "colgantes" dentro del macizo. En las zonas de contacto abrupto del macizo intrusivo con las rocas encajantes, así como en las fisuras casi abruptas que atraviesan las rocas intrusivas, se pueden encontrar cuerpos de menas sulfurosas masivas (fig. 2.8).

Dentro de las intrusiones de rocas básicas (gabro, anortosita), es posible revelar los yacimientos de menas titano-magnéticas, tanto diseminadas como masivas.

Con las rocas alcalinas pueden relacionarse yacimientos importantes de menas apatito-nefelínicas (Jibini en la URSS) de metales raros, como: circonio, niobio, tantalio, torio, los grupos del cerio e itrio (península de Kola, Ucrania, Ural).

La formación de las rocas magmáticas ultrabásicas alcalinas y carbonatitas, controla la localización de muchos minerales útiles que con frecuencia forman yacimientos complejos. Tales son los yacimientos de apatito y magnetita a los cuales se añaden a veces flogopita, vermiculita y metales raros (Karelia del norte, región de Krasnoyarsk, Finlandia, África del Sur).

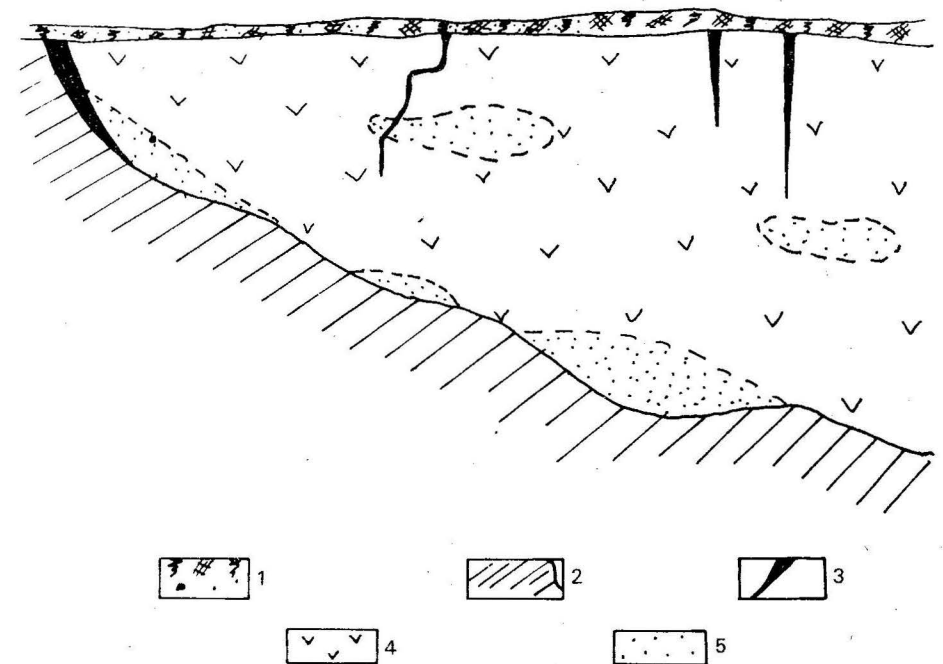


Fig. 2.8 Cuerpos de menas cupro-niquelíferas sulfurosas dentro de rocas básicas: 1- depósitos friables; 2- rocas encajantes; 3- menas masivas; 4- gabro-norita; 5- menas diseminadas

Las relaciones de los yacimientos minerales útiles con las rocas magmáticas medias y ácidas en su mayoría son paragenéticas y, más raramente, genéticas lejanas o telegenéticas. Las dificultades considerables para revelar tales relaciones, se determinan por la constitución complicada de los cuerpos magmáticos que representan a menudo complejos de diferentes rocas de edad geológica variable, procesos ampliamente desarrollados de asimilación de rocas encajantes por el magma, y modificación permanente de la composición de las soluciones mineralizadas a causa de su reacción con las rocas encajantes y subyacentes.

En general, las intrusiones ácidas moderadas (granodiorita, granosienita, diorita cuarzosa) pueden asociarse con los yacimientos de *skarn* de hierro, cobre, plomo, cinc, wolframio, molibdeno y oro, así como con yacimientos hidrotermales de cobre, menas polimetálicas, estaño, oro, plata, cobalto y otros. Para las rocas más ácidas (granitos), son característicos los yacimientos greisseníticos de berilio, estaño, bismuto, tántalo, niobio y wolframio; los *skarn* de wolframio, estaño, molibdeno, berilio y boro, así como los yacimientos hidrotermales de estaño, wolframio, molibdeno, oro, cobre y menas polimetálicas.

Si las relaciones son telegenéticas, como se supone para muchos yacimientos formados a baja temperatura, de mercurio, antimonio, arsénico, cobre y menas polimetálicas, el significado de estas relaciones durante la búsqueda resulta insignificante, ya que estos yacimientos se encuentran a gran distancia de las rocas magmáticas, supuestamente madres.

Por otra parte, las relaciones paragenéticas de la meniferación con las áreas donde se observan con mucha frecuencia los pequeños cuerpos intrusivos, diques, *sills*, *stocks*, son muy importantes para la búsqueda de algunos minerales útiles tales como cobre, estaño, oro, menas polimetálicas y otros. Las acumulaciones de dichos minerales útiles, se ubican dentro de estas áreas o cuerpos intrusivos y a veces en sus contactos. A menudo, las mismas intrusiones representan cuerpos de menas diseminadas; se conoce también el hecho de que mientras la composición de dichos cuerpos intrusivos y su edad geológica se hacen más variables, mejoran las perspectivas de la región en cuanto a la búsqueda de los yacimientos hidrotermales.

Las relaciones genéticas próximas de los minerales útiles y las rocas magmáticas, hay que considerarlas como criterios de búsqueda universales, mientras que las genéticas lejanas y las paragenéticas se consideran regionales. Las últimas deben precisarse teniendo en cuenta las condiciones geológicas concretas del terreno.

Además de las regularidades generales que relacionan la distribución de las rocas magmáticas y los yacimientos minerales endógenos, es necesario utilizar las particularidades de la morfología de los macizos intrusivos, la posición del nivel de erosión y la zonación primaria de dichos yacimientos. Estos factores influyen mucho en la ubicación espacial de los minerales útiles y su estudio permite delimitar más correctamente los sectores favorables para la búsqueda.

En este sentido, es útil recordar que los yacimientos vinculados a los cuerpos intrusivos ácidos y medios se acumulan, en la mayoría de los casos, cerca del techo de los macizos abovedados o en el lado colgante en el caso de intrusivos inclinados. Los cuerpos minerales se encuentran tanto directamente en la zona de contacto de las rocas magmáticas y encajantes como dentro de estas últimas a una distancia más o menos grande del intrusivo. Al ser así, los sectores más favorables para organizar la búsqueda de minerales útiles endógenos son las partes apicales de tales intrusivos, sobre todo en el caso de los salientes y apófisis, así como

también en las áreas de hundimiento suave del techo del macizo. En estos casos se forman amplias zonas de rocas alteradas y yacimientos minerales útiles relacionados con estas. Además, dichas zonas permanecen a una profundidad accesible. Por el contrario, cerca de los contactos abruptos de las intrusiones, los yacimientos ocupan una zona muy estrecha de las rocas adyacentes, muchos minerales útiles se encuentran a gran profundidad y la búsqueda y exploración resulta difícil.

En cuanto al nivel de erosión, el caso más favorable para la búsqueda de minerales útiles relacionados con grandes macizos de rocas ácidas y medias, se presenta cuando la erosión alcanza solo los salientes superiores del intrusivo (fig. 2.9) y en la superficie no se observan más que pequeñas áreas aisladas de rocas magmáticas dentro de las zonas de rocas encajantes alteradas. En estos casos, muchos yacimientos de diferentes minerales útiles yacen a poca profundidad y su revelación es fácil. Si el nivel de erosión es menor, las rocas intrusivas no se manifiestan en la superficie; entonces solo es posible encontrar rocas alteradas y, muy raramente, yacimientos telegenéticos. Aunque en este caso, el subsuelo puede encerrar numerosas y variadas acumulaciones de minerales útiles, todos los objetos son "ciegos" y por esta razón su búsqueda es mucho más difícil y menos eficiente. Cuando la erosión alcanza los horizontes profundos del intrusivo, esto significa que la mayoría de los yacimientos ya fueron destruidos. Estas condiciones no favorecen la búsqueda de minerales útiles.

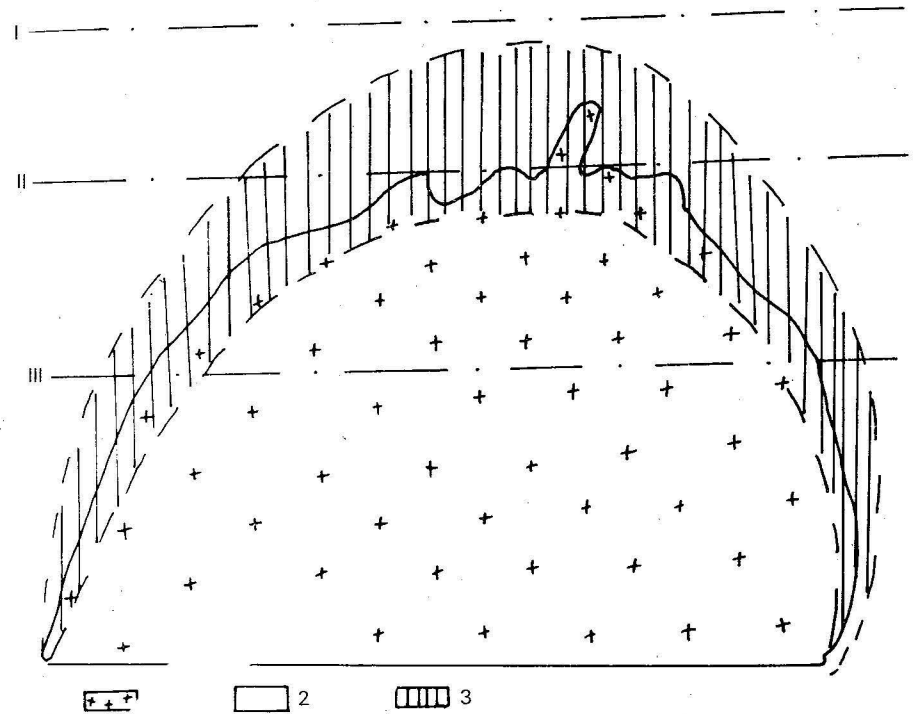


Fig. 2 Influencia de la posición del nivel de erosión sobre las perspectivas de búsqueda de yacimientos minerales: 1- granito granodiorita; 2- rocas encajantes; 3- zona de desarrollo máximo de yacimientos hidrotermales y *skarn*

Si se trata de yacimientos minerales vinculados a las intrusiones básicas, debe advertirse el importante papel que tiene la morfología del fondo de dichas intrusiones, ya que en estas depresiones se localizan con bastante frecuencia los cuerpos de licuación e histeromagmáticos. A la inversa, con las rocas magmáticas ácidas los contactos abruptos del intrusivo son más favorables para la búsqueda, pues a lo largo de este pueden encontrarse los cuerpos de menas masivas. Desde el punto de vista de la posición del nivel de erosión, las mejores condiciones se crean si en la superficie aparecen las partes medias o inferiores del macizo intrusivo.

En caso de rocas alcalinas, las intrusiones diferenciadas de forma cónica son más favorables para la búsqueda de minerales útiles. Aquí, las diferentes zonas del macizo intrusivo encierran distintos tipos de minerales útiles (Jibini, Kovnor y otros) y, debido a la gran amplitud vertical de la meniferación, cualquier nivel de erosión del intrusivo ofrece buenas perspectivas para revelar los yacimientos minerales industriales.

En lo que se refiere a las rocas magmáticas ultrabásicas, la morfología del macizo intrusivo y su grado de erosión tienen un papel de importancia secundaria durante la búsqueda.

Para precisar la posición de las áreas favorables para la localización de diferentes minerales útiles, también se puede utilizar la zonalidad primaria de los yacimientos endógenos. Dicha zonalidad se manifiesta en la estructura diferenciada del cuerpo magmático y las relaciones estrechas de la meniferación con sus diferentes zonas o en la ubicación regular de las acumulaciones minerales útiles alrededor del intrusivo, bajo la forma de zonas concéntricas más o menos estables de diferentes composición. El primer caso es típico para las rocas básicas y alcalinas y ya fue tratado con anterioridad.

Para los yacimientos relacionados con las intrusiones ácidas y medias, se establece con frecuencia la zonalidad vertical directa. Esta se manifiesta en que, debido al movimiento ascendente de las soluciones hidrotermales, los yacimientos que se forman a temperaturas más altas, se encuentran a mayor profundidad y las formaciones de temperaturas inferiores están más cerca de la superficie. Si la erosión corta el sistema de tales zonas, se puede observar en la superficie actual la zonalidad horizontal en la distribución de los minerales útiles, que por lo general es de tipo concéntrico.

En función de la escala de manifestación se conoce la zonalidad primaria de las regiones metalogénicas, campos meníferos y yacimientos. Como ejemplos de la primera, se pueden citar las zonas pirítico-cuprífera del noreste y cupromolibdenífera del suroeste del Cáucaso; la zona estannífera exterior y cuprífera interior (adyacente al océano) de la provincia metalogénica pacífica y otros. La zonalidad de los campos meníferos se expresa en los trabajos de S.S. Smirnov para los yacimientos oro-molibdeníticos de las regiones del Zabaikalie oriental (URSS), donde las zonas centrales de filones de alta temperatura de composición cuarzo-turmalina con pirita, arsenopirita, molibdenita, oro y bismutina se sustituyen, hacia la periferia, primeramente por la zona de filones sulfuro-cuarcíferos de temperatura media con galenita, esfalerita, calcopirita y oro y después por los filones de baja temperatura de tipo carbonato-cuarcífero y calcedonio-cuarcífero con antimonita.

Dentro de un mismo yacimiento la zonalidad primaria se manifiesta aún más claramente y con más frecuencia. Así, en los yacimientos polimetálicos de los Cárpatos, se presentan casi siempre tres zonas: la superior, que es esencialmente oro-argentífera; la media, de composición plomo-cinc y la inferior que contiene

principalmente cobre. En el yacimiento Butte (Montana, EE.UU.), la zona central, esencialmente de cobre, se sustituye hacia la periferia por la de cobre-plomo-cinc y finalmente por la de plomo-cinc.

La destrucción de los macizos magmáticos en condiciones exógenas, puede dar lugar a la creación de yacimientos de diferentes minerales útiles; en estos casos, la composición inicial de las rocas intrusivas es la que da lugar al tipo concreto de yacimiento secundario. En el caso de transporte de los productos de la destrucción de las rocas magmáticas a gran distancia y su redeposición posterior, las relaciones de los yacimientos sedimentarios nuevamente formados con las fuentes del material que les da origen, casi no se revelan. Por eso, los criterios magmáticos tienen poco valor para los minerales útiles sedimentarios. Al contrario, ello son muy importantes durante la búsqueda de los yacimientos residuales, de infiltración y los placeres.

La meteorización de las rocas ultrabásicas, en caso de relieve accidentado, puede dar origen a los placeres de platino y platinoides (Ural), diamantes (Yakutia). Si el relieve es de peniplano, la destrucción de dichas rocas provoca la acumulación de metales ferrosos en la corteza de intemperismo y la creación de yacimientos de menas de hierro naturalmente aleadas (Ural del sur, Guinea y otros) o los de níquel (Cuba, Ural del sur, Grecia, Albania). Además, en estas condiciones se pueden formar los yacimientos de infiltración de la llamada *magnesita amorfa* (Ural del sur, Kazajistán). Los yacimientos residuales y de infiltración están ubicados dentro de las áreas ocupadas por las rocas ultrabásicas o sus productos de alteración (las serpentinitas), mientras que los placeres se encuentran generalmente a poca distancia de estos macizos ultrabásicos.

Lo expuesto anteriormente permite comprender la importancia de la revelación de las rocas ultrabásicas, para una correcta organización de la búsqueda de los minerales útiles correspondientes en una determinada región.

La destrucción de las rocas magmáticas ácidas, en caso de relieve accidentado, trae como consecuencia la acumulación de minerales accesorios estables y pesados en los productos incoherentes y la formación de placeres eluviales, deluviales y aluviales de oro, casiterita, wolframita, rutilo, monacita, etc. Si el relieve es de peniplanicie, pueden originarse yacimientos de la corteza de intemperismo. En el clima tropical húmedo se forman las bauxitas lateríticas (África occidental, Australia, Jamaica), a veces con concentraciones elevadas de oro, y en el clima moderado, caolín primario, que se desarrolla sustituyendo las rocas graníticas (Ucrania, Ural de sur, China, Inglaterra, Checoslovaquia). En la corteza de intemperismo de la zona tropical húmeda, la bauxita también puede resultar de la descomposición de las rocas magmáticas alcalinas (Arkansas, EE.UU.; Guinea), medias y básicas (Guinea).

Criterios estructuro-tectónicos

Los criterios de este grupo reflejan las regularidades de la localización de las acumulaciones de minerales útiles, en dependencia de las particularidades de la estructura del territorio. Según la escala, estos se subdividen en: globales, regionales y locales.

Las estructuras geológicas de escala global, son las plataformas, geosinclinales, áreas transitorias entre ellos y zonas de *rift*. La historia de la evolución geológica de estas regiones más grandes, es totalmente distinta y, por consiguiente, para cada tipo de estructuras globales son características diferentes formaciones meníferas.

En las zonas geosinclinales, los procesos de magmatismo y metamorfismo se manifiestan ampliamente y dan origen a numerosos yacimientos endógenos de diversos minerales útiles. Los minerales útiles exógenos, son menos típicos, aunque a veces pueden dar lugar a yacimientos únicos (fosforita, bauxita, carbón, magnetita). Las cuencas carboníferas de estas regiones se caracterizan por la gran potencia de las series productivas, que son de tipo litoral, numerosos estratos de carbón poco potentes y metamorfismo considerable del carbón, que llega hasta la antracita.

Las plataformas encierran la mayoría de los minerales útiles en su cobertura sedimentaria, donde se pueden encontrar la bauxita, fosforita, menas de hierro, carbón, materia prima para la construcción, arcillas refractarias, etc. Las cuencas carboníferas contienen pocos estratos de gran potencia en series productivas poco potentes; el metamorfismo de la masa orgánica es débil, y con frecuencia se observan los carbones pardos. En estas zonas, los minerales útiles relacionados con las cortezas de intemperismo, tanto antiguas como recientes, también desempeñan un papel importante. Los yacimientos endógenos son bastante raros y se relacionan con las fallas profundas de larga vida en el fundamento de la plataforma (menas sulfurosas cupro-niquelíferas), con las rocas de este fundamento dentro de los escudos y grandes macizos cristalinos (apatito, hierro, metales raros y tierras raras, flogopita, moscovita, uranio, oro) o con las formaciones magmatogénicas de placas, kimberlíticas y de *trapps* (diamante, hierro, espato de Islandia).

Dentro de las plataformas y geosinclinales estabilizados, es necesario prestar una gran atención a las zonas de activación tectónica posterior, que se llaman corrientemente zonas de bloques. Estas zonas se caracterizan por movimientos tectónicos reactivados y manifestaciones de actividad magmática relacionadas con ellos, lo que implica la formación de yacimientos minerales útiles más jóvenes, que se añaden al complejo ya existente de minerales útiles antiguos. En la URSS, regiones importantes de este género son: Zabaikalie, Taimir y noroeste de Siberia.

Las zonas transitorias entre las plataformas y geosinclinales (miogeosinclinales, parageosinclinales y otras) son muy favorables para buscar diferentes minerales útiles de origen sedimentario (carbón, petróleo y gas, sales minerales, bauxita, manganeso, hierro, etc.). En dichas zonas las cuencas carboníferas se caracterizan por la presencia de estratos potentes y superpotentes, cuyo número generalmente sobrepasa una decena, y el metamorfismo poco avanzado del carbón.

En la actualidad las investigaciones muestran claramente que las zonas de *rift*, tanto oceánicas como intracontinentales, desempeñan un papel muy importante en la ubicación de las rocas efusivas y subvolcánicas de la formación alcalino-ultrabásica. Sin embargo, hasta ahora no se conocen yacimientos de minerales útiles endógenos suficientemente grandes, relacionados con dichas zonas.

* Las estructuras tectónicas regionales representan la combinación de dislocaciones plicativas y disyuntivas de primero y segundo orden y se manifiestan como grandes zonas lineales de plegamiento intenso. Ellas controlan la distribución de las rocas magmáticas, zonas metalogénicas y provincias meníferas, dentro de los geosinclinales y zonas de bloques. La extensión de dichas estructuras puede alcanzar unos millares de kilómetros y su ancho varía desde decenas hasta centenas de kilómetros. Pueden señalarse como ejemplos las zonas Verjoyansk (auroestannífera) de más de 1 000 km de largo; Altai-Sayansk, que controla la ubicación de los

yacimientos de menas polimetálicas, hierro, mercurio, wolframio y molibdeno, y se extiende por más de 1 500 km a lo largo de la frontera del geosinclinal Angarsk; las Montañas Rocosas en la América de Norte, que encierran las menas de cobre-polimetálicas, cuyo largo sobrepasa los 1 500 km, y el ancho es del orden de 100 km.

✓ La localización de los campos meníferos concretos, yacimientos, cuerpos minerales independientes y columnas minerales, se determina por las estructuras locales, tanto plicativas como disyuntivas, así como también por la estructura interna de los macizos magmáticos. Como regla general, las perturbaciones disyuntivas más grandes (decenas y centenas de kilómetros de largo) desempeñan el papel de canales que aseguran la llegada y distribución de las soluciones mineralizadas; las fallas de plumaje o secundarias, de orden inferior, pueden contener los cuerpos minerales concretos.

Las estructuras plicativas generalmente encajan la mineralización, y la mayoría de las acumulaciones de minerales útiles están relacionados con las inflexiones anticlinales de las capas: anticlinorios, charnelas de los pliegues anticlinales y sus doblamientos transversales, bóvedas, inflexiones de capas en los flancos de pliegues, etc. La concentración máxima de la mineralización endógena en las estructuras anticlinales se explica, en primer lugar, por el hecho de que con los núcleos de grandes anticlinales se relacionan frecuentemente las intrusiones que dan origen a la meniferación. Si en el corte estratigráfico existen las rocas impenetrables, dichas estructuras representan trampas para las soluciones ascendentes y favorecen la deposición de la masa menífera (fig. 2.10). En segundo lugar, las zonas de inflexiones anticlinales se caracterizan por las tensiones máximas en las rocas, que conducen a menudo a fisuras y exfoliaciones de las capas, lo que crea condiciones muy favorables para la formación de depósitos minerales.

Se pueden señalar innumerables ejemplos de localización de minerales útiles endógenos en las estructuras anticlinales. Tales son la mayoría de los yacimientos de Kazajastán central, yacimientos polimetálicos del Cáucaso del norte, Karatau, Altai, yacimientos de antimonio-mercurio del Asia Central y muchos otros. Las estadísticas muestran también que el mayor número de yacimientos hidrotermales se sitúa en las curvaturas de los pliegues según su rumbo, en los pequeños pliegues, sus flancos (fig. 2.11), e intersecciones de las fallas con las estructuras anticlinales, sobre todo si estas últimas contienen horizontes pantalla.

La localización de los cuerpos minerales dentro de los macizos de rocas magmáticas, puede depender de las estructuras de flujo propias de algunas intrusiones (cromita, menas sulfurosas de cobre y níquel), de la diferenciación y "estratificación" de los intrusivos (yacimientos cuproniquelíferos o de metales raros) del agrietamiento primario de las rocas intrusivas.

✗ De todo lo expuesto, es fácil deducir el importante papel de los criterios estructuro-tectónicos durante la búsqueda de minerales útiles, tanto endógenos como exógenos; por eso, el análisis geoestructural del territorio a estudiar, incluso el estudio de todos los tipos de estructuras geológicas, desde las fallas más profundas, grandes anticlinorios y sinclinorios, hasta pequeños pliegues, perturbaciones disyuntivas y clivaje, sirve como base para los pronósticos metalogénicos a escala pequeña, la búsqueda de los yacimientos concretos y cuerpos minerales independientes, así como la planificación y organización de los trabajos de exploración geológica. Datos más completos sobre las estructuras locales de control de la meniferación, pueden encontrarse en los libros sobre las estructuras de campos meníferos.

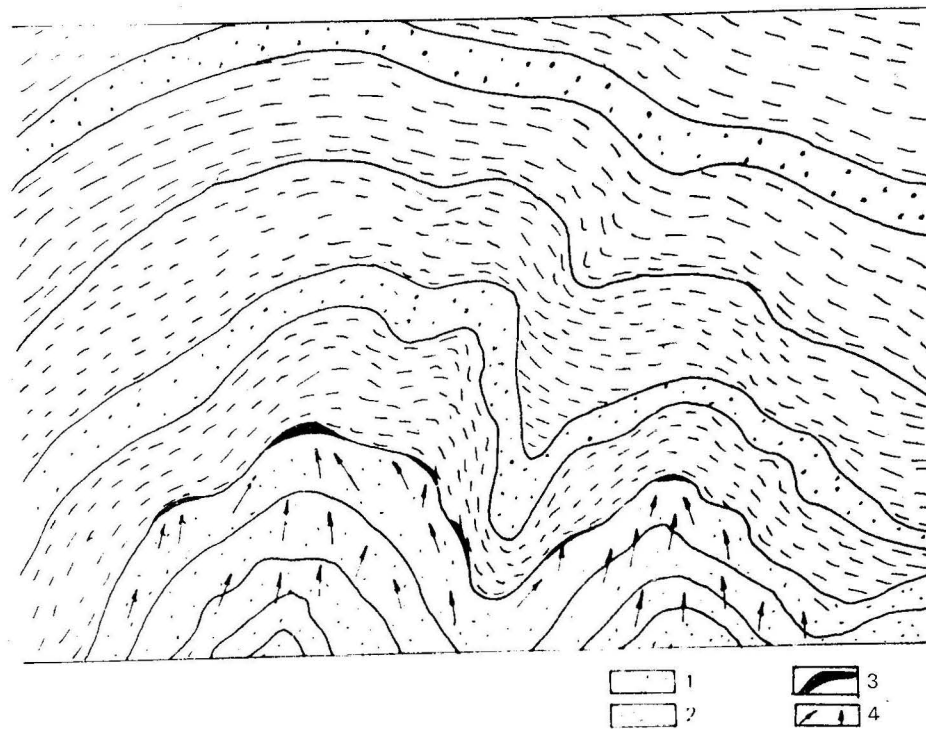


Fig. 2.10 Esquema de acumulación de la meniferación en las estructuras anticlinales: 1- rocas permeables; 2- rocas impermeables; 3- meniferación; 4- dirección de movimiento de las soluciones hidrotermales

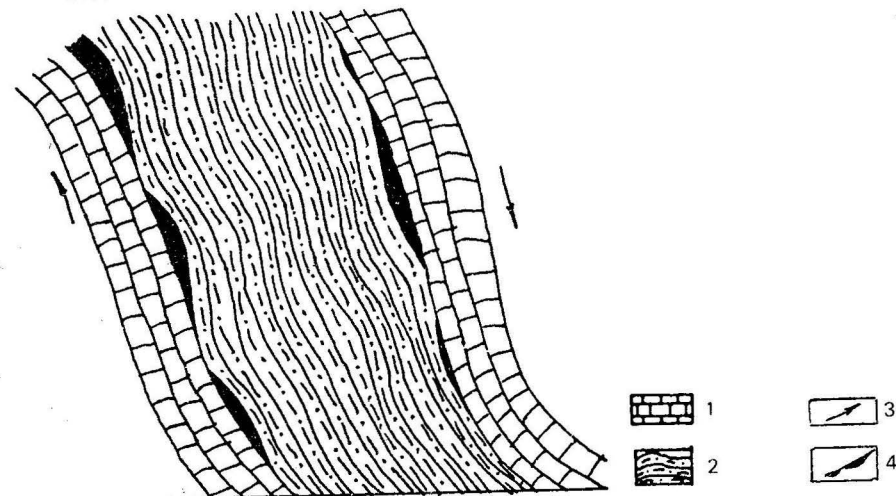


Fig. 2.11 Esquema de la formación de cavidades en el flanco del pliegue a causa de la diferencia en propiedades físicas de las rocas: 1- caliza; 2- esquistos arcillosos; 3- dirección de deslizamiento de las capas; 4- cavidades de exfoliación

Criterios geoquímicos

Estos criterios tienen como base el comportamiento regular de los elementos químicos en la corteza terrestre, lo cual depende tanto de las propiedades de los elementos como de las condiciones físico-químicas del desarrollo de los procesos geológicos. Las regularidades geoquímicas principales que se utilizan para resolver las tareas de búsqueda de minerales útiles, abarcan particularidades de comportamiento de los elementos químicos durante la meniferación endógena y los procesos exógenos, así como las reglas que determinan las asociaciones paragenéticas de elementos minerales y yacimientos en la corteza terrestre.

Los procesos de mineralización endógena resultan no solo de la formación de acumulaciones locales de materia prima mineral; también pueden ser el resultado de los contenidos elevados de los elementos correspondientes en las rocas encajantes y macizos magmáticos, que fueron las fuentes de las soluciones mineralizadas. Por consiguiente, regiones enteras se caracterizan por el contenido de fondo de algunos elementos, que sobrepasa considerablemente el clarke. Así, por ejemplo, en las series productivas del Altai menífero, los contenidos de plomo, cinc y plata, exceden el clarke varias veces; las intrusiones estanníferas de la zona Kalbinsk contienen estaño en cantidades mucho más grandes que las estériles, etc. Por esta razón, las concentraciones elevadas de elementos químicos en las rocas de una región determinada representan un factor favorable para la búsqueda de los minerales útiles correspondientes.

Cerca de los cuerpos minerales, las concentraciones de elementos pertenecientes a estos son aún más grandes para toda la región. Estas anomalías geoquímicas locales se nombran aureolas primarias de dispersión y desempeñan un papel de suma importancia durante la búsqueda, puesto que demuestran directamente la existencia de minerales útiles. Dichas aureolas se estudiarán más detalladamente en el capítulo dedicado a los índices de búsqueda.

El comportamiento de los elementos químicos en los procesos endógenos y su predisposición a la concentración o dispersión, constituyen una función de las condiciones concretas del desarrollo de los procesos geológicos. Este comportamiento puede modificarse al variar las facies de metamorfismo, las etapas de metasomatosis, el potencial de oxidación-reducción del medio, etc. El conocimiento de estas regularidades permite precisar las ideas sobre las condiciones de formación de los yacimientos minerales, el carácter de su zonalidad, el grado de erosión y otras particularidades importantes, lo que representa un fundamento seguro para seleccionar las áreas favorables para la búsqueda y evaluar los horizontes de las manifestaciones minerales ya reveladas. Estos factores se tratan de manera más detallada en los cursos de Geoquímica general y Geología de yacimientos minerales útiles.

Durante el desarrollo de los procesos exógenos, de una parte, los elementos químicos se acumulan en relación con la meniferación sedimentaria, que trae como consecuencia la "contaminación" general de la región con unos u otros elementos (el contenido elevado de fósforo dentro de las cuencas fosforíferas comparado con su clarke) y la aparición de las aureolas primarias de dispersión. Por otra parte, la meteorización de los yacimientos minerales anteriormente formados, alcanza una gran amplitud y tiene como resultado no solo la dispersión, sino también la acumulación local de los elementos, sus combinaciones químicas y los minerales que componen los cuerpos. Estas acumulaciones locales se conocen como aureolas secundarias de dispersión y serán tratadas con posterioridad como índices de búsqueda.

Las asociaciones paragenéticas de los elementos químicos surgen en la corteza terrestre como resultado de procesos geológicos muy variados. Desde el punto de vista de la búsqueda, las paragénesis estables de los elementos en el estado de concentración son más importantes, ya que con ellas se relacionan los yacimientos de minerales útiles. Dichas paragénesis están bien estudiadas y permiten suponer la existencia de algunos elementos y organizar la búsqueda orientada de los minerales útiles correspondientes, a partir del descubrimiento de otros elementos de la asociación estable, así como también evaluar correctamente y de manera compleja la calidad del mineral útil encontrado. Como ejemplo pueden señalarse las paragénesis de plomo y plata, cinc y cadmio, germanio, indio, y galio, en las menas polimetálicas; cobre y níquel de una parte y platino y paladio de otra, en las menas sulfurosas; hierro y cobalto, cromo, níquel y manganeso en los yacimientos residuales; azufre y selenio y telurio en los yacimientos sulfurosos.

Las asociaciones paragenéticas de minerales pueden ser: primarias, cuando sus miembros se forman independientemente y al mismo tiempo; secundarias, cuando unos minerales aparecen con posterioridad y rempazan a otros ya existentes a causa de modificaciones de las condiciones físico-químicas del medio. Ambas desempeñan un papel muy importante durante la búsqueda de minerales útiles, pues aseguran la correcta solución del problema del estudio complejo, tanto del terreno en general como de la calidad de las menas. Además, el conocimiento de dichas asociaciones permite evaluar de manera argumentada los horizontes profundos del yacimiento a partir del estudio del mineral útil en su zona de afloramiento. Como paragénesis primarias de minerales, se pueden considerar: la galenita y esfalerita, pirope y diamante, pirita y calcopirita, cinabrio y antimonita, talco y serpentina, silvina y halita. Como paragénesis secundarias, galenita con anglesita y cerusita, calcopirita con crisocola, malaquita y azurita; esfalerita con calamina y smithsonita; cobaltina con eritrina y otras.

Las asociaciones paragenéticas de los minerales también se pueden manifestar como índice de búsqueda y en este sentido serán estudiadas más adelante.

Las regularidades de las asociaciones paragenéticas de los yacimientos minerales útiles, se aplican para prever la existencia de los yacimientos de algunos tipos de materia prima mineral; generalmente se toma como base el hallazgo de otros yacimientos vinculados espacialmente con estos, lo que permite revelar las áreas favorables para la búsqueda y escoger los métodos de estudio más eficientes. Como ejemplos de dichas paragénesis de procedencia endógena, se encuentran: las relaciones de yacimientos de cromo y platino; níquel y cobalto; níquel y cobre; cobre y molibdeno, estaño y wolframio; moscovita y feldespato, apatito y hierro; apatito y nefelina, etc. En condiciones exógenas, se crean las paragénesis de yacimientos de caolín y arcilla refractaria; dolomita y magnesita; caliza y dolomita; carbón, bauxita y arcilla refractaria; manganeso y hierro; uranio y vanadio; sal gema y silvinita; yeso y azufre; sal gema y fosforita o manganeso, etc. Es necesario tener en cuenta que los yacimientos que forman parte de una paragénesis, pueden estar situados no solo uno a continuación de otro, sino también uno dentro del otro (los yacimientos de germanio en los carbones, galio en las bauxitas, etcétera).

Criterios metamórficos

Como norma, durante el metamorfismo de las rocas y menas, se modifican mucho las propiedades de las rocas encajantes, la calidad del mineral útil, las di-

ensiones y condiciones de yacencia de los cuerpos minerales y con frecuencia aparecen nuevos tipos de materia prima mineral. (Debido a esto, el conocimiento del grado de las alteraciones metamórficas y metasomáticas de las rocas, representa un importante criterio en el caso de la búsqueda de yacimientos minerales metamorfogénicos, tanto metamorfozados como metamórficos). Esto quiere decir que el estudio y la cartografía de las facies del metamorfismo, pueden proporcionar al prospector datos extremadamente importantes y asegurar el pronóstico bien argumentado de las áreas favorables y la organización correcta de los trabajos de búsqueda. En este capítulo no se tratarán las relaciones que existen entre las facies del metasomatismo de contacto y la mineralización correspondiente, pues son índices de búsqueda indirectos y se estudiarán posteriormente. Aquí, el estudio se limitará a las regularidades de la localización de yacimientos minerales útiles, en dependencia de las facies del metamorfismo de contacto y regional.

Bajo el efecto del calor de las intrusiones magmáticas sobre las rocas y menas, se produce el aumento del tamaño de los granos cristalinos, el paso de las combinaciones químicas naturales a formas anhidras y en menor grado la formación de minerales nuevos. Estas modificaciones se desarrollan dentro de estrechas zonas adyacentes a los macizos magmáticos. Los yacimientos de minerales útiles se relacionan principalmente con las facies de baja temperatura, albíta-epidótica y anfibolítica, y son de tipo metamorfozados. Como ejemplos se encuentran las menas de magnesita que rempazan a las limonitas (yacimientos Boleguinsk, Zabaikal); óxidos anhidros y silicatos de manganeso en lugar de psilomelano (Nagpura, India); esmeril que sustituye a la bauxita y laterita (Smirna, Turquía); apatito en lugar de la fosforita (Kara-Tau, Asia Central); mármol en el caso de las calizas (Ural), etc. Raramente se pueden formar yacimientos metamórficos de grafito a expensas del material orgánico de las rocas o estratos de carbón (Cureica; Siberia; Cuenca de Tunguska, Yakutia).

Con las facies del metamorfismo regional correspondientes a las bajas temperaturas, se vinculan por lo general los yacimientos metamorfozados, y con los de alta temperatura los metamórficos. Por otra parte, algunos minerales útiles (azufre nativo, yeso, glauconita, bitúmenes, carbón, etc.), se descomponen o destruyen completamente en los comienzos del metamorfismo (facies de esquistos verdes) y nunca se encuentran dentro de las rocas metamórficas.

Las rocas metamórficas de las facies de esquistos verdes pueden encerrar yacimientos únicos de menas de hierro del tipo metamorfozados (Krivoi Rog y KMA, URSS; Lago Superior, EE.UU.; Nimba, África occidental). La limonita primaria de dichos yacimientos se transformó en magnetita y hematita, las cuales rempazan parcialmente el cuarzo. La eliminación del agua y, hasta cierto punto, del cuarzo, azufre y fósforo, modifica mucho la composición de la mena y aumenta su calidad. Con la misma facie metamórfica se asocian los yacimientos metamorfozados de manganeso. A partir de las menas de hidróxido (psilomelano, manganita) se forman, a causa de su deshidratación, las oxidadas (gausmanita, braunita, Nagpura, India) y algunas silicatadas (rodonita y otras Grikvelandest, África del Sur). Si las menas primarias son carbonatadas, sufren la marmorización acompañada de la formación de minerales accesorios de silicatos de manganeso a expensas del cuarzo de la mena (Kazajistán central; yacimiento Mazulsk, Siberia).

Con la transformación de la bauxita en la facie de esquistos verdes, se vinculan los yacimientos de esmeril (Ural Central; Samos, Grecia). Los yacimientos metamórficos típicos son muy raros entre las rocas de esta facie; como ejemplos

se pueden señalar los grafitos compactos del escudo ucraniano, de Canadá y de Corea.

Los yacimientos metamórficos de la facie almandino-anfibolítica son numerosos. Los ejemplos más importantes son la cianita, la silimanita y el esmeril, que se desarrollan durante el metamorfismo de las rocas arcillosas (península de Kola, Buriatia, Yakutia, India); el grafito cristalino y escamoso que aparece en lugar del material orgánico de las rocas madres (Ucrania, Madagascar, EE.UU.); la ilmenita y el rutilo a partir de minerales arcillosos primarios (EE.UU.). Con las rocas del metamorfismo regresivo (diaféresis), de la subfacie cianita-almandínica se vinculan los yacimientos de pegmatita con moscovita (Karelia del norte, región de Irkutsk, India), mientras que en las de la subfacie silimanítica, de más alta temperatura, solo se encuentran las pegmatitas cerámicas.

Los yacimientos metálicos metamorfizados relacionados con la facie almandino-anfibolítica y granulítica, son raros, como los de las menas silicatadas de manganeso en India, Ghana y Brasil. Por el contrario, los yacimientos no metálicos son abundantes. Estos pueden ser de dos tipos principales: los mármoles, que aparecen a expensas de las rocas carbonatadas, y las cuarcitas, en el caso de rocas madres arenosas.

El metamorfismo de grado más alto (facie eclogítica) es desfavorable para la formación de minerales útiles; el único tipo que puede tener algún valor industrial es el de los yacimientos de rutilo, como resultado del metamorfismo regional muy intenso de las rocas arcillosas o magmáticas básicas.

De todo lo antes expuesto se deduce que las áreas de amplia extensión de las rocas metamórficas de facies de esquistos verdes, son las más favorables para la búsqueda de yacimientos minerales metamorfizados, sobre todo de hierro y manganeso. Las mejores condiciones para los yacimientos metamórficos, aparecen cuando existe una amplia distribución de las rocas de la facie almandino-anfibolítica, que encierran con frecuencia minerales útiles no metálicos, materia prima aluminica, diversas pegmatitas, mármoles, cuarcitas, etcétera.

Criterios geomorfológicos

Los criterios geomorfológicos establecen la relación entre las formas, tanto del relieve actual como del antiguo, y los tipos de minerales útiles posibles. Su importancia es mayor para los minerales útiles cuya formación se asocia estrechamente con la erosión y la creación del relieve de la superficie, o sea, para los exógenos (placeres, materia prima fragmentaria para la construcción, yacimientos de la corteza de intemperismo, etc.). Sin embargo, estos criterios también se pueden utilizar con un buen resultado durante la búsqueda de minerales útiles endógenos, siempre que la diferencia de las propiedades de los cuerpos minerales y las rocas encajantes esté bien definida y se refleje en la distinta rapidez de los procesos de meteorización y en las formas de relieve que surgen. Cuando esas diferencias se manifiestan en grandes regiones, se deben considerar como criterios de búsqueda y utilizarlas para la mejor planificación de los trabajos geológicos. Por otra parte, las diferencias locales análogas desempeñan un papel de índices de búsqueda, pues se relacionan con los cuerpos minerales concretos.

Para revelar las áreas favorables donde se pueden buscar los yacimientos residuales, es preciso establecer la existencia de las superficies de nivelación actuales y antiguas y determinar sus cotas absolutas. Con estas superficies, se vin-

culan, en el caso del clima tropical húmedo, las bauxitas de tipo laterítico, las menas de hierro naturalmente aleadas y las menas de níquel, y en el clima templado los caolines. Algunas veces, los cuerpos minerales de valor industrial se encuentran solo en superficies de nivel hipsométrico determinado y están ausentes en los niveles superiores o inferiores (bauxitas de Guinea). Dichas superficies favorables se revelan por medio de las observaciones terrestres, aéreas y cósmicas del relieve, así como también del análisis paleogeomorfológico detallado, siempre que se considere la influencia de la composición de las rocas iniciales sobre el desarrollo de la meteorización.

El estudio del relieve de las regiones montañosas y la historia de su formación sirven como base para la búsqueda de los placeres continentales de oro, diamante, platino, casiterita y otros minerales útiles. Las condiciones más favorables para buscarlos, son las del relieve accidentado de montañas moderadas con un sistema fluvial bien desarrollado.

Los movimientos tectónicos, que se reactivan más de una vez en las regiones montañosas, cambian la posición de la base local de erosión y por consiguiente el carácter y el grado de desarrollo del valle. En general, desde el curso anterior del río hasta su desembocadura, se pueden distinguir las siguientes zonas consecutivas:

Zona de valles maduros del ciclo de erosión anterior.

Zona de profundización de los valles.

Zona de ensanchamiento y relleno de los valles.

Zona de valles maduros del ciclo de erosión reciente.

A cada una de estas zonas corresponden sus propios tipos de placeres, de lecho, de terraza, y de valle, ya que la delimitación de las áreas, según las etapas de desarrollo del valle, tiene mucha importancia para la correcta organización de la búsqueda de los placeres aluviales. Es absolutamente necesario tener esto en cuenta, sobre todo en el caso de la búsqueda de los placeres enterrados, relacionados con el relieve antiguo y el sistema fluvial enterrado, ya que en estos casos los criterios geomorfológicos (paleogeomorfológicos) desempeñan un papel principal.

Los criterios en cuestión son predominantes durante la búsqueda de las calizas de coquinas, arenas, gravas y otros tipos de materia prima fragmentaria para la construcción. Así, las calizas de coquinas se vinculan con frecuencia con las formaciones de arrecifes jóvenes, que se manifiestan claramente en el relieve actual como formas positivas (yacimientos de Cuba). Los yacimientos de arena y grava en los países septentrionales, en su mayoría representan formas positivas del relieve glacial (ésqueros y otros); por lo tanto, la existencia de las superficies que se caracterizan por este tipo de relieve son favorables para la búsqueda de dichos minerales útiles. La posibilidad de descubrir los yacimientos de arena del tipo eólico se deduce cuando existe relieve de dunas o de barjanes y la de los minerales útiles solubles (calizas, yeso, sales minerales), se debe suponer en el caso del relieve cársico.

El estudio geomorfológico de cualquier territorio permite revelar los sectores donde predominan las rocas poco resistentes a la meteorización, porque en esos sectores siempre se manifiestan formas de relieve negativas. Como regla general, dichos sectores son favorables para la búsqueda de minerales útiles sedimenta-

rios, sobre todo bauxita, caolín, arcilla y carbón. Por el contrario, las áreas de rocas estables se caracterizan por formas de relieve positivas y pueden encerrar diferentes tipos de minerales útiles endógenos (pegmatitas, filones cuarcíferos, cuarcitas secundarias, yacimientos histeromagmáticos, etc.). Además, el estudio geomorfológico ayuda a precisar la posición de los macizos de rocas magmáticas y las fallas recientes, lo cual, como se conoce, permite evaluar más correctamente las perspectivas de búsqueda de unos u otros minerales útiles.

Al estudiar los criterios de búsqueda, se observa que los mismos minerales útiles, y hasta sus yacimientos concretos, figuran como ejemplos para diferentes grupos de criterios. Eso es totalmente natural, ya que cada objeto geológico es el resultado de la manifestación conjunta de varios procesos geológicos y, por consiguiente, más de un criterio puede indicar su probable existencia. Por lo tanto, es posible seleccionar los criterios de búsqueda más importantes para cada tipo genético de cualquier mineral útil. Sin embargo, esto no es racional, pues esa lista sería muy amplia e incómoda desde el punto de vista práctico. Se debe analizar correctamente la constitución geológica de la región concreta, sobre la base de los conocimientos ya obtenidos acerca de los criterios de los grupos estudiados anteriormente, lo que permitirá pronosticar el probable complejo de minerales útiles a buscar, y delimitar las áreas más favorables para organizar los trabajos de búsqueda.

Por otra parte, existe una vía más prometedora: la agrupación de los yacimientos minerales útiles en formaciones, series o familias meníferas, a partir de la semejanza de las condiciones de formación y los tipos de asociaciones minerales en las menas. En este caso, es posible utilizar, de manera compleja, todos los criterios geológicos que favorezcan la búsqueda de dichas formaciones o series.

Lo expuesto hasta aquí representa la esencia del análisis formacional, cuya tarea básica consiste en establecer las regularidades que relacionan mutuamente las formaciones geológicas y meníferas.

N.S. Shatsky propuso el nombre de formación geológica para el complejo natural de rocas relacionadas mutuamente, desde el punto de vista de su formación, edad y ubicación espacial, las cuales reflejan el régimen tectónico específico de la región. Según esto, cada formación geológica se caracteriza por su complejo específico de criterios de búsqueda estratigráficos, litólogo-faciales, magmáticos, estructuro-tectónicos y algunas veces también metamórficos y geoquímicos.

Según la definición de S.S. Smirnov, las formaciones meníferas son complejos de yacimientos minerales útiles, con asociaciones minerales análogas, que se formaron en una situación geológica semejante, sin tener en cuenta la edad de la mineralización. La pertenencia del yacimiento a una determinada formación menífera, no solo refleja las condiciones de su creación, sino también da una idea bastante clara sobre la calidad de la mena, la escala del objeto y las perspectivas generales de este.

En la actualidad existe una multitud de clasificaciones de las formaciones, tanto geológicas como meníferas, y se ha acumulado una gran experiencia en el dominio del estudio de las relaciones mutuas de dichos tipos de formaciones [8; 20]. Las regularidades ya establecidas se emplean con éxito durante la búsqueda de minerales útiles. Como ejemplos se pueden señalar las relaciones entre: la formación menífera pirítico-cuprífera y la formación geológica espilito-quera-tofídica; las formaciones meníferas pegmatíticas y cuarzo casiterítica y la formación geológica granítica de los escudos; las formaciones meníferas cupro-niquelí-

feras y titanomagnetítica y la formación geológica de las intrusiones básicas "estratificadas"; la formación menífera carbonatítica (hierro, apatito, metales raros, tierras raras, flogopita, vermiculita) y la formación geológica de las rocas magmáticas ultrabásicas-alcalinas, y muchas otras.

No obstante, el problema del análisis formacional todavía no está resuelto de manera definitiva y las investigaciones en este dominio son de gran importancia, tanto teórica como aplicada.

2.3.2 Regularidades de la ubicación espacial de los cuerpos minerales

Los criterios geológicos de búsqueda que se tratan en este texto tienen un carácter bastante general y son válidos para sectores considerables de la corteza terrestre, tales como: cuencas y campos meníferos (criterios locales), zonas metalogénicas (regionales) y provincias metalogénicas (universales). Estas características son las que determinan su valor y sus límites de aplicación durante la búsqueda de yacimientos minerales útiles.

Sin embargo, no hay dudas de que las regularidades geológicas en la formación y transformación posterior de los minerales útiles, también deben mostrarse al estudiar los objetos a niveles más detallados (yacimiento, cuerpo mineral o columna mineral). La revelación de dichas regularidades representa una de las tareas más importantes del geólogo durante la exploración de las acumulaciones minerales ya descubiertas, por cuanto aquí se necesita el estudio detallado de la morfología, estructura interna, composición sustancial y posición espacial exacta de todos los objetos minerales que forman el yacimiento. Por lo tanto, el conocimiento de las regularidades mencionadas se utiliza como uno de los fundamentos teóricos de la exploración de los yacimientos minerales útiles.

Se conoce bien que la forma del cuerpo mineral, su estructura interna, el carácter de sus contactos, la composición de la mena, las condiciones de yacencia del cuerpo y sus variaciones, dependen en gran parte de la composición litológica de las rocas encajantes, las propiedades físico-mecánicas de estas y las particularidades de las estructuras plicativas y disyuntivas del terreno.

En la actualidad, las variaciones de la solubilidad de los componentes debidas a las variaciones en la composición y acidez de las soluciones mineralizadas durante su evolución, se consideran como una de las razones principales de la meniferación hidrotermal [17; 18; 19; 44]. La importancia de las variaciones en la acidez de las soluciones, se determina por el hecho de que la mayoría de los minerales meníferos son sales de ácidos y bases débiles (sulfuros y sulfosales) o compuestos anhidros de ácidos débiles (óxidos). De esta forma, al pasar el estado neutro, las soluciones deben depositar fácilmente estos compuestos.

Se pueden señalar innumerables ejemplos de la influencia de la composición, la porosidad y la fisuración de las rocas encajantes sobre el proceso de meniferación. Así, en Zabaikal oriental, los cuerpos meníferos de plomo-cinc dentro de las calizas, contienen hematita y oro en cantidades inferiores, comparado con los mismos cuerpos dentro de las rocas efusivas básicas. Con mucha frecuencia, los filones hidrotermales muestran un contenido elevado de sulfuros y oro cerca de los horizontes enriquecidos con material carbonoso. Para las rocas carbonatadas, generalmente son típicos los depósitos minerales concordantes o de contacto, al-

gunas veces tabulares; para los esquistos arcillosos los cuerpos concordantes lenticulares; para los esquistos cristalinos, filones concordantes; para las rocas efusivas, filones de relleno; etcétera.

Las combinaciones de las estructuras plicativas y disyuntivas (por ejemplo, las intersecciones de las fallas de diferentes sistemas, de fallas, horizontes-pantalla y otras) provocan la formación de cuerpos tubulares o de forma compleja.

La posición espacial del cuerpo mineral, se determina por la posición de las zonas favorables para la mineralización; dicha posición se puede pronosticar con bastante certeza "geometrizando"¹ las superficies de las diferentes variedades de rocas encajantes, así como de las fallas y diferentes sistemas de fisuras.

Debe tenerse en cuenta que la descripción detallada y completa de la influencia de las rocas encajantes y estructuras tectónicas sobre la localización de minerales útiles y los métodos de geometrización de los objetos geológicos aparece en los manuales y libros de estudio correspondientes a las asignaturas: Geología estructural, Estructuras de campos meníferos y Geometría minera [18: 42: 43: 44].

2.3.3 Pronóstico geológico de las variaciones de los parámetros de los cuerpos minerales

Como se ha señalado anteriormente, el pronóstico de la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales de los cuerpos minerales representa una de las tareas más importantes de nuestra asignatura. La correcta solución de esta tarea determina en gran parte la eficiencia del sistema escogido para los trabajos de búsqueda y exploración, la autenticidad de los resultados obtenidos y la confiabilidad de la evaluación geólogo-económica del objeto.

El método geológico es el más seguro para pronosticar las variaciones espaciales de unos u otros parámetros del cuerpo mineral, tanto por separado como en conjunto. Conforme a este método, dichas variaciones pueden explicarse sobre la base de la reconstrucción de la historia de formación del sector correspondiente de la corteza terrestre. Este método necesita la amplia utilización de las regularidades geológicas que determinan la localización y morfología de los cuerpos minerales, así como también de diferentes modos de geometrización de los cuerpos minerales ya mencionados en el tema precedente. Dicho estudio multilateral, permite esclarecer más, y de manera completa, las particularidades del objeto a explorar y argumentar correctamente el carácter de la variación de cada parámetro del cuerpo, no solo entre los puntos de observación sino también fuera de la parte investigada de este cuerpo. Por ejemplo, en la figura 2.12 se muestra la variación de la potencia del depósito mineral entre dos cruceros de prospección contiguos, la cual se puede hacer gradualmente o con los ensanchamientos y estrechamientos, o por último el mineral útil puede ser destruido completamente o parcialmente por los procesos geológicos postmeníferos (intrusiones de rocas magmáticas, erosión, formación del carso, etc.). Desde luego, que solo el análisis profundo de la situación geológica permite escoger la variante correcta de pronóstico de este parámetro.

¹ No se tiene conocimiento acerca de la aceptación de este término por la Real Academia de la Lengua Española. (N. del E.)

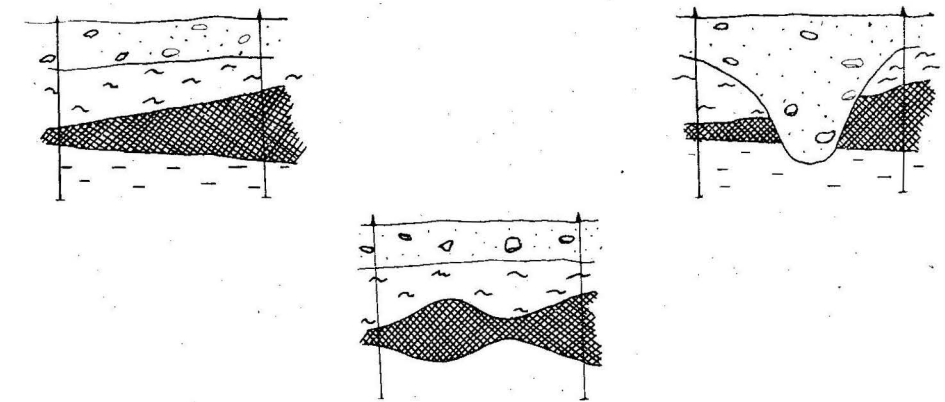


Fig. 2.12 Variantes posibles para interpretar los datos obtenidos en dos pozos de perforación contiguos

En sentido general, el problema del pronóstico geológico de la variabilidad del objeto que se va a estudiar, se resuelve por medio de la elaboración de sus modelos geológicos. Para realizarlo hay que utilizar tanto las ideas generales sobre las condiciones de formación del yacimiento y los principales factores que determinan la localización espacial y calidad del mineral útil, como los datos reales obtenidos en los cruceros de prospección y los que resulten de haber aplicado los métodos geofísicos y geoquímicos.

Frecuentemente, los modelos geológicos son materiales gráficos: mapas; cortes geológicos; planos de horizontes; proyecciones de los cuerpos minerales en diferentes superficies (horizontales, verticales, inclinadas); representación de la variación de diferentes parámetros del cuerpo mineral en el espacio, como las superficies topográficas con ayuda del sistema de isolíneas (planos hipsométricos del techo o del piso del cuerpo, planos de isopacas del cuerpo o del destape, isolíneas de contenido de algún componente, etc.), o sea, las representaciones en una sola superficie plana. Algunas veces se utilizan diagramas de bloque que ofrecen una representación volumétrica del yacimiento, cuerpo mineral o sector. A estos materiales se añaden las columnas estratigráficas de los pozos de perforación y otras, diferentes diagramas, etcétera.

Los modelos geológicos volumétricos de tipo escultural, de relieve, de esqueleto o transparentes, se utilizan raramente y, en su mayoría, tienen como objetivo demostrar las particularidades del objeto geológico en una forma demostrativa.

Todos los materiales gráficos mencionados anteriormente, pueden dar ideas bastante completas sobre el grado, carácter y estructura de la variabilidad, tanto de uno como de varios parámetros geólogo-industriales en conjunto, para secciones determinadas del cuerpo mineral, toda su área de extensión o todo su volumen. Por ejemplo, el perfil de un yacimiento pirítico-cuprífero (fig. 2.13), muestra de manera clara la amplitud y el carácter de la variación de la potencia del cuerpo mineral, la posición espacial de su techo y piso, la variabilidad de las condiciones de yacencia del cuerpo y su estructura interna. Permite también delimitar los bloques geológicos, teniendo en cuenta las condiciones de yacencia y la morfología del cuerpo mineral, y seleccionar las zonas donde el pronóstico de la variabilidad es simple e indiscutible y las zonas más complejas, cuyo estudio suplementario es indispensable.

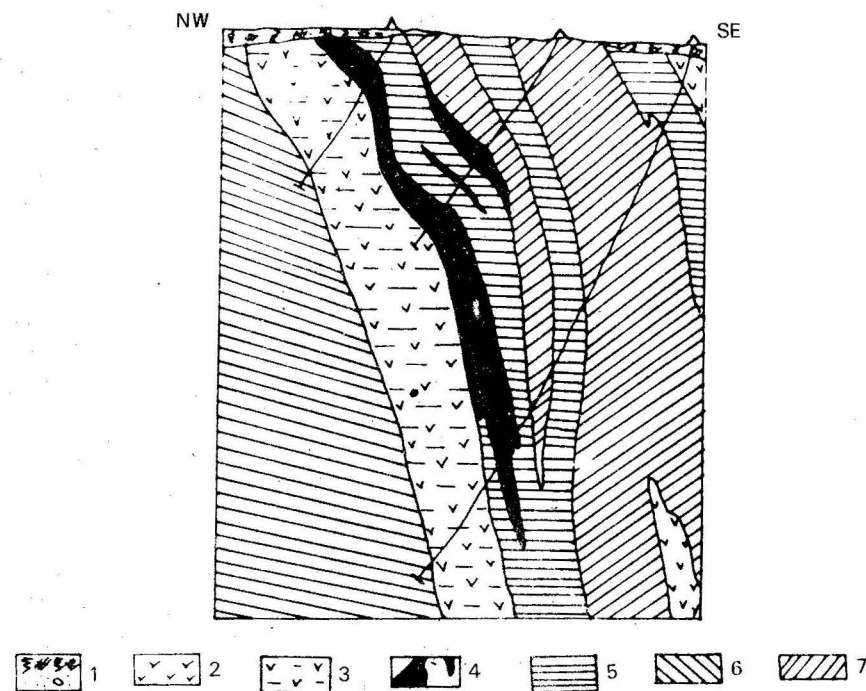


Fig. 2.13 Representación demostrativa de la variabilidad de la potencia de menas pirito-cupríferas en un perfil geológico: 1- depósitos friables; 2- porfiritas albíticas; 3- porfiritas cuarzo-albíticas; 4- menas pirito-cupríferas; 5- esquistos cuarzo-sericiticos; 6- rocas tobáceas y esquistos verdes; 7- esquistos cuarzo-albíticos y clorito-epidóticos

Debido a que los modelos geológicos son multilaterales, bien argumentados y demostrativos, ellos son insustituibles para el estudio y pronóstico de la variabilidad de los objetos geológicos. Estos modelos desempeñan un papel predominante en la argumentación de los sistemas racionales de exploración y muestreo de los yacimientos minerales útiles, en la opción del método de cálculo de reservas y en la evaluación de la confiabilidad de los resultados.

Lo anterior es muy importante, sobre todo hoy día, cuando se presta una atención cada vez mayor a los métodos matemáticos aplicados, los cuales intentan resolver más exactamente los problemas. Sin embargo, la elaboración de dichos modelos representa una tarea difícil que requiere también un trabajo creador y a veces tiene soluciones diferentes. Esto se debe, entre otras cosas, a la complejidad de los procesos geológicos, los cuales resulta difícil reproducir experimentalmente, por lo que a veces no se conocen con profundidad. Otra razón es el carácter discreto de las observaciones del objeto geológico, las cuales se realizan siempre con una red de poca densidad, lo que trae como consecuencia el hecho de que el volumen del cuerpo observado es inconmensurablemente pequeño en comparación con las partes del cuerpo a las cuales se extienden los resultados obtenidos. Lo expuesto se puede aclarar con ejemplos sencillos (figs. 2.14 y 2.15).

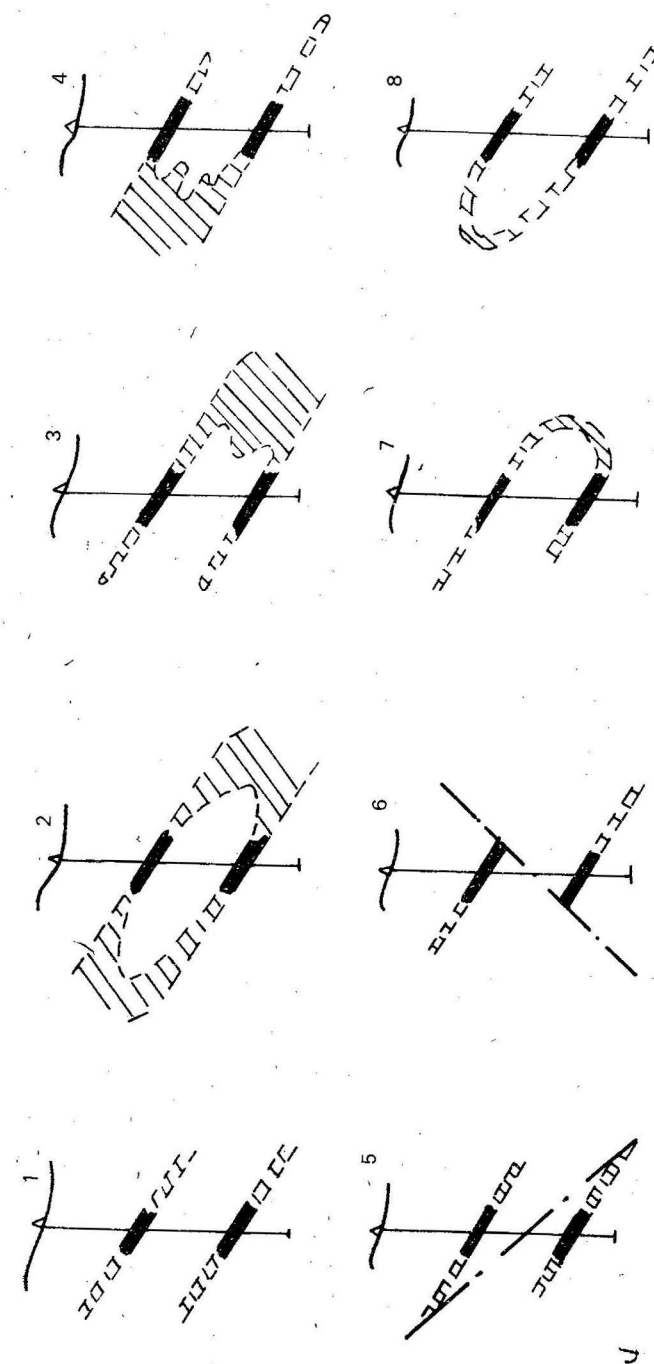


Fig. 2.14 Diferentes variantes de interpretación de los datos obtenidos en un mismo pozo de perforación

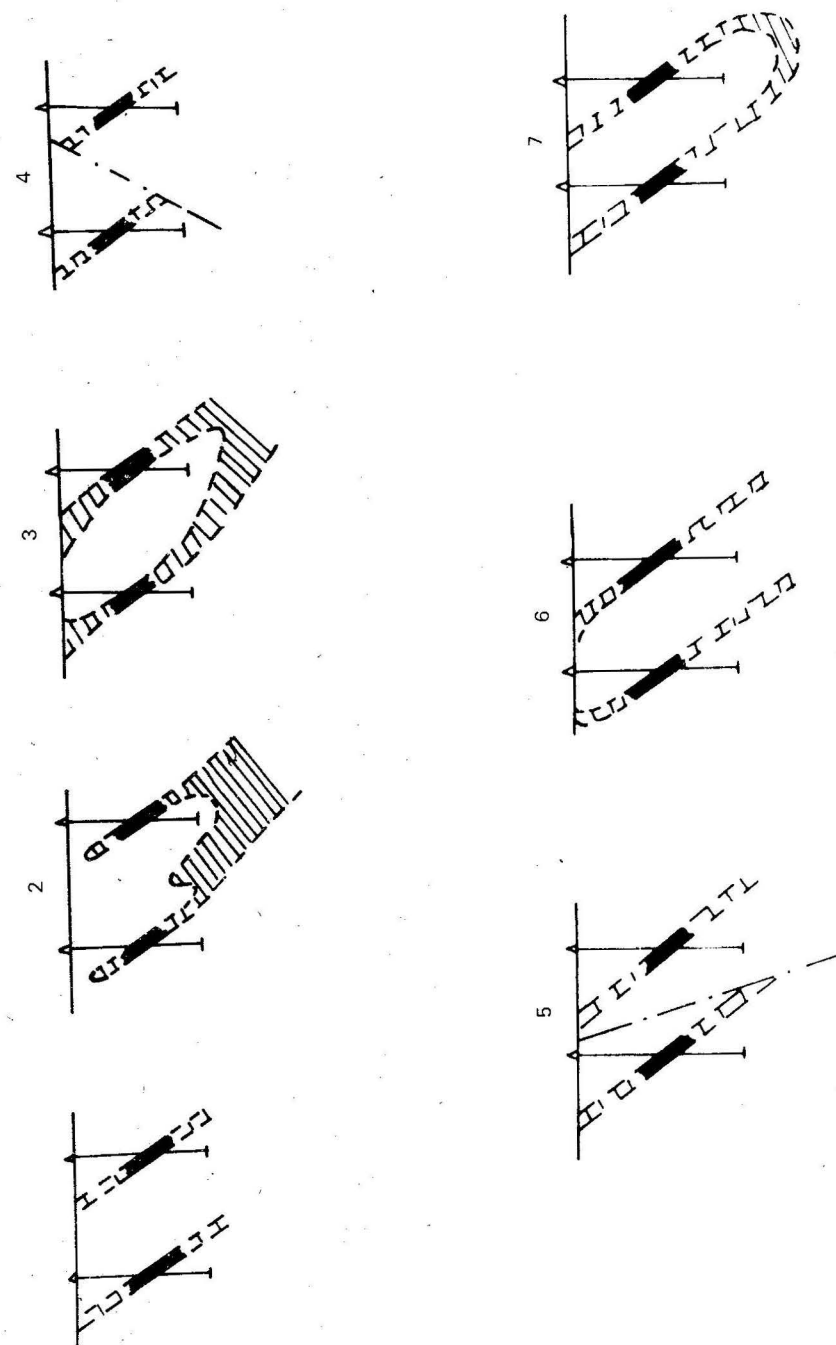


Fig. 2.15 Diferentes variantes para interpretar los datos obtenidos en pozos de perforación contiguos

En la figura 2.14 se muestran las variantes posibles de correlación de dos intervalos mineralizados cortados por el mismo pozo de perforación; la primera variante trata estos intervalos como dos estratos paralelos independientes; la segunda, como un cuerpo potente que contiene la intercalación de roca estéril; la tercera y la cuarta como las apófisis de un cuerpo potente único; la quinta y la sexta, como un estrato separado por la falla; la séptima y la octava, como un estrato plegado. No obstante, una sola de estas variantes es la auténtica y es imposible su selección argumentada, sin utilizar la información suplementaria proporcionada por otros puntos de observación.

Sin embargo, la existencia de numerosos puntos de observación no simplifica mucho el problema. Con la figura 2.15, se ha querido mostrar que el comportamiento de un solo cuerpo mineral entre dos cruces de prospección contiguos puede explicarse de diferente manera.

Al explorar cualquier yacimiento de minerales útiles, se deben correlacionar en un modelo, sin contradicciones, los datos reales obtenidos en numerosos labores de prospección, en cada uno de los cuales se encuentra con frecuencia más de un intervalo menífero. En esos casos son posibles varias variantes del modelo pronóstico del objeto y muy a menudo no se puede argumentar de manera definitiva qué modelo tiene mayor correspondencia con la realidad; esto se esclarecerá solo después de explorar todo el yacimiento o su mayor parte.

En la actualidad, el problema de la autenticidad del pronóstico geológico pierde ya su sentido práctico. Al ser así, la selección de la mejor variante del modelo geológico exige, no solo los conocimientos y experiencia necesarios, sino también la intuición que nace de esta experiencia. Hay que admitir que la intuición transforma, hasta cierto punto, los pronósticos geológicos en obras de arte, y les atribuye al mismo tiempo algunos elementos subjetivos.

En esto reside la desventaja principal del análisis geológico de la variabilidad de los yacimientos minerales desde el punto de vista científico.

A pesar de dicha desventaja, cada pronóstico de la variabilidad de los parámetros del yacimiento mineral, debe partir del pronóstico geológico. Solo después de elaborar un modelo geológico satisfactorio del objeto, se pueden aplicar los métodos matemáticos para el estudio de la variabilidad, por cuanto este mismo modelo determina la subdivisión del yacimiento o cuerpo en bloques con diferentes tipos de variabilidad, que deben investigarse por separado. Si esto no se tiene en cuenta, el análisis de la variabilidad no considerará los desplazamientos tectónicos de los cuerpos minerales, su zonalidad primaria o secundaria, las alteraciones epigenéticas y otras particularidades geológicas del objeto a estudiar, lo cual falseará los resultados.

2.4 Fundamentos matemáticos

La aplicación de los métodos matemáticos en los trabajos de búsqueda y exploración, no es un procedimiento nuevo.

Los métodos de generalización de los datos reales, aunque sean muy sencillos, como por ejemplo el cálculo del valor promedio de la potencia del cuerpo mineral o del contenido del componente útil, se basan en la matemática y representan el primer paso en la vía del análisis matemático de la variabilidad de dichos parámetros. Lo mismo se aplica, con mayor razón, al cálculo de reservas, cuya esencia consiste en la elaboración de modelos geométricos de los cuerpos minerales y la amplia utilización de los métodos matemáticos. A esto debe añadirse el hecho

de que muchos tipos de análisis geológicos de la variabilidad también utilizan la geometrización de los objetos naturales, o sea, sus métodos matemáticos de representación; es posible comprobar entonces, que la matemática se aplica para resolver las tareas de la búsqueda y exploración, con gran resultado. Sin embargo, aquí no se tratará de estas formas tradicionales de utilización de los métodos matemáticos, ya que sus fundamentos teóricos fueron creados en el comienzo del siglo actual por los científicos rusos V.I. Bauman, S.U. Duborginsky y P.M. Leontovsky y hoy día se imparten, de manera detallada, en los cursos de Geometría minera y Topografía minera, incluso en diversos manuales y libros de consulta correspondientes [22; 42; 43].

Para nuestra asignatura, los métodos matemáticos son más interesantes e importantes en el dominio de la descripción de las propiedades de los objetos geológicos, la sistematización de los datos reales sobre diferentes parámetros geólogo-industriales, la evaluación de la variabilidad de dichos parámetros y la elaboración de los modelos matemáticos pronósticos, tanto del objeto en conjunto como de las variaciones de sus índices en el espacio.

Aunque las primeras tentativas de utilización de la matemática con estos objetivos, datan de la década del treinta del siglo actual, durante los veinte años siguientes la aplicación práctica fue muy poca. En primer lugar esto se explica por el carácter primitivo y bastante limitado de los métodos matemáticos que se aplicaban para estudiar los objetos geológicos, así como también por la complejidad de dichos objetos naturales que generalmente no se podían describir con tales métodos. Solo en los últimos treinta años, han sido notables los progresos, tanto en el perfeccionamiento de los métodos matemáticos aplicables en la geología y exploración de los yacimientos minerales, como en los resultados obtenidos prácticamente.

Además, debe señalarse que en la actualidad los métodos matemáticos se utilizan en la geología para elaborar conceptos y términos precisos y uniformes y determinar las relaciones entre los objetos y fenómenos geológicos; es decir, para formalizar el lenguaje geológico. Esta forma de utilización es totalmente actual y necesaria, porque la mayoría de las propiedades de los objetos geológicos se describen por medio de expresiones lógicas, aunque estas son muy distintas para caracterizar el mismo concepto o la misma particularidad del objeto. Por ejemplo, se determinan de diferente manera conceptos básicos tales como: mineral (39 definiciones), roca (49), formación geológica (63), facie (112), muestreo, reservas del mineral útil, factores de la evaluación geólogo-económica, etc. En esto no se manifiestan éxitos considerables y por eso no resulta racional prestar atención en este texto a los problemas de la formalización del lenguaje geológico.

Hoy día, los métodos matemáticos desempeñan un papel más importante en la discriminación de las áreas (objetos) favorables, desfavorables o sin perspectiva alguna, durante la búsqueda y el estudio de la variabilidad de los objetos geológicos, lo cual sirve como base teórica para escoger los sistemas racionales de exploración y evaluar la autenticidad de los resultados obtenidos.

2.4.1 Propiedades de los objetos geológicos y su posibilidad de información

Se conoce que cada objeto geológico se caracteriza por propiedades diversas, las cuales se revelan durante las diversas fases de su estudio. Una parte de dichas

propiedades se agrupa bajo el nombre de parámetros geólogo-industriales del yacimiento.

Otras propiedades que corresponden a los niveles más detallados de la constitución del objeto son, por ejemplo, la forma de los granos minerales, sus dimensiones y particularidades: el color y la textura de la mena, las propiedades magnéticas o eléctricas del mineral útil, etc. Todas las propiedades se pueden expresar en forma numérica (la potencia del cuerpo mineral es igual a 4,8 m, su ángulo de buzamiento es igual a 52°), o como expresiones lógicas (el cuerpo mineral es potente, su buzamiento es abrupto; la textura de la mena es bandeada).

El tratamiento matemático de las características numéricas de cualquier índice geológico no presenta ninguna dificultad, mientras que las expresiones lógicas tienen que adoptar la forma numérica. Esta operación se llama *formalización* de las expresiones lógicas y se realiza por medio de algunos procedimientos sencillos.

El primer modo, y el más simple, consiste en atribuir la expresión lógica a una clase determinada; esta clase se marca con uno y las ausentes con ceros. Así, este modo permite constatar solamente la presencia o ausencia de alguna propiedad del objeto, sin caracterizar cuantitativamente su grado de manifestación.

Si la clasificación de las expresiones lógicas tiene criterios cuantitativos, para distinguir las clases (por ejemplo, grupos de cuerpos minerales según su potencia o ángulo de buzamiento, grupos de menas en función del contenido del componente útil, etc.), se pueden numerar dichas clases en orden definido, según el crecimiento o la disminución del valor del índice. En este caso, cada expresión lógica recibe el número de la clase correspondiente, lo que asegura la evaluación relativa del grado de manifestación de la propiedad geológica. Este procedimiento también se utiliza con mucha frecuencia para resolver el problema opuesto, o sea, transformar las características numéricas en expresiones lógicas, con el objetivo de sistematizar y generalizar los datos factibles. Dichas clasificaciones, que se basan en el principio de modificación gradual de alguna propiedad (por ejemplo, tamaño de los granos en la mena, sucesión de la estratificación de las rocas, edad relativa de las fallas o rocas magmáticas, etc.) se utilizan ampliamente en la geología y se conocen con el nombre de *escalas de puntos*.

De lo expuesto, se deduce que cualquier propiedad del objeto geológico puede expresarse en la forma numérica conveniente para el tratamiento matemático. Si el número de objetos y sus propiedades es grande, es cómodo presentarlos en forma de tablas (tabla 2.3). Por ejemplo, hay que expresar numéricamente las siguientes propiedades de los filones estanníferos para cinco objetos investigados: potencia del filón (m), su largo según el rumbo (m), ángulo de buzamiento (grado) contenido de estaño (%), presencia de la estannina, estructura de la mena. Las cuatro primeras propiedades, se presentan en forma numérica y se indican directamente en las columnas correspondientes (1, 2, 3, y 4) de la tabla. La presencia o ausencia de la estannina puede expresarse como dos clases de expresiones lógicas, sin precisar su grado de manifestación. Los datos correspondientes se ponen en la columna 5. Las estructuras observadas de la mena requieren la utilización de una escala de puntos con la valoración siguiente: las menas de granos finos, I tipo (un punto); las de granos medios, II tipo (dos puntos); las de granos diversos, desde los finos hasta los grandes, III tipo (tres puntos). Para las estructuras de menas, está destinada la columna 6.

Tabla 2.3
RESULTADOS DE LA OBSERVACIÓN DE LAS PROPIEDADES
DE LOS FILONES ESTANNÍFEROS

Número del objeto geológico	Número de la propiedad	1	2	3	4	5	6
1		1,85	125	65	2,87	0	1
2		2,15	205	80	3,30	0	2
3		1,10	110	70	4,62	1	3
4		2,60	180	75	3,88	0	2
5		1,55	75	60	1,92	1	1

Como regla, para el tratamiento matemático, estas tablas son incómodas y por consiguiente se utilizan las matrices que se confeccionan sobre la base de dichas tablas. Por ejemplo:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}$$

donde:

k - número de propiedades;

n - número de objetos.

En el ejemplo: $X_{11}=1,85$, $X_{1k}=X_{16}=1$, $X_{n1}=1,55$ y $X_{nk}=X_{56}=1$.

Todas las propiedades de los objetos geológicos se vinculan con puntos de observación determinados y, en caso general, no se pueden analizar sin relacionar estos puntos con el sector concreto del objeto geológico, ya que a causa de la variabilidad del cuerpo mineral o yacimiento los valores de estas propiedades en otras partes del objeto serán distintas o no se observarán. Esto quiere decir que las observaciones de las propiedades de los objetos geológicos, deben vincularse con las coordenadas del espacio geológico tridimensional. En este espacio se pueden medir las distancias entre los puntos de observación u objetos geológicos y caracterizar su morfología, dimensiones, posición, estructura interna y composición. Para establecer las relaciones de los objetos desde el punto de vista cronológico, se utiliza el espacio geocronológico monodimensional y para representar e investigar las propiedades de dichos objetos, el espacio de índices. En este último, los valores de las diferentes propiedades de los objetos se colocan según los ejes de coordenadas y en función del número de propiedades que se consideran en conjunto. El espacio de índices puede ser bidimensional, tridimensional o multidimensional; debe notarse que si los dos primeros espacios existen realmente, el índice es imaginable y se utiliza solo para tratar matemáticamente los datos sobre

diversas propiedades de los objetos. Algunas veces también se utiliza la combinación de los espacios mencionados, cuando unos ejes de coordenadas pertenecen al espacio geológico o geocronológico y otros al de índices (por ejemplo, las variaciones de la potencia del cuerpo mineral a lo largo de una galería o dentro del área mineralizada).

Para representar correctamente las propiedades de los objetos en el espacio de índices es muy importante escoger una escala adecuada para cada eje de coordenadas. La aplicación directa de los datos promedio resulta incómoda, porque conforme a la naturaleza de las diferentes propiedades, las escalas según estos ejes serán diferentes. Por esto, se aplican frecuentemente los valores transformados o normalizados de dichas propiedades. El procedimiento corriente es el de trasponer el origen de las coordenadas al centro de gravedad de la nube de puntos, que representa las propiedades del objeto en el espacio de índices, y calcular las relaciones entre las variaciones de estas propiedades desde dicho centro (donde se considera el valor promedio) y su desviación cuadrática media, de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$X_n = \frac{X - \bar{X}}{\sigma_x} \quad (11)$$

donde:

X_n - valor normalizado de la propiedad;

X - valor medido;

\bar{X} - valor promedio;

σ_x - desviación cuadrática media.

La desviación cuadrática media se calcula mediante la conocida fórmula de la estadística matemática:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n}} \quad (12)$$

donde:

n - número de observaciones de la propiedad.

También se puede utilizar otro procedimiento para determinar el valor normalizado de alguna propiedad que se base en la relación entre la diferencia de los valores medido y mínimo (X_{\min}) de la propiedad y la de sus valores máximo (X_{\max}) y mínimo:

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (13)$$

A veces, la escala para el eje de coordenadas del espacio de índices se determina en proporción con la significación o posibilidad de información de las propiedades. Por eso, el estudio de dicha posibilidad de información, o sea, de su papel relativo para caracterizar el objeto geológico, representa una tarea de suma importancia. Los resultados de dicho estudio permiten disminuir el número de propiedades consideradas y en consecuencia facilita su investigación conjunta.

Esto es deseable durante la búsqueda de minerales útiles, cuando un gran número de criterios e índices de búsqueda, no solo complican la discriminación de los objetos favorables y desfavorables, sino también hacen los resultados poco confiables.

Entre los numerosos métodos de determinación de la posibilidad de información de las propiedades de los objetos geológicos, se pueden distinguir dos grupos, que se aplican frecuentemente y se caracterizan por la simplicidad relativa de las operaciones de cálculo:

Métodos basados en el análisis de frecuencia de las propiedades y sus combinaciones.

Métodos basados en el análisis de las distancias generalizadas en el espacio de índices.

El primer grupo comprende los métodos de las frecuencias medias de aparición de la propiedad, la medida informativa de Shenon y la entropía. Todos ellos son aplicables solo en los casos en que la propiedad se manifiesta con una expresión lógica del primer tipo y puede señalarse como presencia o ausencia de la clase correspondiente de expresión.

El método de frecuencias medias de aparición de la propiedad, se utiliza si es necesario escoger los índices más informativos de una sola imagen (por ejemplo, solamente de los objetos favorables); para simplificar la exposición del material, en este capítulo se denominarán *meníferos* a las áreas y objetos favorables y *sin menas* a los que no tienen ninguna perspectiva desde el punto de vista de la búsqueda. La posibilidad de información de cada propiedad (I_i), considerándola independientemente de otras, se determina por su frecuencia de aparición, lo que es totalmente lógico. La fórmula recomendada es la siguiente:

$$I_i = \frac{n_i}{n} \quad (14)$$

donde:

n_i - número de objetos que manifiestan la propiedad i ;

n - número total de objetos investigados de esta imagen.

Sin embargo, tal evaluación de la posibilidad de información, generalmente no es lo suficientemente correcta, ya que las propiedades de los objetos geológicos con mucha frecuencia se relacionan mutuamente en cierta medida. Por consiguiente, las posibilidades de información de dichas propiedades en conjunto sobrepasan la de cada una de ellas calculada por separado. En este caso, muy corriente, es mejor utilizar otra fórmula para determinar la posibilidad de información de alguna propiedad:

$$I_i = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K n_{ij}^2} \quad (15)$$

donde:

K - número de propiedades estudiadas del objeto;

n_{ij} - frecuencia de aparición conjunta de las propiedades i y j .

Después de calcular las posibilidades de información particulares, estas se ordenan en una serie según su disminución, lo cual sirve como base para evaluar la posibilidad de información total de varias propiedades. Para ordenar dicha se-

rie, a la propiedad más informativa se le añaden sucesivamente los otros miembros según la fórmula siguiente:

$$I'_m = \sqrt{\sum_{i=1}^m I_i^2} \quad (16)$$

donde:

I'_m - posibilidad de información total de varias propiedades;
 m - número de propiedades utilizadas.

Para una mejor comprensión se da un ejemplo concreto de aplicación de lo tratado anteriormente.

Ejemplo 1: Se tienen seis objetos meníferos y en cada uno se investigan cinco propiedades. Esto se representa mediante la siguiente matriz:

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Es necesario determinar la posibilidad de información de estas propiedades y escoger las que aseguren la identificación más confiable de los objetos meníferos.

En primer lugar, se calcula la posibilidad de información de cada propiedad, sin tener en cuenta sus correlaciones, mediante la fórmula (14):

$$I_1 = \frac{3}{6} = 0,50; \quad I_2 = \frac{5}{6} = 0,83;$$

$$I_3 = \frac{2}{6} = 0,33; \quad I_4 = \frac{3}{6} = 0,50;$$

$$I_5 = \frac{5}{6} = 0,83$$

A partir de estos resultados, es posible llegar a la conclusión de que la segunda y quinta propiedades tienen la mayor posibilidad de información; el segundo lugar lo ocupan la primera y la cuarta, cuyas posibilidades de información también son equivalentes y la tercera es menos informativa.

A continuación se determina la posibilidad de información de estas propiedades mutuamente vinculadas, utilizando la fórmula (15):

$$I_1 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} (3^2 + 2^2 + 1^2 + 1^2 + 2^2)} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 19} = 0,32$$

$$I_2 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} (2^2 + 5^2 + 2^2 + 3^2 + 4^2)} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 58} = 0,57$$

$$I_3 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} (1^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2 + 1^2)} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 14} = 0,28$$

$$I_4 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} (1^2 + 3^2 + 2^2 + 3^2 + 2^2)} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 27} = 0,39$$

$$I_5 = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} (2^2 + 4^2 + 1^2 + 2^2 + 5^2)} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{1}{5} \cdot 50} = 0,53$$

Si se ordenan las posibilidades de información según su disminución, se obtiene la serie siguiente:

$$I_2=0,57; I_5=0,53; I_4=0,39; I_1=0,32; I_3=0,28$$

Como se puede comprobar fácilmente, la idea sobre las posibilidades de información de las propiedades investigadas se precisó y se ha logrado distinguir las propiedades segunda y quinta, primera y cuarta, desde este punto de vista.

Mediante la fórmula (15), se determina la posibilidad de información total, y se añaden sucesivamente las propiedades menos informativas:

$$I'_1 = I_2 = 0,57$$

$$I'_2 = \sqrt{I_2^2 + I_5^2} = \sqrt{0,57^2 + 0,53^2} = 0,78$$

$$I'_3 = \sqrt{I_2^2 + I_5^2 + I_4^2} = \sqrt{0,57^2 + 0,53^2 + 0,39^2} = 0,88$$

$$I'_4 = \sqrt{I_2^2 + I_5^2 + I_4^2 + I_1^2} = \sqrt{0,57^2 + 0,53^2 + 0,39^2 + 0,32^2} = 0,93$$

$$I'_5 = \sqrt{I_2^2 + I_5^2 + I_4^2 + I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{0,57^2 + 0,53^2 + 0,39^2 + 0,32^2 + 0,28^2} = 0,97$$

Si se considera la posibilidad de información total de las cinco propiedades ($I'_5=0,97$) como 100%, las propiedades más importantes (segunda y quinta) proporcionan el 80% de la posibilidad de información total, y la adición de la cuarta aumenta el resultado hasta 91. Estas dos propiedades son importantes para resolver las tareas de índole práctico en el dominio del agrupamiento de los objetos geológicos y su identificación; las otras dos se pueden excluir del análisis posterior como poco informativas.

La medida informativa de Shenon, basada en la relación de los logaritmos de la probabilidad o frecuencia relativa de observación de la propiedad, se utiliza para evaluar la significación de algunos índices y propiedades, durante la selección de las áreas meníferas. La posibilidad de información de cada propiedad se calcula mediante la fórmula:

$$I_i = \log \frac{\frac{n_i^m}{n^m}}{\frac{S_i}{S}} \quad (17)$$

donde:

n_i^m - número de objetos o áreas meníferas que manifiestan la propiedad i ;

n^m - número total de objetos o áreas meníferas;

S_i - superficie dentro de la cual se manifiesta la propiedad i ;

S - superficie total de los objetos o áreas, tanto meníferos como sin mena.

La posibilidad de información total de algunas propiedades ordenadas en series descendentes, se puede determinar según la fórmula aproximada siguiente:

$$I'_m = \sum_{i=1}^m I_i \quad (18)$$

Como en el método precedente, los cálculos permiten escoger la combinación más informativa de propiedades. La diferencia es que por dicha medida informativa hay que tener dos imágenes distintas, que representen, por una parte, los objetos indudablemente meníferos y por otra los sin mena, unidos con los datos de experimentación.

La entropía E , se utiliza para evaluar la posibilidad de información de las propiedades, en el caso de dos o más imágenes de objetos. Para cada propiedad, esta se determina por la fórmula:

$$E_i = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \log_2 \frac{n_1}{n_1 + n_2} + \frac{n_2}{n_1 + n_2} \log_2 \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (19)$$

donde:

n_1 - número de objetos meníferos con la propiedad i ;

n_2 - número de objetos sin mena con la misma propiedad.

Si $n_1 > n_2$, la propiedad en cuestión brinda la información sobre la existencia de la mineralización y cuando $n_1 < n_2$, indica su ausencia. Si las propiedades se ordenan según el crecimiento del valor absoluto de su entropía, se obtiene la serie descendente de sus posibilidades de información. La entropía mínima de manifestación conjunta de algunas propiedades, es igual a la suma de sus entropías

($E'_m = \sum_{i=1}^m E_i$) y su valor mínimo permite escoger la combinación más informativa de propiedades del objeto geológico.

Los procedimientos que utilizan el análisis de las distancias generalizadas en el espacio de índices, para determinar la posibilidad de información de las propiedades, se pueden aplicar siempre que estas se expresen en forma numérica o como expresiones lógicas formalizadas de cualquier tipo. La condición necesaria es la existencia de dos imágenes separadas: la de los objetos meníferos y la de los objetos sin mena.

Este grupo de procedimientos abarca dos métodos diferentes. El primero fue propuesto por el científico soviético D.A. Rodiónov [35]. Este método es más sencillo, por cuanto considera las propiedades como independientes. Para caracterizar la posibilidad de información de alguna propiedad, se utiliza el cuadrado de la distancia entre los centros de gravedad de las nubes de puntos, correspondientes a los objetos meníferos y sin mena en el espacio de índices. Esta distancia se obtiene mediante los cálculos, según la metodología que se explica a continuación.

En primer lugar, se calculan separadamente los valores promedio de la propiedad que se quiere estudiar, para los objetos meníferos (\bar{X}_i^m) y sin mena (\bar{X}_i^{sm}). Después, se determinan las dispersiones de los valores medidos (σ_{im}^2 , σ_{ism}^2), mediante la fórmula (12) y la dispersión de la diferencia entre los valores promedios de la propiedad σ_i^2 por la fórmula siguiente:

$$\sigma_i^2 = \frac{\sigma_{im}^2}{n_m} + \frac{\sigma_{ism}^2}{n_{sm}} \quad (20)$$

donde:

n_m - número de objetos meníferos;

n_{sm} - número de objetos sin mena.

Los resultados obtenidos permiten utilizar la siguiente expresión, para determinar el cuadrado de la distancia ρ_i^2 entre los centros de gravedad de las nubes de puntos meníferos y sin mena:

$$\rho_i^2 = \frac{(\bar{X}_i^m - \bar{X}_i^{sm})^2}{\sigma_i^2} \quad (21)$$

Mientras aumente el valor de ρ_i^2 , mayor es la posibilidad de información de la propiedad correspondiente. Una vez que los cuadrados de las distancias calculados se ordenan según su disminución, se puede calcular la posibilidad de información total de algunas propiedades, como la variación de la distancia generalizada entre los centros de las nubes (ρ_m^2), por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho_m^2 = \sum_{i=1}^m \rho_i^2 \quad (22)$$

Si se comparan los resultados obtenidos con la posibilidad de información total de todas las propiedades, es fácil seleccionar su combinación más informativa.

El segundo método, que tiene en cuenta la correlación entre las propiedades y por consiguiente es más exacto, fue propuesto por A.V. Garanin. Según este método, que se basa en las matrices de propiedades de los objetos meníferos y sin mena, hay que confeccionar las matrices correspondientes a las desviaciones de cada propiedad de su valor promedio y, después, las de covariación de propiedades. La covariación de dos propiedades i y j ($\text{Cov } X_{ij}$) se calcula por la fórmula:

$$\text{Cov } X_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i) (X_{jk} - \bar{X}_j) \quad (23)$$

donde:

K - número del objeto investigado;

n - número de objetos;

X_{ik}, X_{jk} - valores de las propiedades i y j para el objeto número k ;

\bar{X}_i, \bar{X}_j - valores promedio de dichas propiedades.

Las matrices de covariación resultantes son cuadradas, simétricas y su número de líneas y columnas es igual al número de propiedades analizadas. Estas sirven para calcular los elementos de la matriz de covariación media ponderada ($\text{Cov } \bar{X}_{ij}$) mediante la fórmula:

$$\text{Cov } \bar{X}_{ij} = \frac{\text{Cov } X_{ij}^m}{n_m} + \frac{\text{Cov } X_{ij}^{sm}}{n_{sm}} \quad (24)$$

Sobre la base de dicha matriz media ponderada se construye el sistema de ecuaciones de primer grado, que deben tener el siguiente aspecto:

$$ba_1 + ca_2 + \dots + pa_m = g \quad (25)$$

con valores incógnitos $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$.

El número de incógnitas m , así como el de ecuaciones, es igual al de las propiedades investigadas; los coeficientes, junto a las incógnitas (b, c, \dots, p) son los elementos de la matriz de covariación media ponderada para las propiedades corres-

pondientes. El miembro derecho de la ecuación (g) representa la diferencia entre los valores promedio de la propiedad, que desempeña un papel predominante en esta ecuación, calculados para los objetos meníferos (\bar{X}_i^m) y los sin mena (\bar{X}_i^{sm}).

Una vez resuelto este sistema de ecuaciones, los valores de las incógnitas obtenidos se utilizan para determinar el cuadrado de la distancia generalizada en el espacio de índices, según la fórmula:

$$\rho_m^2 = \sum_{i=1}^m a_i (\bar{X}_i^m - \bar{X}_i^{sm}) \quad (26)$$

Al comienzo del trabajo, este método es análogo al de D.A. Rodiónov, ya que hay que escoger la propiedad más informativa mediante la fórmula (21) y establecer la serie de posibilidades de información de las propiedades, sin considerar su correlación posible. Después, a esta propiedad se le adiciona cada una de las que siguen y, sobre la base de la matriz de covariación media ponderada, se realizan los cálculos necesarios para determinar finalmente la combinación más informativa de dos propiedades con ayuda de la fórmula (26). A esta combinación se añaden sucesivamente las propiedades restantes, para hallar de la misma manera la mejor combinación de las tres propiedades. Así, el método en cuestión requiere un volumen considerable de trabajo de cálculo, sobre todo para resolver los sistemas de ecuaciones con muchas incógnitas. Por este motivo, es más racional realizar estos cálculos con computadoras y programas de cálculo unificados.

A fin de comparar los métodos de D.A. Rodiónov y A.V. Garanin, se analizará un ejemplo.

Ejemplo 2: Hay seis objetos meníferos y siete sin mena; para cada uno se estudian cinco propiedades. Las matrices de estas propiedades son las siguientes:

$$X_{ij}^m = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 3,12 & 2,05 & 5,61 & 4,15 & 1,82 & 3,70 \\ 8 & 14 & 6 & 8 & 12 & 7 \\ 2 & 1 & 2 & 3 & 1 & 3 \\ 0,25 & 0,30 & 0,15 & 0,41 & 0,22 & 0,34 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$X_{ij}^{sm} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 2,02 & 1,69 & 1,12 & 1,93 & 3,01 & 0,58 & 0,01 \\ 15 & 11 & 7 & 10 & 19 & 3 & 8 \\ 1 & 3 & 2 & 2 & 2 & 1 & 3 \\ 0,32 & 0,28 & 0,15 & 0,19 & 0,34 & 0,20 & 0,23 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Se propone determinar la posibilidad de información de dichas propiedades.

En primer lugar, se calculan los valores promedio de las propiedades y se expresan mediante matrices lineales:

$$\bar{X}_i^m = [0,667 \ 3,41 \ 9,17 \ 2 \ 0,278]$$

$$\bar{X}_i^{sm} = [0,571 \ 1,62 \ 10,43 \ 2 \ 0,244]$$

Se determinan las desviaciones de los valores de las propiedades de sus valores promedio y se ordenan en sus matrices correspondientes:

$$(X_i - \bar{X}_i)_n^m = \begin{bmatrix} -0,667 & -0,29 & -1,17 & 0 & -0,028 \\ 0,333 & -1,36 & 4,83 & -1 & 0,022 \\ 0,333 & 2,20 & -3,17 & 0 & -0,028 \\ -0,667 & -0,74 & -1,17 & 1 & 0,132 \\ 0,333 & -1,59 & 2,83 & -1 & -0,058 \\ 0,333 & 0,29 & -2,17 & 1 & 0,062 \end{bmatrix}$$

$$(X - \bar{X})_n^{sm} = \begin{bmatrix} 0,429 & 0,40 & 4,57 & -1 & 0,076 \\ -0,571 & 0,07 & 0,57 & 1 & 0,036 \\ 0,429 & -0,50 & -3,43 & 0 & -0,094 \\ 0,429 & 0,31 & -0,43 & 0 & -0,054 \\ -0,571 & 1,39 & 8,57 & 0 & 0,096 \\ 0,429 & -1,04 & -7,43 & -1 & -0,044 \\ -0,571 & -0,61 & -2,13 & 1 & -0,014 \end{bmatrix}$$

Se obtienen las dispersiones de valores de las propiedades y se presentan en forma de matrices:

$$\sigma_{im}^2 = [0,222 \ 1,65 \ 8,13 \ 0,667 \ 0,0071]$$

$$\sigma_{ism}^2 = [0,245 \ 0,557 \ 23,9 \ 0,571 \ 0,0038]$$

Según la fórmula (20), se calculan las dispersiones de la diferencia de los valores promedio:

$$\sigma_1^2 = \frac{0,222}{6} + \frac{0,245}{7} = 0,072$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1,65}{6} + \frac{0,557}{7} = 0,355$$

$$\sigma_3^2 = [0,072 \ 0,355 \ 4,77 \ 0,193 \ 0,0017]$$

Ahora, es posible hallar los cuadrados de la distancia entre los centros de gravedad de las nubes de puntos meníferos y sin mena, mediante la fórmula (21):

$$\rho_1^2 = \frac{(0,667 - 0,571)^2}{0,072} = 0,128$$

$$\rho_2^2 = \frac{(3,41 - 1,62)^2}{0,355} = 9,051$$

$$\rho_3^2 = \frac{(9,17 - 10,43)^2}{4,77} = 0,333$$

$$\rho_4^2 = [0,128 \ 9,051 \ 0,333 \ 0,000 \ 0,680]$$

Como puede apreciarse, la segunda propiedad es la más informativa. Después, en orden descendente se encuentran la quinta, la tercera y la primera. También resultó que la cuarta no brinda ninguna información útil. Según la fórmula (22), se tienen las siguientes posibilidades de información de las combinaciones de estas propiedades:

$$\rho_m^2 = [9,051 \ 9,731 \ 10,064 \ 10,192]$$

Si se consideran los valores obtenidos, es posible llegar a la conclusión de que la combinación de la segunda y la quinta propiedades, tiene una posibilidad de información máxima que constituye 95,5% de la total. Al añadir la tercera propiedad, es posible aumentar la posibilidad de información de la combinación hasta 98,7%. Por lo tanto, la utilización de la primera propiedad se considera irracional. Estos son los resultados, según el método de D.A. Rodiónov.

Ahora se procede, conforme a las recomendaciones de A.V. Garanin. Se calculan las matrices de covariación de las propiedades de los objetos meníferos y sin mena, según la fórmula (23) y se excluye, como es lógico, la cuarta propiedad.

$$\text{Cov } X_{ij}^m = \begin{bmatrix} 0,222 & -0,0756 & 0,406 & -0,0172 \\ -0,0756 & 1,65 & -3,21 & -0,0159 \\ 0,406 & -3,21 & 8,13 & 0,0153 \\ -0,0172 & -0,0159 & 0,0153 & 0,0071 \end{bmatrix}$$

$$\text{Cov } X_{ij}^{sm} = \begin{bmatrix} 0,245 & -0,120 & -0,959 & -0,0167 \\ -0,120 & 0,557 & 3,51 & 0,0358 \\ -0,959 & 3,51 & 23,9 & 0,271 \\ -0,0167 & 0,0358 & 0,271 & 0,0038 \end{bmatrix}$$

Mediante la fórmula (24), se determinan los elementos de la matriz de covariación media ponderada:

$$\overline{\text{Cov } X_{ij}} = \begin{bmatrix} 0,072 & -0,0297 & -0,0694 & -0,00526 \\ -0,0297 & 0,355 & -0,0034 & 0,00246 \\ -0,0694 & -0,034 & 4,77 & 0,0413 \\ -0,00526 & 0,00246 & 0,0413 & 0,00172 \end{bmatrix}$$

Como la segunda propiedad es mas informativa, se comienza a añadir las otras por separado, para evaluar su posibilidad de información conjunta. Así, para la primera y segunda propiedades, los elementos correspondientes de la matriz media ponderada, son los que siguen:

$$\overline{\text{Cov } X_{12}} = \begin{bmatrix} 0,072 & -0,0297 \\ -0,0297 & 0,355 \end{bmatrix}$$

Se construyen las ecuaciones necesarias según la expresión (25):

$$\begin{aligned} 0,072a_1 - 0,0297a_2 &= 0,667 - 0,571 \\ -0,0297a_1 + 0,355a_2 &= 3,41 - 1,62 \end{aligned}$$

La solución de este sistema es $a_1=3,54$ y $a_2=5,34$. Según la fórmula (26) el cuadrado de la distancia generalizada en el espacio de índices es:

$$\rho_{12}^2 = 3,54 (0,667 - 0,571) + 5,34 (3,41 - 1,62) = 9,90$$

De manera análoga se determina este valor para otras dos combinaciones posibles. Los resultados de los cálculos son los siguientes:

$$\rho_{23}^2 = 9,28 \quad \rho_{25}^2 = 9,30$$

La combinación más informativa es la de la segunda y primera propiedades; deben añadirse las restantes para revelar la combinación más informativa de tres propiedades. Por ejemplo, para la segunda, primera y tercera propiedades, los elementos de la matriz de covariación media ponderada, son los siguientes:

$$\overline{\text{Cov}}_{ij} = \begin{bmatrix} 0,072 & -0,297 & -0,0694 \\ -0,0297 & 0,355 & -0,034 \\ -0,0694 & -0,034 & 4,77 \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones tiene el siguiente aspecto:

$$\begin{aligned} 0,072 a_1 - 0,0297 a_2 - 0,0694 a_3 &= 0,667 - 0,571 \\ -0,0297 a_1 + 0,355 a_2 - 0,034 a_3 &= 3,41 - 1,62 \\ -0,0694 a_1 - 0,034 a_2 + 4,77 a_3 &= 8,13 - 10,43 \end{aligned}$$

De donde los valores de las incógnitas son:

$$a_1 = 3,37 \quad a_2 = 5,31 \quad a_3 = 0,18$$

y el cuadrado de la distancia generalizada en el espacio de índices es:

$$\rho_{123}^2 = 3,37 (0,667 - 0,571) + 5,31 (3,41 - 1,62) - 0,18 (8,13 - 10,43) = 10,06$$

El segundo valor de este parámetro que se obtiene análogamente es igual a $\rho_{215}^2 = 10,44$.

Es posible comprobar que la combinación más informativa es la de la segunda, primera y quinta propiedades, aunque al añadir la quinta, el crecimiento de la posibilidad de información es pequeño. Por esta razón, prácticamente es posible limitarse a utilizar estas tres propiedades en lugar de las cinco iniciales y para obtener una solución aproximada de la tarea, dos propiedades (primera y segunda) son más que suficientes. Así, estas conclusiones, que tienen en cuenta la correlación entre las propiedades, se diferencian esencialmente de las que se basan en las posibilidades de información individuales de estas propiedades, consideradas como independientes, lo que justifica la aplicación de cálculos matemáticos más complicados.

2.4.2 Discriminación de las áreas y objetos favorables

Cualquier tratamiento matemático de los datos geológicos consiste en plantear la tarea y resolverla. La primera parte es más difícil, por cuanto necesita la ela-

boración de los modelos geológicos y matemáticos correspondientes del objeto estudiado. En los estadios de búsqueda, los métodos matemáticos se utilizan principalmente para lograr dos objetivos:

Escoger las áreas favorables para la búsqueda de minerales útiles.

Evaluar las anomalías y manifestaciones reveladas.

Las dos tareas son semejantes desde el punto de vista de su planteamiento matemático y se resuelven por las mismas vías.

La primera requiere para su solución la existencia de información previa, acerca de algunas áreas seguramente meníferas, donde ya se conocen yacimientos industriales, y acerca de las sin mena, dentro de las cuales dichos yacimientos están ausentes y su revelación posterior es improbable. Esta información la proporcionan los criterios de búsqueda ya estudiados, así como los índices de búsqueda, que se tratarán posteriormente.

Como es natural, las propiedades que caracterizan las áreas, tanto meníferas como sin mena, tienen que ser formalizadas y deben representarse en forma de matrices con el siguiente aspecto:

$$X_{ij}^m = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}$$

$$X_{ij}^{sm} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1k} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nk} \end{bmatrix}$$

El número de propiedades k , que se utiliza para resolver esta tarea, se determina sobre la base del análisis de su posibilidad de información. Al realizar el análisis por una de las vías tratadas en el tema precedente, es posible, como se conoce, seleccionar la combinación más informativa de propiedades, con un número mínimo de estas.

De manera análoga, se confeccionan las matrices iniciales de las propiedades para los objetos meníferos y sin mena, sobre la base de la investigación de las propiedades, las anomalías y las manifestaciones indudablemente industriales, teniendo en cuenta, desde luego, la posibilidad de información de dichas propiedades y sus combinaciones.

La solución de esta tarea consiste en revelar algún índice numérico que pueda caracterizar, sin equivocación, cada grupo de objetos ya conocidos y después determinar el valor de dicho índice para cada objeto de experimentación (más raramente para todo el grupo de dichos objetos). La comparación de este valor con

las características para los objetos meníferos y sin mena, permite identificar el conjunto al cual pertenece el objeto de experimentación.

Este tipo de tarea se conoce en las matemáticas como *discriminación de imágenes*. En el caso de utilización de la distancia en el espacio de índices, la esencia de dicha tarea consiste en separar las nubes de puntos que corresponden a los objetos meníferos y sin mena por medio de una línea (espacio bidimensional), como aparece en la figura 2.16, o superficie compleja (espacio multidimensional). Al hacerlo, las imágenes de los objetos meníferos y sin mena se ubican dentro de diferentes sectores del espacio, y resta solo verificar en cuál de estos sectores se encontrará el punto que corresponde al objeto de experimentación. También es posible utilizar otros métodos de solución de esta tarea, mediante las distancias desde el punto que representa el objeto de experimentación hasta las nubes de puntos correspondientes a los objetos meníferos y sin mena.

Además, la discriminación de las imágenes se puede realizar sobre la base del análisis de frecuencia de las propiedades, utilizando la frecuencia de aparición de dichas propiedades como la medida informativa de Shenon o la entropía.

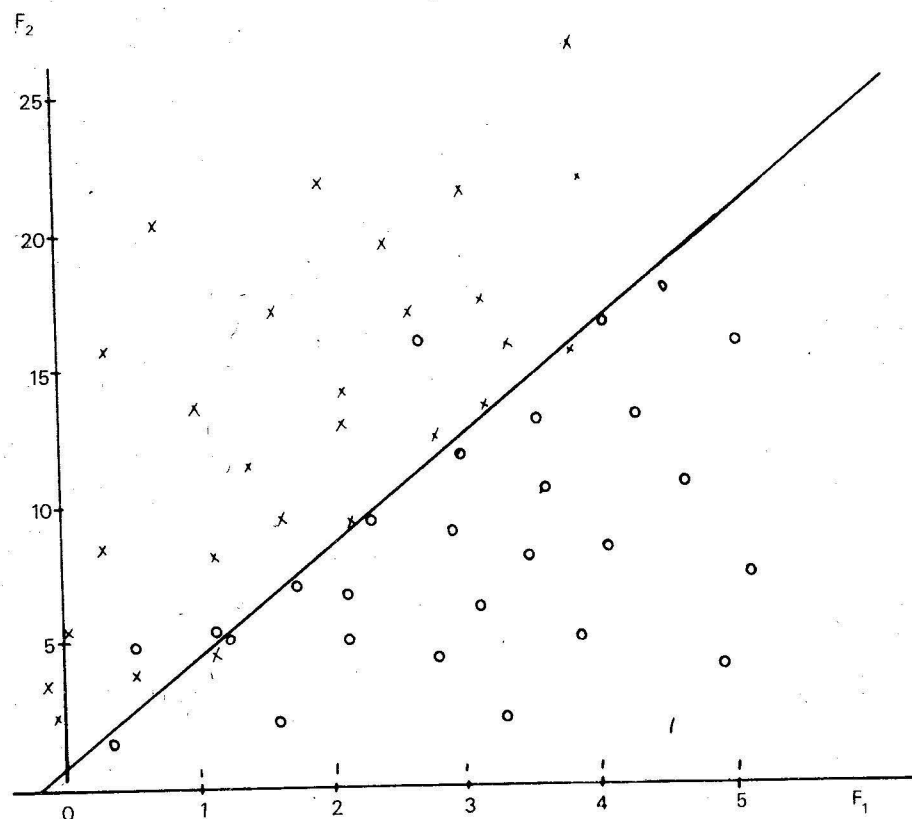


Fig. 2.16 Delimitación de las áreas correspondientes a los objetos meníferos (puntos) y sin mena (cruces) con ayuda del plano (línea) discriminante

El análisis de frecuencia es más sencillo cuando solo se comprueba la presencia o ausencia de cada propiedad para cada objeto investigado. En este caso, conforme a la metodología propuesta anteriormente, hay que establecer las propiedades más informativas de los objetos meníferos y sin mena. Una vez escogida la combinación más informativa de propiedades, se comienzan los cálculos de la posibilidad de información total de cada objeto (tanto menífero como sin mena) por separado, mediante la fórmula (16) y se tiene en cuenta la presencia o ausencia de la propiedad correspondiente para dichos objetos. Esta operación tiene como resultado dos matrices de posibilidad de información para dos imágenes de objetos. Si se aplica el mismo procedimiento se determina la posibilidad de información total del objeto de experimentación, a partir de dos suposiciones posibles (objeto menífero o sin mena). La comparación de esta posibilidad de información con las matrices arriba mencionadas permite decidir si el objeto es menífero o sin mena.

La utilización del método en cuestión se puede aclarar por medio de un ejemplo.

Ejemplo 3: Se tienen seis objetos meníferos y seis sin mena, cada uno de los cuales se caracteriza por cuatro propiedades. Los resultados del estudio de dichos objetos, así como los de tres objetos de experimentación, se representan en las matrices siguientes:

$$X_{ij}^m = \begin{bmatrix} 0110 \\ 1011 \\ 0010 \\ 0011 \\ 0101 \\ 1001 \end{bmatrix} \quad X_{ij}^{sm} = \begin{bmatrix} 0100 \\ 1101 \\ 0111 \\ 1010 \\ 1110 \\ 1000 \end{bmatrix} \quad X_{ij}^e = \begin{bmatrix} 0001 \\ 1100 \\ 1111 \end{bmatrix}$$

Se requiere determinar la pertenencia de los objetos de experimentación al conjunto de objetos meníferos o sin mena.

En primer lugar, se debe determinar la posibilidad de información de las propiedades según la fórmula (15) para cada conjunto de objetos investigados. El resultado se expresa con las dos matrices siguientes:

$$I_i^m = [0,25 \ 0,20 \ 0,39 \ 0,42]$$

$$I_i^{sm} = [0,42 \ 0,44 \ 0,35 \ 0,26]$$

La fórmula (16) permite calcular la posibilidad de información total de cada objeto y da como resultado las cuatro matrices siguientes:

$$I_m^m = \begin{bmatrix} 0,40 \\ 0,63 \\ 0,39 \\ 0,57 \\ 0,47 \\ 0,49 \end{bmatrix} \quad I_m^{sm} = \begin{bmatrix} 0,44 \\ 0,61 \\ 0,56 \\ 0,55 \\ 0,70 \\ 0,42 \end{bmatrix} \quad I_m^e = \begin{bmatrix} 0,42 \\ 0,32 \\ 0,66 \end{bmatrix} \quad I_m^c = \begin{bmatrix} 0,26 \\ 0,61 \\ 0,74 \end{bmatrix}$$

Aquí I_m^e corresponde a las posibilidades de información totales de los objetos de experimentación calculados a partir de la suposición de que ellos pertenecen al conjunto menífero, mientras que I_m^c corresponde a las calculadas sobre la base de la idea opuesta.

Tabla 2.4

ÍNDICES COMPLEJOS DE LOS OBJETOS

Número de índices complejos		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
Objetos meniferos	Propiedades														
	4	-	1	-	0	1	1	1	0	1	1	1			
	3	-	-	1	-	-	-	0	1	1	0	1			
	2	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0			
	1	0	-	0	0	0	1	0	0	1	-	-			
Número de índices complejos		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Objetos sin mena	Propiedades														
	4	-	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	3	-	-	0	0	1	-	-	0	0	0	0	1	1	
	2	1	-	-	1	1	1	0	-	-	0	1	-	1	1
	1	1	1	-	1	1	1	1	0	1	-	-	1	-	1

Si se comparan las matrices de los objetos de experimentación con las de los conocidos, es posible concluir que el primer objeto de experimentación es menifero sin ninguna duda, por cuanto su posibilidad de información, según esta suposición, corresponde a la matriz de objetos meniferos y la suposición opuesta no se confirma. De la misma forma, el segundo objeto se considera sin mena. En cuanto al tercero, el juicio definitivo no se obtiene, porque sus posibilidades de información, a partir de ambas suposiciones, no corresponden a ninguna de las variantes posibles. En casos semejantes se utilizan los llamados *índices complejos*, que representan combinaciones de dos, tres y más propiedades, y son típicos solo para los objetos meniferos o solo para los sin mena. Para el ejemplo en cuestión, todos los índices complejos posibles se indican en la tabla 2.4.

Según esta tabla, es posible establecer que al primer objeto de experimentación corresponden cuatro índices complejos de objetos meniferos (2, 5, 7 y 10) y ninguno de los sin mena, pues su carácter menifero no ofrece ninguna duda. El segundo objeto muestra tres índices complejos de objetos sin mena (12, 15 y 17) y ninguno de los meniferos, lo que confirma su naturaleza desfavorable. El tercero tiene tres índices complejos que lo caracterizan como desfavorable (16, 24 y 25) y uno solo que sugiere la idea de su carácter menifero (9). Por lo tanto, este objeto se puede considerar como sin mena con una posibilidad de 75% (3:1).

La aplicación de la medida informativa de Shenon es bastante sencilla. Se trata de calcular, mediante las fórmulas apropiadas, la posibilidad de información total de algunas propiedades. Esta posibilidad de información aumenta a medida que la existencia de la meniferación dentro del área a estudiar se hace más probable. La probabilidad del hecho de que el área pertenezca a las meniferas $\left(\frac{n_i^m}{n^m}\right)$ puede deducirse a partir de la fórmula (17) y se representa con la expresión siguiente:

$$\log \frac{n_i^m}{n^m} = I_m - \log \frac{S_i}{S} \quad (27)$$

Para determinar el tipo de objeto también se puede utilizar su entropía total. Si esta disminuye, la probabilidad de pertenencia del objeto a una de las imágenes conocidas aumenta. Además del valor de la entropía total, hay que tener en cuenta la proporción de las frecuencias de aparición de una propiedad determinada para los objetos meniferos y sin mena.

La discriminación de los objetos meniferos y sin mena por medio de las distancias entre los puntos de los objetos de experimentación y las nubes de puntos que representan las imágenes correspondientes en el espacio de índices se conoce como utilización de las funciones de potencial. Uno de los métodos de este grupo propone calcular la distancia media desde el punto hasta la nube correspondiente (ρ), o sea, su potencial, mediante las fórmulas siguientes:

$$\rho_j = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{X_{ij}^m - X_i^e}{X_i^{\max} - X_i^{\min}} \right)^2} \quad (28)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_j \quad (29)$$

donde:

- p_j - distancia desde el punto hasta la nube calculada para el objeto j ;
- X_{ij}^m - valor de la propiedad i para el objeto número j de la nube de puntos meníferos;
- X_i^e - valor de la misma propiedad para el objeto de experimentación;
- X_i^{\max} y X_i^{\min} - valores máximo y mínimo de esta propiedad para el conjunto de objetos meníferos;
- n - número de objetos meníferos que componen la nube;
- k - número de propiedades utilizadas.

De la misma forma se calcula la distancia media desde este punto hasta la nube de puntos que representa los objetos sin mena. La comparación de estos valores (\bar{p}_m y \bar{p}_{sm}) permite escoger la nube a la cual se aproxima más el objeto de experimentación, pero no asegura la evaluación cuantitativa de la discriminación de imágenes realizadas. No obstante, dicho método es bastante sencillo y rápido, y se recomienda para resolver de manera aproximada la tarea de selección de los objetos favorables. Su aplicación será más comprensible después de analizar el siguiente ejemplo.

Ejemplo 4: Se tienen seis objetos meníferos, seis sin mena y dos de experimentación, cuyas propiedades se dan en las matrices siguientes:

$$X_{ij}^m = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 4,4 \\ 1 & 1 & 0,5 \\ 3 & 1 & 2,8 \\ 2 & 0 & 0,3 \\ 1 & 1 & 1,6 \\ 2 & 0 & 3,1 \end{bmatrix} \quad X_{ij}^{sm} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2,3 \\ 1 & 0 & 1,2 \\ 2 & 1 & -2,5 \\ 1 & 0 & 0,6 \\ 3 & 0 & 1,1 \\ 1 & 1 & -0,4 \end{bmatrix} \quad X_{ij}^e = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3,2 \\ 1 & 0 & 1,1 \end{bmatrix}$$

Se confeccionan las matrices de valores máximos y mínimos de estas propiedades para cada imagen:

$$X_i^{m\max} = [3 \ 1 \ 4,4]; \quad X_i^{m\min} = [1 \ 0 \ -0,3] \\ X_i^{sm\max} = [3 \ 1 \ 2,3]; \quad X_i^{sm\min} = [1 \ 0 \ -2,5]$$

Según la fórmula (28) se calcula la distancia desde el punto que corresponde al primer objeto de experimentación hasta el primer punto de la nube menífera:

$$p_1^m = \sqrt{\frac{(2-2)^2}{(3-1)} + \frac{(0-1)^2}{(1-0)} + \left[\frac{4,4-3,2}{4,4-(-0,3)} \right]^2} = 1,06$$

Por cálculos análogos se obtienen otras distancias para este objeto, tanto hasta los puntos de dicha nube como hasta los de la nube de objetos sin mena:

$$p_2^m = 0,76; \quad p_3^m = 0,51; \quad p_4^m = 1,26; \quad p_5^m = 0,60; \quad p_6^m = 1,00; \\ p_1^{sm} = 0,53; \quad p_2^{sm} = 1,19; \quad p_3^{sm} = 1,19; \quad p_4^{sm} = 1,25; \quad p_5^{sm} = 1,20; \quad p_6^{sm} = 0,92$$

Las distancias medias se obtienen con ayuda de la fórmula (29) y son iguales a $\bar{p}^m = 0,82$ y $\bar{p}^{sm} = 1,05$.

De esta forma, el objeto de experimentación se sitúa más cerca de la nube del conjunto menífero y debe considerarse como tal.

Para el segundo objeto de experimentación se tiene que $\bar{p}^m = 0,95$ y $\bar{p}^{sm} = 0,76$ y, de acuerdo con esto, su naturaleza corresponde a los objetos sin mena.

Hay que señalar que la aplicación de las funciones de potencial para discriminar las imágenes, parte de la suposición de que las nubes de puntos correspondientes están bien delimitadas en el espacio de índices. Sin embargo, en la realidad, dichas nubes pueden aproximarse o hasta superponerse, por lo que el método no garantiza una solución acertada.

Los mejores resultados se obtienen al separar el espacio de índices en dos subespacios: menífero y sin mena, por cuanto la inclusión del punto del objeto de experimentación en uno de estos, hace fácil la identificación de su naturaleza.

Una de las formas más corrientes de separación del espacio de índices es el análisis discriminante. Su esencia consiste en disponer la superficie que separa los subespacios (en el caso más sencillo esta superficie es plana) de manera tal que el porcentaje mínimo de objetos investigados se encuentre en la zona ajena, con lo cual se alcanza un error mínimo posible de la discriminación de imágenes.

La forma general de la ecuación de este plano discriminante es la siguiente:

$$\sum_{i=1}^k a_i X_i - b = 0 \quad (30)$$

donde:

a_i - coeficientes determinados mediante la solución del sistema de ecuaciones lineales (25);

b - distancia desde el origen de coordenadas hasta el plano discriminante.

La distancia b se obtiene al resolver la ecuación:

$$\left(\frac{b - \bar{p}_m}{\sigma_m} \right) - 2 \ln \frac{n_m}{\sigma_m} = \left(\frac{b - \bar{p}_{sm}}{\sigma_{sm}} \right) - 2 \ln \frac{n_{sm}}{\sigma_{sm}} \quad (31)$$

donde:

\bar{p}_m y \bar{p}_{sm} - valores promedio de las desviaciones de los puntos que corresponden a los objetos meníferos y sin mena desde el plano discriminante;

σ_m y σ_{sm} - desviaciones cuadráticas medias correspondientes;

n_m y n_{sm} - número de objetos meníferos y sin mena.

Para cada objeto independiente, la desviación de su punto en el espacio de índices desde el plano discriminante (p_j), se determina por la expresión siguiente:

$$p_j = \sum_{i=1}^k a_i X_{ij} \quad (32)$$

Al transferir el plano discriminante al origen de coordenadas, es posible lograr que las desviaciones de los puntos desde dicho plano sean positivas para un conjunto de objetos, y negativas para el otro. Por eso, el signo de estas desviaciones reducidas, que se denominan discriminantes (D_j) da la idea exacta sobre la naturaleza del objeto. La fórmula para calcular la discriminante es la siguiente:

$$D_j = p_j - b \quad (33)$$

Como regla, esta tarea se resuelve de manera que los objetos meníferos tengan discriminantes positivas y los sin mena, negativas.

Para aclarar lo expuesto se discriminarán las imágenes, por este método, sobre la base de los datos iniciales del ejemplo 2 de este capítulo.

Como fue establecido en este ejemplo, las propiedades más informativas de los objetos son la primera, la segunda y la quinta. De acuerdo con esto, se confeccionan las matrices de valores de estas propiedades, sus valores promedio y elementos correspondientes de la covariación media ponderada de dichas propiedades:

$$X_{ij}^m = \begin{bmatrix} 0 & 3,12 & 0,25 \\ 1 & 2,05 & 0,30 \\ 1 & 5,61 & 0,15 \\ 0 & 4,15 & 0,41 \\ 1 & 1,82 & 0,22 \\ 1 & 3,70 & 0,34 \end{bmatrix} \quad X_{ij}^{sm} = \begin{bmatrix} 1 & 2,02 & 0,32 \\ 0 & 1,69 & 0,28 \\ 1 & 1,12 & 0,15 \\ 1 & 1,93 & 0,19 \\ 0 & 3,01 & 0,34 \\ 1 & 0,58 & 0,20 \\ 0 & 1,01 & 0,23 \end{bmatrix}$$

$$X_i^m = [0,667 \ 3,41 \ 0,278] \quad X_i^{sm} = [0,571 \ 1,62 \ 0,244]$$

$$\text{Cov } \bar{X}_{ij} = \begin{bmatrix} 0,072 & -0,0297 & -0,00526 \\ -0,0297 & 0,355 & 0,00246 \\ -0,00526 & 0,00246 & 0,00172 \end{bmatrix}$$

El sistema de ecuaciones tiene el siguiente aspecto:

$$\begin{aligned} 0,072a_1 - 0,0297a_2 - 0,00526a_3 &= 0,667 - 0,571 \\ -0,0297a_1 + 0,355a_2 + 0,00246a_3 &= 3,41 - 1,62 \\ -0,00526a_1 + 0,00246a_2 + 0,00172a_3 &= 0,278 - 0,244 \end{aligned}$$

Su solución proporciona los resultados siguientes:

$$a_1 = 4,52 \quad a_2 = 5,33 \quad a_3 = 13,55$$

Mediante la fórmula (32) se calculan las desviaciones de los puntos desde el plano discriminante. Por ejemplo, para el primer objeto menífero:

$$p_1^m = 4,52 \cdot 0 + 5,33 \cdot 3,12 + 13,55 \cdot 0,25 = 50,5$$

Análogamente se obtiene:

$$\begin{aligned} p_2^m &= 19,7 & p_3^m &= 37,0 & p_4^m &= 28,1 \\ p_5^m &= 17,4 & p_6^m &= 29,1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_1^{sm} &= 19,6 & p_2^{sm} &= 12,8 & p_3^{sm} &= 12,5 \\ p_4^{sm} &= 17,4 & p_5^{sm} &= 20,7 & p_6^{sm} &= 9,3 \\ p_7^{sm} &= 8,5 \end{aligned}$$

Los valores promedio correspondientes son $\bar{p}^m = 30,3$ y $\bar{p}^{sm} = 14,4$.

Sobre esa base, es posible calcular las desviaciones cuadráticas medias para cada nube de puntos:

$$\sigma_m = 11,95 \quad \sigma_{sm} = 4,51$$

Se construye la ecuación (31) para determinar el valor b :

$$\left(\frac{b-30,3}{11,95} \right)^2 - 2 \ln \frac{6}{11,95} = \left(\frac{b-14,4}{4,51} \right)^2 - 2 \ln \frac{7}{4,51}$$

Simplificando:

$$\begin{aligned} \frac{b^2 - 60,6b + 918,08}{143,3} - 2 \ln 0,501 &= \frac{b^2 - 28,8b + 207,36}{20,4} - 2 \ln 1,552 \\ \frac{b^2 - 60,6b + 918,08 - 2,1433(-0,693)}{143,3} &= \\ = \frac{7,02b^2 - 202,2b + 1455,67 - 2,1433 \cdot 0,440}{143,3} \end{aligned}$$

$$6,02b^2 - 141,6b + 212,88 = 0$$

$$b^2 - 23,5b + 35,36 = 0$$

$$b_{1,2} = \frac{23,5}{2} \pm \sqrt{\frac{23,5^2}{4} - 35,36} = 11,75 \pm 10,02$$

$$b_1 = 21,77 \quad b_2 = 1,73$$

Una de las raíces de esta ecuación ($b_1 = 21,77$) es válida y permite separar los objetos meníferos de los sin mena por los signos de sus discriminantes; la otra ($b_2 = 1,73$) es falsa y no puede asegurar la discriminación de los objetos en cuestión. Por lo tanto, se calculan las discriminantes según la fórmula (33) para $b_1 = 21,77$ y se presentan los resultados en forma de matrices:

$$\begin{aligned} D_j^m &= [28,7 \ -2,1 \ 15,2 \ 6,4 \ -4,4 \ 7,3] \\ D_j^{sm} &= [-2,2 \ -9,0 \ -9,3 \ -4,4 \ -1,1 \ -12,5 \ -13,3] \end{aligned}$$

Como puede observarse, solo en dos de los trece casos posibles, el signo de la discriminante no corresponde a la pertenencia del objeto, es decir, la certeza de la discriminación de las imágenes es igual a $11/13 = 0,845$. Al mismo tiempo, todos los objetos con discriminantes positivas son meníferos y la probabilidad de esto es de 100%. Para los que tienen la discriminante negativa, la probabilidad de su correcta identificación es menor y corresponde a 85%.

Si se tienen dos objetos de experimentación, para los cuales se conocen las mismas propiedades, dadas en la matriz siguiente:

$$X_{ij}^e = \begin{bmatrix} 1 & 2,68 & 0,30 \\ 1 & 1,76 & 0,17 \end{bmatrix}$$

Para establecer su pertenencia a los objetos meníferos o sin mena, se calculan según la fórmula (32): $p_1^e = 22,9$ y $p_2^e = 16,2$ y después, mediante la fórmula (33): $D_1^e = 1,1$ y $D_2^e = 5,6$.

El primer objeto es menífero sin duda alguna y el segundo pertenece a los sin mena con una probabilidad de 85%.

Como conclusión, debe señalarse que todos los métodos de solución de la tarea de discriminación de las imágenes se pueden aplicar con éxito, no solo para separar los objetos meníferos de los sin mena, sino también para elaborar diferentes clasificaciones de objetos geológicos, sobre la base de un principio cuantitativo. En efecto, cada subdivisión de cualquier clasificación representa una imagen determinada de tales objetos, que se diferencia de las demás subdivisiones por un conjunto de propiedades.

Es natural entonces, que en las clasificaciones construidas correctamente dichas imágenes se discriminen confiablemente y, por consiguiente, la determinación del tipo de objeto a estudiar, sobre la base de los métodos matemáticos tratados, no debe encontrar ninguna dificultad.

2.4.3 Métodos matemáticos para el estudio y pronóstico de la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales de los yacimientos minerales

Los métodos matemáticos que se aplican hoy día para estudiar y pronosticar la variabilidad de los objetos geológicos son numerosos y diversos. La duración del presente curso y las tareas a él asignadas no permiten exponer todos esos métodos, aunque pueden encontrarse, con suficiente detalle, en manuales, libros de consulta y publicaciones científicas [3; 4; 15; 26; 52]. Por eso, el objetivo es dar solo una idea general sobre las principales vías de solución matemática de este problema, conforme a diferentes tipos de modelos matemáticos de la variabilidad, así como caracterizar los métodos matemáticos concretos más usuales, sus ventajas e insuficiencias y el valor práctico de sus resultados.

Es preciso señalar que los objetos geológicos se pueden calificar como *sistemas naturales mal organizados* [27], lo que es una consecuencia de la complejidad de los procesos geológicos que les han dado origen. Por esta razón, dichos objetos, desde un punto de vista cuantitativo, no se pueden describir exactamente, y, como regla, la relación mutua de sus parámetros no se explica con una ley estricta; en lugar de los objetos, generalmente se emplea un modelo, que representa un resumen de la constitución del objeto geológico o las particularidades del proceso geológico a estudiar. Todo lo referente a los modelos geólogo-geométricos se trató en el epígrafe 2.3, por lo que solo resta pasar revista a los modelos matemáticos, que sería más conveniente llamarlos geólogo-matemáticos, ya que ellos deben elaborarse teniendo en cuenta las particularidades geológicas de los objetos naturales. No obstante, para simplificar la exposición del material, respetando la tradición, de ahora en adelante se utilizará el término *modelos matemáticos*.

Los principios fundamentales que se deben respetar al elaborar dichos modelos son los siguientes:

No se representa como modelo todo el objeto, sino las propiedades que interesan para resolver la tarea concreta planteada.

En el modelo se utilizan no solo los valores reales de esas propiedades, sino también su variabilidad, que se revela a un determinado nivel de estudio.

La gran mayoría de los modelos matemáticos son probabilísticos y no determinados, dada la complejidad de los objetos geológicos y el carácter limitado de los datos reales obtenidos.

La aceptabilidad del modelo matemático se determina por su correspondencia con el tipo de modelo geológico del objeto, que fue elaborado por el geólogo, sobre la base de las observaciones ya realizadas.

Los modelos matemáticos tienen en cuenta, de diferentes formas, la ubicación espacial de los puntos de observación; de acuerdo con esto se pueden agrupar como sigue:

- a) modelos estadísticos;
- b) modelos en diferencias finitas;
- c) modelos basados en las funciones aleatorias.

Modelos estadísticos

Son los más corrientes en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración, y se aplican desde hace mucho tiempo. A su vez, los modelos estadísticos se subdividen en unidimensionales y multidimensionales. En los primeros se trata de generalizar los resultados del estudio de un solo índice del objeto geológico, mientras que los segundos están destinados a esclarecer las relaciones mutuas existentes entre varios índices. Un caso particular de aplicación de los modelos estadísticos multidimensionales es el estudio de la posibilidad de información de los índices y la discriminación de los objetos de diferentes imágenes (ver los epígrafes 2.4.1 y 2.4.2).

La aplicación del modelo estadístico unidimensional se basa en la suposición de que los valores medidos del índice que se estudia son independientes; o sea, no existe ninguna relación entre el valor observado y la posición del punto de observación en el espacio geológico. Lamentablemente, no existen criterios suficientemente seguros para considerar los resultados de los trabajos de búsqueda y exploración como conjunto estadístico. En un caso general se puede pensar que mientras aumenta el grado de variabilidad del índice y disminuye el sector del objeto donde este es más frecuente, el objeto a su vez se aproxima más al concepto de conjunto estadístico, y viceversa. Por ejemplo, la experiencia demuestra que las fórmulas de la estadística matemática dan buenos resultados al aplicarse en el estudio de la variabilidad del contenido del componente útil, en muchos yacimientos primarios (de oro, platino, diamante, metales raros y parcialmente no ferrosos, de mica, etc.), pero son poco confiables si se trata de la variabilidad de la potencia de diferentes depósitos minerales sedimentarios.

En los trabajos de búsqueda y exploración, los modelos estadísticos unidimensionales se utilizan principalmente para evaluar numéricamente determinados índices del objeto o para comprobar diferentes hipótesis. Antes de explicar la metodología concreta de solución de estas tareas, conviene repasar brevemente los conceptos principales de la estadística matemática.

El conjunto de los valores numéricos de cualquier parámetro se denomina *conjunto estadístico*, que puede ser *general*, si abarca el objeto a estudiar en todo su volumen, o *selectivo*; este último se denomina concretamente *selección*. Cada selección estadística tiene como objetivo principal caracterizar correctamente todas las propiedades del conjunto general correspondiente. La selección que resuelve

esta tarea en los límites de precisión establecidos se llama *representativa*. Cuando se trata de conjuntos estadísticos, la mayor representatividad la aseguran las *selecciones casuales*, que se realizan de manera tal que cada miembro del conjunto general tiene igual probabilidad de encontrarse en la selección.

Los resultados del estudio del objeto, según un sistema de perfiles de exploración o de excavaciones mineras que delimitan el bloque de explotación, por lo general no pueden considerarse selección casual y por esta razón las fórmulas de la estadística matemática no aseguran la exactitud necesaria de la evaluación de los datos obtenidos.

Las conclusiones deducidas mediante alguna selección se pueden extender a todo el conjunto general, pero la evaluación del índice, denominado en este caso evaluación selectiva, siempre representa un valor casual y por eso una de las tareas importantes de la estadística matemática es la opción del mejor procedimiento de cálculo y determinación del grado de autenticidad de la evaluación obtenida. Para comprobar la veracidad de las conclusiones acerca de unas u otras regularidades reveladas, se utilizan diferentes hipótesis estadísticas (sobre la correspondencia de las distribuciones empíricas y teóricas, la igualdad de las evaluaciones selectivas, etc.), cuya verosimilitud se analiza a partir de la probabilidad de existencia de dicha regularidad.

Todos los modelos estadísticos tienen como base el concepto de probabilidad del suceso aleatorio, el cual oscila entre cero (suceso imposible) y uno (suceso cierto). Cuando el número de observaciones es grande, la probabilidad se aproxima a la frecuencia relativa, que representa la relación entre el número de apariciones del suceso en la serie de observaciones (es decir, su frecuencia) y el número total de observaciones ejecutadas.

La característica más completa de la variable aleatoria es su función o ley de distribución, que establece la relación entre diferentes valores de la variable aleatoria y sus probabilidades de aparición. Con frecuencia se utilizan las funciones de distribución diferenciales, las cuales caracterizan la probabilidad de que el valor selectivo de la magnitud aleatoria se encuentre en determinado intervalo de sus valores. Las funciones de distribución se distinguen por los valores de sus características numéricas: esperanza matemática, moda, mediana, dispersión, asimetría y exceso.

La *esperanza matemática* M_x de la magnitud aleatoria es el valor promedio de esta y se determina generalmente como la suma de los productos de todos sus valores posibles (X_i) por las probabilidades correspondientes (p_i).

$$M_x = \sum_{i=1}^n X_i p_i \quad (34)$$

donde:

n - número de valores diferentes de la magnitud aleatoria.

En la mayoría de los casos, al realizar los cálculos prácticos la esperanza matemática se reemplaza por el valor promedio del índice (\bar{X}), obtenido sobre la base de los resultados de las observaciones independientes (X_i):

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (35)$$

donde:

n - número de observaciones ejecutadas.

La *moda* (M_0) representa, el valor más probable de la magnitud aleatoria.

Se llama *mediana* al valor de la magnitud aleatoria cuando la probabilidad de encontrar los valores mayores y menores es igual.

En caso de distribuciones simétricas (ley de distribución normal, o distribución de Gauss) estas tres características coinciden, mientras que generalmente (distribución normal logarítmica, binómica y otros) sus valores son diferentes (fig. 2.17).

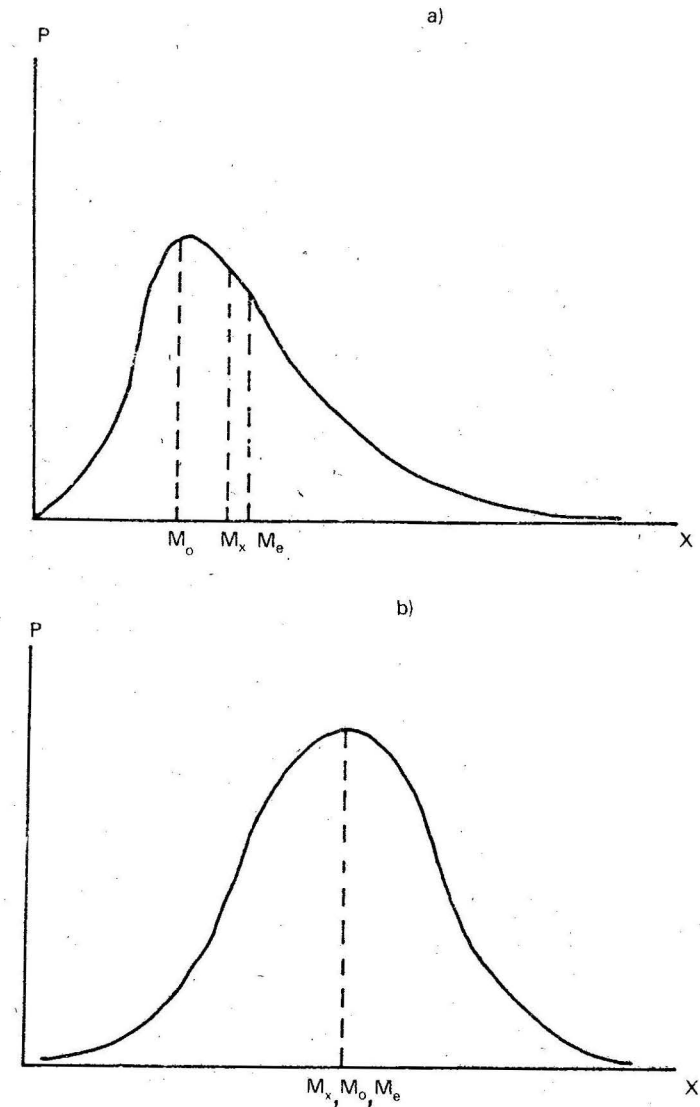


Fig. 2.17 Curvas de distribución: a) normal logarítmica; b) normal (M_x - promedio; M_0 - moda; M_e - mediana)

La *dispersión de la magnitud aleatoria* (σ_x^2) se determina como el promedio de los cuadrados de las desviaciones del valor promedio de dicha magnitud. En un caso general, el cálculo se realiza por la siguiente fórmula:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 p_i \quad (36)$$

Las características que se obtienen sobre la base de la dispersión son: la desviación estándar (σ_x), que es igual a la raíz cuadrada de la dispersión ($\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$) y el coeficiente de variación (V_x), que representa la característica estadística más utilizable del grado de variación del índice; este coeficiente se calcula según la fórmula:

$$V_x = \frac{\sigma_x}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (37)$$

La *asimetría de la distribución* se caracteriza por el coeficiente de asimetría (A) que se determina por la siguiente expresión:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3 p_i}{\sigma_x^3} \quad (38)$$

Si el valor de A es positivo, la distribución se denomina positivamente asimétrica; si es negativo, negativamente asimétrica y si el coeficiente se iguala a cero, la distribución es simétrica.

El *exceso de distribución* (E_d) caracteriza la agudeza del máximo de la curva de distribución diferencial en comparación con el de la ley normal. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_d = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4 p_i}{\sigma_x^4} - 3 \quad (39)$$

El valor de E_d puede ser positivo (curvas agudas), negativo (curvas suaves) o igual a cero (distribución normal).

Anteriormente se mencionó la existencia de diferentes leyes teóricas, a las cuales se pueden someter las distribuciones reales de magnitudes aleatorias. Sin embargo, al resolverse estadísticamente las tareas de búsqueda y exploración se utiliza con más frecuencia la ley normal y a veces la normal logarítmica. Las particularidades principales de estas leyes se expresan a continuación.

La ley de distribución normal se caracteriza por una curva simétrica campaniforme, a cuyo máximo corresponden los valores respectivos de la moda, la mediana y el promedio (fig. 2.17). Esta ley representa el límite al cual tienden otras distribuciones en condiciones determinadas. En el papel probabilístico normal su función integral se expresa mediante una línea recta (fig. 2.18).

La ley de distribución se denomina normal logarítmica o lognormal cuando los logaritmos de los valores de la variable aleatoria se distribuyen conforme a la ley normal. La curva diferencial de esta distribución es positivamente asimétrica con un exceso positivo. En este caso la esperanza matemática supera siempre a la mediana, que a su vez sobrepasa a la moda.

La selección del modelo estadístico unidimensional empieza por la búsqueda de la distribución teórica, que debe corresponder lo más posible con la distribución observada empíricamente.

Con este objetivo hay que confeccionar los gráficos de frecuencias de distribución de los valores del índice: los histogramas (fig. 2.19) o los gráficos de las fre-

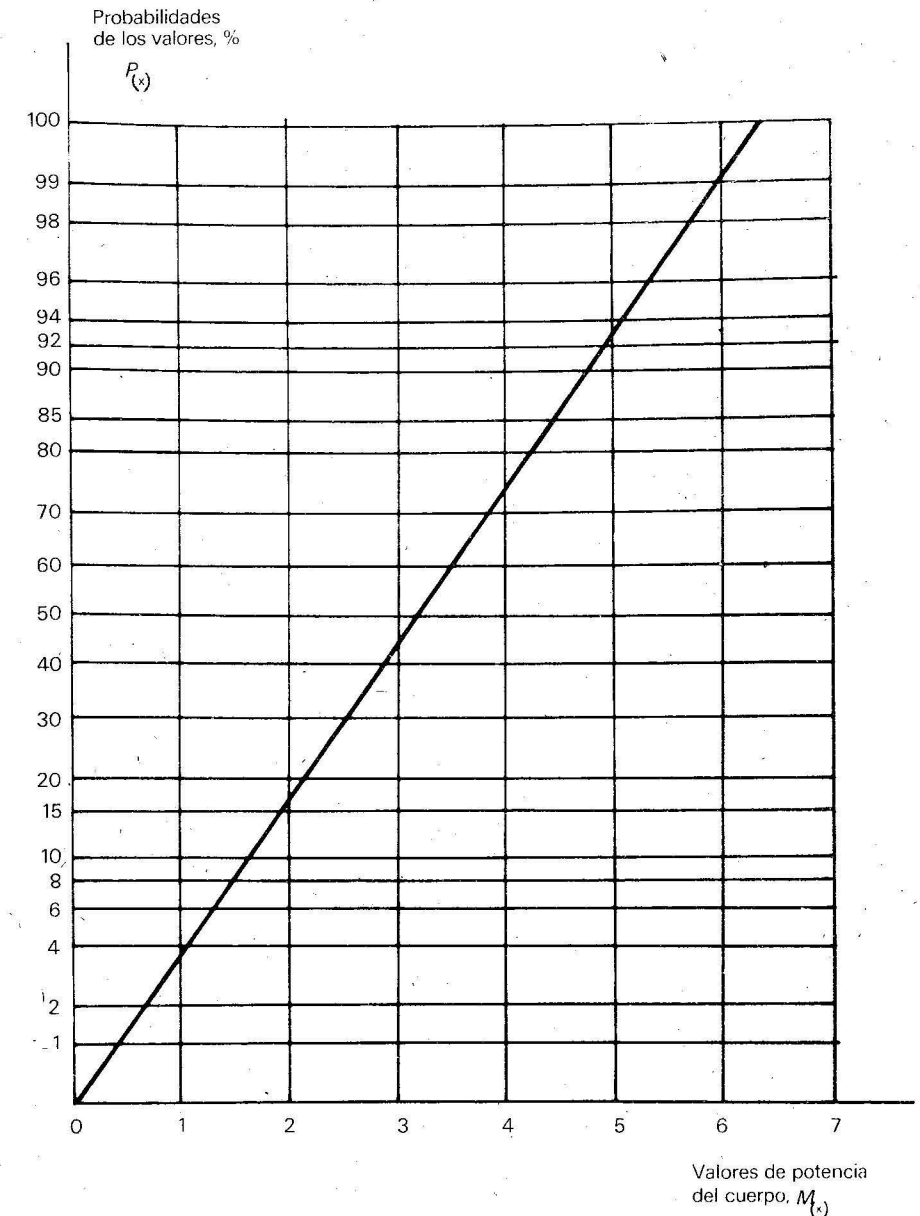


Fig. 2.18 Gráfico de la distribución normal en papel probabilístico

cuencias acumuladas; en este último caso se utiliza el papel probabilístico (fig. 2.20). Para las selecciones con un volumen medio de observaciones (30 a 50), se pueden utilizar los valores de los coeficientes de asimetría y de exceso, los cuales tienen que ser iguales a cero si la distribución es normal. Cuando se trata de la distribución logarítmica, esos coeficientes se igualan a cero si se calculan sobre la base de los logaritmos de los valores del índice. Para las selecciones con poco volumen de observaciones (15 a 20 y menos) esta primera e importante tarea no tiene ninguna solución definitiva y por consiguiente todos los cálculos posteriores carecerán de confiabilidad.

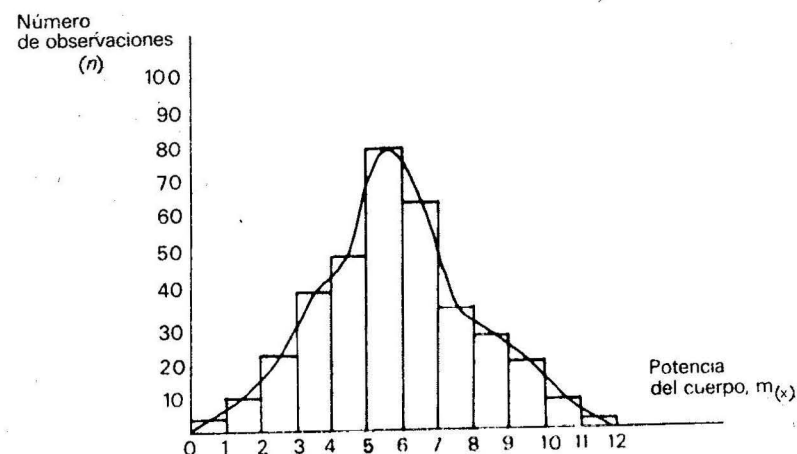


Fig. 2.19 Histograma de distribución de los valores con la potencia del cuerpo mineral y curvas de distribución diferencial

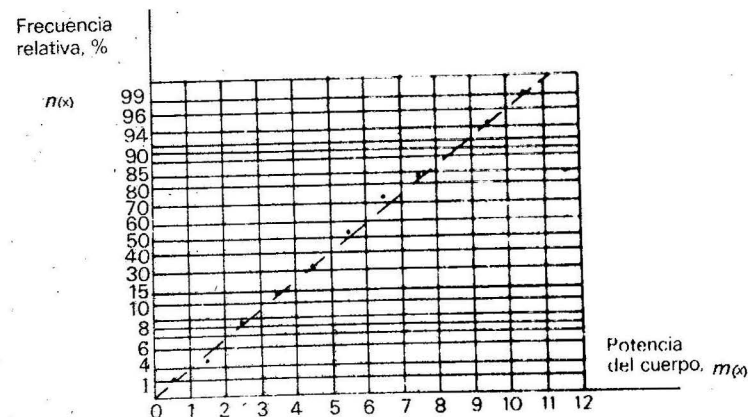


Fig. 2.20 Gráfico de las frecuencias acumuladas en papel prebalístico (según los datos de la figura 2.19)

Después de escoger la ley de distribución se procede a la evaluación del índice. Las evaluaciones estadísticas pueden ser *puntuales* y *de intervalo*. En el primer caso el valor se caracteriza por una cifra determinada y en el segundo se da un intervalo de valores, dentro del cual tiene que encontrarse el valor auténtico con una probabilidad establecida de este suceso. Las evaluaciones puntuales deben ser confiables, no desplazadas y de eficiencia máxima.

Evaluación confiable se llama a la que se aproxima a la esperanza matemática del parámetro que se estudia, a medida que aumenta el volumen de la selección. La evaluación es no desplazada si su esperanza matemática corresponde al parámetro estudiado para cualquier volumen de la selección, es decir, si la evaluación no tiene ningún error sistemático. Finalmente, la evaluación se denomina efectiva si su dispersión es mínima para un número de observaciones dado. En el caso de la ley normal, para evaluar el valor promedio del parámetro se utiliza su media aritmética, calculada según la fórmula (34) o a partir de los resultados de las observaciones por la fórmula (35). Además, si se agrupan los resultados de las observaciones en clases estadísticas, el cálculo se puede efectuar por el *método de momentos*, según la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = a + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m n_i (X_i - a) \quad (40)$$

donde:

n_i - frecuencia de la aparición de los valores del parámetro correspondiente a la clase i ;

X_i - mitad del intervalo de clase para la clase i ;

m - número de clases, en las cuales se agrupan los valores del parámetro;

n - número total de observaciones del parámetro;

a - valor correspondiente a la mitad de uno de los intervalos de clase (generalmente el de la clase con la frecuencia n_i máxima).

Si la distribución es normal logarítmica, el valor promedio del parámetro se obtiene como media geométrica (\bar{X}) por la fórmula:

$$\ln \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln X_i \quad (41)$$

Aquí conviene señalar que la media aritmética, para cualquier ley de distribución, es una evaluación confiable y no desplazada y solo si es muy asimétrica la distribución, esta evaluación deja de ser de eficiencia máxima, por cuanto los valores excesivos únicos influyen notablemente sobre el valor calculado.

Solo raras veces la media geométrica es confiable y no desplazada, razón por la cual, en la gran mayoría de los casos, se prefiere la media aritmética como evaluación estadística del valor promedio, sin tener en cuenta la función de la distribución.

En el caso de la ley normal, la dispersión se calcula por la fórmula (36) o mediante la transformación de esta fórmula según las siguientes expresiones:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2 \quad (42)$$

donde:

X_i - valores observados del parámetro.

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^m n_i (X_i - a)^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i (X_i - a)}{n} \right)^2 \quad (43)$$

donde las designaciones son las mismas que en la fórmula (40).

Los cálculos mediante la fórmula (43), conocidos como el método de momentos, se practican cuando el número de datos iniciales es grande (centenas y aún más). Para efectuar dichos cálculos, el conjunto estadístico se subdivide en clases de igual intervalo (α) cuyo número m debe ser superior al intervalo de 12 a 15 para asegurar una suficiente precisión en los resultados. Al ser así, el intervalo de clase se determina como:

$$\alpha = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{m}$$

y se aproxima a la cifra cercana más cómoda. Para simplificar los cálculos se puede utilizar este valor como factor constante y aplicar, en lugar de las desviaciones reales de las mitades de los intervalos de clase del promedio arbitrario a , los números de las clases (Δ_i), que se cuentan a partir de la clase promedio, según una relación sencilla:

$$X_i - a = \alpha \Delta_i$$

En este caso la fórmula tiene el siguiente aspecto:

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left[\frac{\sum_{i=1}^m n_i \Delta_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_{i=1}^m n_i \Delta_i}{n} \right)^2 \right] \quad (44)$$

A continuación se dan los cálculos del valor promedio del parámetro y de su dispersión por ambos procedimientos, con el objetivo de ilustrar su aplicación práctica.

Ejemplo 5: El contenido de plomo en una mena polimetálica ha sido determinado por 18 pozos de perforación. Se necesita calcular el contenido promedio de plomo y su dispersión para la parte explorada del cuerpo mineral. Los datos iniciales y los resultados de los cálculos se indican en la tabla 2.5.

Ejemplo 6: En un yacimiento aurífero primario se ha realizado el análisis de 842 muestras; los resultados fueron agrupados en 12 clases con el intervalo de clase igual a 5 g/t (tabla 2.6). Se requiere determinar el contenido promedio de oro y su dispersión. Los resultados de los cálculos intermedios se dan en la propia tabla 2.6.

Cuando la ley de distribución es normal logarítmica, la dispersión se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln X_i - \ln \bar{X})^2 \quad (45)$$

El cálculo de las características secundarias que se derivan de las principales, o sea, el cálculo de la desviación estándar y del coeficiente de variación se realiza mediante las fórmulas apropiadas.

La desventaja principal de la evaluación estadística puntual es la ausencia de toda idea acerca de la precisión del resultado obtenido. Esto no es muy importante si el número de selecciones (cantidad de muestras) es grande, pero si estas son pequeñas y la variabilidad del índice es considerable, el error de la evaluación puntual del valor promedio puede ser elevado. Por eso, en esos casos, también es necesario conocer el intervalo de los valores posibles, dentro del cual se encontrará el promedio auténtico del índice con una probabilidad determinada. Para obtener este intervalo se utiliza la ley de distribución de los errores puntuales selectivos, que se enuncia como sigue: los promedios aritméticos, sobre la base de las selecciones del conjunto general, cuya distribución se somete a la ley normal, se distribuyen conforme a la misma ley, y su dispersión (σ_x^2) es proporcional a la evaluación selectiva de la dispersión de la distribución del índice y al volumen de la selección.

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_x^2}{n} \quad (46)$$

Tabla 2.5

CÁLCULO DEL CONTENIDO PROMEDIO DE PLOMO Y DE LA DISPERSIÓN

Número de pozos	Contenido de plomo, % (X_i)	Desviación del contenido promedio ($X_i - \bar{X}$)	Cuadrados de las desviaciones del valor promedio ($(X_i - \bar{X})^2$)
2	6,50	- 6,89	47,60
5	5,36	- 8,03	64,48
6	7,41	- 5,98	36,85
7	21,15	- 7,76	60,46
9	8,67	- 4,72	22,35
10	11,14	- 2,25	5,06
11	13,22	- 0,17	0,03
12	32,45	19,06	364,28
14	9,66	- 3,73	13,92
15	7,28	- 6,11	37,50
16	25,86	12,47	155,50
17	14,42	1,03	1,06
19	5,89	- 7,50	56,25
21	13,40	0,01	0,00
22	16,81	3,42	11,70
23	17,20	3,81	14,54
24	15,01	1,62	2,63
26	9,50	- 3,89	15,08
Suma	$\Sigma X_i = 240,93$	$\Sigma (X_i - \bar{X})^2 = 909,29$	
Suma	$\bar{X} = \frac{\Sigma X_i}{n} = 13,39$	$\sigma_x^2 = \frac{\Sigma (X_i - \bar{X})^2}{n} = 50,51$	

Tabla 2.6
CÁLCULO DEL CONTENIDO PROMEDIO DE ORO Y DE LA DISPERSIÓN
POR EL MÉTODO DE MOMENTOS

Clase según el contenido de oro, g	Número de muestras en la clase n_i	Número de la clase Δ_i	Cuadrado del número de la clase, Δ_i^2	$n_i \Delta_i$	$n_i \Delta_i^2$
0-5	251	-1	1	-251	251
5-10	384	0	0	0	0
10-15	99	1	1	99	99
15-20	53	2	4	106	212
20-25	24	3	9	72	216
25-30	15	4	16	60	240
30-35	8	5	25	40	200
35-40	3	6	36	18	108
40-45	2	7	49	14	98
45-50	1	8	64	8	64
50-55	1	9	81	9	81
55-60	1	10	100	10	100

$$\begin{aligned} \text{Suma } n &= 842 \\ \bar{x} &= a + a \frac{\sum n_i \Delta_i}{n} = 7,5 + 5,0 \cdot 22 = 7,5 + 1,1 = 8,6 \text{ g/t} \\ \sigma_x^2 &= a^2 \left[\frac{\sum n_i \Delta_i^2}{n} - \left(\frac{\sum n_i \Delta_i}{n} \right)^2 \right] = 5^2 [1,98 - 0,22^2] = 48,30 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum n_i \Delta_i &= 185 \quad \sum n_i \Delta_i^2 = 1\ 669 \\ \frac{\sum n_i \Delta_i}{n} &= 0,22 \quad \frac{\sum n_i \Delta_i^2}{n} = 1,98 \end{aligned}$$

La probabilidad de que la evaluación selectiva del valor promedio se diferencie de su esperanza matemática en menos de $\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$ se expresa mediante el coeficiente correspondiente, el cual, en casos de selecciones grandes ($n > 60$), se obtiene con ayuda de la tabla de la función integral de Laplace (criterio u) y para las pequeñas se precisa teniendo en cuenta el volumen de selección (criterio de Student t). En la mayoría de los casos, la solución de las tareas de búsqueda y exploración está relacionada con selecciones de poco volumen, para las cuales el intervalo de aceptación del valor promedio (λ) se determina por la siguiente fórmula:

$$\lambda = \bar{X} \pm \frac{t \sigma_x}{n} \quad (47)$$

Los valores del criterio t se dan en las tablas correspondientes conforme a la probabilidad de confianza adoptada y al número de observaciones en la selección. La probabilidad de confianza representa la posibilidad de que el promedio auténtico se encuentre dentro del intervalo de aceptación. Para los cálculos de índole práctico, se pueden admitir los siguientes valores de dicho criterio, al variar el volumen de la selección desde 11 hasta 60 observaciones (si la selección aumenta

aún más, los valores del criterio de Student se mantienen prácticamente constantes):

Probabilidad de confianza	Criterio t
0,65-0,67	1
0,82	1,5
0,95	2
0,99 y más	3

Para las selecciones de menor volumen los valores de este criterio aparecen en la tabla 2.7.

Tabla 2.7
VALORES DEL CRITERIO DE STUDENT PARA LAS SELECCIONES
DE POCO VOLUMEN

Volu- men de selec- ción	Probabilidad de confianza							
n	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99
1	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
2	0,82	1,06	1,39	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
3	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
5	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03
6	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
7	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
8	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
9	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
10	0,70	0,88	1,09	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17

A veces se utiliza la diferencia entre uno y la probabilidad de confianza; el resultado que corresponde a la probabilidad del suceso opuesto al esperado se llama nivel de rechazo.

El valor $\delta_a = \frac{t \sigma_x}{\sqrt{n}}$ se nombra error absoluto de la evaluación del promedio.

Es preciso recordar que dicho valor no caracteriza al error real sino al error máximo posible adoptado para la probabilidad de confianza. Como los valores promedio del índice pueden ofrecer la misma magnitud de error absoluto, es racional utilizar el error relativo δ calculado según la fórmula:

$$\delta = \frac{\delta_a}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (48)$$

Después de realizar transformaciones sencillas esta fórmula presenta el siguiente aspecto:

$$\delta = \frac{tV_x}{\sqrt{n}} \cdot 100 \quad (49)$$

Una variante simplificada del modelo estadístico fue propuesta por V.V. Bogatski [3]. Según dicha variante, el grado de variabilidad del índice se puede caracterizar por la relación entre sus valores máximo y promedio, y los resultados obtenidos son más precisos que en el caso de los cálculos estadísticos ordinarios. Debido a la simplicidad de los cálculos, el método de V.V. Bogatsky tuvo una rápida aceptación en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración, pero investigaciones ulteriores mostraron que no ofrece ninguna ventaja fundamental, en comparación con el modelo estadístico clásico y, además, es menos exacto, ya que el valor máximo en la selección puede ser poco representativo. Por lo tanto, hoy día no se recomienda su utilización práctica. Con frecuencia las tareas basadas en la comprobación de diferentes hipótesis por métodos estadísticos se utilizan para comparar distintos objetos geológicos, en particular al aplicarse el método de analogía, o para estudiar el grado de homogeneidad del objeto. La solución de estas tareas se logra mediante la formulación y comprobación de la hipótesis sobre la igualdad de los valores promedio y las dispersiones del índice, la existencia de sus valores anómalos, la subdivisión de las selecciones heterogéneas conforme a los conjuntos generales independientes representados, etc. Para ello se calculan uno u otros criterios de aceptación, los cuales, según sus valores, permiten calificar la hipótesis como cierta o rechazarla como falsa. La metodología concreta de la comprobación estadística de las hipótesis geológicas se da de manera bastante detallada en libros de estudios especiales [4, 15, 52]. Si se tiene en cuenta que la aplicación de tales métodos es muy limitada en la solución de las tareas de exploración propiamente dichas, resulta irracional prestarles más atención en el presente curso.

Para concluir la revisión de los modelos estadísticos unidimensionales, conviene señalar que el coeficiente de variación depende poco del número de observaciones, pero sí depende del nivel de estudio del índice. Además, dada la estructura compleja de la variabilidad de los objetos geológicos, los valores de este coeficiente calculados para algunos sectores del yacimiento, generalmente no se pueden extender a otros sectores o al yacimiento completo, sin determinadas limitaciones. Por último, las observaciones de los índices de los objetos geológicos raramente son variables aleatorias precisas, lo que hace a las evaluaciones estadísticas de su variabilidad considerablemente exageradas. Lo expuesto delimita la posibilidad de aplicación de los modelos estadísticos en la solución de las tareas de exploración.

Modelos estadísticos bidimensionales

Se emplean para estudiar los conjuntos estadísticos formados por dos índices del objeto o fenómeno geológico y tienen como base la función de distribución bidimensional de dos variables aleatorias X y Y , entre las cuales pueden existir relaciones estocásticas. Tales relaciones significan que a cada valor determinado de una variable aleatoria X_i corresponde, no un valor determinado de otra Y_i , sino un conjunto de sus valores ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$) con sus probabilidades de aparición.

El lugar geométrico de los puntos correspondientes a los centros de las distribuciones convencionales de estos valores se denomina *línea de regresión* y la expresión matemática que describe esta línea se llama *ecuación de regresión*. En el sistema de dos variables aleatorias existen dos líneas de regresión: $Y_x = f(X)$ y $X_y = f(Y)$. Dichas líneas pueden ser tanto rectas como curvas de diferente orden. En los trabajos de búsqueda y exploración, se utiliza con más frecuencia la regresión rectilínea, la cual se determina en el sistema de coordenadas rectangulares (fig. 2.21) por dos ecuaciones:

$$\begin{aligned} Y &= a_1 x + b_1 \\ X &= a_2 y + b_2 \end{aligned} \quad (50)$$

En un caso general esas líneas rectas se cruzan en el punto cuyas coordenadas son iguales a los valores promedio de ambas variables aleatorias (\bar{X} y \bar{Y}) y el ángulo entre ellas (γ) oscila entre 0° , al coincidir ambas líneas y hacerse funcional la relación entre esas variables aleatorias, y 90° , al no existir relación alguna (fig. 2.22).

Los modelos estadísticos bidimensionales permiten revelar las relaciones estocásticas entre las variables aleatorias y evaluar su intensidad, pero son incapaces de explicar las razones de dichas relaciones. Sin embargo, ellas facilitan la argumentación de los límites dentro de los cuales se encuentra el valor de una variable aleatoria, al conocerse los valores de la otra variable, vinculada con ella, en lo que reside la utilidad práctica incuestionable de dichas relaciones.

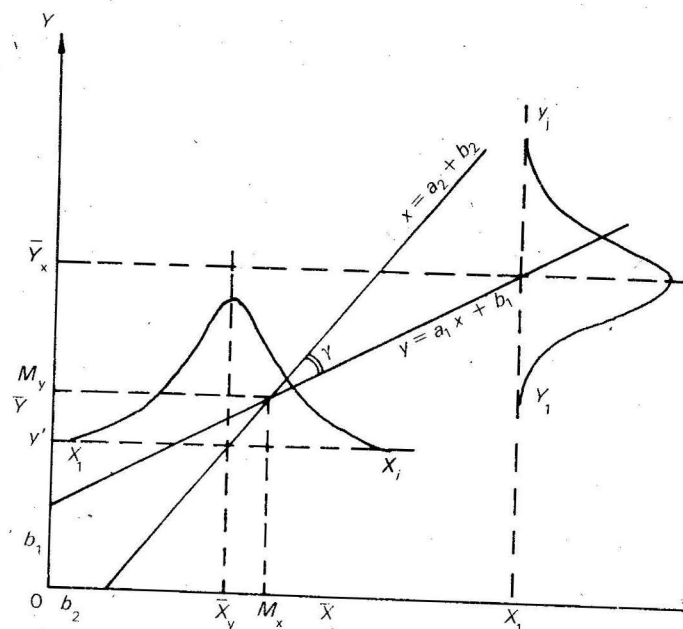


Fig. 2.21 Representación gráfica de las principales características del modelo estadístico bidimensional

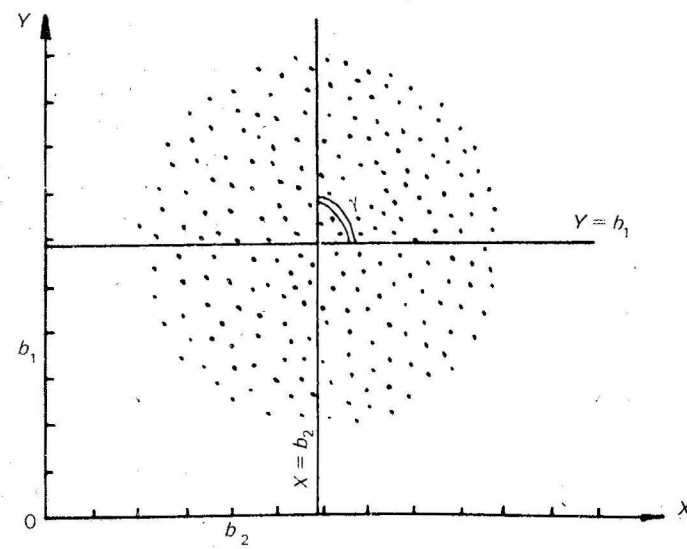
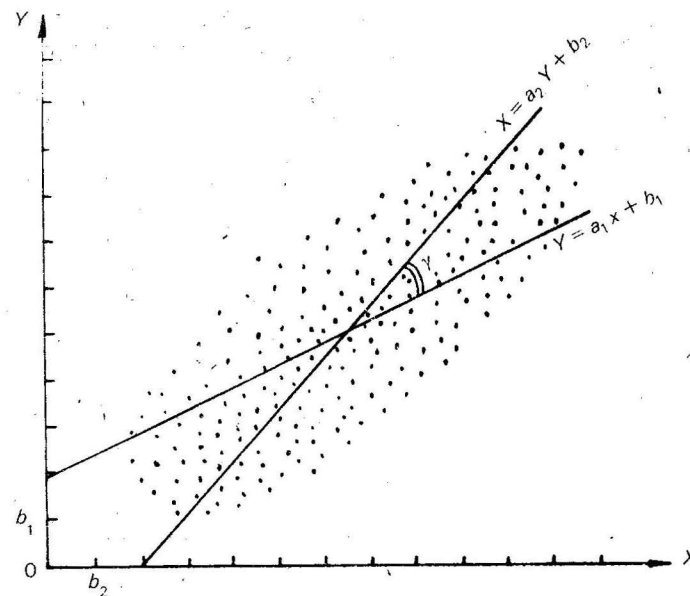


Fig. 2.22 Diferente orientación de las líneas de regresión: a) cuando existe la correlación de las variables aleatorias X y Y ; b) cuando no existe dicha correlación

Las características numéricas principales de la distribución bidimensional de las variables aleatorias son: la covarianza (momento de correlación), el coeficiente de correlación y el índice de correlación.

La covarianza (Cov_{xy}) representa la esperanza matemática del producto de las desviaciones de ambas variables aleatorias de sus valores promedio y se calcula por la fórmula (23). En el caso del conjunto estadístico en cuestión, dicha fórmula tiene el siguiente aspecto:

$$\text{Cov}_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (51)$$

La covarianza también se puede calcular por otra fórmula:

$$\text{Cov}_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \bar{X} \bar{Y} \quad (52)$$

Así como por el método de momentos:

$$\text{Cov}_{xy} = \alpha_x \alpha_y \left(\sum_{i=1}^m \frac{n_i \Delta_i \Delta_j}{n} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n n_i \Delta_i}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^K n_j \Delta_j}{n} \right) \quad (53)$$

donde:

- n_i - frecuencia de aparición de los valores de la variable aleatoria X correspondiente a la clase i ;
- n_j - ídem para la variable aleatoria Y y la clase j ;
- i - número de la clase para la variable aleatoria X que se cuenta a partir de la clase promedio;
- j - ídem para la variable aleatoria y ;
- m - número de clases en las cuales están agrupados los valores de la variable aleatoria x ;
- K - lo mismo para la variable aleatoria y ;
- α_x - intervalo de clase para la variable aleatoria x ;
- α_y - intervalo de clase para la variable aleatoria y ;
- n - número de observaciones comunes de ambas variables aleatorias (de parejas de valores).

El coeficiente de correlación (ζ_{xy}) es la covarianza normada por las desviaciones estándar de los parámetros estudiados, y se calcula por la siguiente fórmula:

$$\zeta_{xy} = \frac{\text{Cov}_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (54)$$

Para esclarecer la metodología de ejecución de los cálculos del coeficiente de correlación por el procedimiento ordinario y el método de momentos se analizarán dos ejemplos.

Ejemplo 7: Se necesita realizar el análisis estadístico de la correlación entre los contenidos de plomo y plata en una mena polimetálica, a partir de los resultados del análisis de 20 muestras agrupadas. Los datos iniciales, así como los cálculos intermedios, se presentan en la tabla 2.8.

Ejemplo 8: Calcular el coeficiente de correlación entre los contenidos de cinc y cadmio sobre la base de los resultados del análisis de 213 muestras, agrupadas por el método de momentos. Los datos iniciales y los cálculos intermedios se dan en la tabla 2.9.

El coeficiente de correlación de dos variables aleatorias puede tomar todos los valores desde -1 hasta $+1$. El signo indica el carácter de la relación: si es positivo, la relación es directa, o sea, los valores de una variable aleatoria aumentan.

tan, al aumentar los de la otra, y si es negativo, la relación es inversa. El valor absoluto de dicho coeficiente caracteriza el grado de manifestación de la relación investigada: si es igual a uno la relación es funcional y cuando este coeficiente disminuye hasta cero la relación no existe. Sin embargo, conviene recordar que, como todo valor estadístico, el coeficiente de correlación tiene una evaluación, no solo puntual sino también de intervalo. Su error relativo (δ_r) se determina mediante la fórmula:

$$\delta_r = t \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}} \quad (55)$$

Tabla 2.8

CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS DE PLOMO Y PLATA

Número de las muestras	Contenido de plomo, % (X_i)	Contenido de plata, g/t (y_i)	$X_i - \bar{X}$	$Y_i - \bar{Y}$	$(X_i - \bar{X})^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$
8	9,66	24	-3,73	-8,6	13,92	73,96	32,08
11	7,41	14	-5,98	-18,6	36,85	345,96	111,23
12	11,14	29	-2,25	-3,6	5,06	12,96	8,10
14	21,15	44	7,76	11,4	60,46	129,96	88,46
15	5,36	15	-8,03	-17,6	64,48	309,76	141,33
16	6,50	15	-6,89	-17,6	47,60	309,76	121,26
19	32,45	81	19,06	48,4	364,28	2 342,56	922,50
20	8,67	20	-4,72	-12,6	22,35	158,16	59,47
21	13,22	33	-0,17	0,4	0,03	0,16	-0,07
22	15,39	39	2,00	6,4	4,00	40,96	12,80
25	9,50	21	-3,89	-11,6	15,08	134,56	45,12
26	16,81	43	3,42	10,4	11,70	108,16	35,57
28	7,28	19	-6,11	-13,6	37,50	284,96	83,10
29	5,89	13	-7,50	-19,6	56,25	386,16	147,00
33	25,86	70	12,47	37,4	155,50	1 398,76	466,38
34	13,40	30	0,01	4,6	0,00	5,76	-0,03
35	14,42	29	1,03	-3,6	1,06	12,96	-3,71
36	11,39	28	-2,00	-4,6	4,00	21,16	9,20
37	15,01	34	1,62	1,4	2,63	1,96	2,27
40	17,20	51	3,81	8,4	14,54	70,56	32,00
<hr/>							
Suma	$\Sigma X_i = 267,71$	$\Sigma Y_i = 652$	$\Sigma(X_i - \bar{X})^2 =$	$917,29$	$\Sigma(Y_i - \bar{Y})^2 =$	$6,249,80$	$\Sigma(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) = 2 314,06$
<hr/>							
Promedio	$\bar{X} = 13,39$	$\bar{Y} = 32,6$	$\sigma_x^2 = 45,86$	$\sigma_y^2 = 312,5$	$\text{Cov}_{xy} = 115,7$		
<hr/>							
$r_{xy} = \frac{115,7}{\sqrt{45,86} \cdot \sqrt{312,5}} = \frac{115,7}{6,76 \cdot 17,67} = 0,978$							

El intervalo de aceptación será:

$$\lambda_r = r_{xy} \pm t \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}}$$

Como norma, para los cálculos de índole práctica se admite una probabilidad de confianza de la evaluación del coeficiente de correlación igual a 0,95; entonces:

$$\delta_r = 2 \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}}$$

Por eso el criterio del concepto de no nulidad de este coeficiente está dado por la siguiente desigualdad:

$$|r_{xy}| \geq 2 \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}} \quad (56)$$

donde:

$|r_{xy}|$ - valor absoluto del coeficiente de correlación.

Además, para juzgar como preciso y seguro el resultado obtenido, es necesario comprobar si es suficiente el número de observaciones de las variables aleatorias (n) mediante la siguiente desigualdad:

$$|r_{xy} \sqrt{n-1}| \geq 3 \quad (57)$$

Si el número de observaciones resulta suficiente y el coeficiente de correlación se diferencia de cero, se pueden confeccionar las ecuaciones de regresión que expresan la correlación de dichas variables aleatorias X y Y :

$$\begin{aligned} Y_x &= \bar{Y} + r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X_i - \bar{X}) \\ X_y &= \bar{X} + r_{xy} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (Y_i - \bar{Y}) \end{aligned} \quad (58)$$

Así, en el ejemplo 7 se tiene:

$$2 \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}} = 2 \frac{1 - 0,978^2}{\sqrt{20}} = 0,02 \quad |r_{xy}| = 0,978 > 0,02$$

$$|r_{xy} \sqrt{n-1}| = |0,978 \sqrt{20-1}| = 4,15 > 3$$

Ambas desigualdades son ciertas, y se construyen las ecuaciones de regresión:

$$Y_x = 32,6 + 0,978 \frac{17,68}{6,76} (X_i - 13,39) = 32,6 + 2,55 X_i - 34,15 = 2,55 X_i - 1,55$$

$$X_y = 13,39 + 0,978 \frac{6,76}{17,68} (Y_i - 32,6) = 13,39 + 0,37 Y_i - 12,20 = 0,37 Y_i + 1,19$$

Tabla 2.9
CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ENTRE LOS CONTENIDOS
DE CINC Y CADMIO

Número de muestras con contenido de cadmio, unidades convencionales (Y_i)	Porcentaje de cinc (X_i)						
	2,5 - 3	3 - 3,5	3,5 - 4	4 - 4,5	4,5 - 5	5 - 5,5	5,5 - 6
0 - 5	1	3	1				
5 - 10	1	2	5	1		1	
10 - 15		3	2	8	2	2	
15 - 20				5	26	7	1
20 - 25				2	12	81	9
25 - 30					1	3	15
30 - 35							1
35 - 40							1
40 - 45							
Número de la clase (Δ_i)	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
Número de muestras (n_i)	2	8	8	16	41	94	27
$n_i \Delta_i$	-10	-32	-24	-32	-41	0	27
$n_i \Delta_i^2$	50	128	72	64	41	0	27
$\Sigma n_j \Delta_j$	-7	-24	-23	-24	-29	-11	19
$\Sigma n_j \Delta_j \Delta_i$	35	96	69	48	29	0	19

$$\bar{X} = 5,75 - 0,5 \cdot \frac{60}{213} = 5,75 - 0,14 = 5,61 \quad \bar{Y} = 22,5 - 5 \cdot \frac{59}{213} = 22,5 - 1,4 = 21,1$$

$$\sigma_x = 0,5 \sqrt{\frac{664}{213} - \left(\frac{60}{213}\right)^2} = 0,5 \sqrt{3,117 - 0,079} = 0,5 \cdot 1,74 = 0,87$$

$$\sigma_y = 5 \sqrt{\frac{443}{213} - \left(\frac{59}{213}\right)^2} = 5 \sqrt{2,08 - 0,077} = 5 \cdot 1,42 = 7,10$$

					Número de la cla- se Δ_j	Número de mues- tras n_j	$n_j \Delta_j$	$n_j \Delta_j^2$	$\Sigma n_j \Delta_j$	$\Sigma n_j \Delta_j \Delta_j$
6-6,5	6,5 -7	7-7,5	7,5-8	8-8,5						
					-4	5	-20	80	-20	80
					-3	10	-30	90	-30	90
1					-2	18	-36	72	-34	68
					-1	39	-39	39	-35	35
					0	104	0	0	-7	0
2	1				1	22	22	22	21	21
4		1			2	6	12	24	13	26
	2		1		3	4	12	36	12	36
	2	2		1	4	5	20	80	20	80
2	3	4	5	6	S	U	M	A		
7	5	3	1	1	S	213	-59	443		436
14	15	12	5	6	U	-60				
28	45	48	25	36	M	664				
8	15	10	3	4	A					
16	45	30	15	24	A	436				

$$\text{Cov}_{xy} = 0,5 \cdot 5 \left(\frac{436}{213} - \frac{60}{213} \cdot \frac{59}{213} \right) = 2,5 \cdot 1,969 = 4,923$$

$$\zeta_{xy} = \frac{4,923}{0,87 \cdot 7,10} = 0,797$$

Como el coeficiente de correlación es válido solo si la regresión es rectilínea, su posibilidad de aplicación es limitada. Así, por ejemplo, si existe una correlación curvilínea bien marcada de dos variables aleatorias, el coeficiente de correlación puede ser igual a cero o tener un valor muy bajo. Por esta razón, en casos semejantes se utiliza el índice de correlación η , que representa la relación entre la desviación estándar de los valores individuales del parámetro, calculados mediante la ecuación de regresión, y la desviación estándar de los valores reales del parámetro. Evidentemente, en el sistema de dos variables aleatorias existen dos índices de correlación:

$$\eta_y = \frac{\sigma_{y_x}}{\sigma_y} \quad \eta_x = \frac{\sigma_{x_y}}{\sigma_x} \quad (59)$$

donde:

$$\sigma_{y_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{x_i} - \bar{Y})^2}{n}} \quad \sigma_{x_y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{y_i} - \bar{X})^2}{n}}$$

Para comprobar la no nulidad del índice de correlación y la suficiencia del número de observaciones realizadas, se aplican las siguientes desigualdades:

$$|\eta| \geq 2 \frac{1 - \eta^2}{\sqrt{n}} \quad (60)$$

$$|\eta \sqrt{n-1}| \geq 3 \quad (61)$$

El índice de correlación siempre es positivo y sus valores se encuentran entre cero y uno. Por su valor absoluto, sobrepasa el coeficiente de correlación y, como excepción, es igual a este, cuando la correlación de las variables aleatorias ($\eta_x = \eta_y = \zeta_{xy} = 1$) es funcional rectilínea. Si la relación entre estas no existe, el índice en cuestión se iguala a cero. Al ser así, el índice de correlación tiene un sentido más general que el coeficiente de correlación y representa una característica igualmente válida para las relaciones, tanto rectilíneas como curvilíneas. Mediante dicho índice se pueden confeccionar las ecuaciones de regresión, si se supone la forma posible de la curva correspondiente (parábola, hipérbola, etc.). Luego se confecciona y resuelve el sistema de ecuaciones para determinar los coeficientes.

Antes de aplicar los modelos estadísticos bidimensionales, es necesario ejecutar un análisis gráfico de la distribución de las variables aleatorias, lo que asegura la existencia de la homogeneidad del conjunto estadístico estudiado, supone el carácter de la relación (rectilínea o curvilínea), y a veces posibilita la obtención de la evaluación aproximada del coeficiente de correlación.

En el caso representado en la figura 2.23 es obsoleto calcular el coeficiente de correlación entre los contenidos de alúmina y compuestos volátiles para todo el conjunto de muestras analizadas, por cuanto estas corresponden a dos tipos naturales de mena, o sea, a dos conjuntos estadísticos generales que deben estudiarse por separado.

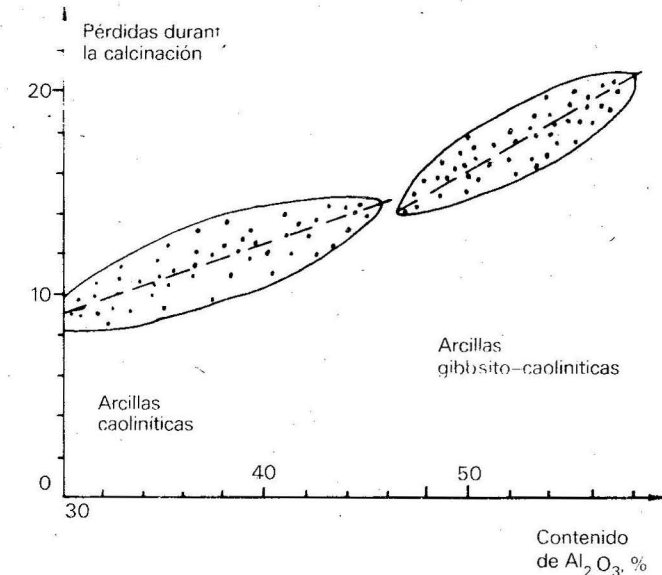


Fig. 2.23 Campo de correlación entre el contenido de alúmina y las pérdidas durante la calcinación en las arcillas refractarias del yacimiento Krasnooktiabrsk (Kazajastán del norte)

Si el conjunto estadístico es homogéneo, el cálculo del coeficiente de correlación se realiza a partir del número de puntos ubicados en los diferentes cuadrantes obtenidos luego de haber trazado las líneas correspondientes a la mediana de cada variable aleatoria (fig. 2.24) según la fórmula:

$$\zeta_{xy} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (62)$$

donde:

n_1 - número de puntos en los cuadrantes I y III;

n_2 - número de puntos en los cuadrantes II y IV.

Para pronosticar los valores concretos de una variable aleatoria a partir de los valores de la otra (X) vinculada con ella, ambas se consideran independientes y se confecciona una sola ecuación de regresión, por lo cual este procedimiento se llama análisis de regresión. Además, para evaluar la precisión de los resultados obtenidos en esta ecuación de regresión se introduce el error absoluto del cálculo y la fórmula adquiere el siguiente aspecto:

$$Y_x = \bar{Y} + \zeta_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (X_i - \bar{X}) \pm t\sigma_y \sqrt{1 - \zeta_{xy}^2} \quad (63)$$

El análisis de regresión se utiliza ampliamente para determinar los contenidos de elementos satélites en la mena, calcular la masa volumétrica del mineral útil en función de su calidad, interpretar los resultados de los métodos mineralógicos y geofísicos que se utilizan durante el muestreo del mineral útil, establecer diferentes propiedades físicas de la mena sobre la base de los índices indirectos, precisar la evaluación de los parámetros de los cuerpos minerales a partir de los resultados de la explotación, etcétera.

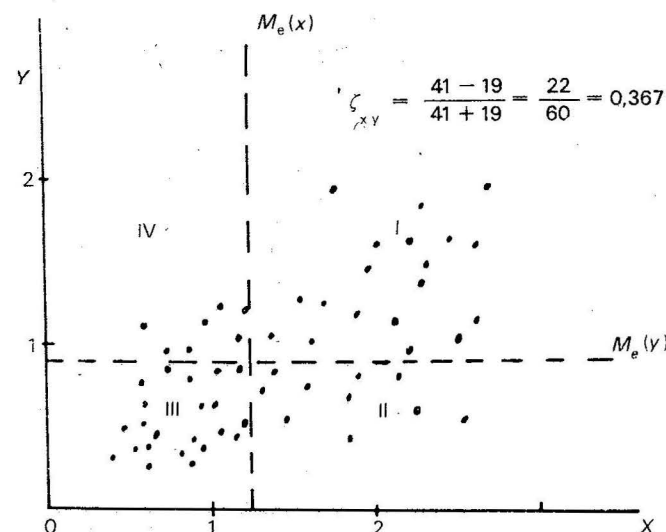


Fig. 2.24 Campo de correlación entre los contenidos de azufre en las rocas encajantes (x) y en el petróleo (y)

Modelos estadísticos multidimensionales

Los modelos de este género, que se aplican en la discriminación de las imágenes de los objetos geológicos ya se trataron anteriormente. Además, los modelos multidimensionales se utilizan para pronosticar el valor de un parámetro (Z) que se correlaciona con otros parámetros (dos o más). En el caso más sencillo esta tarea se resuelve mediante la siguiente ecuación de regresión triple:

$$Z_{xy} = \bar{Z} + \zeta_{xz} \frac{\sigma_z}{\sigma_x} (X_i - \bar{X}) + \zeta_{yz} \frac{\sigma_z}{\sigma_y} (Y_i - \bar{Y}) \quad (64)$$

donde:

ζ_{xz} y ζ_{yz} - coeficiente de correlación entre el parámetro Z y los parámetros X y Y respectivamente;

σ_z - desviación estándar de la distribución de la variable aleatoria Z.

Modelos en diferencias finitas

Los modelos de este grupo se basan en diferencias entre los valores del índice detectados en puntos de observación contiguos. Tienen como objetivo la eliminación de la influencia del componente regular de la variabilidad, para caracterizar mejor la variabilidad casual, la cual es importantísima en cuanto a la selección del sistema de estudio del objeto, y evaluar la precisión de los resultados alcanzados. Según el tipo de diferencias que se utiliza con este fin, los modelos en cuestión se subdividen en los de diferencias primarias, secundarias y de orden más alto, calculados según determinadas direcciones, y modelos, en diferencias primarias complejas, calculados por elementos de superficie.

Los modelos en diferencias primarias, calculados según las líneas de ubicación de los puntos de observación, se utilizan poco en los trabajos de búsqueda y exploración, ya que no permiten subdividir definitivamente la variabilidad total en sus componentes regular y casual y dan solo una idea somera acerca de la intensidad de las variaciones del índice entre los puntos de observación contiguos. En este grupo se debe mencionar el método de I.P. Shoropov [38], aplicable en casos de distancia igual entre los cruceros de prospección.

Además, Z.D. Nisguretsky propuso un modelo que se basa tanto en las diferencias primarias como en la teoría de las funciones aleatorias.

I.P. Shoropov sostiene que la variabilidad del índice se caracteriza bien con ayuda del coeficiente de regularidad B vinculado al coeficiente de oscilación (γ). Para calcular esos coeficientes se aplican las siguientes fórmulas:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^k |\Delta'_i|}{2 \sum_{i=1}^n -(X_1 + X_n)} \quad (65)$$

$$B = 1000 (1 - \gamma) \quad (66)$$

donde:

$|\Delta'_i|$ - valor absoluto de la diferencia entre las magnitudes contiguas del índice;

K - número de las diferencias primarias;

X_i - valores medidos del índice;

n - número de observaciones del índice.

Según Z.D. Nisguretsky [28], el error absoluto del contenido promedio del componente útil en un bloque de explotación, se expresa por la siguiente fórmula:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (C_i - C_{i+1})^2}{2n(n-1)}} \quad (67)$$

donde:

C_i y C_{i+1} - valores contiguos del contenido del componente útil;

n - número de puntos de observación.

Modelos en diferencias secundarias

Fueron propuestos por primera vez en el año 1948 por el científico soviético D.A. Kazakovsky [12] y a partir de esa fecha comenzaron a utilizarse en la práctica. Sobre esa base, se elaboraron con posterioridad otros métodos de estudio de la variabilidad (E.I. Popov, 1959; Z.D. Nisguretsky, 1963).

El método de D.A. Kazakovsky fue deducido para las redes cuadradas, en caso de parámetros que se pueden representar en forma de diferentes superficies topográficas. La suposición principal de este método es que entre los puntos de observación contiguos el índice se modifica de manera rectilínea y contigua.

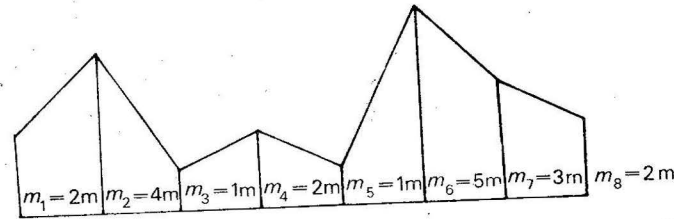


Fig. 2.25 Variación de la potencia del cuerpo mineral según un perfil de exploración

Para calcular las diferencias secundarias (Δ_i''), en primer lugar, se calculan las primarias (Δ_i') del mismo índice, utilizando los datos de observación contiguos, por la fórmula:

$$\Delta_i' = X_i - X_{i+1} \quad (68)$$

Luego, sobre esta base, se determinan las diferencias secundarias mediante la fórmula:

$$\Delta_i'' = \Delta_i' - \Delta_{i+1}' = X_i - 2X_{i+1} + X_{i+2} \quad (69)$$

En el caso representado en la figura 2.25 las diferencias primarias serán:

$$\begin{aligned} \Delta_1' &= 2 - 4 = -2 & \Delta_2' &= 4 - 1 = 3 & \Delta_3' &= 1 - 2 = -1 & \Delta_4' &= 2 - 1 = 1 \\ \Delta_5' &= 1 - 5 = -4 & \Delta_6' &= 5 - 3 = 2 & \Delta_7' &= 3 - 2 = 1 \end{aligned}$$

y las diferencias secundarias:

$$\begin{aligned} \Delta_1'' &= -2 - 3 = -5 & \Delta_2'' &= 3 - (-1) = 4 & \Delta_3'' &= -1 - 1 = -2 \\ \Delta_4'' &= 1 - (-4) = 5 & \Delta_5'' &= -4 - 2 = -6 & \Delta_6'' &= 2 - 1 = 1 \end{aligned}$$

La medida absoluta de la variabilidad, según D.A. Kazakovsky, es el *índice de la complejidad de la superficie topográfica* (μ_a), el cual representa la media aritmética de los valores absolutos de esas diferencias secundarias.

$$\mu_a = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K |\Delta_i''| \quad (70)$$

donde:

K - número de diferencias secundarias.

Así, en el ejemplo, el índice de complejidad será:

$$\mu_a = \frac{5 + 4 + 2 + 5 + 6 + 1}{6} = 3.83 \text{ m}$$

Aunque este índice se puede calcular para los perfiles de exploración independientes, D.A. Kazakovsky elaboró un método para analizar la variabilidad dentro de una superficie delimitada del cuerpo mineral. Según este método, las diferencias secundarias se calculan primeramente para todos los perfiles de una orientación, luego para las perpendiculares a estos y por último para ambas di-

recciones de la red de exploración. Si se tienen en cuenta las diferentes longitudes del lado del cuadrado y de su diagonal, los valores de las diferencias secundarias calculadas según las diagonales tienen que multiplicarse por un coeficiente igual a 0,7 con el propósito de mantener equivalente la zona de influencia de cada diferencia secundaria. Según esta proposición de D.A. Kazakovsky, es lógico que su método también pueda aplicarse en casos de redes rectangulares y rómbicas, si se utilizan los coeficientes de corrección apropiados conforme a la proporción de los lados de la cuadrícula o de sus diagonales.

Para caracterizar la variabilidad relativa del parámetro en el método de D.A. Kazakovsky se utiliza el índice de variabilidad (μ) que se calcula por la fórmula:

$$\mu = \frac{\mu_a}{x} \quad (71)$$

D.A. Kazakovsky dedujo la relación entre el índice de variabilidad del objeto geológico y su grado de estudio según la siguiente expresión:

$$R = \frac{n}{1000\mu} \quad (72)$$

donde:

R - índice del grado de estudio del objeto;

n - número de observaciones del parámetro.

Si la probabilidad de confianza ($t=1$) es igual a 0,67, la relación entre el índice del grado de estudio y el error relativo estadístico del valor promedio del parámetro se da en la tabla 2.10.

Tabla 2.10

RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DEL GRADO DE ESTUDIO Y EL ERROR RELATIVO ESTADÍSTICO DEL VALOR PROMEDIO DEL PARÁMETRO

Error relativo del valor promedio, % (δ)	Índice del grado de estudio, fracciones de uno (R)
1	0,91
2	0,29
4	0,14
7	0,08
10	0,05
15	0,02

Para aplicar el método en cuestión es necesario que las distancias entre los puntos de observación sean iguales, ya que en este caso la variabilidad rectilínea regular del índice implica la igualdad de todas las diferencias primarias por su magnitud y signo y la nulidad de las secundarias (fig. 2.26a); o sea, el índice de variabilidad será igual a cero y mostrará la ausencia de la variabilidad casual. Si dichas distancias son diferentes, que es el caso más sencillo desde el punto de vista de la exploración, surgirá la variabilidad falsa, debido a que las diferencias primarias serán desiguales (fig. 2.26b).

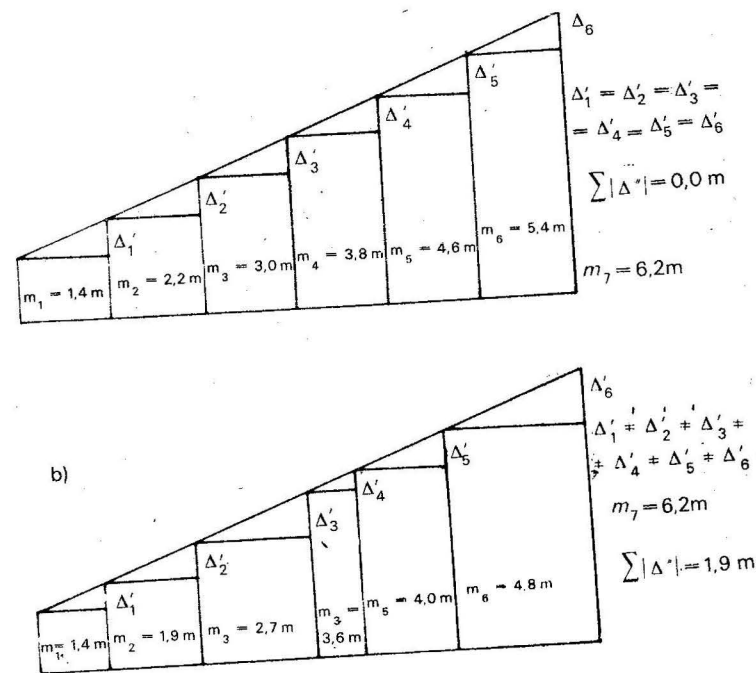


Fig. 2.26 Eliminación de la variabilidad: a) regular; b) surgimiento de la variabilidad falsa en el caso de la red de observaciones irregular

El método de D.A. Kazakovsky permite excluir la influencia de la variabilidad rectilínea regular (cuando la superficie topográfica es plana) y, por consiguiente, caracteriza el grado de la variabilidad, que tiene dos componentes, la casual y la regular compleja; este grado de variabilidad se expresa con curvas de diferente orden. Sin embargo, es conveniente destacar que esta tarea se resuelve exitosamente solo cuando la selección de exploración es representativa, o sea, cuando los puntos de observación coinciden con todas las inflexiones de la superficie topográfica. De no cumplirse esta exigencia, la aplicación de dicho método puede llevar a conclusiones totalmente falsas (fig. 2.27).

En la literatura especial prácticamente no se analizan las ventajas y desventajas de este método ni las limitaciones de su aplicación práctica. Esto se explica hasta cierto punto por la simplicidad aparente y el carácter persuasivo de los razonamientos y deducciones. Algunos autores (E.I. Popov, Z.D. Nisguretsky) admiten este método sin ninguna objeción o restricción; otros (por ejemplo, G.S. Pomitenov) sostienen, sin argumentación especial, que el índice de variabilidad disminuye de manera gradual y tiende a cero mientras disminuye la distancia entre los puntos de observación (h); el valor máximo corresponde, en este caso, a la ausencia total de relaciones espaciales entre los resultados de las observaciones contiguas. Por lo tanto, en este texto se estudiará el comportamiento del índice de variabilidad en dependencia de la distancia entre los puntos de observación, mediante un modelo lineal de variabilidad de la potencia del cuerpo mineral, según un perfil de exploración.

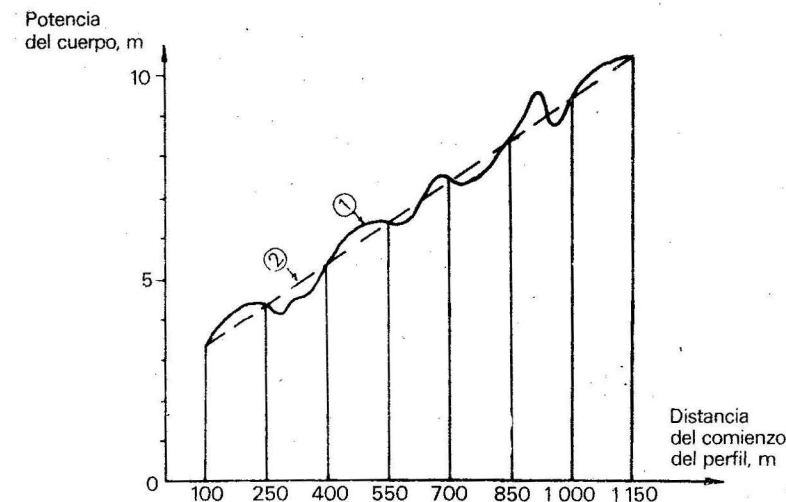


Fig. 2.27 Gráficos de variaciones de la potencia del cuerpo mineral según perfil de exploración 1- sobre la base de los valores reales; 2- sobre la base de las observaciones en los pozos de perforación

Supóngase que los puntos de la red de exploración realizada, equidistantes a 25 m uno de otro, coinciden con todas las inflexiones de la superficie del cuerpo y que entre dichos puntos la potencia varía de manera regular y rectilínea (fig. 2.28). La potencia promedio del cuerpo (\bar{m}) es igual a 2,00 m y el resultado del cálculo del índice de variabilidad es $\mu=1,29$. Se rarifican o dispersan los puntos de observación mediante diferentes distancias entre estos (hasta 150 m) y diferente posición del punto inicial. Se tendrán como resultado 20 variantes posibles de la potencia promedio y el índice de variabilidad, calculados sobre la base de los resultados de las observaciones. Estas variantes para el índice de variabilidad, junto con los resultados de los cálculos análogos ejecutados para este mismo modelo, suponiendo que los puntos de observación se ubican a 12,5 m uno de otro, se relacionan en la tabla 2.11. Además, en esta tabla se indican los valores promedio de dicho índice para cada distancia entre los puntos de observación.

Sobre la base de los datos de la tabla 2.11 se puede llegar a dos conclusiones principales:

1. Una vez alcanzada la representatividad suficiente de la selección de exploración, la reducción ulterior de la distancia entre los puntos de observación implica una brusca disminución del índice de variabilidad. Esto se comprende fácilmente, ya que en este caso los valores absolutos de las diferencias secundarias disminuyen, mientras que su número aumenta. En otras palabras, la densificación de la red de exploración no ofrece ninguna información complementaria acerca de la variabilidad de la potencia y el índice de variabilidad calculado no caracteriza la complejidad real de la superficie topográfica.
2. Al aumentar la distancia entre los puntos de observación, las selecciones dejan de ser representativas, los valores particulares del índice de variabilidad oscilan dentro de límites muy amplios, y los valores promedio de dicho índice para cada distancia entre dichos puntos son comparables con el índice de variabilidad real.

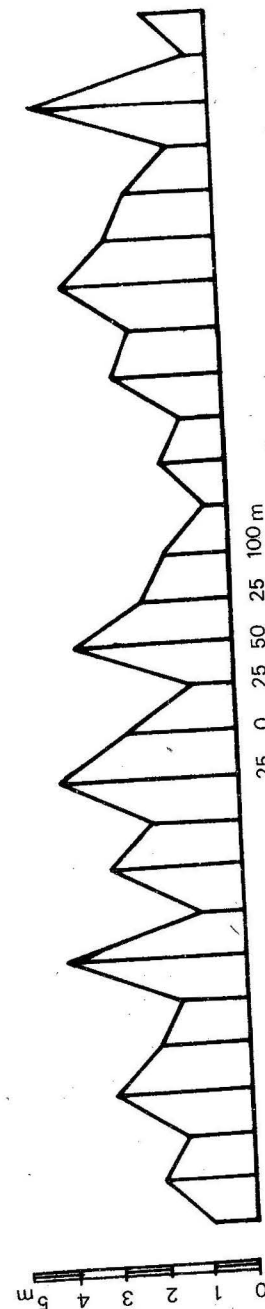


Fig. 2.28 Modelo de variabilidad de la potencia del cuerpo mineral según un perfil de exploración

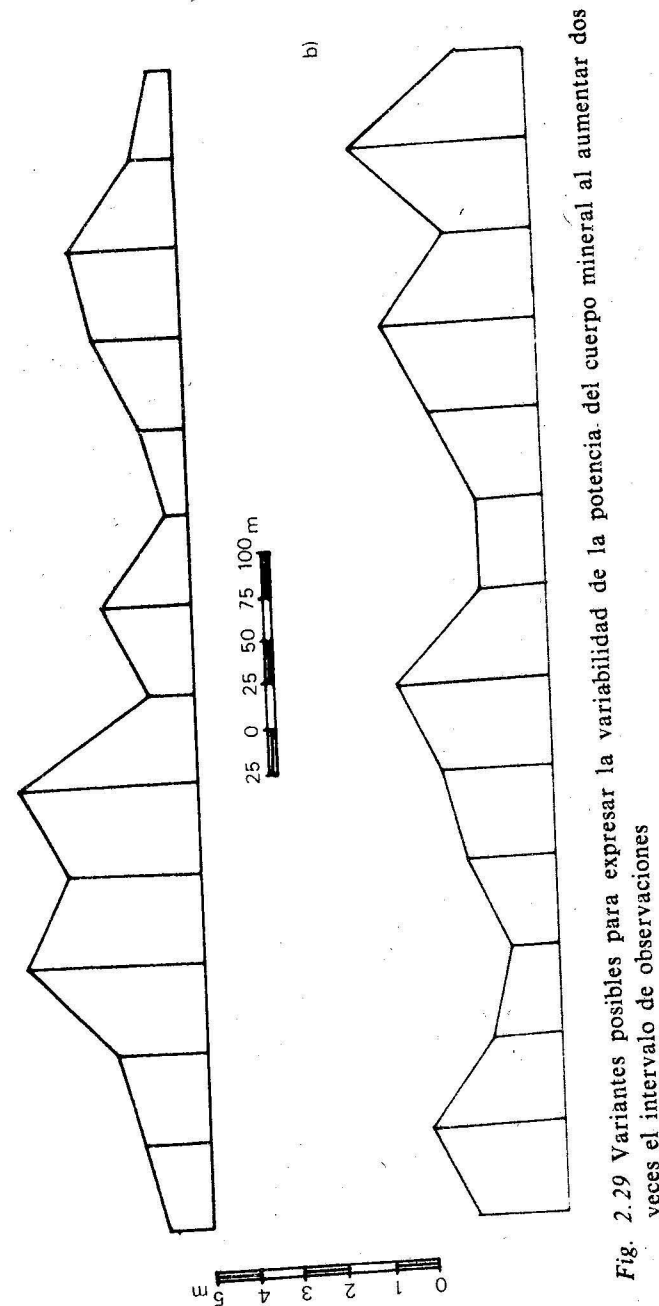
Tabla 2.11
RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE VARIABILIDAD Y LA DISTANCIA ENTRE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Variante	Distancia entre los puntos de observación, m						
	12,5	25	50	75	100	125	150
I	0,32	1,29	1,03	1,18	7,07	1,24	1,88
II	-	-	0,88	1,14	0,86	2,08	0,96
III	-	-	-	0,50	1,04	0,59	0,93
IV	-	-	-	-	0,95	0,93	1,01
V	-	-	-	-	-	0,44	2,44
VI	-	-	-	-	-	-	0,93
Valor promedio	0,32	1,29	0,96	0,94	0,98	1,06	1,36

La segunda conclusión es interesante y requiere un análisis más profundo. En efecto, cuanto más grande es la distancia entre los puntos de observación, tanto más sencilla debe parecer la superficie topográfica, ya que la amplitud de las variaciones del índice se mantiene más o menos constante, pero aumentan considerablemente las distancias según las cuales se producen tales variaciones. Además, no se comprueba una parte de las inflexiones intermedias de la superficie topográfica. Lo expuesto se ve claramente al comparar las figuras 2.29a y 2.29b. Por consiguiente, el índice de variabilidad de este parámetro debe disminuir progresivamente y tender a cero al ser muy grande la distancia entre los puntos de observación. No obstante, los resultados obtenidos en el ejemplo anterior contradicen claramente la lógica de este fenómeno, lo que constituye una de las desventajas del método de D.A. Kazakovsky, que consiste en no considerar las distancias concretas según las cuales se observan las diferencias de los valores del índice. Por esta razón, es imposible comparar los objetos geológicos estudiados mediante diferentes redes de observaciones sobre la base de sus índices de variabilidad.

En el ejemplo también se muestra el papel de la representatividad de la selección de exploración; para esto es suficiente desplazar un semiintervalo el punto de observación inicial, en el caso de la distancia de 25 m entre las observaciones, para que el índice de variabilidad se reduzca más de 1,5 veces (hasta 0,82), aunque esta distancia parece ser suficiente para estudiar la variabilidad de la potencia del cuerpo mineral en esta sección de exploración. Para neutralizar la desventaja del método de D.A. Kazakovsky, se propone calcular el índice de variabilidad, no a partir de las diferencias secundarias de los valores del parámetro, sino mediante las diferencias de sus gradientes de variación entre los puntos contiguos. Si se tiene en cuenta que durante la exploración detallada de la mayoría de los yacimientos minerales útiles, las distancias entre los laboreos de prospección son aproximadamente 100 m, es lógico escoger el intervalo igual a 100 m para calcular dichos gradientes. En este caso el gradiente de la variación del parámetro (g_i) entre dos puntos contiguos se expresa por la siguiente fórmula:

$$g_i = \frac{X_i - X_{i+1}}{l_i} \cdot 100 \quad (73)$$



donde:

l_i - distancia entre los puntos de observación contiguos (m).

Las diferencias de los gradientes contiguos (Δg_i) se calculan teniendo en cuenta sus signos y luego se determina la suma de sus valores absolutos y el índice de complejidad $\overline{\Delta g}$ según la fórmula:

$$\overline{\Delta g} = \frac{\sum_{i=1}^K |\Delta g_i|}{K} \quad (74)$$

donde:

K - número de diferencias del gradiente.

La relación entre el índice de complejidad y el valor promedio del parámetro da el índice de variabilidad i :

$$i = \frac{\overline{\Delta g}}{\bar{X}} \quad (75)$$

En la tabla 2.12 se indican los índices de variabilidad calculados por este método para el ejemplo anterior.

Tabla 2.12

RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE VARIABILIDAD CALCULADO A PARTIR DE LOS GRADIENTES Y LA DISTANCIA ENTRE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN

Variante	Distancia entre los puntos de observación, m						
	12,5	25	50	75	100	125	150
1	2	3	4	5	6	7	8
I	2,52	5,16	2,08	1,56	1,07	1,00	1,24
II	-	-	1,76	1,52	0,86	1,68	0,64
III	-	-	-	0,68	1,04	0,48	0,64
IV	-	-	-	-	0,95	0,76	0,68
V	-	-	-	-	-	0,36	1,64
VI	-	-	-	-	-	-	0,64
Valor promedio	2,52	5,16	1,92	1,24	0,98	0,84	0,82

Como puede observarse, el índice de variabilidad caracteriza de manera más objetiva la complejidad observada de la superficie topográfica para diferentes distancias entre los puntos de observación. Además, posee un carácter unificado y permite comparar la complejidad de la variabilidad del parámetro en diferentes sectores del mismo cuerpo mineral, explorado mediante diferentes redes, así como en casos de diferentes cuerpos minerales y densidades de la red de explo-

ración. Por último, este índice se obtiene fácilmente para cualquier configuración de la red de observaciones, incluso para las redes irregulares o las observaciones realizadas según un sistema de perfiles no paralelos.

Los resultados obtenidos en el estudio del índice de variabilidad por ambos procedimientos se expresan gráficamente en la figura 2.30.

Al analizar esta figura, es fácil comprobar que la utilización de los gradientes hace más clara la idea sobre la variación de la complejidad visible de la superficie topográfica para diferentes distancias entre los puntos de observación. Por dicha razón, es posible utilizar este procedimiento para revelar la correspondencia entre las particularidades de la variabilidad del parámetro y la densidad de la red de exploración realizada. Para lograr este objetivo hay que calcular el índice de variabilidad sobre la base de los gradientes para diferentes distancias entre los puntos de observación y comparar entre sí los resultados obtenidos.

Evidentemente, los resultados más confiables y auténticos se pueden obtener si la red de observación alcanzada es suficientemente densa (exploración de explotación, sectores de densificación experimental de la red de exploración), mientras que la comparación de los datos obtenidos durante diferentes estadios de estudio (trabajos de búsqueda evaluativa, exploración orientativa, exploración detallada) no ofrece más que una idea cualitativa en cuanto al grado de correspondencia entre el sistema de observaciones y el carácter de la superficie topográfica estudiada. La razón principal de esto es el incremento de la influencia de la posición del punto inicial de la red sobre los resultados obtenidos, en casos de grandes distancias entre los puntos de observación.

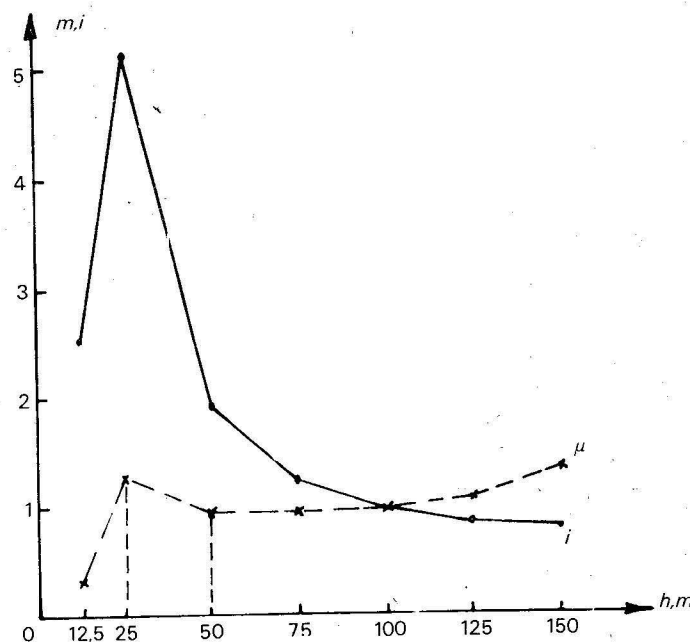


Fig. 2.30 Comportamiento del índice de variabilidad calculado por el método de Kazakovsky (μ) y el procedimiento propuesto (i) en dependencia del intervalo de observaciones

La tabla 2.12 muestra que los límites de los valores posibles del índice de variabilidad son muy amplios y valores similares se pueden obtener al ser totalmente desigual la distancia entre las observaciones. Cuando se trata de la rarefacción de redes densas, este fenómeno se excluye por medio del cálculo del valor promedio de dicho índice, para todas las variantes posibles de la ubicación de los puntos de observación, pero dicho resultado es inalcanzable en los casos de trabajos de búsqueda y exploración ordinarios, cuando para cada densidad concreta de la red de exploración se realiza una sola variante de ubicación espacial.

Como el índice de variabilidad provoca una subestimación de la variabilidad del parámetro, al ser insuficiente la densidad de la red de exploración, es inútil aplicarlo para determinar de manera definitiva la distancia necesaria entre los cruceros de prospección o evaluar la precisión de los resultados de la exploración. Por consiguiente, el modelo en diferencias secundarias, incluso basado en gradientes, tiene una función auxiliar en la solución de estas tareas.

Se debe añadir que durante la exploración no se puede predecir el carácter real de la superficie topográfica y por eso la ubicación espacial de los puntos de observación tiene una gran probabilidad de ser poco representativa. Se concluye fácilmente que el papel del modelo de D.A. Kazakovsky, en la práctica de la búsqueda y exploración, no puede ser muy grande.

Z.D. Nisguretsky propuso evaluar la variabilidad de la potencia del cuerpo mineral mediante el error cuadrático medio σ_1 , calculado sobre la base de diferencias secundarias por la siguiente fórmula:

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (\Delta_i')^2}}{4k} \quad (76)$$

E.I. Popov dedujo una fórmula análoga para determinar el error cuadrático medio σ_e en la confección de los planos de isolíneas:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k (\Delta_i')^2}}{6k} \quad (77)$$

Este autor sostiene que el error real de esta operación (σ_e^*) se encuentra en los siguientes límites:

$$0,3 \sigma_e < \sigma_e^* \leq 1,2$$

Modelo de A.I. Osetsky

Este modelo está destinado al estudio de la variabilidad del parámetro, dentro de una cuadrícula independiente de la red de exploración y fue elaborado para redes cuadradas, pero es fácil demostrar que puede aplicarse sin corrección alguna en los casos de redes rectangulares o rómbicas. La esencia de los razonamientos de A.I. Osetsky consiste en lo siguiente:

Al calcularse el valor promedio del parámetro (por ejemplo, de la potencia) dentro de cualquier cuadrícula, se supone que los valores observados varían de manera regular y rectilínea entre los cruceros de prospección contiguos. Geomé-

tricamente, esto corresponde al remplazo de la forma natural compleja del cuerpo dentro de esta cuadrícula por un prisma truncado. El error de cálculo dependerá, en primer lugar, de la diferencia que existe entre este prisma y la forma real del cuerpo. Para evaluar dicho error, se divide el prisma tetraédrico, cuya superficie en la base es igual a S , en dos prismas triédricos con bases iguales a $S/2$ según un plano diagonal (fig. 2.31).

El volumen del cuerpo dentro de la cuadrícula, se puede expresar de dos maneras:

$$V = \frac{1}{4} (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) S$$

$$V' = V_1 + V_2 = \frac{1}{3} (m_1 + m_2 + m_3) \frac{S}{2} + \frac{1}{3} (m_1 + m_3 + m_4) \frac{S}{2}$$

$$\frac{S}{2} = \frac{1}{6} (2m_1 + m_2 + 2m_3 + m_4) S$$

Si el cuerpo real corresponde perfectamente al prisma, ambos resultados deben ser equivalentes, o sea, su diferencia será igual a cero. Por otra parte, esta diferencia (ΔV) se puede representar de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{4} S(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) - \frac{1}{6} S(2m_1 + m_2 + 2m_3 + m_4) = \\ &= S \frac{3m_1 + 3m_2 + 3m_3 + 3m_4 - 4m_1 - 2m_2 - 4m_3 - 2m_4}{12} = \\ &= S \frac{m_2 + m_4 - m_1 - m_3}{12} = S \frac{(m_2 + m_4) - (m_1 + m_3)}{12} \end{aligned}$$

Es fácil probar que al dividir el prisma según otro plano diagonal el resultado será el siguiente:

$$V = S \frac{(m_1 + m_3) - (m_2 + m_4)}{12}$$

o más generalmente, para ambos casos

$$V = \pm S \frac{(m_1 + m_3) - (m_2 + m_4)}{12}$$

Como en esta expresión $S \neq 0$, el valor $\pm \frac{(m_1 + m_3) - (m_2 + m_4)}{12}$ debe igualarse a cero, cuando son equivalentes los volúmenes V y V' . Por el contrario, si este valor se diferencia de cero, el volumen del prisma tetraédrico no corresponde a la suma de los volúmenes de los dos prismas triédricos, lo que significa que la forma del cuerpo mineral dentro de la cuadrícula estudiada es más compleja que la supuesta. Por consiguiente, el valor K , llamado por A.I. Ositsky *número rojo*, permite evaluar la correspondencia entre la densidad de la red de exploración y el carácter del cuerpo mineral a explorar:

$$K = \frac{(m_1 + m_3) - (m_2 + m_4)}{12} \quad (78)$$

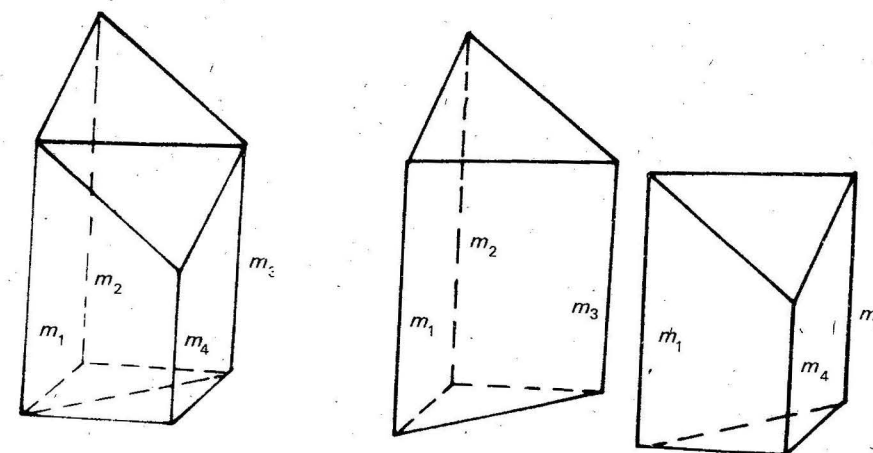


Fig. 2.31 Esquema destinado a ilustrar la deducción de la fórmula del número rojo

Para obtener una característica más objetiva, que relacione la imperfección del prisma supuesto con su altura, se determina el *número rojo relativo* (K_r) mediante la siguiente fórmula:

$$K_r = \frac{K_i}{m_i} = \frac{(m_1 + m_3) - (m_2 + m_4)}{3(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)} \cdot 100 \quad (79)$$

Este número rojo relativo puede variar desde cero (si el cuerpo dentro de la cuadrícula corresponde perfectamente al prisma) hasta 33,3 % (si la suma de las potencias según una de las diagonales es igual a cero). Por lo tanto, el análisis de los valores del número rojo, en diferentes cuadrículas de la red de exploración, permite evaluar la exactitud del pronóstico acerca de la morfología del cuerpo mineral.

El método de D.A. Ositsky es sencillo y eficaz, pero su aplicación está limitada por las suposiciones principales hechas durante la deducción de la fórmula del número rojo, y que son las siguientes: el parámetro tiene que variar de manera regular rectilínea entre los puntos de observación contiguos y las inflexiones de la superficie topográfica, que expresan la variabilidad de dicho parámetro, deben ocurrir según las aristas superiores del prisma y dentro de este, según uno de sus planos diagonales. En la práctica se dan raramente estas condiciones (solo cuando la red de puntos de observación es suficientemente densa); por esta razón no se recomienda la utilización de dicho método durante los estadios iniciales de los trabajos de búsqueda y exploración.

A partir de los valores absolutos del número rojo, E.I. Popov [32] dedujo la siguiente fórmula para evaluar la precisión de los planos hipsométricos, y por consiguiente de cualesquiera planos en isolíneas, con ayuda del error cuadrático medio σ_e .

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n K_i^2}{4n}} \quad (80)$$

donde:

K_i - valor absoluto del número rojo en la cuadrícula i ;

n - número de cuadrículas utilizadas.

Según E.I. Popov el error real de la confección del plano en isolíneas (σ_ϵ) está comprendido dentro de los siguientes límites:

$$0,5 \sigma_\epsilon < \sigma_\epsilon^* < 1,1 \sigma_\epsilon,$$

Modelos basados en las funciones aleatorias

La solución de muchas tareas en la búsqueda y exploración requiere una evaluación cuantitativa de la variabilidad espacial de uno u otro parámetro geológico industrial, en dependencia de la distancia entre los puntos de observación contiguos. Con este objetivo se utiliza el aparato matemático de la teoría de las funciones aleatorias.

Una función se llama aleatoria, si después de realizado el experimento ella puede tomar uno u otro aspecto concreto denominado *realización*, y es imposible predecir este aspecto de antemano (fig. 2.32). El conjunto de realizaciones de la función aleatoria que corresponde a un valor fijo de su argumento se nombra *sección*. El conjunto de valores puntuales del parámetro ubicados en un mismo plano representa una sección plana del campo aleatorio y la serie ordenada de resultados de las observaciones, según determinada dirección, corresponde a una de las realizaciones posibles de la función aleatoria.

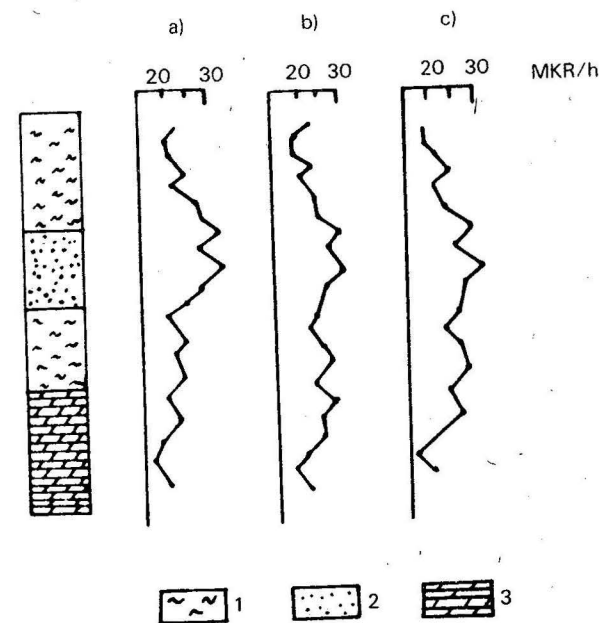


Fig. 2.32 Resultados del carotage -gamma (en mkr/h) según un pozo de perforación: a) carotage principal; b) y c) carotage de control; 1- aleurolita; 2- arenisca; 3- calizas

Los modelos matemáticos basados en funciones aleatorias utilizan la teoría de las probabilidades y los principales conceptos de la estadística matemática. Las características más importantes de la función aleatoria $X(l)$ son: la esperanza matemática $M_x(l)$, la dispersión $D_x(l)$ y la función correlativa $K_x(l, l')$. A diferencia del modelo estadístico ordinario, cada característica de la función aleatoria no representa generalmente una cifra concreta, sino una función de distribución de los valores para diferentes realizaciones.

Al utilizar las funciones aleatorias para crear los modelos matemáticos de los objetos geológicos, estos últimos se subdividen en sectores elementales, correspondientes a las zonas de extrapolación de las observaciones independientes, dentro de los cuales el parámetro que se estudia se considera variable aleatoria. La dificultad principal en la aplicación de dichos modelos consiste en que los resultados de las observaciones geológicas representan, como norma, una sola realización de la función aleatoria, que permite evaluarla con bastante certeza solamente al ser estacionaria y ergódica esta función.

La función aleatoria es estacionaria si todas sus características probabilísticas se conservan, cualquiera que sea el desplazamiento de los argumentos según el eje l . Dicha función se caracteriza por valores constantes de la esperanza matemática y la dispersión; su función correlativa no depende de dos argumentos (l y l'), sino de la distancia entre los valores contiguos del argumento, o sea, en realidad representa la función de un solo argumento. Se llama ergódica a la función aleatoria estacionaria, cuya realización en un gran intervalo es equivalente a un gran número de realizaciones en un pequeño intervalo, es decir, corresponde a los valores promedio del conjunto de realizaciones.

Las funciones de la variabilidad observada en cualquier parámetro de los objetos geológicos no son estacionarias y ergódicas; por eso, la utilización de los modelos en cuestión requiere algunas suposiciones. Además, tales modelos dan resultados positivos solo cuando se dispone de muchos puntos de observación, ubicados según una red lo suficientemente densa, para asegurar la existencia de las relaciones espaciales entre los valores contiguos del parámetro.

En la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración tiene mayor aplicación el modelo basado en la función aleatoria estacionaria con esperanza matemática constante. En este caso la esperanza matemática (el valor promedio) y la dispersión del parámetro se calculan por las fórmulas apropiadas de la estadística matemática y la función correlativa $K_x(h)$ se determina según la expresión:

$$K_x(h) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_{i+h} - \bar{X})}{n} \quad (81)$$

donde:

X_i y X_{i+h} - valores contiguos del parámetro en la serie ordenada de las observaciones;

\bar{X} - valor promedio del parámetro sobre la base de todas las observaciones;

n - número de parejas de valores contiguos del parámetro utilizados en el cálculo.

La relación entre esta función y la dispersión del parámetro se llama coeficiente de autocorrelación ζ_a , y caracteriza el grado de la correlación entre las

secciones de la función aleatoria, equidistantes del valor h (intervalo de observaciones). Si $h=0$ el coeficiente es igual a uno y tiende a cero con el aumento del intervalo de observaciones. La no nulidad del coeficiente de autocorrelación y la suficiencia del número de observaciones utilizadas para calcularlo, se comprueban mediante las fórmulas apropiadas del modelo estadístico [56, 57].

El intervalo de observaciones máximo que asegura la no nulidad del coeficiente en cuestión y su signo positivo se denomina radio de autocorrelación R y corresponde a la distancia máxima entre los puntos de observación. Esta distancia garantiza la existencia de la correlación espacial entre los valores contiguos del parámetro.

Otra característica de la función aleatoria estacionaria es su función estructural $\gamma_x(h)$, que se calcula por la fórmula:

$$\gamma_x(h) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{i+1})^2}{n} \quad (82)$$

La función estructural está vinculada a la correlatividad de la siguiente forma:

$$\gamma_x(h) = 2[\sigma_x^2 - K_x(h)]$$

El comportamiento del coeficiente de autocorrelación y de la función estructural, en el caso de la función aleatoria ergódica, se expresa gráficamente en la figura 2.33. Las desviaciones de los gráficos reales con respecto a este gráfico teórico y que se observan con frecuencia en la práctica (transición del coeficiente de autocorrelación a la zona de valores negativos, periodicidad persistente de sus valores etc.), señalan que la variabilidad de los objetos de estudio es heterogénea, es decir, poseen una estructura compleja, y la aplicación del modelo basado en la función aleatoria no asegura la obtención de resultados confiables.

Se debe recordar que las funciones correlativa y estructural dependen tanto de la dirección según la cual se realiza el estudio de la variabilidad del parámetro como (y sobre todo) del carácter constante de la distancia entre los puntos de observación para determinado intervalo de observaciones h . Por esta razón, los modelos en cuestión son inaplicables en el caso de redes de exploración irregulares.

G. Matérn propuso evaluar la variabilidad del parámetro con ayuda de la mitad del valor de la función estructural denominada semivariograma $\gamma(h)$, que se puede expresar aproximadamente con la fórmula de Veis:

$$\gamma(h) = 3\alpha \ln h \quad (83)$$

donde:

α - coeficiente de dispersión absoluta del esquema de Veis, que caracteriza el ritmo de disminución de la correlación entre los valores del parámetro, a medida que aumenta el intervalo de observaciones.

El semivariograma representa el complemento de la función correlativa hacia la dispersión del parámetro:

$$\gamma(h) + K_x(h) = \sigma_x^2 \quad (84)$$

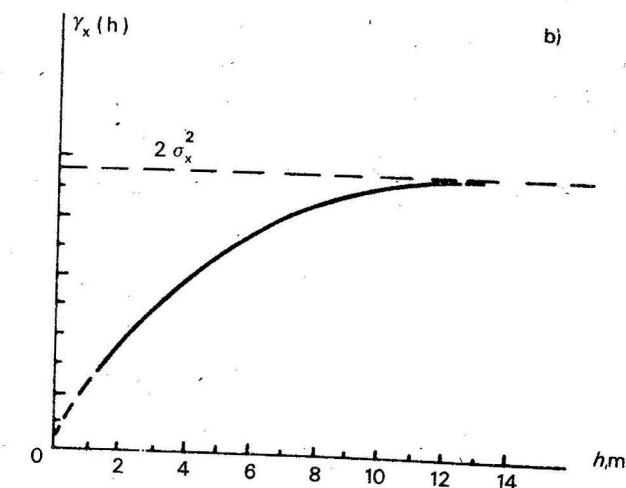
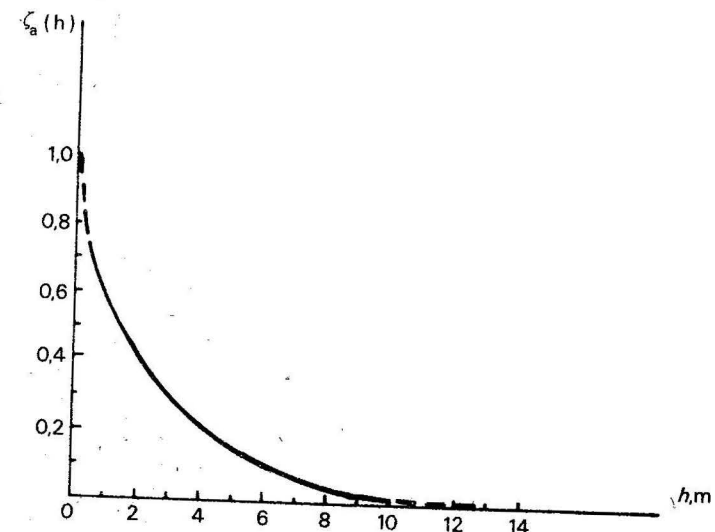


Fig. 2.33 Gráficos teóricos de las funciones correlativa y estructural en dependencia del intervalo de observación h : a) correlativa; b) estructural

A continuación se explicará la metodología concreta de los cálculos del coeficiente de autocorrelación, el semivariograma y el coeficiente de dispersión absoluta, mediante un ejemplo.

Ejemplo 9: Hay que estudiar la variabilidad del contenido de cobre en una galería, donde las muestras fueron tomadas cada 5 m. Los datos iniciales, así como

los cálculos intermedios, se dan en la tabla 2.13, que permite obtener fácilmente los resultados finales:

A. Valor promedio: $\bar{X} = \frac{43,43}{24} = 1,82$

B. Dispersión: $\sigma_x^2 = \frac{6,6301}{24} = 0,276$

C. Función correlativa para diferentes intervalos de observación h :

$$K_x(5) = \frac{3,4390}{23} = 0,149 \quad K_x(10) = \frac{1,0925}{22} = 0,0497$$

$$K_x(15) = \frac{0,6637}{21} = 0,0316$$

D. Función estructural para diferentes intervalos de observación h :

$$\gamma_x(5) = \frac{6,1797}{23} = 0,269 \quad \gamma_x(10) = \frac{10,8582}{22} = 0,496$$

$$\gamma_x(15) = \frac{8,2301}{21} = 0,392$$

E. Coeficiente de autocorrelación y comprobación de su no nulidad para diferentes intervalos de observación h .

Para $h=5$ m: $\zeta_a = \frac{0,149}{0,276} = 0,54$

$$|\zeta_a \sqrt{n-1}| = |0,54 \sqrt{23-1}| = 0,54 \cdot 4,68 = 2,52 < 3$$

$$2 \frac{1-\zeta_a^2}{n} = 2 \frac{1-0,54^2}{23} = 0,295$$

$$\zeta_a = 0,54 > 0,295$$

Para $h=10$ m: $\zeta_a = \frac{0,0497}{0,276} = 0,18$

$$|\zeta_a \sqrt{n-1}| = |0,18 \sqrt{22-1}| = 0,18 \cdot 4,57 = 0,87 < 3$$

$$2 \frac{1-\zeta_a^2}{n} = 2 \frac{1-0,18^2}{\sqrt{22}} = 0,413$$

$$\zeta_a = 0,18 < 0,413$$

Para $h=15$ m: $\zeta_a = \frac{0,0316}{0,276} = 0,11$

$$|\zeta_a \sqrt{n-1}| = |0,11 \sqrt{21-1}| = 0,11 \cdot 4,47 = 0,49 < 3$$

$$2 \frac{1-\zeta_a^2}{2} = 2 \frac{1-0,11^2}{\sqrt{21}} = 0,433$$

$$\zeta_a = 0,11 < 0,433$$

Como puede observarse, el coeficiente de autocorrelación se diferencia de cero solo para la distancia real entre los puntos de observación ($h=5$ m), aunque este resultado puede ser inseguro dado el volumen insuficiente de la selección. Al aumentar el intervalo de observaciones, los valores contiguos del parámetro llegan a ser variables aleatorias independientes.

F. Semivariograma para diferentes intervalos de observación h :

$$\gamma(5) = \frac{0,392}{2} = 0,196 \quad \gamma(10) = \frac{0,496}{2} = 0,248$$

$$\gamma(15) = \frac{0,392}{2} = 0,196$$

G. Coeficiente de dispersión absoluta para diferentes intervalos de observación h :

$$\alpha(5) = \frac{0,135}{3 \ln 5} = \frac{0,135}{3 \cdot 1,6094} = 0,028$$

$$\alpha(10) = \frac{0,248}{3 \ln 10} = \frac{0,248}{3 \cdot 2,3026} = 0,036$$

$$\alpha(15) = \frac{0,196}{3 \ln 15} = \frac{0,196}{3 \cdot 2,7081} = 0,023$$

H. Valor promedio del coeficiente de dispersión absoluta:

$$\bar{\alpha} = \frac{0,028 + 0,036 + 0,023}{3} = 0,029$$

La función correlativa y la estructural en los modelos matemáticos de este tipo permiten resolver las siguientes tareas:

1. Evaluar la homogeneidad del objeto que se estudia y revelar la existencia de regularidades en la sucesión ordenada de los valores del parámetro, a partir del carácter de las curvas que expresan dichas funciones y de la magnitud del coeficiente de autocorrelación.
2. Determinar la distancia máxima entre los puntos de observación, lo que asegura la existencia de la correlación entre los valores contiguos del parámetro que se estudia y argumentar bien la geometrización del objeto y la interpolación de los datos obtenidos. Debe notarse que si las distancias reales sobrepasan el radio de autocorrelación, los resultados de las observaciones se deben generalizar solo mediante el modelo estadístico.
3. Establecer el grado de anisotropía de la variabilidad del parámetro por medio de la comparación de los coeficientes de autocorrelación calculados según diferentes direcciones.

Tabla 2.13

CÁLCULO DE LAS FUNCIONES CORRELATIVA Y ESTRUCTURAL PARA DIFERENTES INTERVALOS DE OBSERVACIONES (h)

CÁLCULO DE LAS FUNCIONES CORRELACIONALES DE OBSERVACIONES (h)								
	h=0 m				h=5 m		h=10 m	
Contenido de cobre, % (X_i)	$(X_i - \bar{X})$	$(X_i - \bar{X})^2$	Contenido de cobre % (Y_i)	$Y_i - \bar{Y}$	$(X_i - Y_i)$	$(X_i - Y_i)^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$	Contenido de cobre, % (Y_i)
1,46	-0,36	0,1 296	1,73	-0,09	-0,27	0,0 729	0,0 324	2,15
1,73	-0,09	0,0 081	2,15	0,33	-0,42	0,1 764	-0,0 297	1,86
2,15	0,33	0,1 089	1,86	0,04	0,29	0,0 841	0,0 132	2,91
1,86	0,04	0,0 016	2,91	1,09	1,05	1,1 025	0,0 436	2,44
2,91	1,09	1,1 881	2,44	0,62	0,47	0,2 209	0,6 758	1,06
2,44	0,62	0,3 844	1,06	-0,76	1,38	1,9 044	-0,4 712	0,98
1,06	-0,76	0,5 776	0,98	-0,84	0,08	0,0 064	0,6 384	1,25
0,98	-0,84	0,7 056	1,25	-0,57	-0,27	0,0 729	0,4 788	1,00
1,25	-0,57	0,3 249	1,00	-0,82	0,25	0,0 625	0,4 674	1,44
1,00	-0,82	0,6 724	1,44	-0,38	-0,44	0,1 936	0,3 116	1,86
1,44	-0,38	0,1 444	1,86	0,04	-0,42	0,1 764	-0,0 152	1,18
1,86	0,04	0,0 016	1,18	-0,64	0,68	0,4 624	-0,0 256	1,44
1,18	-0,64	0,4 096	1,44	-0,38	-0,26	0,0 676	0,2 432	1,69
1,44	-0,38	0,1 444	1,69	-0,13	-0,25	0,0 625	0,0 494	2,15
1,69	-0,13	0,0 169	2,15	0,33	-0,46	0,2 116	-0,0 429	2,44
2,15	0,33	0,1 089	2,44	0,62	-0,29	0,0 841	0,2 046	2,01
2,44	0,62	0,3 844	2,01	0,19	0,43	0,1 849	0,1 178	2,34
2,01	0,19	0,0 361	2,34	0,52	-0,33	0,1 089	0,0 988	2,75
2,34	0,52	0,2 704	2,75	0,93	-0,41	0,1 681	0,4 836	1,96
2,75	0,93	0,8 649	1,96	0,14	0,79	0,6 241	0,1 302	2,04
1,96	0,14	0,0 196	2,04	0,22	-0,08	0,0 064	0,0 308	1,74
2,04	0,22	0,0 484	1,74	-0,08	0,30	0,0 900	-0,0 176	1,55
1,74	-0,08	0,0 064	1,55	-0,27	0,19	0,0 361	0,0 216	-
1,55	-0,27	0,0 729	-	-	-	-	-	-
6,6 301					6,1 797	3, 4 390		
43,43								

h=10 m					h=15 m			
$(Y_i - \bar{Y})$	$(X_i - Y_i)$	$(X_i - Y_i)^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$	Contenido de cobre, % (Y_i)	$(Y_i - \bar{Y})$	$(X_i - Y_i)$	$(X_i - Y_i)^2$	$(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$
0,33	-0,69	0, 4 761	-0, 1 188	1,86	0,04	-0,40	0,1 600	-0,0 144
0,04	-0,13	0, 0 169	-0, 0 036	2,91	1,09	-1,18	1,3 924	-0,0 981
1,09	-0,76	0, 5 776	0, 3 597	2,44	0,62	-0,29	0,0 841	0,2 046
0,62	0,58	0, 3 364	0, 0 248	1,06	-0,76	0,80	0,6 400	-0,0 304
-0,76	1,85	3, 4 225	-0, 8 284	0,98	-0,84	1,06	1,1 236	-0,9 156
-0,84	1,46	2, 1 316	-0, 5 208	1,25	-0,57	0,98	0,9 604	-0,3 534
-0,57	-0,19	0, 0 361	0, 4 332	1,00	-0,82	0,06	0,0 036	0,6 232
-0,82	-0,02	0,0 004	0, 6 888	1,44	-0,38	-0,02	0,0 004	0,3 192
-0,38	-0,19	0,0 361	0, 2 166	1,86	0,04	-0,59	0,3 481	0,3 363
0,04	-0,86	0,7 396	-0,0 328	1,18	-0,64	-0,18	0,0 324	0,1 476
-0,64	0,26	0, 0 676	0, 2 432	1,44	-0,38	0,00	0,0 000	0,1 444
-0,38	0,42	0,1 764	-0,0 152	1,69	-0,13	0,17	0,0 289	-0,0 052
-0,13	-0,51	0,2 601	0,0 832	2,15	0,33	-0,97	0,9 409	-0,2 112
0,33	-0,71	0,5 041	-0,1 254	2,44	0,62	-1,00	1,0 000	-0,2 356
0,62	-0,75	0,5 625	-0,0 806	2,01	0,19	-0,32	0,1 024	-0,0 247
0,19	0,14	0,0 196	0,0 627	2,34	0,52	-0,19	0,0 361	0,1 716
0,52	0,10	0,0 100	0,3 224	2,75	0,93	-0,31	0,0 961	0,5 766
0,93	-0,74	0,5 476	0,1 767	1,96	0,14	0,05	0,0 025	0,0 266
0,14	0,38	0,1 444	0,0 728	2,04	0,22	0,30	0,0 900	0,1 144
0,22	0,71	0,5 041	0,2 046	1,74	-0,08	1,01	1,0 201	-0,0 744
-0,08	0,22	0,0 484	-0,0 112	1,55	0,27	0,41	0,1 681	-0,0 378
-0,27	0,49	0,2 401	-0,0 594	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-
10,8 582				1,0 925	-	-	8,2 301	0,6 637

4. Subdividir la dispersión total del parámetro en las componentes casual y regular para cada intervalo de observación al ser dicho intervalo inferior al radio de autocorrelación, mediante las siguientes fórmulas:

$$\sigma_{x_c}^2 = \sigma_x^2 \zeta_a^2 \quad (85)$$

$$\sigma_{x_r}^2 = \sigma_x^2 (1 - \zeta_a^2) \quad (86)$$

donde:

$\sigma_{x_c}^2$ - dispersión del componente regular de la variabilidad;

$\sigma_{x_r}^2$ - dispersión del componente casual de la variabilidad.

Los valores de la dispersión del componente casual, obtenidos de esta manera, se utilizan con posterioridad para calcular más correctamente el coeficiente de variación y lograr evaluaciones del intervalo más precisas en cuanto al valor promedio del parámetro.

5. Clasificar los objetos geológicos según el carácter de la variabilidad espacial de sus índices reflejados en los gráficos de sus funciones correlativa y estructural.

Sin embargo, debe señalarse que todos los razonamientos expuestos anteriormente son válidos solo en caso de funciones aleatorias estacionarias con una distribución normal de los valores del parámetro. Si la ley de distribución es normal logarítmica, la función, tanto correlativa como estructural, se debe calcular partiendo de los logaritmos de los valores del parámetro, pero esto significa una gran complicación de cálculo y por consiguiente dicho procedimiento no se utiliza en la práctica.

También hay que añadir que las características de la función aleatoria estacionaria se determinan con suficiente precisión solamente si no existen oscilaciones periódicas de los valores del parámetro, cuyos períodos (longitudes de ondas) sean comparables con las dimensiones del objeto que se estudia. En el caso opuesto (constitución rítmica del corte geológico, manifestación periódica de fallas o pilares meníferos, etc.), es necesario, no solo determinar el componente regular de la variabilidad, sino también revelar los períodos de la variación del parámetro y establecer la amplitud de dichas variaciones periódicas. Esto representa una base indispensable para establecer la probabilidad y la magnitud posible del error, que surgirá durante el cálculo del valor promedio del parámetro a causa de dichas oscilaciones periódicas, conforme al intervalo de observaciones real, así como para revelar el intervalo de observación "prohibido" que se aproxima a la longitud de onda predominante y puede provocar el error sistemático. Los métodos que se utilizan para lograr este objetivo son numerosos y complejos y la duración de este curso no permite tratarlos en detalle.

Para formarse una idea más concreta acerca de esos métodos, el lector puede dirigirse a libros científicos especiales o de consulta [4, 15, 33, 36].

Lamentablemente, muchos tipos de variabilidad en los índices de los objetos geológicos no se pueden expresar mediante funciones aleatorias estacionarias, debido a que con frecuencia, el desplazamiento espacial del argumento (los puntos de observación) implica el cambio de la esperanza matemática de esta función, la cual en este caso pasa a ser estacionaria. Una sola realización de la función aleatoria no estacionaria (por ejemplo, los resultados de los trabajos de búsqueda y exploración), es insuficiente para obtener una evaluación confiable de sus características y por esta razón los modelos matemáticos basados en estas funciones se pueden crear solo si se admiten ciertas suposiciones. Los más corrientes entre dichos modelos son el de nivelación de las observaciones y el *trend* (tendencia).

En el primer modelo se supone que, dentro de sectores diminutos del objeto que se estudia, la función aleatoria no estacionaria se transforma en estacionaria. La variante sencilla de este modelo fue propuesta por P.L. Kalistov, para la serie ordenada de observaciones realizadas por intervalos regulares, según una dirección cualquiera [10]. En este caso, la subdivisión de la variabilidad total del parámetro en sus componentes casual y regular se obtiene con ayuda de la llamada "ventana deslizante", que abarca varios puntos de observación contiguos y se desplaza sucesivamente a los diferentes intervalos de observación en la dirección escogida. Dentro de esta "ventana", para cada posición fija, los valores reales del parámetro en los puntos de observación independientes se remplazan por la media aritmética calculada sobre esa base y colocada en la mitad del intervalo que corresponde a la "ventana deslizante". Utilizando los puntos que corresponden a dichos valores promedio, se traza la línea que expresa la variabilidad regular del parámetro; las diferencias entre sus valores reales en los puntos de observación y los valores nivelados correspondientes, caracterizarán el componente casual de la variabilidad.

Como regla, la "ventana deslizante" abarca tres puntos contiguos, más raramente cinco puntos, y la "nivelación" se reanuda, en primer lugar, utilizando los datos reales y luego partiendo de los valores nivelados correspondientes. La mejor variante de nivelación tiene que ofrecer la máxima proporción del componente regular de la variabilidad, o sea, la mínima dispersión de la variabilidad casual que se calcula a través de los cuadrados de las diferencias entre los valores reales y nivelados del parámetro. Las nivelaciones ulteriores provocan el incremento de la dispersión, ya que la curva nivelada tiende a la línea recta correspondiente al valor promedio del parámetro para la selección, mientras el número de nivelaciones aumenta de manera ilimitada. En las posiciones extremas de la "ventana deslizante", cuando esta abarca solo dos puntos de observación, el punto extremo se utiliza dos veces en el cálculo del valor nivelado, para obtener los resultados necesarios para toda la longitud del intervalo.

Como ejemplo se utiliza el modelo de P.L. Kalistov para analizar la variabilidad del contenido de cobre en una mena pirito-cuprífera, en una de las galerías de exploración, donde las muestras se tomaron en el frente de la excavación cada 2 m de avance. Los datos del muestreo y los resultados de los cálculos se indican en la tabla 2.14 y se expresan gráficamente en la figura 2.34.

Como se observa en la tabla 2.14, la variabilidad regular se excluyó después de la primera nivelación, por cuanto se ha logrado la mínima dispersión del componente casual ($\sigma_{x_c}^2 = \sigma^2 = 0,509$). Si se sabe que la dispersión total del parámetro es igual a la suma de las dispersiones de sus componentes ($\sigma_x^2 = \sigma_{x_c}^2 + \sigma_{x_r}^2$) se puede evaluar la proporción de cada componente en la variabilidad total del contenido de cobre:

$$\text{Variabilidad regular: } \frac{1,279 - 0,509}{1,279} \cdot 100 = 60,3\%$$

$$\text{Variabilidad casual: } \frac{0,509}{1,279} \cdot 100 = 39,7\%$$

El grado de variabilidad casual se caracteriza con ayuda de su coeficiente de variación (V_{cas}) que será:

$$V_{cas} = \frac{0,509}{2,41} \cdot 100 = 21,1\%$$

Tabla 2.14

REVELACIÓN DEL COMPONENTE CASUAL DE LA VARIABILIDAD SEGÚN EL MÉTODO DE P.L. KALISTOV

Número de observaciones	Datos iniciales		Primera nivelación		Segunda nivelación		Tercera nivelación	
	Contenido de cobre, % (X_i)	$(X_i - \bar{X})^2$	Contenido de cobre, % (Y_i)	$(X_i - Y_i)$	Contenido de cobre, % (Y_i)	$(X_i - Y_i)^2$	Contenido de cobre, % (Y_i)	$(X_i - Y_i)^2$
1	1,48	0,8649	1,25	0,0529	1,41	0,0049	1,49	0,0001
2	0,78	2,6569	1,73	0,0025	1,65	0,7569	1,73	0,9025
3	2,92	0,2601	1,96	0,9216	2,12	0,6400	2,02	0,8100
4	2,17	0,0576	2,68	0,2601	2,28	0,0121	2,24	0,0049
5	2,96	0,3025	2,19	0,5929	2,32	0,4096	2,22	0,5476
6	1,45	0,9216	2,08	0,3969	2,07	0,3844	2,17	0,6184
7	1,82	0,3481	1,93	0,0121	2,12	0,0900	2,14	0,1024
8	2,51	0,0100	2,34	0,0289	2,23	0,0784	2,18	0,1089
9	2,70	0,0841	2,42	0,0784	2,20	0,2500	2,24	0,2116
10	2,04	0,1369	1,85	0,0361	2,28	0,0576	2,34	0,0900
11	0,82	2,5281	2,57	3,0625	2,55	2,9929	2,73	3,6481
12	4,86	6,0025	3,28	2,4964	3,35	2,2801	3,20	2,7556
13	4,15	3,0976	4,21	0,0036	3,69	0,2116	3,55	0,3600
14	3,61	1,4400	3,59	0,0004	3,60	0,0001	3,55	0,0036
15	3,02	0,3721	3,01	0,0001	3,37	0,1225	3,48	0,2116
16	2,41	0,0000	3,49	1,1664	3,48	1,1449	3,57	1,3456
17	5,04	6,9169	3,94	1,2100	3,85	1,4161	3,65	1,9321
18	4,36	3,8025	4,13	0,0529	3,61	0,5625	3,47	0,7921
19	3,00	0,3481	2,75	0,0625	2,95	0,0025	2,89	0,0121
20	0,88	2,3409	1,96	1,1664	2,11	1,5129	2,31	2,0449
21	2,00	0,1681	1,62	0,1444	1,87	0,0169	1,96	0,0016
22	1,99	0,1764	2,03	0,0016	1,91	0,0064	1,90	0,0081
23	2,10	0,0961	2,09	0,0001	1,93	0,0289	1,86	0,0576
24	2,18	0,0529	1,68	0,2500	1,74	0,3116	1,79	0,1521
25	0,77	2,6896	1,56	0,6241	1,71	0,8806	1,80	1,0609
26	2,74	0,1089	1,98	0,5776	1,95	0,6241	1,90	0,7056
27	2,42	0,0001	2,32	0,0100	2,04	0,1444	2,02	0,1600
28	1,80	0,3721	1,82	0,0004	2,07	0,0729	2,09	0,0841
29	1,23	1,3824	2,08	0,7225	2,15	0,8464	2,21	0,9604
30	3,22	0,6561	2,56	0,4356	2,40	0,4356	2,32	0,8100
Suma	72,37	38,3841		15,2699		16,2978		18,4035
Promedio	$\bar{X}=2,41$	$\sigma_x^2=1,279$		$\sigma_1^2=0,509$		$\sigma_2^2=0,543$		$\sigma_3^2=0,613$

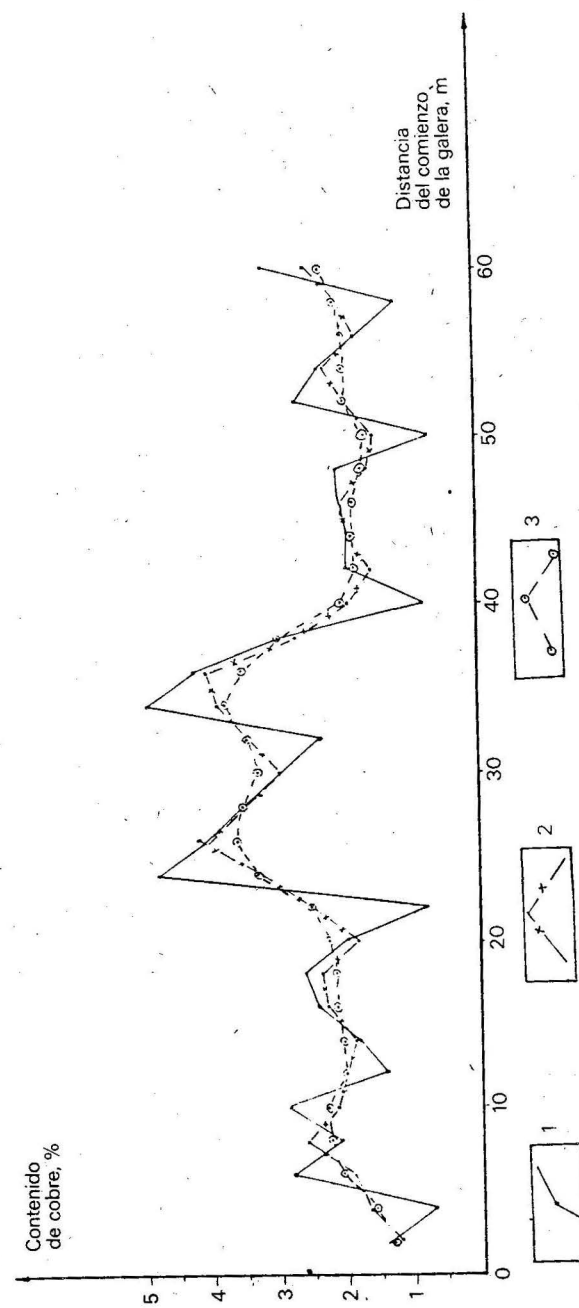


Fig. 2.34 Gráficos de variaciones del contenido de cobre según una galería: 1- según los datos reales; 2- después de la primera nivelación; 3- después de la segunda nivelación

Si se compara este resultado con el coeficiente de variación obtenido mediante el modelo estadístico clásico ($V = \frac{1,279}{2,41} \cdot 100 = 53,0\%$) se comprueba que el modelo de P.L. Kalistov caracteriza mucho mejor la variabilidad casual del parámetro, si se manifiestan sus variaciones regulares. Sin embargo, hay que recordar que este modelo a veces puede dar resultados erróneos, ya que utiliza las relaciones mutuas entre los valores contiguos dentro de la "ventana deslizante", las cuales en la realidad pueden faltar.

Una metodología de nivelación análoga se puede aplicar a las selecciones que abarcan una superficie; las observaciones se realizan según una red regular (por ejemplo, durante la confección de los planos hipsométricos y otros planos en isóneas). En esos casos, las dimensiones de la "ventana deslizante" corresponden, generalmente, a una cuadrícula de la red. La primera nivelación ofrece los datos intermedios relacionados con los centros de las cuadrículas; la segunda, que se realiza sobre la base de estos datos, permite obtener los valores nivelados que corresponden a los datos iniciales y expresan más o menos claramente la variabilidad regular. Estas operaciones se reiteran hasta obtener la dispersión mínima del componente casual de la variabilidad.

El modelo de *trend* tiene como base la subdivisión de la variabilidad total en sus componentes regular y casual [$f(x, y, z) = M(x, y, z) + \tau$] y la selección de una expresión algebraica conveniente que se aproxime lo más posible a la esperanza matemática $M(x, y, z)$ de la función aleatoria. Esta expresión algebraica denominada *trend* permite calcular, para cualquier punto del objeto, el componente regular del parámetro y, después de compararlo con su valor real, es posible determinar la desviación casual (τ).

La hipótesis sobre la existencia del *trend* se comprueba por dos métodos: el de los cambios de signo o el del número de saltos. En el primer caso, cuando las variaciones del parámetro son suaves, se determina el número de puntos de observación (t) en los cuales el signo de la diferencia de sus valores contiguos, llega a ser opuesto en comparación con la diferencia precedente y se calcula el número teórico de dichos puntos (T) para la sucesión casual de los datos, mediante la siguiente fórmula:

$$T = \frac{2n-4}{3} \quad (87)$$

donde:

n - número de puntos de observación en la serie ordenada.

Luego se determina el criterio probabilístico Z , que permite aceptar la hipótesis en cuestión o rechazarla como falsa. Para obtener este criterio, en primer lugar, se establece la dispersión del número de puntos de cambio de signo (σ_t^2) por la fórmula:

$$\sigma_t^2 = \frac{16n-29}{90} \quad (88)$$

Entonces el criterio Z se expresa de la forma siguiente:

$$Z = \frac{t-T}{\sqrt{\sigma_t^2}} \quad (89)$$

La comprobación de dicha hipótesis se realiza generalmente para una probabilidad de confianza igual a 0,95; un valor absoluto de dicho criterio superior a 1,65 es suficiente para considerar probada la existencia del *trend*.

El método de saltos se utiliza cuando las variaciones del parámetro son bruscas. En este caso hay que dividir la sucesión ordenada de los valores observados en grupos de dos géneros; los primeros se forman a partir de los valores inferiores a la mediana y los demás a partir de los valores superiores a esta. Se llama salto al intervalo de sucesión ordenada dentro del cual se observan los valores del parámetro pertenecientes a un solo grupo (fig. 2.35). El número real de dichos saltos (u) se compara con el número teórico para la sucesión casual (U), calculado según la fórmula:

$$U = \frac{2n_1n_2}{n_1+n_2} + 1 \quad (90)$$

donde:

n_1 - número de valores del parámetro superiores a la mediana;

n_2 - número de valores del parámetro inferiores a la mediana.

La dispersión del número de saltos se obtiene por la fórmula:

$$\sigma_u^2 = \frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)(n_1 + n_2 - 1)} \quad (91)$$

Con dichas características se puede calcular el criterio probabilístico mediante la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{u - U}{\sqrt{\sigma_u^2}} \quad (92)$$

Si el valor absoluto de Z es superior a 1,65 la existencia del *trend* está probada.

Potencia del cuerpo, M, m

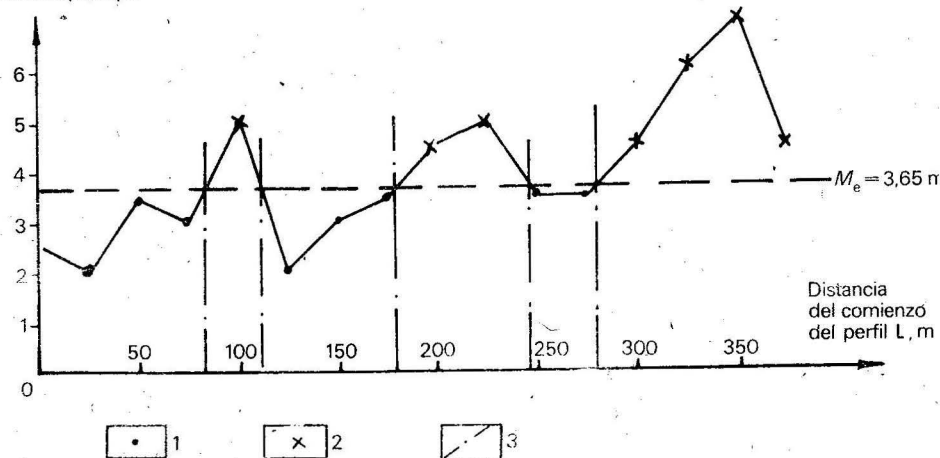


Fig. 2.35 Gráfico de variaciones de la potencia del cuerpo mineral según un perfil de exploración: 1- magnitudes de la potencia inferiores a la mediana; 2- magnitudes de la potencia superiores a la mediana; 3- límites de los saltos

En el caso representado en la figura 2.35, $n_1=7$ y $n_2=9$; el número de saltos real es igual a 6, y el teórico se determina como $U = \frac{2 \cdot 7 \cdot 9}{7+9} + 1 = 9$, la dispersión es igual a:

$$\sigma_u^2 = \frac{2 \cdot 7 \cdot 9 [(2 \cdot 7 \cdot 9) - (7+9)]}{(7+9)^2 (7+9-1)} = 3,61$$

El cálculo del criterio probabilístico es:

$$Z = \frac{6-9}{\sqrt{3,61}} = -1,58$$

Entonces, a pesar de la tendencia visualmente discernible de incremento en la potencia del cuerpo, a medida que se aleja del comienzo del perfil, la existencia del *trend* no se puede considerar probada.

Si el *trend* existe, se representa en forma de una u otra expresión matemática: polinomio, función exponencial, trigonométrica o logarítmica, etc.; la forma de dicha expresión se escoge de manera arbitraria. Esta es la principal desventaja de dicho modelo, porque da lugar a soluciones diferentes de la tarea, a partir de los mismos datos iniciales. Los coeficientes, conjuntamente con las incógnitas, en la expresión escogida, se determinan de manera que la suma de los cuadrados de las desviaciones casuales sea mínima.

Según la ubicación espacial de los puntos de observación, el *trend* puede ser unidimensional (lineal), bidimensional (superficial) y tridimensional (volumétrico). El caso más sencillo de revelación del *trend* está representado por la deducción de la ecuación de regresión lineal. Los cálculos, en el caso del *trend* bidimensional, y sobre todo del tridimensional, son muy complejos y, por lo general, se ejecutan mediante computadoras, según programas unificados; para esto se utilizan las observaciones realizadas con ayuda de una red, que puede ser tanto regular como irregular.

Las desventajas del modelo de *trend* son las siguientes:

El modelo acepta la existencia de valores irreales del parámetro que se estudia (valores negativos de la potencia y del contenido del componente).

La interpolación de los valores del parámetro se realiza a veces de manera formal y hasta en la zona de las rocas estériles, sin tener en cuenta los límites geológicos claros y las variaciones bruscas del parámetro.

Se tergiversan la discontinuidad y la complejidad de la estructura interna del objeto que se estudia.

No obstante, el modelo en cuestión se utiliza mucho y con gran resultado para pronosticar la variabilidad regular del parámetro, precisar la característica de su variabilidad casual, revelar la heterogeneidad del objeto, delimitar las zonas anómalas y seleccionar los valores anómalos del parámetro.

Para concluir la revisión de los métodos matemáticos que se aplican al análisis y pronóstico de la variabilidad de los parámetros geólogo-industriales de los cuerpos minerales, es preciso subrayar que ninguno de ellos garantiza una solución confiable y precisa de esta tarea. Por esta razón, muy a menudo se utiliza un complejo de métodos matemáticos para estudiar el mismo parámetro del objeto geológico y con frecuencia se necesita la aplicación de diferentes modelos matemáticos en las diferentes etapas de los trabajos de búsqueda y exploración. En esos casos, la selección de los mejores modelos depende tanto de las particulari-

dades concretas del objeto como de las tareas planteadas y los métodos de los trabajos geológicos que se utilizan para resolverlas. Además, hay que recordar que cualquiera que sea el modelo matemático, es necesario utilizar en los cálculos los resultados de las observaciones del parámetro que pertenecen al mismo nivel de investigación. De no ser así, los resultados no serán comparables (por ejemplo, datos sobre la calidad del mineral útil obtenidos a través de muestras de diferente tipo o volumen) y su análisis conjunto para la misma selección (conjunto geológico) será insensato.

2.4.4 Determinación del número necesario y suficiente de cruceros de prospección

La determinación del número de cruceros de prospección necesario y suficiente para estudiar el objeto geológico o, en otras palabras, la argumentación de la densidad racional de la red de exploración, es una de las tareas más importantes en la teoría de la exploración de los yacimientos minerales útiles. Existen diferentes métodos de solución, que se tratarán posteriormente en los sistemas de trabajos de exploración. En este capítulo solo se tratarán los basados en los modelos matemáticos.

En un caso general, la solución matemática de dicha tarea utiliza la correlación entre tres valores: determinado índice de la variabilidad del cuerpo mineral, error admisible del resultado final y número de observaciones que se realizan para estudiar el objeto. Como la variabilidad del cuerpo mineral se determina a través de la manifestación conjunta de la variabilidad de los diferentes parámetros, los cálculos matemáticos se ejecutan para el parámetro más variable, ya que el número de observaciones que asegura su estudio es suficiente para obtener la evaluación precisa de todos los demás parámetros.

El problema más complejo que se presenta al realizar estos cálculos consiste en la determinación del nivel de error admisible, con el cual se obtiene el resultado final. En la mayoría de los casos, estos resultados finales de la exploración son los valores promedio de los parámetros geólogo-industriales principales (potencia del cuerpo mineral, contenido del componente útil, masa volumétrica de la mena, coeficiente de menificación, etc.), que se utilizan para calcular las reservas de la materia prima mineral. Por lo tanto, los errores admisibles se pueden establecer a través del intervalo de aceptación de la evaluación de cualquier parámetro. En esto se encuentra la mayor dificultad, consistente en que, para la mayoría de los minerales útiles, faltan las exigencias establecidas oficialmente (sin hablar ya de las científicamente argumentadas) en cuanto a la magnitud de la desviación admisible del valor promedio de un parámetro determinado durante la exploración a partir de su valor real. Tampoco está establecida la probabilidad necesaria con la cual los resultados de la exploración deben encontrarse dentro de los límites de precisión fijados. Por este motivo, en cada caso concreto, antes de abordar los cálculos matemáticos es necesaria la coordinación con los institutos de proyección que rigen la rama correspondiente, acerca de dichas exigencias, ya que la precisión necesaria de los datos de exploración depende, sobre todo, de la confiabilidad del proyecto técnico para la explotación del yacimiento y la elaboración del mineral útil. Debe añadirse que la solución general de este problema, sobre la base de la evaluación económica del daño causado por la determinación incorrecta de los índices técnico-económicos, de la futura empresa minera,

cuando son defectuosos los resultados de la exploración representa una tarea de suma actualidad e importancia que debe resolverse con urgencia.

En cuanto a los cálculos, estos son más sencillos cuando se utiliza el modelo estadístico. En este caso, el número de cruceros de prospección (n) se determina a partir de la fórmula (49), según la siguiente expresión:

$$n = \left(\frac{V_t}{\delta} \right)^2 \quad (93)$$

El coeficiente de probabilidad de confianza (t) puede variar desde 1 hasta 2, y no existen recomendaciones uniformes acerca de su valor necesario. Esta es la desventaja principal del cálculo, ya que los resultados son indefinidos y solo son útiles para dar una orientación de carácter general en cuanto a la densidad necesaria de la red.

Si se aplican los modelos con nivelación de observaciones, la fórmula anterior es válida si en lugar del coeficiente de variación total se coloca el de variación casual (V_{cas}).

Cuando la utilización de los modelos basados en la función aleatoria estacionaria, revela la correlación entre los valores contiguos del parámetro hay que calcular el número de cruceros de prospección por la fórmula convenientemente modificada:

$$n = \left(\frac{V \sqrt{1 - \zeta_a^2} t}{\zeta} \right)^2 = \left(\frac{V_t}{\delta} \right)^2 (1 - \zeta_a^2) \quad (94)$$

Al tratarse de los modelos en diferencias finitas se puede utilizar el de D.A. Kazakovsky, pero debe tenerse la seguridad de que la selección de exploración utilizada para calcular el índice de variabilidad es representativa. Desafortunadamente, en la mayoría de los casos se carece de esta seguridad y por eso los cálculos del número de cruceros de prospección solo dan una orientación general. La fórmula correspondiente tiene el siguiente aspecto:

$$n = 1000 R_{\mu} \quad (95)$$

El valor requerido del índice del grado de estudio R se fija mediante la tabla 2.10, conforme al error admisible aceptado del valor promedio del parámetro.

Después de calcular por uno u otro procedimiento el número de cruceros de prospección necesario, se procede a la determinación de la densidad de la red de exploración mediante la fórmula aproximada:

$$S_0 = \frac{S}{n} \quad (96)$$

donde:

S_0 - superficie del cuerpo mineral que corresponde a un punto de observación, o sea, la superficie de una cuadrícula de la red;

S - superficie total del cuerpo dentro del sector a estudiar.

El carácter aproximado de esta fórmula se debe a que en esta se tiene en cuenta la complejidad del contorno exterior del cuerpo mineral. Por esta razón, a una parte de los laboreos de prospección periféricos corresponden superficies inferiores a S_0 . A veces este defecto se puede eliminar con ayuda del coeficiente de corrección ($K > 1$), por el cual se multiplica la superficie total y se fija su valor en función de la complejidad del contorno del cuerpo mineral. Sin embargo, es dudosa la necesidad de esto, si se tiene en cuenta el carácter aproximado de los resultados que se obtienen. Es mucho más importante escoger correctamente la

parte del objeto a la cual corresponderá el número de cruceros de prospección calculado. Es conveniente señalar que dicha parte del objeto tiene que coincidir con el bloque de cálculo de reservas, dentro del cual será calculado el valor promedio del parámetro, y cuyo error admisible fue utilizado en la argumentación de la densidad de la red de exploración.

Una de las variantes de la argumentación matemática de la distancia entre los laboreos de prospección es la rarefacción de la red de exploración existente. Se supone que esta red asegura indudablemente la precisión requerida de los resultados (nótese a propósito, que esto siempre debe comprobarse, en particular, mediante el cálculo del error posible de dichos resultados según los modelos matemáticos apropiados). La verificación artificial de esta red y el análisis de todas las variantes posibles de las selecciones rarefadas, permiten determinar los valores promedio de diferentes parámetros geólogo-industriales en cada variante y los errores de su evaluación. Si se conoce el nivel admisible de dicho error se puede establecer la densidad mínima de la red rarefada, que asegura los errores admisibles en todas sus variantes de ubicación. Con frecuencia, en el método de rarefacción de la red existente, se utiliza el modelo estadístico de la variabilidad, aunque todos los modelos tratados anteriormente también son aplicables.

La comparación de las evaluaciones puntuales del valor promedio del parámetro geólogo-industrial, obtenidos sobre la base de la red inicial y rarefada, es totalmente erróneo, aunque se hace en la práctica con bastante frecuencia. Como se señaló anteriormente, la evaluación puntual no ofrece ninguna información acerca de la precisión del resultado alcanzado y por consiguiente no puede servir como base para hacerse una idea en cuanto a la precisión de los valores promedio calculados para diferentes selecciones de exploración.

Como ejemplo se argumenta la densidad racional de la red de exploración para un cuerpo bauxítico cuyo parámetro más variable es su potencia (fig. 2.36). La densidad de la red alcanzada durante la exploración de explotación ($12,5 \times 12,5$ m) permite determinar la potencia media del cuerpo ($\bar{m}=2,91$ m), su dispersión total ($\sigma_m^2=7,55$) y el error relativo posible del valor promedio, teniendo en cuenta la correlación entre las observaciones contiguas ($\zeta_a=0,67$) para la probabilidad de confianza igual a 0,68 ($\delta=9,7\%$). Para los cuerpos bauxíticos de este tipo, el error admisible en el cálculo del valor promedio de la potencia, durante la exploración detallada, es igual a 20 % y por eso los resultados de la exploración se deben considerar confiables. Se rarefacta la red inicial y se excluye cada segundo pozo de perforación alternativamente, lo que da lugar a dos variantes posibles de ubicación espacial de la red cuadrada (fig. 2.36a) cuyo lado de cuadrícula se aproxima a 18 m (variantes I y II). Los valores promedio de la potencia de cuerpo en esas variantes son iguales a 2,76 m y 3,06 m, las dispersiones a 7,53 y 7,35 y los errores relativos posibles, teniendo en cuenta la relación de los valores contiguos ($\zeta_a=0,38$), a 16,3 % y 15,2 %. Es evidente que dicha distancia entre los pozos de perforación asegura la precisión requerida de los resultados.

Se procede a la segunda rarefacción de la red y se ubican los laboreos de prospección según una red cuadrada cuyo lado será igual a 25 m. En este caso son posibles cuatro variantes de la posición del punto inicial de la red: variantes III, IV, V y VI (fig. 2.36b), cuyos resultados son los siguientes:

$\bar{m}_3=2,86$ m	$\bar{m}_4=3,49$ m	$\bar{m}_5=2,93$ m	$\bar{m}_6=2,65$ m
$\sigma_{m_3}=6,82$	$\sigma_{m_4}=5,43$	$\sigma_{m_5}=8,08$	$\sigma_{m_6}=8,30$
$\delta_3=24,3\%$	$\delta_4=20,8\%$	$\delta_5=25,8\%$	$\delta_6=30,2\%$

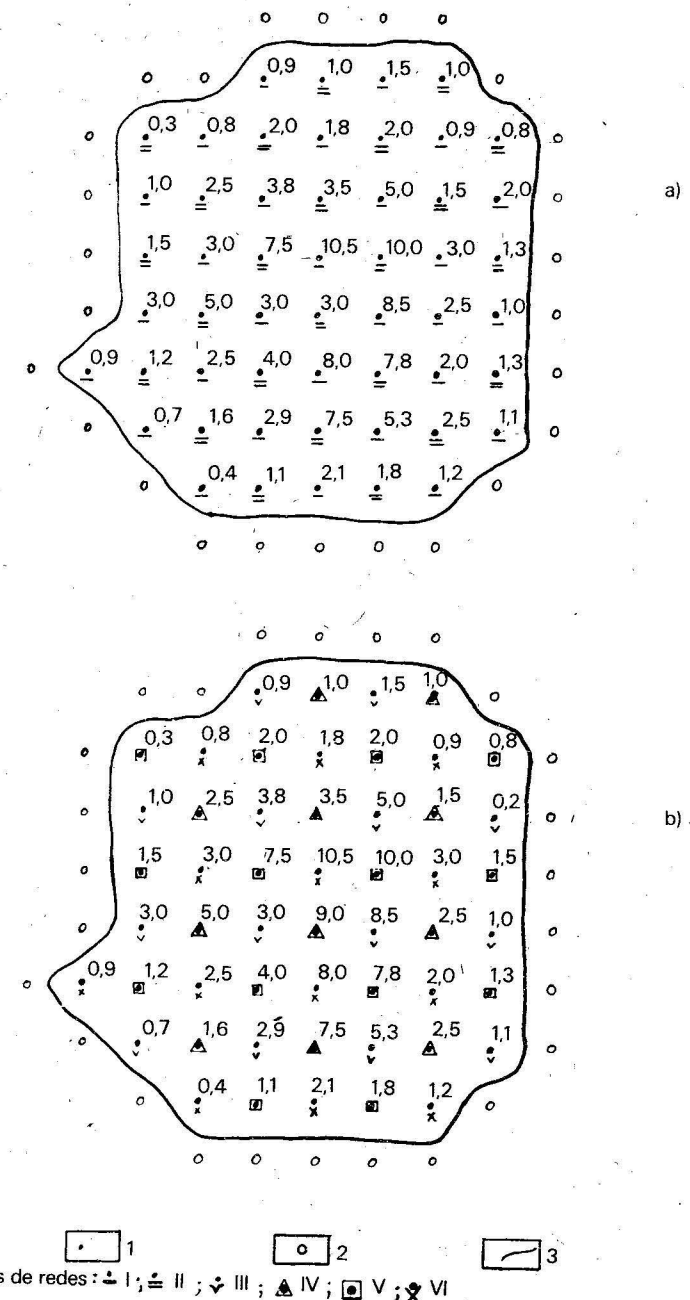


Fig. 2.36 Variantes de ubicación de las redes rarefadas: a) con el lado de la cuadrícula igual a 18 m; b) con el lado de la cuadrícula igual a 25 m; 1- pozo de perforación y potencia de la bauxita observada; 2- pozos de perforación sin mena; 3- contorno cero del cuerpo mineral

Hay que comprobar que esta densidad de la red es insuficiente para asegurar la precisión necesaria de los resultados y la red con el lado de 18 m es la más racional. Es importante destacar que la aplicación del procedimiento más sencillo para comparar las redes inicial y rarificada solo a través de los valores promedio de la potencia hará creer que hasta la red de 25 m es suficiente.

$$\frac{\bar{m}_3 - \bar{m}}{\bar{m}} \cdot 100 = \frac{2,86 - 2,91}{2,91} \cdot 100 = -1,7\%$$

$$\frac{\bar{m}_4 - \bar{m}}{\bar{m}} \cdot 100 = \frac{3,49 - 2,91}{2,91} \cdot 100 = 19,9\%$$

$$\frac{\bar{m}_5 - \bar{m}}{\bar{m}} \cdot 100 = \frac{2,93 - 2,91}{2,93} \cdot 100 = 0,7$$

$$\frac{\bar{m}_6 - \bar{m}}{\bar{m}} \cdot 100 = \frac{2,65 - 2,91}{2,91} \cdot 100 = -8,9\%$$

Esta conclusión es totalmente absurda, sobre todo porque esta distancia sobrepasa el radio de autocorrelación entre los valores contiguos de la potencia y por consiguiente no garantiza una geometrización confiable del cuerpo y una interpolación y extrapolación bien argumentadas de los datos obtenidos durante la exploración.

2.4.5 Evaluación de la exactitud de los resultados de la exploración

Esta tarea es inversa a la precedente y generalmente consiste en la determinación de los intervalos de aceptación de los valores promedio de diferentes parámetros geólogo-industriales. Sin embargo, hay que señalar que la precisión de estos valores y la exactitud de la exploración son casos diferentes; por ejemplo, el ángulo de buzamiento promedio para todo el yacimiento no tiene ningún sentido práctico, ya que para organizar la explotación de manera correcta es indispensable conocer los límites de los sectores, dentro de los cuales dicho ángulo corresponde a la misma clase industrial, lo que permite aplicar el mismo sistema de extracción del mineral útil.

Por eso, la precisión del cálculo del ángulo de buzamiento promedio no tiene nada que ver con la precisión alcanzada en el estudio de las variaciones espaciales de dicho parámetro, las cuales son importantísimas, tanto al confeccionarse el proyecto de la empresa minera como durante su funcionamiento posterior.

Lo mismo se aplica a todos los demás parámetros geólogo-industriales, por cuanto también para ellos la exactitud de la exploración se caracteriza no solo por la precisión de la determinación de sus valores promedio, sino también por el grado de corrección con que se revelan el carácter y la estructura de su variabilidad según toda la superficie del yacimiento. Cualquiera que sea la metodología de evaluación de la exactitud de los resultados de la exploración, esta tiene que considerar las magnitudes de diferentes errores cometidos en el transcurso de la

búsqueda o la exploración. Por su naturaleza, todos los errores se pueden agrupar de la siguiente manera:

Errores técnicos

Errores motivados por la representatividad insuficiente de la selección de exploración.

Errores del pronóstico geológico.

Errores de la interpolación y extrapolación de los datos reales.

Errores técnicos

Dependen de la metodología general de los trabajos de búsqueda y exploración, que se aplica en la realidad; de la calidad de los equipos y aparatos utilizados; de la calificación del personal; de la minuciosidad y rigurosidad con que se realizan las observaciones y la anotación de sus resultados. Los errores de este género, por lo general son casuales, aunque a veces pueden ser sistemáticos (desgaste selectivo del testigo, error sistemático de los análisis químicos o del método utilizado para calcular el valor promedio del parámetro, etc.), y se revelan sin grandes dificultades mediante observaciones de control. Lo referente a la evaluación de los errores técnicos, tanto casuales como sistemáticos, se tratará con suficiente detalle en el capítulo dedicado al muestreo de minerales útiles.

Errores motivados por la representatividad insuficiente en la selección de la exploración

Surgen debido a que cada ubicación concreta del sistema de puntos de observación con respecto al objeto geológico es más o menos casual. Como no se conoce de antemano la posición real de los puntos del objeto donde uno u otro parámetro geólogo-industrial sufre cambios bruscos, existen pocas probabilidades de hacer coincidir los puntos de observación con estos lugares. Aun más, si esto se logra para un parámetro (por ejemplo, para la potencia del cuerpo), las observaciones casi siempre serán poco representativas para otros parámetros (calidad de la mena, estructura interna del cuerpo mineral, estructura tectónica del terreno, etc.).

En la figura 2.37a se muestra el gráfico de la variación de la potencia de un cuerpo bauxítico, según un perfil de exploración confeccionado a partir de los resultados de la exploración de explotación. A pesar de que la red de observaciones es muy densa, (12,5 × 12,5 m) no se puede pretender que la representatividad de la selección de exploración sea perfecta; basta desplazar los pozos de perforación un semiintervalo para que el carácter visible de la variabilidad de la potencia sea mucho más sencillo (línea punteada de la figura 2.37a) y se altere el valor promedio de este parámetro (4,08 m contra 3,86 m según los datos reales). Además, no se tiene garantía alguna de las variaciones regulares rectilíneas de la potencia entre los pozos de perforación contiguos y por consiguiente pueden existir ensanchamientos y estrechamientos desconocidos del cuerpo.

La representatividad de la selección de exploración también disminuye de manera muy considerable al aumentar la distancia entre los puntos de observación, y es mucho más marcada la influencia de la posición del punto inicial de la red de exploración sobre los resultados obtenidos (fig. 2.37b).

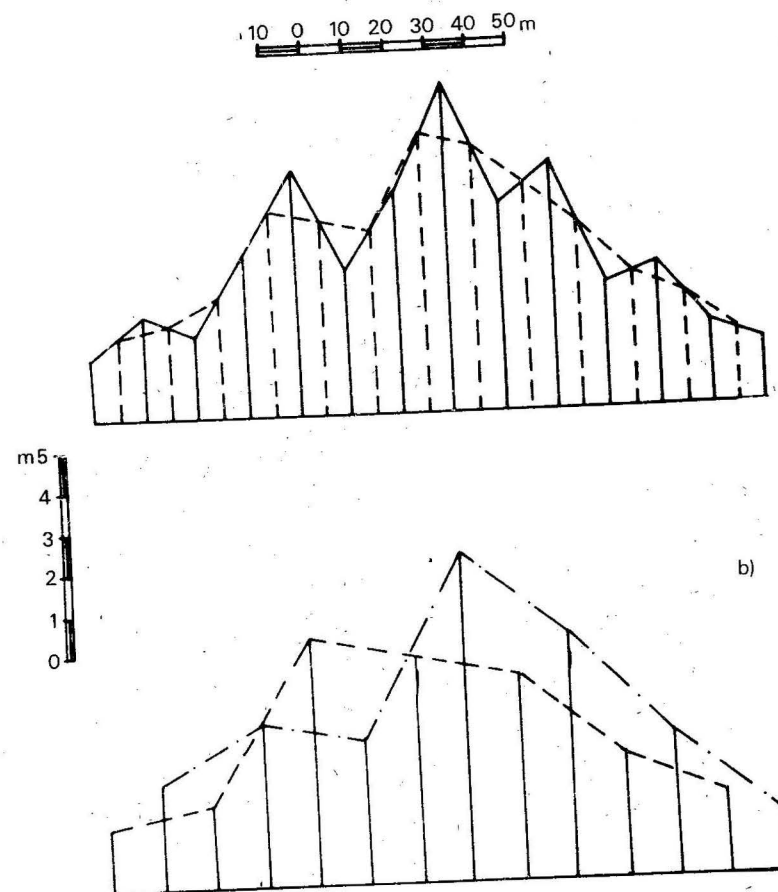


Fig. 2.37 Diferentes ideas sobre la variabilidad de la potencia bauxítica según un perfil de exploración: a) al desplazarse los puntos de observación; b) al rarefarse la red de exploración

Del ejemplo anterior se extraen dos conclusiones importantes:

1. La evaluación cuantitativa de los errores de la exploración, que pueden surgir debido a la representatividad insuficiente de la selección realizada, es imposible antes del comienzo de la explotación del yacimiento. Esto se debe a que faltan datos reales acerca de la posición de los puntos de inflexión de las superficies topográficas, que expresen las variaciones de diferentes parámetros geólogo-industriales, así como acerca del carácter de las variaciones del parámetro entre dichos puntos.
2. Los errores en cuestión se reducen considerablemente al densificarse la red de exploración; pero en caso de las redes utilizadas en la práctica esos errores no se pueden excluir por completo.

Para disminuir la influencia negativa de la representatividad insuficiente los datos de exploración no es necesario densificar de manera formal la red de ob-

servaciones, sino hacer todo lo posible para ubicar los puntos de observación, de acuerdo con el carácter y la estructura supuesta de la variabilidad del objeto; dichos puntos se reflejan claramente en su modelo geológico pronóstico.

Errores del pronóstico geológico

Son los que surgen durante la generalización de la información obtenida del objeto y están provocados por la opción errónea del modelo geológico pronóstico sobre la base de esta información. Como se señaló anteriormente, existen numerosas variantes de relación de datos de exploración, obtenidos tanto en el mismo laboreo de prospección como en diferentes cruceros de prospección. Esto implica el surgimiento de distintas variantes del modelo geológico pronóstico, sobre todo si el yacimiento estudiado es complejo. Una selección incorrecta de la variante puede desfigurar por completo su morfología, condiciones de yacencia y otros parámetros geólogo-industriales del objeto geológico (fig. 2.38).

Aunque los errores del pronóstico geológico pueden ser muy grandes, y sobrepasar el conjunto de todos los demás errores de la exploración, su evaluación cuantitativa no se puede lograr con suficiente precisión.

En primer lugar, la comparación de diferentes modelos pronóstico del mismo objeto no permite revelar el error del pronóstico, ya que antes de extraer completamente el mineral útil no se conoce cuál es el modelo real del cuerpo en cuestión que servirá de patrón. Tal comparación solo da la posibilidad de excluir las peores variantes y las menos probables, por lo que esta solución se obtiene de manera cualitativa. El método principal para lograr este objetivo es el dictamen pericial basado en la experiencia de la exploración y explotación de objetos análogos, el estudio profundo de las regularidades concretas que controlan la localización del mineral útil y ciertos razonamientos y deducciones lógicas.

En segundo lugar, aunque existan los resultados de la explotación del yacimiento, no es seguro que estos sean un patrón confiable, para comparar con él diferentes modelos pronóstico del objeto, porque la morfología, la calidad y las condiciones de yacencia del cuerpo mineral se alteran con frecuencia durante la explotación, a causa de las pérdidas y la dilución, así como debido a que los sectores del cuerpo mineral, más complejos por su estructura, generalmente quedan sin explotar.

Por último, no existe una opinión común acerca de los índices de los modelos pronóstico que deben utilizarse para comparar dichos modelos con el patrón. Al ser numerosos los parámetros geólogo-industriales del objeto geológico, unos pueden coincidir prácticamente con el modelo y el patrón, mientras que otros serán totalmente distintos y los signos de las desviaciones podrán variar. Por lo tanto, el geólogo no posee ningún criterio seguro para juzgar el modelo pronóstico en su conjunto como auténtico o falso. Esto se demuestra claramente cuando se comparan las reservas de mineral útil calculadas durante la exploración y las extraídas en el transcurso de la explotación. Como las reservas representan un parámetro compuesto que depende al mismo tiempo de la potencia del cuerpo, la superficie mineralizada, la masa volumétrica y el contenido del componente útil en la mena, el mismo resultado, o sea, la perfecta coincidencia de las reservas exploradas y extraídas solo se puede obtener si son incorrectos por completo los datos que la exploración ofreció acerca de cada parámetro independiente (la potencia media

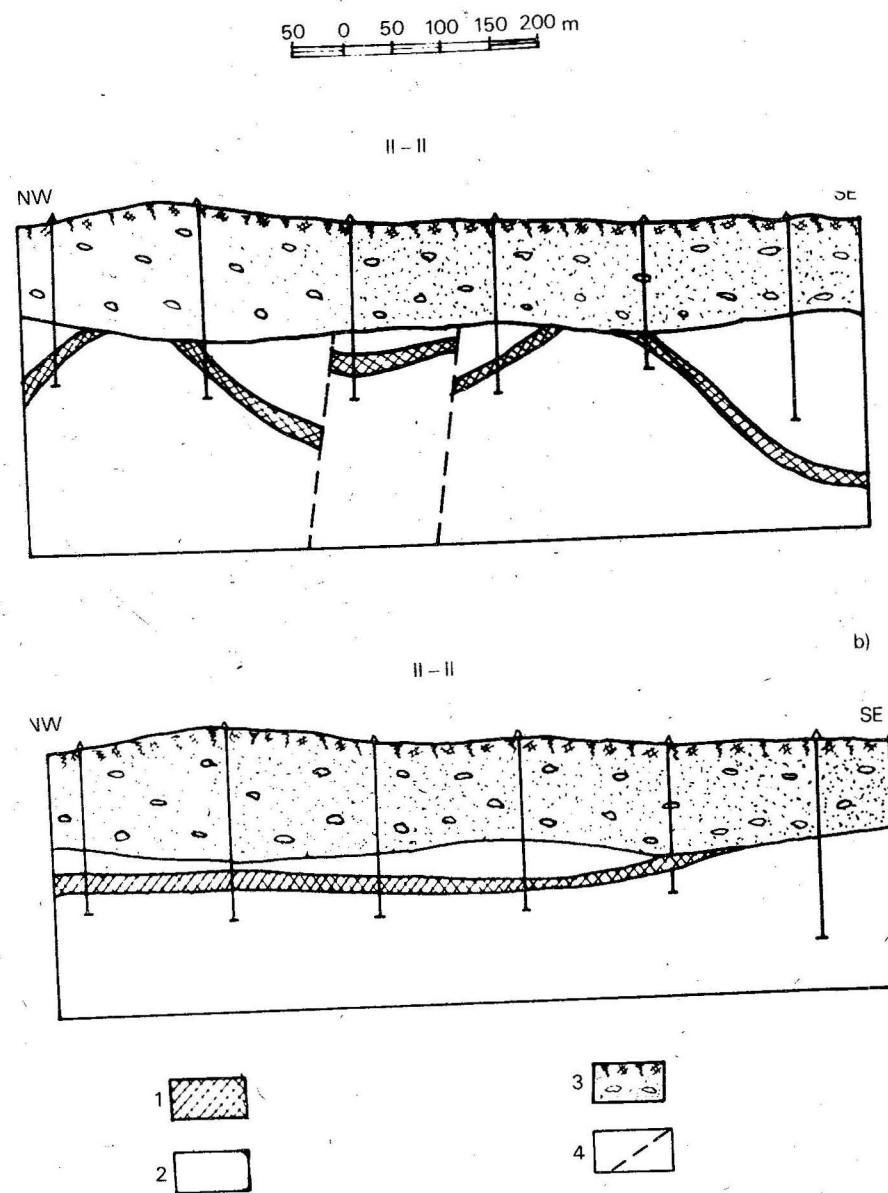


Fig. 2.38 Perfil real de un yacimiento estratiforme: a) según los datos de explotación; b) según los resultados de la exploración detallada; 1- cuerpo mineral; 2- rocas encajantes; 3- sedimentos; 4- falla

calculada durante la exploración, fue dos veces inferior a la red pero en compensación el contenido del componente útil fue exagerado dos veces). Estas coincidencias de las reservas no permiten suponer que el modelo pronóstico del objeto aceptado durante la exploración sea auténtico.

Errores de la interpolación y extrapolación de los datos reales

Existen en cualquier caso, independientemente de la autenticidad del modelo pronóstico aceptado del objeto geológico y de la representatividad de la selección de exploración realizada. Surgen debido a la extensión de los resultados de las observaciones ejecutadas en el volumen del cuerpo entre esas observaciones, sin conocimiento exacto de la ley conforme a la cual varían en el espacio los valores de los parámetros. Además, como se conoce, con mucha frecuencia la ley en cuestión no se revela y esto hace aún menos confiable la generalización de los resultados de la exploración.

En la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración se admite una de estas dos suposiciones, solo si falta la información complementaria:

El valor del parámetro varía entre los puntos de observación contiguos de manera regular rectilínea.

El valor observado del parámetro se mantiene invariable hasta la mitad del intervalo de observación y luego cambia bruscamente.

La primera suposición puede ser precisa solo cuando la red de exploración es suficientemente densa y se ubica en el espacio de manera representativa, mientras que la segunda es totalmente formal y prácticamente nunca corresponde a las particularidades reales de la variabilidad de los objetos geológicos.

Los errores de interpolación y extrapolación de los datos reales, se pueden evaluar de manera cuantitativa conforme a los modelos matemáticos que se utilizan para estudiar la variabilidad del objeto. Con frecuencia, se prefiere determinar los errores relativos de los valores promedio de uno u otro parámetro geólogo-industrial en diferentes sectores del yacimiento o cuerpo mineral. Estos errores son los máximos posibles para la probabilidad de confianza admitida y se pueden diferenciar considerablemente de los errores reales. Sin embargo, la ausencia de un patrón seguro de comparación obliga a tomar solo este camino, es decir, determinar la evaluación probabilística de los errores posibles de la exploración.

La tarea de la determinación del error en la interpolación y extrapolación de los datos, denominado también error de analogía, abarca dos etapas:

Cálculo del error relativo posible con el cual se determinan los valores promedio de los parámetros geólogo-industriales sencillos (por ejemplo, potencia del cuerpo mineral, contenido del componente útil, etc.).

Determinación del error total que caracteriza los valores obtenidos de los parámetros compuestos (por ejemplo, reservas de mineral útil).

En el primer caso se aplican las fórmulas ya conocidas: (49), (72), (76), (77), (80) y (86), que permiten calcular el error relativo conforme al tipo de modelo matemático admitido como el mejor en un caso concreto dado. Debe notarse que todas esas fórmulas dan la magnitud del error vinculado al componente casual de la variabilidad y eliminan su componente regular, sobre la base de la suposición, manifestada o no manifestada, de que entre los puntos contiguos el parámetro varía de manera regular rectilínea.

Una metodología totalmente distinta fue propuesta por G. Matérón [26] para evaluar el error relativo del valor promedio del componente útil. Esto tiene como

base la idea acerca de las zonas de influencia, dentro de las cuales son válidos los resultados de las observaciones, y sobre el carácter curvilíneo conforme al cual varía la dispersión de la extensión del resultado real en la zona de influencia, a medida que se alejan del punto de observación. Para evaluar dicha dispersión se calcula el semivariograma y se determina el coeficiente de dispersión absoluto para cada realización concreta del esquema isotrópico de Veis. Obviando lo complicadas que son las operaciones de cálculo por este método, este se basa en ciertas suposiciones: en primer lugar, se admite la existencia de zonas en las cuales se puede extender de manera continua el contenido del componente útil comprobado en el punto de observación (esto puede ser falso); luego se supone que cerca de los límites de dichas zonas el contenido del componente cambia bruscamente. Por estas razones, la utilización del método de G. Matérn es limitada y corresponde a la exploración de explotación, raramente a la detallada, con la condición obligatoria de que la distancia entre los puntos de observación sea inferior al radio de autocorrelación calculado para este parámetro geólogo-industrial. Debe añadirse que como el método explota la función estructural de la función aleatoria, que caracteriza la variabilidad casual del contenido del componente útil, se pueden alcanzar resultados análogos mediante cálculos basados en la fórmula (86). Teniendo en cuenta lo anterior, resulta obsoleto presentar aquí la metodología compleja del método de G. Matérn; se propone consultar la obra científica de este autor o sus popularizaciones ulteriores [1,33].

Si se evidencian errores casuales de índole técnico en la determinación de los valores del parámetro que se estudia, el error de analogía δ , calculado según las fórmulas mencionadas, debe corregirse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\delta' = \sqrt{\delta^2 + \delta_t^2} \quad (97)$$

donde:

δ' - error total de determinación del valor promedio del parámetro;

δ_t - error técnico relativo de la determinación del mismo parámetro.

El error total de determinación de los valores de los parámetros geólogo-industriales compuestos, se calcula a partir de los errores parciales que caracterizan cada parámetro independiente; estos errores parciales forman parte de la expresión matemática correspondiente y el cálculo se basa en el teorema de la adición de dispersiones de variables aleatorias. Por ejemplo, el error relativo de las reservas de metal calculadas en un bloque se determina generalmente como:

$$\delta = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_m^2 + \delta_d^2 + \delta_c^2} \quad (98)$$

donde:

δ_s , δ_m , δ_d y δ_c - errores relativos de los promedios de la superficie del cuerpo mineral, potencia, masa volumétrica de la mena y contenido del componente útil respectivamente.

Así se pueden evaluar cuantitativamente los errores técnicos o los de interpolación y extrapolación de los datos reales, tanto para cada parámetro geólogo-industrial por separado como para su manifestación conjunta. No obstante, los resultados de estos cálculos no caracterizan las magnitudes reales de dichos errores sino sus magnitudes posibles, o sea, dan una idea sobre la precisión de las evaluaciones de intervalos correspondientes. Además, esos cálculos no esclarecen la precisión de la exploración realizada, ya que los errores debidos a la representa-

tividad insuficiente de los datos iniciales y a la opción incorrecta del modelo geológico pronóstico del objeto pueden exceder varias veces los de analogía y los técnicos.

2.5 Fundamentos económicos

Las investigaciones científicas especiales demuestran que en un volumen determinado de cualquier roca se encuentran casi todos los elementos químicos que el hombre utiliza hoy día en su actividad económica; desde este punto de vista toda roca se pudiera considerar como mineral útil. Sin embargo, el grado de concentración de dichos elementos en ellas varía mucho y el nivel alcanzado en la técnica y la tecnología industrial no permite extraer de las rocas los elementos cuyo contenido es insuficiente. Más aún, si fuera posible esa extracción, los gastos necesarios para lograrlo sobrepasarían el nivel admisible que se determina por la utilidad del producto obtenido; por lo tanto, el concepto de mineral útil debe tener como base los principios económicos. La primera condición obligatoria para que los trabajos de búsqueda y exploración sean exitosos es la existencia de criterios seguros que permitan diferenciar las acumulaciones industriales de unos u otros componentes útiles en las rocas encajantes estériles.

Como se mostrará con posterioridad, la calidad del mineral útil se caracteriza no solo por su composición química sino también por sus propiedades mineralógicas y petrográficas, físico-técnicas y tecnológicas, por lo que con mucha frecuencia los límites entre mena y roca, se trazan atendiendo a razones económicas.

Las acumulaciones naturales de un mismo mineral útil y de calidad semejante pueden ser diferentes, como ya se conoce, por la escala, las condiciones de yacencia y las condiciones mineras e hidrogeológicas de explotación. Al ser similares dichas condiciones, la situación económica de la región donde se reveló esa acumulación de mineral útil puede influir mucho sobre su utilidad práctica. Por eso, durante la búsqueda y exploración, además de saber distinguir el mineral útil de la roca estéril hay que seleccionar los yacimientos industriales y no industriales, así como escoger entre los primeros los más valiosos, cuya puesta en práctica se hará en primer lugar, y los mediocres, que servirán de base para el futuro desarrollo de las ramas correspondientes de la economía nacional. La solución de estas tareas necesita un profundo conocimiento de los fundamentos económicos de la búsqueda y la exploración. Esos fundamentos son los principios y factores de la evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales útiles, los precios de los productos de las empresas mineras y las exigencias industriales para la materia prima mineral de yacimientos concretos (condiciones industriales).

2.5.1 Principios de la evaluación de los yacimientos minerales útiles

Estos principios reflejan las leyes económicas básicas del socialismo y se pueden formular de la siguiente manera:

Satisfacción máxima de las demandas.

Abastecimiento pleno de la economía nacional con la materia prima mineral de calidad requerida, teniendo en cuenta sus necesidades futuras.

Utilización completa y compleja del subsuelo.

Economía máxima en los gastos necesarios para obtener el producto de la empresa minera.

Protección del medio.

Abastecimiento pleno de la economía nacional con la materia prima mineral

La búsqueda y exploración de minerales útiles no representa un objetivo final por sí mismo y no se organiza para satisfacer solamente la curiosidad natural del hombre. Como se conoce, esos trabajos tienen que asegurar un desarrollo proporcional, constante y dinámico de todas las ramas de la economía nacional vinculadas a la utilización de los recursos minerales naturales. Por lo tanto, en cada región concreta, los trabajos de búsqueda y exploración deben planificarse solo si existe la necesidad real de la materia prima mineral dada.

Las necesidades de la economía nacional varían con el tiempo, de acuerdo con el desarrollo de la técnica y la tecnología de producción en sus diferentes ramas y por consiguiente los yacimientos que anteriormente se consideraban no industriales pueden convertirse en explotables, si se evidencia la insuficiencia del mineral útil correspondiente, y viceversa.

Es preciso destacar que dichas necesidades se manifiestan no solo en cuanto a reservas suficientes de la materia prima mineral, sino también en su calidad. Desafortunadamente, en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración a veces se olvida esta importante exigencia, lo que trae como consecuencia un malgasto de los fondos para el estudio de objetos sin perspectiva alguna. Así, en los años 1965-1970, en la URSS se realizaron trabajos con la finalidad de revelar suficientes reservas de dolomita, para producir materiales refractarios utilizables en los convertidores de oxígeno. La mayoría de los yacimientos seleccionados con este propósito, en las regiones noroeste y central de la parte europea del país y en Ucrania, se caracterizaban por una alta proporción de impurezas dañinas (sílice, óxidos de hierro y aluminio), por lo cual los resultados de dichos trabajos fueron deficientes. Muchos filones pegmatíticos explorados detalladamente en Karelia del norte y la península de Kola mostraron un bajo contenido de moscovita en forma de cristales grandes, los cuales son deficitarios, mientras que los pequeños son de poco valor y utilidad práctica. Por esta razón, dichos filones, en su mayoría, quedaron fuera de balance. De todos los yacimientos cupríferos y polimetálicos del Kazajastán, explorados alrededor del año 1965, casi la mitad fue rechazada por la industria. Numerosos son los ejemplos de este género que respaldan la idea de que el análisis riguroso de las necesidades de materia prima mineral, tanto existentes como perspectivas, para la economía nacional, es absolutamente indispensable para lograr resultados exitosos en el dominio de la búsqueda y exploración de yacimientos minerales.

Este principio, por tanto, desempeña un papel preponderante en el caso de minerales útiles escasos y deficitarios, ya que los yacimientos que aseguran la obtención de la producción máxima en plazos más cortos son los mejores objetos para la explotación del primer orden, cualesquiera que sean sus demás características técnico-económicas.

Utilización completa y compleja del subsuelo

Las reservas de minerales útiles en el subsuelo son enormes, pero limitadas y, además, el ritmo de su reproducción natural es totalmente incomparable con el ritmo creciente de utilización de los recursos minerales. El problema del agotamiento amenazante del subsuelo es sumamente actual para diversos minerales útiles (petróleo, cobre, níquel, cobalto, plomo, cinc, moscovita y otros) y un ejemplo típico de ello es la llamada crisis del petróleo, que comenzó hace dos décadas. En estas condiciones, el consumo racional y cuidadoso de la materia prima mineral, la reducción de las pérdidas de minerales útiles en el subsuelo al mínimo posible, así como la utilización máxima y completa de las rocas y menas ya extraídas tienen una importancia primordial. Debe señalarse que la utilización compleja de los yacimientos minerales útiles no solo permite prescindir de la explotación de otros objetos naturales con el mismo tipo de materia prima mineral, sino también favorece la concentración de la industria minera, la reducción de las inversiones capitales y el aumento de la productividad del trabajo. Por eso, al ser iguales las demás condiciones, deben preferirse los yacimientos donde el mineral útil principal se pueda extraer junto con otros tipos de materia prima mineral.

La URSS ha logrado muchos éxitos en el dominio de la utilización compleja del subsuelo. Así, por ejemplo, las empresas de la metalurgia no ferrosa extraen como productos secundarios casi toda la masa de bismuto, plata y platino que se obtiene en el país; más de 30 % de toda la producción de azufre; una cantidad importante de germanio, galio, indio, escandio, renio, selenio, telurio y otros componentes raros; cerca de 10% de cobre, plomo y cinc. Sobre la base de la nefelina de los yacimientos apatíticos de la península de Kola, se produce la alúmina y el cemento en la región de Leningrado. En el yacimiento de menas de hierro Kovdorsk se pone en práctica la extracción del apatito y la baddeleíta a partir de las colas de la separación magnética. En la planta siderúrgica Azovstal se organizó la utilización de las escorias fosfatadas como fertilizantes. En algunas empresas mineras de la industria siderúrgica, las rocas del destape y las colas se utilizan parcialmente para la producción de grava, arena de construcción y ladrillos. Durante la explotación de los placeres titano-circoníferos en Siberia occidental se obtienen también arena de moldeo y caolín enriquecido. En los yacimientos bauxíticos del Kazajastán del norte, se extrae una cantidad importante de arcillas refractarias. Se organizó la utilización, en diferentes ramas de la economía nacional, de los desechos industriales que son el resultado de la elaboración del asbesto y moscovita.

No obstante lo expuesto, hasta ahora el problema de la utilización compleja y sin desechos del subsuelo no se puede considerar resuelto de manera satisfactoria. Durante la extracción y elaboración de menas cupríferas y polimetálicas en la URSS se pierde de 25 a 60% de su valor potencial. En muchos yacimientos no se extraen de la mena compleja componentes secundarios valiosos tales como oro, plata, paladio, plomo, cinc, cobalto y otros. En el yacimiento de magnesita Satkinsk y en la cantera de calizas Melejovo-Fedotovskaia, los enormes volúmenes de dolomita utilizada en la producción de materiales refractarios forman escombros inútiles, mientras que la materia prima análoga se explota por muchas empresas especializadas, incluso recién construidas. En los yacimientos de moscovita de Karelia del Norte, solo una parte insignificante de la materia prima cerámica (cuarzo, feldespato y pegmatita) se utiliza como mineral útil secundario. Las ro-

cas del destape de la mayoría de los yacimientos que se explotan a cielo abierto no tienen aplicación industrial. En el subsuelo o en las escombreras se pierden grandes volúmenes de cuarcitas ferruginosas oxidadas, menas de manganeso carbonatadas, restos de la calcinación de la pirita, etcétera.

No son menos importantes las pérdidas de los componentes útiles durante los procesos metalúrgicos. En la URSS, como promedio, esas pérdidas ascienden a 4% de plomo y 12 % de cinc, en el caso de concentrados de esos metales; 6% de cobre y 9% de níquel, para los concentrados cupro-niquelíferos; casi 6% de estaño de los concentrados correspondientes, etc. Esos metales son componentes principales de dichos concentrados y las pérdidas de los componentes secundarios son aún más grandes. Es curioso que en las escorias metalúrgicas de las empresas del Kazajastán oriental los contenidos de ciertos metales sobrepasen considerablemente esos mismos contenidos en las menas de algunos yacimientos que se están explotando en otras regiones del país. Según N.A. Jrushev [9], en la URSS el valor que se extrae realmente de las reservas de minerales útiles corresponde al 30% de su valor total.

La aplicación rigurosa y sin excepciones del principio de la utilización completa y compleja del subsuelo, en todas las etapas de la evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales útiles, y el perfeccionamiento de la metodología de dicha evaluación, permitirán, sin lugar a dudas, disminuir las pérdidas de materia prima mineral y el costo de producción de las empresas mineras y metalúrgicas, así como abastecer la economía nacional con reservas complementarias de minerales útiles y facilitar la utilización más racional del subsuelo y la mejor protección del ambiente.

Economía máxima de los gastos necesarios para obtener el producto de la empresa minera

Como se ha dicho, los yacimientos del mismo mineral útil pueden ser diferentes por su calidad, reservas de la mena y condiciones de explotación; además, se encuentran con frecuencia en regiones con diferente situación geográfica y económica. Por consiguiente, la obtención de una tonelada del producto final equivalente necesitará gastos desiguales. Por esa razón, una de las tareas más importantes de la evaluación geólogo-económica es la determinación del nivel máximo admisible de los gastos, para que la extracción y elaboración de la materia prima mineral sea económicamente racional y el yacimiento se pueda considerar industrial. En este caso, la explotación de cada objeto industrial dará su propia economía de los gastos capitales y materiales, ya que las diferentes condiciones naturales de dichos objetos se reflejarán en los distintos gastos específicos reales.

Hoy día, el enfoque único es que el nivel máximo admisible de los gastos necesarios para obtener el producto final de la empresa, se determina por el precio de venta al por mayor para los productos correspondientes (menas, concentrados, metales, etc.), y que los gastos reales en yacimientos concretos se expresan por el costo de producción. Así pues, la diferencia entre el precio de venta al por mayor y el costo de producción muestra el grado de la economía de la mano de obra y de los gastos materiales y caracteriza la rentabilidad en la explotación del yacimiento. Por lo tanto, de acuerdo con el principio en cuestión, al realizar la evaluación geólogo-económica hay que preferir los objetos que aseguran, durante su explotación, la máxima ganancia en los plazos más cortos.

Protección del ambiente

El rápido desarrollo de la industria en los últimos veinte años a escala mundial, sobre todo en ramas tales como la minería, la siderurgia y la industria química, ha tenido como consecuencia daños considerables en cuanto al ambiente: la contaminación con desechos industriales de la atmósfera y las aguas superficiales y subterráneas; el deterioro de los macizos forestales y tierras fértiles; la modificación del paisaje en sectores importantes; el agotamiento de las reservas de aguas subterráneas y la variación de su régimen; la pérdida del equilibrio ecológico y las manifestaciones de cambios climáticos. Ahora se puede decir, sin sobrevalorar este peligro, que la actividad económica del hombre es comparable, por su escala, con los procesos y fenómenos geológicos, e influye enormemente sobre el desarrollo de los procesos naturales, lo que a veces tiene consecuencias catastróficas (erosión antropogénica).

Como ejemplos se pueden citar: la degeneración del plancton marino, fuente principal de oxígeno atmosférico, a causa de la contaminación de los mares y océanos con petróleo (la cantidad anual que se pierde durante la explotación de los yacimientos petrolíferos en la zona de *shelf* y el transporte marítimo del petróleo sobrepasa los 8 millones de toneladas); la llegada anual a la atmósfera de más de 100 millones de toneladas de cenizas y 60 millones de toneladas de anhídrido sulfúrico, como resultado del funcionamiento de las centrales térmicas; la enorme cantidad de productos tóxicos, compuestos químicos de mercurio, plomo, cadmio y otros que van a parar a los ríos y depósitos de agua a través del desagüe de las empresas mineras, químicas y metalúrgicas, por cuya razón muchos ríos y lagos se vuelven "muertos" (lago Erie en EE.UU., río Rhin en Europa y otros); la transformación del paisaje y del régimen de las aguas superficiales y subterráneas, pérdidas de las áreas forestales y agrícolas al construirse canteras grandes y profundas, etcétera.

En la URSS, la protección del ambiente es una preocupación importantísima del Partido Comunista y del Gobierno Soviético. En el año 1970, el Soviet Supremo de la URSS dictó los "Fundamentos de la legislación de la URSS y las Repúblicas Federales sobre el uso de las tierras"; en el año 1973, los "Fundamentos de la legislación sobre el uso de las aguas" y en el año 1975, los "Fundamentos de la legislación de la URSS y las Repúblicas sobre el uso del subsuelo". En el año 1977 la obligación de todos los ciudadanos y organismos estatales de contribuir a la utilización racional y compleja del subsuelo y la protección del ambiente fue escrita en la nueva constitución de la URSS. Según los documentos legislativos mencionados, los problemas de la protección del medio ambiente se resuelven de manera planificada y deben tenerse en cuenta al evaluar los yacimientos de minerales útiles.

En Cuba, la Asamblea Nacional del Poder Popular ha analizado leyes y ha adoptado resoluciones en este mismo sentido.

La protección del ambiente se puede asegurar en gran medida con la utilización completa y compleja de la materia prima mineral, ya que esto disminuye considerablemente el volumen de desechos industriales que pueden penetrar en la atmósfera, las aguas superficiales y las subterráneas; también reduce las áreas destinadas a las escombreras, los depósitos de colas, etc. El cumplimiento de las leyes vigentes necesita la opción de la mejor variante de explotación del yacimiento, para que el daño al ambiente se reduzca al mínimo posible (por ejemplo, explotación subterránea en lugar de la construcción de una cantera) y se deben des-

tinar inversiones capitales indispensables para reconstruir el paisaje, recultivar las tierras fértiles y construir instalaciones de procesamiento de los desechos. Es evidente que estos gastos complementarios, junto con la aplicación de los métodos y procedimientos de extracción y elaboración del mineral útil, más caros y complejos, aumentan el costo de producción y pueden cambiar la idea sobre la rentabilidad de la utilización industrial del yacimiento. Más aún, es necesario evaluar los daños, que sufrirán la naturaleza y la sociedad en el caso de explotación del yacimiento, y comprobarlo con la ganancia resultante, lo que a veces llevará a prescindir de la puesta en práctica del objeto, si este puede causar consecuencias negativas irreversibles y empeorar las condiciones sociales de vida. Como conclusión, debe señalarse que el principio de la utilización completa y compleja del subsuelo, algunas veces puede contradecir el principio de la economía máxima de los gastos necesarios, por cuanto la reducción de la potencia mínima admisible del cuerpo mineral aumenta, como norma, el costo de producción durante la explotación, y la elaboración de la materia prima extraída se hace más costosa a medida que disminuye el contenido mínimo admisible del componente útil en la mena. Esta contradicción hace necesaria la selección de la variante óptima que pueda asegurar el mejor balance de las pérdidas y los gastos. Para lograrlo, deben analizarse profundamente las relaciones mutuas entre diferentes parámetros geólogo-industriales del yacimiento, por una parte, y los índices técnico-económicos de su explotación por otra.

2.5.2 Factores de la evaluación de los yacimientos minerales útiles

Comprende todos los datos utilizables en la evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales útiles, unidos por elementos comunes de surgimiento y un carácter uniforme de manifestación. Desde este punto de vista dichos datos se agrupan en: geográficos, geológicos, de planificación, no económicos y coyunturales.

Factores geográficos

Se derivan de la situación geográfica del yacimiento y las condiciones naturales y económicas de la región. Conviene mencionar el clima, el relieve de la superficie actual, la población y la existencia de mano de obra disponible, la existencia de viviendas y de la base cultural; las condiciones de transporte, el estado de la base combustible energética; la existencia de las empresas industriales (sobre todo mineras) y agrícolas, así como la suficiencia de los recursos de aguas y materia prima para la construcción.

Los factores geográficos tienen mucha importancia en la evaluación de los yacimientos minerales útiles y a veces pueden ser decisivos. Sin embargo, su influencia es multilateral y permite diferentes conclusiones. En la mayoría de los casos es preferible poner en explotación los objetivos situados en las regiones bien pobladas con una infraestructura económica desarrollada; pero los yacimientos o sus sectores, que se encuentran en las cercanías de grandes ciudades o en su zona "verde", así como en el subsuelo de las empresas industriales importantes, con frecuencia obtienen una evaluación negativa. La ausencia de vías de transporte no permite explorar los yacimientos de minerales útiles corrientes que se consu-

men en grandes cantidades (carbón, mena de hierro o de manganeso, bauxita, caliza, sales minerales, materia prima fosfática, gravas, arenas, arcillas y otros), pero este factor es de importancia secundaria cuando se trata de la materia prima deficitaria y preciosa (oro, materiales piezoópticos, moscovita, piedras preciosas y decorativas, etc.). Además, las condiciones de transporte de la región se pueden modificar con el transcurso del tiempo, lo que necesita una evaluación esencial de los yacimientos anteriormente revelados. Un buen ejemplo en este sentido lo representan los objetos que se sitúan en la zona del ferrocarril Baikal-Amur, en la URSS. Antes de la construcción de esta vía férrea allí casi todos los yacimientos se consideraban no industriales, mientras que hoy día su evaluación es positiva: muchos objetos se preparan para la explotación o se están explorando detalladamente.

No obstante la simplicidad aparente y el carácter comprensible de cada factor económico, su influencia se hace compleja y requiere un análisis cuidadoso y profundo para asegurar una correcta evaluación del yacimiento dado. Para esto hay que tener en cuenta la existencia de consumidores reales y posibles de la materia prima mineral y la distancia que los separa del yacimiento; la carga de las arterias de transporte existentes que se propone utilizar para transportar el mineral útil extraído o los concentrados; la posibilidad de cooperación de la empresa minera proyectada con otras ya existentes o en construcción; la necesidad de construir pueblos nuevos, carreteras, líneas de acueductos, de electrotransmisión y depósitos de agua; los volúmenes probables de medidas a tomar para proteger el ambiente y los gastos necesarios correspondientes.

Factores geológicos

Determinan las particularidades naturales esenciales del yacimiento, las cuales influyen directamente sobre el nivel de los gastos necesarios para obtener la materia prima mineral, los concentrados o los metales.

De estos factores dependen en gran medida los índices técnico-económicos de la futura empresa minera.

A este grupo pertenecen todos los parámetros geólogo industriales de los yacimientos minerales útiles, estudiados anteriormente con suficiente detalle, así como las condiciones geológicas y geomorfológicas generales de los campos y regiones meníferas y las regularidades que controlan la localización de diferentes minerales útiles dentro de sus límites. De la corrección, precisión y amplitud con que se estudien los factores geológicos durante la búsqueda y exploración, depende decisivamente la seguridad de la evaluación geólogo-económica del yacimiento.

Factores de planificación

De acuerdo con el principio de abastecimiento pleno de la economía nacional con la materia prima mineral, la búsqueda y exploración de yacimientos minerales, así como la evaluación de sus resultados, deben realizarse teniendo en cuenta obligatoriamente la suficiencia en la satisfacción de las necesidades de la economía nacional con las reservas y la producción de minerales útiles correspondientes.

Como la economía de los países socialistas se desarrolla de manera planificada, los factores en cuestión se apoyan en el plan de desarrollo óptimo de la base

mineral, el cual se elabora mediante el análisis de las necesidades de la materia prima mineral conveniente para diferentes ramas de la economía nacional, el balance estatal de las reservas de minerales útiles, la potencia productiva de las empresas mineras en funcionamiento y las posibilidades de incrementar la producción, el estado de los recursos financieros y la mano de obra. El estudio de dichos aspectos del problema lo realizan los organismos de planificación, tanto estatales como ramales, y tiene como resultado los balances de necesidad de cada tipo de materia prima y los balances de reservas de los minerales útiles correspondientes, así como las conclusiones técnico-económicas acerca de la medida en que se satisfacen las necesidades de grandes regiones económicas o complejos minero-industriales con la materia prima mineral. Dichos balances y conclusiones representan los principales factores planificados de la evaluación geólogo-económica de yacimientos minerales. Además, como tales factores hay que considerar la política estatal a largo plazo, orientada a la creación de los centros industriales nuevos (las repúblicas federales del Cáucaso, Kazajastán, Asia Central, las regiones de la Siberia y Extremo Oriente en el caso de la URSS; en Cuba, las regiones Moa-Baracoa, Mayarí-Nicaró y Cienfuegos) y a la mejor satisfacción de los intereses de los países miembros del CAME en cuanto a la cooperación y distribución internacional óptima de la producción.

Conviene señalar que las argumentaciones técnico-económicas del desarrollo de la base mineral para diferentes tipos de minerales útiles, suficientemente concretas y seguras, solo existen para un período de 5 a 7 años. Sin embargo, el tiempo necesario para poner en funcionamiento una empresa minera es de 10 a 20 años, a partir del momento del hallazgo del yacimiento, razón por la cual dichos materiales de planificación son insuficientes para elaborar el plan prospectivo de los trabajos de búsqueda y exploración a escala estatal y evaluar correctamente los resultados obtenidos. Además, esos materiales son poco accesibles para la mayoría de los geólogos prospectores. De lo expuesto se deduce fácilmente la necesidad de la confección de los planes de desarrollo a largo plazo, para diversas ramas de la industria minera; el período de planificación es superior a 15 o 20 años. Este problema es muy complicado y hasta ahora no existen pronósticos prospectivos seguros de la necesidad para la mayoría de los minerales útiles. Las razones principales de esto son el planteamiento y la difícil solución de las tareas relacionadas con la búsqueda de las vías óptimas del desarrollo de la base mineral, ya que se deben estudiar y comparar entre sí muchas variantes; además, se deben tener en cuenta numerosas limitaciones de carácter social, económico y técnico.

Para resolver este problema, en los últimos años se ha propuesto la metodología prometedora de los cálculos económico matemáticos mediante computadoras, lo cual tiene como base la evaluación del efecto óptimo en caso de explotación del yacimiento. Como ejemplos positivos en este campo, se encuentran los métodos concretos propuestos por los científicos soviéticos L.V. Kantorovich y A.B. Torotko [11], A.M. Margolin [25] y otros. Esos métodos se diferencian por los criterios que se aplican para juzgar lo óptimo de la variante escogida y por el tipo de modelo matemático, pero todos se basan en la necesidad de la materia prima mineral, el volumen de producción, el balance de reservas, las inversiones capitales indispensables para aumentar la producción del mineral útil, los índices económicos de las empresas mineras en funcionamiento, el tiempo necesario para explorar los yacimientos nuevos y prepararlos para la explotación y la tasa de ganancia según el factor tiempo. Estos cálculos tienen que dar como resultado los

pronósticos prospectivos del desarrollo de la base material para diferentes tipos de minerales útiles; los pronósticos son fácilmente accesibles y comprensibles para los geólogos de todas las brigadas geológicas y se renuevan, al menos cada quinquenio, sistemáticamente.

Factores no económicos

Los tres grupos de factores estudiados hasta aquí se manifiestan finalmente en las variaciones de los índices técnico-económicos del funcionamiento de la empresa minera, por lo que las soluciones que se obtienen sobre esa base, deben corresponder al principio de la economía máxima de los gastos necesarios; o sea, tienen que asegurar la ganancia máxima posible en caso de explotación del yacimiento. No obstante, se conocen muchos casos en que la industria utiliza los objetos cuya exploración es menos eficiente, desde el punto de vista económico, con respecto a otros yacimientos del mismo mineral útil y que algunas veces se pueden volver no rentables. Esto se explica por la influencia de los factores del cuarto grupo, los cuales por su carácter se pueden llamar no económicos, ya que la empresa minera en esos casos se construye independientemente de sus índices económicos. Ejemplos de dichos factores son: los intereses del fortalecimiento del poder defensivo del país; la necesidad de encontrar fuentes locales de materia prima mineral en las regiones con situación geográfica y de transporte específica (por ejemplo, regiones adyacentes a la Vía Marítima Septentrional en la URSS); existencia de mano de obra excedente en regiones con una buena infraestructura económica y dentro de los complejos minero-industriales antiguos, la cual debe hallar empleo en la misma región (Cáucaso; muchas regiones del Asia Central, Karelia del norte, algunas regiones del centro de la parte europea de la URSS y otras).

Factores coyunturales

Todos los factores de la evaluación tratados anteriormente, manifiestan su influencia de manera permanente o durante períodos muy largos y aseguran la planificación prospectiva del desarrollo de la base material. No obstante, la práctica de la búsqueda y exploración ha demostrado más de una vez cambios bruscos e imprevistos en el balance de la producción y del consumo de ciertos minerales útiles, con frecuencia a causa del cambio brusco de la necesidad de la materia prima mineral. Este fenómeno implica cambios en los precios de venta al por mayor de los minerales útiles y en las exigencias generales de la industria para los yacimientos explorados, lo que causa, a su vez, la reevaluación completa de los objetos tanto conocidos como encontrados recientemente. Como ejemplo se encuentra la orientación de las centrales térmicas de la URSS al uso preponderante de petróleo y de gas natural que tuvo como resultado el consumo reducido de carbón y las exigencias industriales más rigurosas en cuanto a la potencia y calidad de este mineral útil; el rápido desarrollo de la producción de acero mediante convertidores de oxígeno en la década del 70 y el aumento correspondiente del precio de la dolomita de alta calidad cuyo resultado fue la reevaluación de numerosos yacimientos dolomíticos alejados de los consumidores y con anterioridad admitidos como no industriales; el aumento brusco del precio del oro en el mercado mundial, también en la década del 70 y la reducción del contenido mínimo admisible de este metal en la mena.

Los factores de este grupo tienen una vida corta, y pasan con posterioridad al grupo de factores de planificación, si las necesidades de la economía nacional no se satisfacen completamente o desaparecen, al igualarse la producción y el consumo del mineral útil correspondiente. Sin embargo, durante el período en que se manifiestan, los factores coyunturales desempeñan un papel importantísimo en la evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales y a veces pueden hasta superar a los demás factores, por lo que resulta racional su estudio independiente.

2.5.3 Precios de los productos de las empresas mineras

La importancia del precio del producto como índice de los gastos máximos admisibles para su obtención, se señalaron en este mismo capítulo. En cada período dado, el precio del producto refleja: las condiciones geográficas y geológicas de los yacimientos que se están explotando; el grado de correspondencia entre el nivel de producción del mineral útil y las reservas de una parte y las necesidades de la industria de la otra; el nivel de desarrollo de la técnica y la tecnología en la industria minera y las ramas de la economía nacional relacionadas con la elaboración de la materia prima mineral. Por consiguiente, este precio es un índice compuesto de carácter general y sirve como instrumento importantísimo para la evaluación de los yacimientos de minerales útiles, por lo que permite elaborar criterios objetivos y seguros para diferenciar objetos industriales y no industriales rentables. Con el transcurso del tiempo, los precios para los productos de las empresas mineras deben variar de acuerdo con los cambios de la situación económica de la región, el estado de la base de materia prima mineral y el nivel técnico de la producción. Esto quiere decir que la evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales siempre tendrá carácter temporal.

En la industria minera, y otras ramas relacionadas con ella, los precios de los productos mercantiles son de dos tipos: precios de la mena (o mineral útil) mercantil y precios para los concentrados (o mineral útil elaborado).

El precio de la mena u otro mineral útil no elaborado se establece en función de su tipo y calidad (por ejemplo, por el contenido del componente útil, las impurezas dañinas, las dimensiones de los cristales del mineral valioso, las propiedades físicas del mineral útil, etc.) y como norma de manera diferenciada para diversas regiones, cuencas minerales y hasta yacimientos concretos. No obstante, pueden existir precios uniformes para todo el país (por ejemplo, precio de una tonelada de cobre en la mena cuprífera).

Para la mayoría de los minerales útiles meníferos, los precios al por mayor se establecen, para los concentrados, en dependencia de la calidad y tienen un carácter unificado para todo el país. En esos casos se evalúa tanto el mismo concentrado como una tonelada de metal o de su óxido típico en el concentrado. En cuanto a los minerales útiles no meníferos, los precios se dan para los semiproductos (moscovita seleccionada y preparada para la fabricación de diferentes artículos, feldespatos en bloque, cuarzo molido y otros) o para el producto final (gravilla para construcción, dolomita calcinada para los hornos Martin, bloques decorativos, etcétera).

Si el mineral útil es complejo, los precios para los concentrados de varios componentes se establecen generalmente según el contenido del componente prin-

cipal y para los demás se prevén los complementos al precio inicial, en función del valor de cada componente secundario y su contenido en el producto. Más raramente, cuando los contenidos de componentes secundarios son más o menos estables o constantes, se da un precio unificado para el concentrado complejo (por ejemplo, concentrado de loparita) teniendo en cuenta el valor total de la porción que se puede extraer.

En la URSS los precios al por mayor de los productos de las empresas mineras se revisaron por última vez en el año 1966 y se dan actualmente en las listas oficiales de precios vigentes para diferentes ramas de la economía nacional. Esos nuevos precios son muy importantes para la evaluación geólogo-económica, ya que han permitido poner fin al funcionamiento no rentable de muchas empresas mineras, asegurar la evaluación y la utilización más correcta de tipos de materia prima mineral mutuamente intercambiadas y utilizar en forma más completa las menas complejas. Sin embargo, dichos precios están lejos de ser perfectos y necesitan otra corrección, por cuanto reflejan insuficientemente la utilidad potencial del mineral útil. Así, por ejemplo, el precio de las arcillas refractarias de los yacimientos Moiskoie y Aprelskoie del Kazajastán destinados a abastecer con este tipo de materia prima a la planta siderúrgica de Kuznetsk es de 3 a 4 veces más alto que el de la arcilla del yacimiento Barzassk, aunque las primeras tienen menos calidad; el precio de la magnesita del yacimiento Satkinsk, que es una materia deficitaria, es inferior al precio de la dolomita de algunos yacimientos del Donbás (Yamsk, Nikitovsk) que es un mineral útil corriente y de baja calidad.

Además, el sistema de construcción de las listas oficiales de precios es heterogéneo: para unos minerales útiles el precio abarca los gastos de transporte hacia los consumidores, y para otros estos gastos se excluyen del precio del producto. Hasta ahora, los precios al por mayor estimulan poco la utilización completa y compleja del subsuelo. Por lo tanto, el perfeccionamiento de los precios para los productos de las empresas mineras es un problema de suma actualidad en cuanto a hacer más eficiente la evaluación geólogo-económica de los yacimientos de minerales útiles.

2.5.4 Condiciones industriales para la materia prima mineral

Comprenden el conjunto de las exigencias límites de la industria en cuanto a la cantidad y calidad del mineral útil y las condiciones minero-técnicas del yacimiento; dichas exigencias deben ser económicamente argumentadas, de manera que se garantice la mejor variante de delimitación de los cuerpos minerales y la explotación y elaboración rentables del mineral útil, en una época determinada y una región dada. Así pues, las condiciones industriales tienen necesariamente un carácter local y temporal. Se elaboran para cada yacimiento de minerales útiles de manera individual y se modifican al cambiar la situación económica de la región, la necesidad de la materia prima mineral, el precio del producto de la empresa minera, la técnica y tecnología de la extracción y elaboración de minerales útiles, así como los conocimientos acerca de los parámetros geólogo-industriales del yacimiento.

El hallazgo en la década del 50 de ciertos yacimientos de menas cupro-porfíricas en la URSS, los cuales se caracterizaban por una baja ley de cobre y grandes reservas, condicionó, junto con el perfeccionamiento de la tecnología del be-

neficio, la reducción del contenido mínimo admisible de cobre casi en 10 veces: desde 3 a 5% hasta 0,5 a 1,0%. La organización en los años 70 de la producción de bloques refractarios sobre la base de dolomita calcinada, destinada a los convertidores de oxígeno, provocó el aumento de las exigencias industriales para la dolomita, y el contenido máximo admisible de las impurezas dañinas (sílice, alúmina y óxidos de hierro) bajó de 8 a 11% a 2,5 a 4%. El aumento de la proporción de petróleo y gas natural, en el balance de combustibles de la URSS en la década del 60, provocó el aumento correspondiente de las exigencias para los carbones energéticos: el contenido admisible de cenizas se redujo considerablemente y la potencia mínima industrial se incrementó. Los ejemplos de este tipo son numerosos.

En el transcurso de los trabajos de búsqueda y exploración en un yacimiento, las condiciones industriales se establecen al menos dos veces:

Condiciones provisionales. Se establecen sobre la base de los resultados de la exploración orientativa y están destinadas al cálculo de reservas, la determinación del valor industrial del objeto y de la racionalidad de la exploración ulterior.

Condiciones permanentes. Están basadas en los resultados de la exploración detallada y se utilizan para: realizar la delimitación definitiva de los cuerpos minerales; calcular las reservas exploradas de la materia prima mineral; establecer el orden de la puesta en práctica de diferentes yacimientos del mismo mineral útil; argumentar de manera técnico-económica y confeccionar los proyectos de las empresas mineras y otras empresas relacionadas con la elaboración del mineral útil; planificar y ejecutar la extracción de la materia prima mineral; controlar el cumplimiento de las reglas y leyes vigentes sobre la utilización del subsuelo.

Las condiciones provisionales se elaboran, generalmente, por las brigadas y empresas geológicas responsables de la exploración del yacimiento y los organismos de proyección de la rama correspondiente. Se utiliza la analogía bien argumentada con objetos ya conocidos y los cálculos técnico-económicos aproximados. Esas condiciones se adoptan en la URSS, por las comisiones centrales de reservas de minerales útiles, pertenecientes a los ministerios o por las comisiones territoriales análogas de los organismos geológicos regionales, y en Cuba por el Centro Nacional del Fondo Geológico.

Las condiciones permanentes se elaboran por los institutos de proyección principales de las ramas correspondientes con la colaboración necesaria de los organismos geológicos interesados. Estas condiciones se basan en los cálculos confiables de índole técnico-económico realizados para muchas variantes posibles de contorno del yacimiento y para su explotación ulterior.

Durante la proyección, construcción o explotación de la empresa minera, es posible precisar los factores de la evaluación del yacimiento o revelar otros nuevos, pueden cambiar los precios al por mayor correspondientes o surgir nuevas soluciones técnicas y tecnológicas en determinada rama de la economía nacional, por cuyas razones se necesitará la revisión de las condiciones permanentes y su readaptación por la CER. Además, en los últimos tiempos el Instituto Estatal de la Economía de la Materia Prima Mineral de la URSS ha acumulado una experiencia considerable y valiosa en el dominio de la confección de las condiciones industriales simplificadas, destinadas a establecer rápidamente el valor industrial probable del objeto durante la búsqueda. Dichas condiciones utilizan las relaciones entre el contenido del componente útil en la mena y las reservas mínimas necesarias para hacer económicamente racional la explotación del yacimiento. Esas

relaciones se deducen en forma más general y para los valores normalizados de los demás parámetros geólogo-industriales, y tienen en cuenta las condiciones reales del objeto mediante los coeficientes de corrección.

Es conveniente destacar que las condiciones industriales por sí mismas no reflejan los valores promedio de los parámetros geólogo-industriales ni su variabilidad; por eso, los índices de estas condiciones pueden ser diferentes para los yacimientos análogos por su escala y calidad de mineral útil o similares para los objetos cuyas menas se diferencian mucho por su calidad. Las condiciones industriales sirven como elemento auxiliar muy importante de evaluación geólogo-económica de los yacimientos minerales, pero esta última no se puede reducir sólo a la elaboración y argumentación de dichas condiciones.

En cuanto a los índices principales de las condiciones económicas y sus modos de determinación, estos se tratarán en detalle en el capítulo correspondiente a la evaluación geólogo-económica de los yacimientos de minerales útiles que forma parte del contenido de la segunda parte de este texto.

CAPÍTULO 3

Búsqueda de yacimientos minerales útiles

En el capítulo precedente se trataron con suficiente detalle los criterios geológicos de búsqueda de minerales útiles, que sirven como base para seleccionar las áreas más favorables para los trabajos de búsqueda. No obstante, como se ha señalado ya más de una vez, dichos criterios, aunque reflejan las regularidades objetivas del desarrollo de diversos procesos geológicos, no representan testimonios seguros de la existencia de unos u otros minerales útiles.

Las acumulaciones de minerales útiles pueden no existir, a pesar de ser favorables las condiciones geológicas. Los criterios en cuestión sugieren solo la posibilidad de existencia de algunos tipos de materia prima mineral dentro del territorio que se estudia y permiten organizar su búsqueda, mientras que la ausencia de los criterios correspondientes elimina la posibilidad de revelación de los minerales útiles. Por lo tanto, es preciso tener la seguridad de que en la región que se estudia, no solo existieron las condiciones favorables para la formación de minerales útiles, sino que también se manifiesten realmente los procesos de meniferación que pueden dar o dieron origen a los yacimientos minerales. Todos los datos, tanto geológicos como no geológicos, que se utilizan para lograr este objetivo se llaman *índices de búsqueda*. Según su carácter e importancia, estos se subdividen en dos grupos: índices directos e índices indirectos.

3.1 Índices de búsqueda directos

Están constituidos por los datos que indican directamente la existencia de las acumulaciones de minerales útiles en los límites de determinado sector de la corteza terrestre. Son índices directos de búsqueda: los afloramientos de minerales útiles; los rastros de la explotación o elaboración antigua del mineral útil; los datos de archivo acerca de la minería antigua; las aureolas y flujos de dispersión, tanto primarios como secundarios; y ciertos tipos de anomalías geofísicas.

Afloramientos de minerales útiles

No es necesario explicar con muchos detalles la importancia del hallazgo del mineral útil en su yacencia propia en la superficie terrestre actual. Esto significa,

sin duda, la existencia de este mineral en el subsuelo y representa el índice de búsqueda más seguro y preciso. Además, con mucha frecuencia los afloramientos del mineral útil son las meniferaciones *in situ*; sin embargo, en la mayoría de los casos, las tareas no se resuelven con el simple hallazgo de los afloramientos minerales. En primer lugar, los parámetros principales del cuerpo mineral (potencia, condiciones de yacencia, calidad del mineral útil) se modifican mucho en la zona de meteorización y no corresponden a sus valores en las partes más profundas. En segundo lugar, los afloramientos constituyen solamente la apófisis de los cuerpos minerales encerrados en el subsuelo y, en tercer lugar, en la superficie se encuentra un número bastante reducido de cuerpos minerales existentes dentro del área que se estudia. Por todo lo anterior, los afloramientos de minerales útiles se deben considerar índices de búsqueda directos de suma importancia.

Rastros de la explotación o elaboración antigua de minerales útiles

En tiempos muy lejanos, ya el hombre sabía extraer y utilizar algunos minerales útiles; con este objetivo realizaba excavaciones mineras y construía instalaciones primitivas de beneficio o para el proceso metalúrgico. Sin embargo, el bajo nivel de desarrollo de la técnica y la tecnología de la minería y elaboración de minerales útiles, obligaba a los mineros antiguos a utilizar únicamente las menas muy ricas con yacencia favorable y condiciones minero-técnicas sencillas, es decir, las menas situadas cerca de la superficie. Por lo general, los horizontes inferiores de los yacimientos, así como los cuerpos de menas de calidad mediocre, no se explotaban y por eso el descubrimiento de rastros de trabajos mineros antiguos provoca con mucha frecuencia la revelación de yacimientos industriales. Inclusive, en los casos en que en la antigüedad se extrajeron completamente pequeños cuerpos minerales, existen generalmente otros cuerpos que entonces eran desconocidos.

La mayoría de las veces, las excavaciones mineras antiguas no se pueden explorar por lo peligroso de su estado. Además, frecuentemente sus orificios se derrumban y están enmascaradas por la vegetación, lo que hace difícil su descubrimiento. Por el contrario, las escombreras de rocas estériles son más visibles; estas forman elevaciones circulares o arqueadas que rodean el lugar de la explotación antigua o se desplazan según la pendiente. Con mucha frecuencia, dichas elevaciones se manifiestan claramente en el relieve actual. Las escombreras pueden contener minerales no metálicos que acompañan a los metálicos, minerales secundarios que remplazan a los metálicos primarios en condiciones exógenas y algunas veces los mismos minerales primarios, si estos son suficientemente estables. Estos hallazgos constituyen una gran ayuda, no solo para determinar el tipo de mineral útil en cuestión, sino también para precisar las variedades de menas posibles y suponer el tipo geólogo-industrial de yacimiento.

Con frecuencia, las excavaciones mineras antiguas se laboreaban directamente en los cuerpos minerales y seguían todas las curvaturas y ramificaciones con una tendencia a extraer solamente el mineral útil y dejar las rocas adyacentes en el subsuelo. Por eso, la forma de dichas excavaciones resulta compleja e irregular y no se puede hablar de un sistema de explotación determinado. Los laboreos mineros más corrientes eran socavones, pozos criollos, minas primitivas, canteras, cámaras irregulares y hendiduras (figs. 3.1 y 3.2). La profundidad puede alcan-

zar de 150 a 200 m, y su volumen es de decenas o centenas de metros cúbicos. Debe señalarse la ausencia de correlación clara entre el volumen de los trabajos mineros antiguos y las dimensiones de los cuerpos minerales, así como entre la masa de la escombrera y la riqueza relativa de la mena.

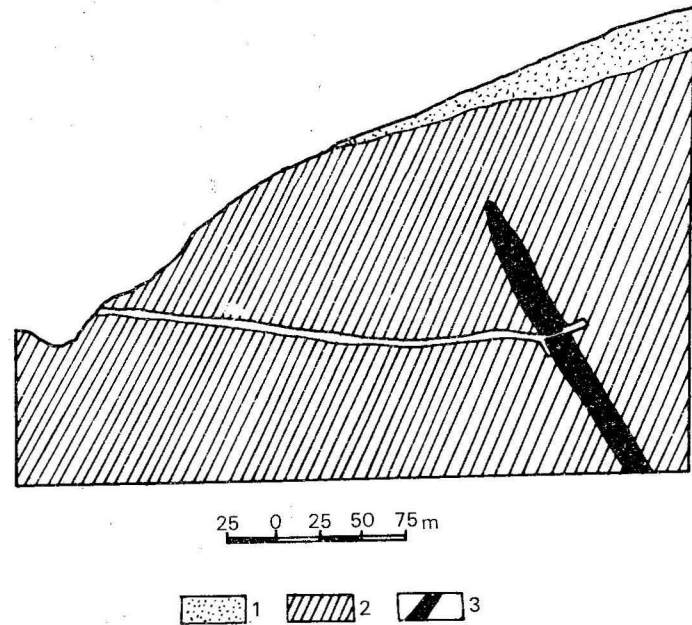


Fig. 3.1 Socavón antiguo en un yacimiento de plomo en Asia Central: 1- depósitos friables; 2- rocas encajantes; 3- mena

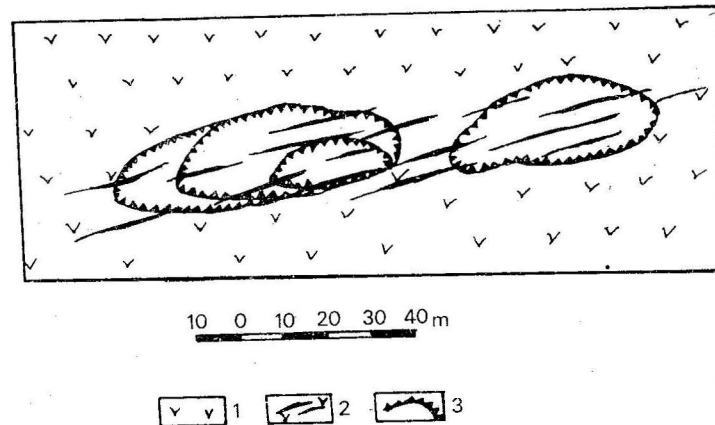


Fig. 3.2 Canteras antiguas en una zona tectónica mineralizada: 1- rocas tobáceas y efusivas; 2- zona tectónica mineralizada; 3- escalones de las canteras

Los rastros de la explotación antigua se pueden encontrar casi únicamente en los yacimientos de minerales útiles que la humanidad conoce hace mucho (oro, plata, estaño, cobre, plomo, hierro, mercurio, piedras preciosas y decorativas, mica, materia prima de construcción, sales minerales, etc.). Un gran número de excavaciones mineras antiguas fue encontrado en Asia Central, Cáucaso, Altai, Kazajastán, Karelia, Sajonia, Silesia, Grecia, España, Montes Rodopi y en otros lugares. Al mismo tiempo, el papel de este índice es insignificante para la búsqueda de manganeso, titanio, níquel, cromo, molibdeno, wolframio, aluminio y otros tipos de materia prima mineral cuya utilización industrial comenzó en los siglos XIX y XX.

Las huellas del tratamiento antiguo de los minerales útiles pueden existir en forma de colas del beneficio, ruinas de los hornos de fundición o escombreras de escorias de fundición metalúrgicas. El beneficio en los tiempos antiguos era primitivo y generalmente consistía en la selección manual de la mena o su lavado, a veces con la trituración anterior del mineral útil. Las posibilidades de transporte de los mineros eran muy limitadas en esa época, por lo cual, el beneficio se realizaba generalmente en las proximidades del lugar de la extracción del mineral útil. Esto facilita la búsqueda utilizando dicho índice. Como el agua representaba la principal fuente de energía y un medio de beneficio importantísimo, las colas antiguas, en la mayoría de los casos, se encuentran en los valles y a menudo en los depósitos aluviales de los ríos. La composición de dichas colas es de gran importancia para llegar a una idea acerca de los tipos de menas que se sometían al tratamiento.

El tratamiento metalúrgico de las menas en la antigüedad se organizaba también cerca de los ríos y a poca distancia del yacimiento. Las escorias metalúrgicas, que tienen el aspecto de una masa muy porosa, de color gris oscuro o negro son bastante duras y resistentes desde el punto de vista químico, por lo que forman a menudo flujos en los depósitos aluviales que pueden alcanzar desde unos kilómetros hasta decenas de kilómetros de largo y se revelan fácilmente. Dentro de los trozos de escoria se pueden conservar fragmentos de menas primarias, relictos de agentes fundentes o carbón de leña, lo que resulta de mucha ayuda si se quiere determinar el tipo de mineral útil tratado o las posibles variedades de mena. Las ruinas de los hornos son más raras y también se localizan generalmente en los valles; generalmente alrededor de ellas se observan las escorias de fundición y es probable encontrar montones de mena que por cualesquiera razones no fueron utilizados.

Datos de archivo acerca de la minería antigua

Los datos sobre la extracción de minerales útiles, fabricación de metales, visitas a los yacimientos, ejecución de trabajos con la utilización de la materia prima de construcción y otros que se pueden encontrar en los archivos y crónicas históricas, reflejan la presencia de diferentes tipos de minerales útiles en la región que se estudia y por esta razón desempeñan el papel de índices de búsqueda muy importantes.

A este grupo también pertenecen los resultados de los trabajos arqueológicos, que revelan, entre los objetos de la cultura material de los tiempos lejanos, herramientas mineras, candiles mineros primitivos, martillos, mojas (o mochacos) y morteros para la trituración de la mena, etc. Esos hallazgos demuestran la exis-

tencia de acumulaciones minerales en el subsuelo, aunque como regla es difícil precisar el tipo concreto de mineral útil explotado.

Aureolas y flujos de dispersión

Durante la formación de los yacimientos minerales de cualquier génesis, los procesos de concentración de los elementos químicos no se limitan a los contornos de los cuerpos minerales sino que se desarrollan también en las rocas encajantes, aunque en ellas su intensidad sea mucho menor. El resultado de dichos procesos es la acumulación de unos u otros elementos, y combinaciones de estos o de minerales en las rocas encajantes que representan una especie de prolongaciones de los cuerpos minerales. Estos fenómenos se llaman aureolas primarias de dispersión.

La destrucción de los yacimientos minerales útiles provoca tanto la dispersión definitiva en el medio de los elementos, combinaciones o minerales que los componen, como las concentraciones locales de dichos productos en las rocas friables, aguas, plantas, etc. Estas concentraciones se conocen como aureolas secundarias de dispersión.

El rasgo característico de todas las aureolas de dispersión es su extensión, que es siempre mayor que la de los cuerpos minerales o yacimientos que les dieron origen, por lo que se revelan muy fácilmente durante la búsqueda. Además de las aureolas existen los flujos de dispersión. Hasta el presente, los principios claros de distinción de las aureolas y los flujos de dispersión no son más que partes de las aureolas que se encuentran en la zona de influencia inmediata de los agentes atmosféricos. Otros consideran como flujos a las aureolas secundarias o sus sectores, desplazados en alguna dirección desde el lugar de su formación, así como las partes de las aureolas primarias linealmente extendidas que marcan las vías de movimiento de las soluciones mineralizantes.

Para los autores de este texto, ambos puntos de vista son equivocados. Por ejemplo, las combinaciones que surgen como resultado de la destrucción del cuerpo mineral, y migran en las aguas subterráneas hacia alguna corriente de agua superficial, representan sin lugar a dudas un flujo de dispersión, el cual se puede separar de manera artificial en el momento de salida del agua a la superficie. Además, no es correcto nombrar flujo a la aureola eluvial que yace sobre el cuerpo mineral y tiene la transición gradual a las menas primarias, aunque esta aureola se encuentre en la zona de meteorización. Por otra parte, no tiene sentido subdividir la aureola primaria de dispersión, que se forma durante la circulación de las soluciones mineralizantes a través de las rocas encajantes, en la propia aureola alrededor del cuerpo mineral y el flujo de dispersión cerca de la fisura que representa la vía de movimiento de dichas soluciones. Por este motivo, de ahora en adelante se aplicará el término flujo de dispersión solo a las aureolas secundarias de dispersión (o sus partes) desplazadas con respecto al cuerpo que les da origen, a causa de los procesos exógenos.

Las aureolas y los flujos de dispersión pueden acompañar tanto a los cuerpos minerales como a los yacimientos o campos meníferos enteros. Sin embargo, hay que recordar que no es totalmente correcto considerarlos como índices de búsqueda directos. Efectivamente, en la inmensa mayoría de los casos, ellos atestiguan la presencia de unos u otros minerales útiles dentro de la región que se estudia, pero esto no ocurre siempre. Por lo tanto, las aureolas primarias de dispersión pueden surgir aunque los procesos de concentración del material menífero no al-

cancen la intensidad suficiente como para asegurar la formación de los cuerpos minerales.

Las aureolas secundarias pueden existir, ya que el yacimiento madre es destruido por completo a causa de la erosión. Además, dichas aureolas secundarias a veces se crean a expensas de la materia menífera diseminada, que no forma acumulaciones locales en las rocas encajantes. No obstante, estos casos representan raras excepciones y está reconocido el importante papel de las aureolas y flujos de dispersión como índices de búsqueda directos.

Aureolas primarias de dispersión

Las aureolas de dispersión primaria de la materia menífera pueden ser tanto singenéticas como epigenéticas, con respecto a las rocas encajantes. Las primeras se forman al mismo tiempo que las rocas y las otras se superponen con posterioridad a las rocas ya existentes. Las aureolas singenéticas son características para los minerales útiles magmáticos, metamorfogénicos y sedimentarios, y las epigenéticas para los postmagmáticos y pegmatíticos.

Las aureolas singenéticas se caracterizan por un aumento gradual del contenido del componente, a medida que se aproximan al cuerpo mineral, lo que se expresa por el poco contraste de dichas aureolas. En el caso de yacimientos minerales magmáticos, estas aureolas tienen una forma bastante sencilla y casi isométrica, se localizan generalmente en las partes superiores y apicales de los macizos intrusivos, así como en las rocas de su techo, y repiten aproximadamente la configuración de este último. Si dentro del macizo magmático existen cuerpos minerales de esta génesis, sus aureolas primarias de dispersión se ubican en el lado colgante del cuerpo (fig. 3.3).

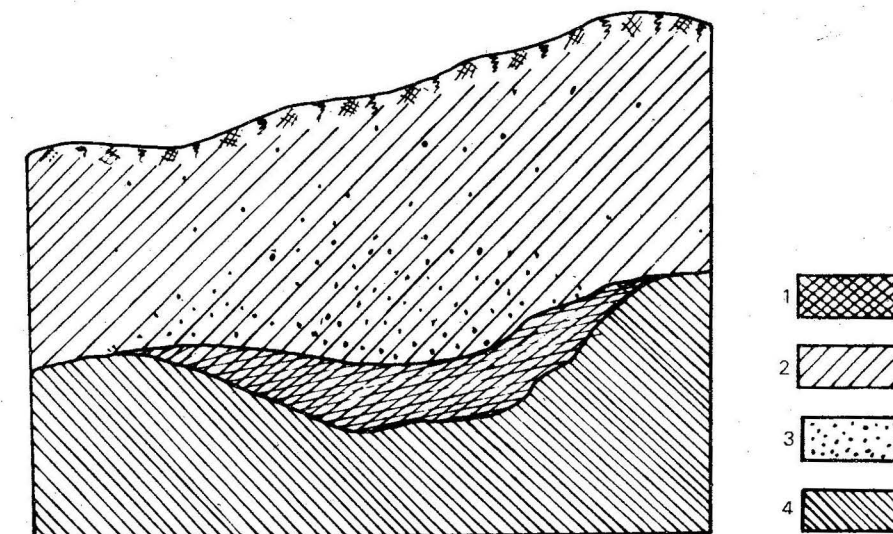


Fig. 3.3 Esquema de la constitución de la aureola de dispersión primaria en un yacimiento cupro-niquelífero (corte vertical): 1- mena cupro-niquelífera masiva; 2- rocas básicas; 3- aureolas en las rocas básicas; 4- rocas encajantes

Las aureolas primarias de los yacimientos minerales sedimentarios y metamorfogénicos son muy aplanadas; sus dimensiones en el plano del horizonte productivo son muchas veces más grandes (hasta 100 veces y más) que en el sentido de la potencia. Por ejemplo, las aureolas primarias de dispersión de fosfatos de calcio y de glauconita, en los yacimientos de fosforita de Siberia oriental, se observan a una distancia de 4 km fuera de los límites de los depósitos industriales, mientras que en el sentido de la potencia ellas no sobrepasan 25 m. Aureolas análogas se conocen en los yacimientos sedimentarios de manganeso, areniscas cupríferas estratiformes, etc. En todas las aureolas primarias de dispersión de origen sedimentario los componentes útiles se encuentran en la misma forma que en los depósitos industriales: granos minerales o concreciones, si las menas representan agregados minerales, y elementos químicos o sus combinaciones en el caso de los cuerpos minerales de tipo sorción. Por lo tanto, estas aureolas se pueden considerar como zonas de meniferaación embrionaria o no terminada, que se convierten gradualmente en rocas estériles, de acuerdo con la modificación de la situación facial de la cuenca de sedimentación.

La distribución de los elementos en las aureolas primarias epigenéticas de dispersión se caracteriza por un contraste considerable y una zonalidad geoquímica bien marcada. Las aureolas primarias de los cuerpos minerales independientes son de mayor contraste: los contenidos de los elementos pueden sobrepasar el fondo normal de dispersión en la región en 2 o 3 órdenes matemáticos. Estas aureolas son relativamente pequeñas y contienen solo elementos típicos para el mismo cuerpo mineral. Surgen generalmente a causa de la difusión de los elementos, a partir de las soluciones mineralizantes o cuerpos minerales hacia las rocas encajantes; el traslado de los componentes tiene lugar solo en la dirección de la disminución de los potenciales químicos de los elementos. Cuando el grado y el carácter de la dispersión de los elementos químicos son distintos, la forma, la estructura, las dimensiones y la composición de las aureolas primarias resultan diferentes. Las razones principales que causan esas diferencias son las siguientes:

Propiedades geoquímicas de los elementos.

Composición, estructura interna y condiciones de yacencia de los cuerpos minerales.

Propiedades físico-químicas y condiciones de yacencia de las rocas encajantes.

Tipo de formación menífera.

Las propiedades geoquímicas de los elementos determinan su capacidad de migración y dependen de los factores que se relacionan a continuación: valencia variable del elemento; propiedades ácidas o básicas del elemento, que se determinan por la relación entre los radios y las valencias de los iones; energía de las redes cristalinas de las combinaciones químicas naturales, que influye sobre la solubilidad de estas últimas y constitución interna de dichas combinaciones. Así, por ejemplo, cuando aumenta la valencia, la capacidad de migración del azufre, el cobre, el cromo, el vanadio, y el arsénico se acrecienta y la del hierro, el manganeso y el cobalto, por el contrario, disminuye; los cambios de la acidez de las soluciones mineralizadas, al pasar estas a través de las rocas encajantes, puede provocar la dispersión de unos componentes y el aumento de la capacidad de migración de otros.

Las diferencias de las propiedades geoquímicas de los elementos se reflejan en la zonalidad de las aureolas primarias epigenéticas. Por lo tanto, la composición

y extensión de una u otra zona pueden no corresponder a la constitución del cuerpo mineral. Los elementos cuya capacidad de migración es considerable (mercurio, antimonio, arsénico, cinc, plata, molibdeno, hierro y otros) forman aureolas amplias y largas, mientras que los pocos móviles (cobre, plomo, bario, cobalto, wolframio, estaño y otros) se localizan en aureolas estrechas. Las aureolas primarias de dispersión, con una alternancia regular de zonas de composición distinta, se presentan en muchos yacimientos polimetálicos de cobre, molibdeno, estaño y otros. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo de zonalidad de la aureola primaria de un cuerpo polimetálico.

La zonalidad de las aureolas primarias de dispersión, en el caso de yacimientos endógenos, tiene mucha importancia durante la búsqueda, ya que permite pronosticar correctamente el tipo posible de mineral útil en el subsuelo, a partir de los datos obtenidos en la superficie, y revelar la presencia de los cuerpos minerales a gran profundidad, sobre la base del estudio de las zonas medias o lejanas de dichas aureolas. Numerosas observaciones han probado que las aureolas primarias de los yacimientos endógenos tienen la orientación casi vertical y se pueden manifestar entre 100 a 200 m por encima de los cuerpos minerales que estos acompañaban. Aún más, si las condiciones de migración de los elementos son muy favorables, esta distancia puede alcanzar de 300 a 350 m (aureolas de mercurio sobre los yacimiento de antimonio-mercurio).

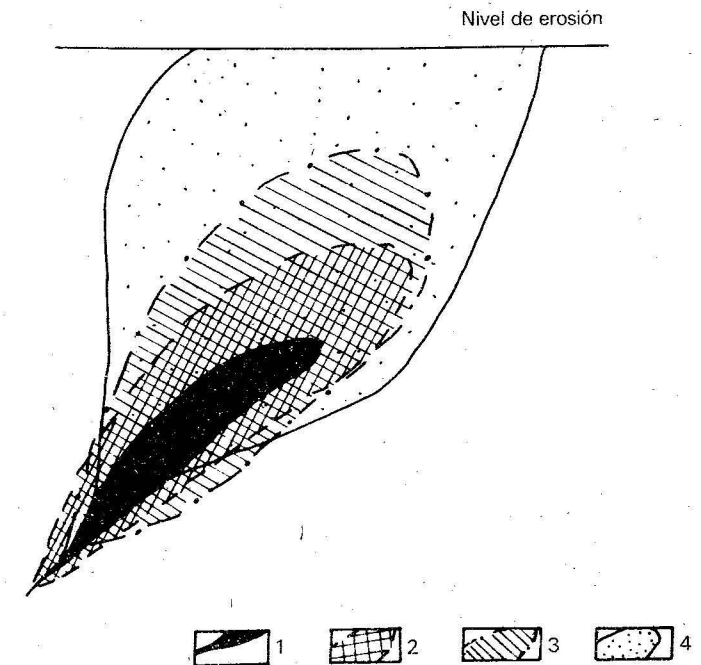


Fig. 3.4 Esquema de la zonalidad de la aureola de dispersión primaria en un cuerpo de menas polimetálicas: 1- cuerpo mineral; 2- zona cercana (Cu, Pb, Au, S); 3- zona mediana (Zn, Ag, Cu, Cd, As, S); 4- zona lejana (Zn, Sb, Hg, Az, I, Sr)

Tabla 3.1
SERIES DE ZONALIDAD DE LAS AUREOLAS PRIMARIAS

Tipo de meniferación	Yacimiento	Serie de zonalidad
Wolframio-molibdenífera de skarn	Choruk-Dayrón Shurole	Ba, Ag, (Pb, Zn), Sn, Cu, W, Mo, (Co, Ni), Be Ag, Pb, Zn, Mo, W, Ni, Co
Polimetálica de skarn	Kamarsai Aktash Kurusoi	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
	Altin-Topkan	Sb, Cd, (Ag, Pb), (Sn ⁺¹ , Zn) Cu, Bi, Ni, (Co, Mo, Sn ⁺² , W, Be)
Aurífera	Kochbulak	(Sb, As ⁺¹ , Ag, Pb) Zn, Au, Mo, Cu, Bi, (Co, Ni, As ⁺² , W, Be)
	Shkolnoye	Sb, As, Ag, Pb, Zn, Au, Cu, Mo, Sn, Bi, Be, W, Co
	Burgundo	Ba, Sb, As, Ag, Pb, (Zn, Cu), Au, Mo, (Sn, Bi, W)
Polimetálica hidrotermal	Este Kanimansur Arkhon	Ba, As ⁺¹ , Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Co, Sn, As ⁺² , W, Ag, Pb, Zn, Cu, Co
Cuprífera porfírica	Almalyk	Ba, As, Sb, (Ag, Pb, Zn) Au, Bi (Cu, Mo), (Sn, Co, W, Be)
	Saricheku	Ag, Pb, Zn, Cu, Co
Cuprífera	Kafan	Ba, As, Pb, Zn, (Ag, Sn), Cu, Bi, Co, Ni
Plomo-cincífera estratiforme	Sumsar	Ba, As, Cu, Ag, Pb, Zn, Co, Ni, Be
Mercúrico	Symap	Ba, Hg, Ag, Pb, Zn, Cu (Co, Ni, Sn), Mo
	Agyatag	As, Hg, (Ag, Pb, Sn, Zn), Cu, Co, Ni (Be, Mo, W)
	Sokholin	As, Hg, Sb, Pb, Zn, Cu (Co, Ni)
Antimonio-mercúrica	Tereksoi Karakamar	As, Sb, Hg, Cu, Ag, Pb, Zn, Be, Co, Ni As, Sb, Hg, Ag, Sn, Pb, Zn, Cu, Mo (W, Co, Ni)
Uranífera		Ag, Pb, Zn, Cu, Mo

La sustitución regular de unos elementos por otros, en dirección vertical también se expresa en las llamadas *series de zonalidad*, cuya utilización permite determinar la posición aproximada del nivel de erosión de los cuerpos minerales, sus minerales o sus aureolas primarias de dispersión. Sobre la base de investigaciones muy amplias de las aureolas primarias de yacimientos hidrotermales, se estableció la siguiente serie general de zonalidad vertical de mayor probabilidad, de arriba hacia abajo [51]:

Ba, (Sb, As⁺¹, Hg), Cu⁺¹, Cd, Ag, Pb, Zn, Au, Cu⁺², Bi, As⁺², Ni, Co, Mo, U, Sn, Be, W

En los últimos años, las aureolas primarias de dispersión de los elementos indicadores, adquieren una inmensa importancia para la búsqueda de las acumulaciones minerales que yacen a gran profundidad. Dichos elementos (manganeso, bismuto, estroncio, rubidio, cesio, mercurio, antimonio y especialmente yodo), aunque se encuentren en las menas en cantidades insignificantes crean, sin embargo, aureolas extendidas y de gran contraste. Por ejemplo, las aureolas de antimonio, con un contenido de hasta 0,5%, se revelan entre los 150 y los 200 m por el realce desde los filones estanníferos que no contienen prácticamente este elemento [9,51]. El contenido de manganeso en las aureolas primarias de yacimientos polimetálicos, estanníferos y de wolframio tiene una relación bastante estrecha con la escala de estos últimos, lo que permite orientar correctamente los trabajos de búsqueda, sobre la base del estudio de las aureolas de manganeso. Alrededor de los cuerpos pegmatíticos se observan aureolas primarias de dispersión muy extendidas (hasta 100 y 200 m) de litio, rubidio y cesio. Por encima de los cuerpos polimetálicos, piritocupríferos, cupro-molibdeníferos, cupro-niquelíferos, estanníferos, mercurio-antimoníferos y arsenicales, se desarrollan las aureolas primarias de yodo, por cuanto este último tiene la más alta capacidad de migración con respecto a otros elementos. Estas aureolas pueden sobrepasar los 200 m por el realce, y su ancho se encuentra entre los 30 y 50 m [51].

La forma en que se presentan los elementos en las aureolas primarias epigenéticas de dispersión, varía mucho (elementos nativos, combinaciones químicas, minerales propios, impurezas isomórficas en minerales ajenos, soluciones líquidas, etc.) en dependencia no solo del carácter de su presencia en los cuerpos minerales, sino también de las propiedades físico-químicas del medio de meniferación.

Para diferentes tipos de minerales útiles, S.V. Grigorian propuso [7] las series de zonalidad vertical de las aureolas primarias que aparecen en la tabla 3.1.

La aparición doble de algunos elementos en la misma serie de zonalidad se debe a la formación de las menas en etapas sucesivas. Las aureolas donde se manifiestan dichos fenómenos se llaman *poliformacionales*. Ellas también pueden mostrar los casos de zonalidad inversa; por ejemplo, el wolframio a nivel más alto que el molibdeno en las aureolas primarias de los yacimientos Tirni-Auz y Choruk-Dayron, el cobre por arriba del plomo y cinc en el yacimiento Tereksoi, y otros.

La composición, estructura interna y condiciones de yacencia de los cuerpos minerales ejercen una gran influencia sobre la morfología y las dimensiones de las aureolas primarias de dispersión vinculadas con dichos cuerpos. En primer lugar, alrededor de los cuerpos de menas macizas o ricas diseminadas, como resultado de los procesos claramente manifestados de concentración de la materia, se observan aureolas primarias de dispersión estrecha (por lo general no más de unos

metros), mientras que en el caso de menas de dimensiones ordinarias o pobres, las aureolas son más amplias (decenas y hasta centenas de metros). Además, los cuerpos independientes de forma sencilla están acompañados por aureolas simples que en la mayoría de los casos no son más que zonas de poca potencia que reflejan aproximadamente la morfología del cuerpo (fig. 3.5).

En el caso de algunos cuerpos cercanos se forman las aureolas primarias de dispersión de forma compleja y composición mixta o compuesta (fig. 3.6).

Los cuerpos lineales de buzamiento abrupto por lo general dan origen a aureolas primarias estrechas y largas; los cuerpos horizontales o de buzamiento suave están asociados con aureolas amplias de tipo superficial.

Las propiedades físico-mecánicas y químicas de las rocas encajantes son de gran importancia en cuanto a la formación de las aureolas primarias de dispersión. Si otras condiciones son iguales, dichas aureolas de dispersión están más extendidas en las rocas porosas, frágiles y agrietadas que en las compactas y poco penetrables. Además, en las rocas inertes, desde el punto de vista químico (rocas silicatadas principalmente), la dispersión de la materia menífera se observa a distancias muy grandes, mientras que las activas (por ejemplo, rocas carbonatadas) provocan la deposición brusca de algunas combinaciones químicas a partir de la solución y se caracterizan por aureolas primarias de dispersión mucho más estrechas.

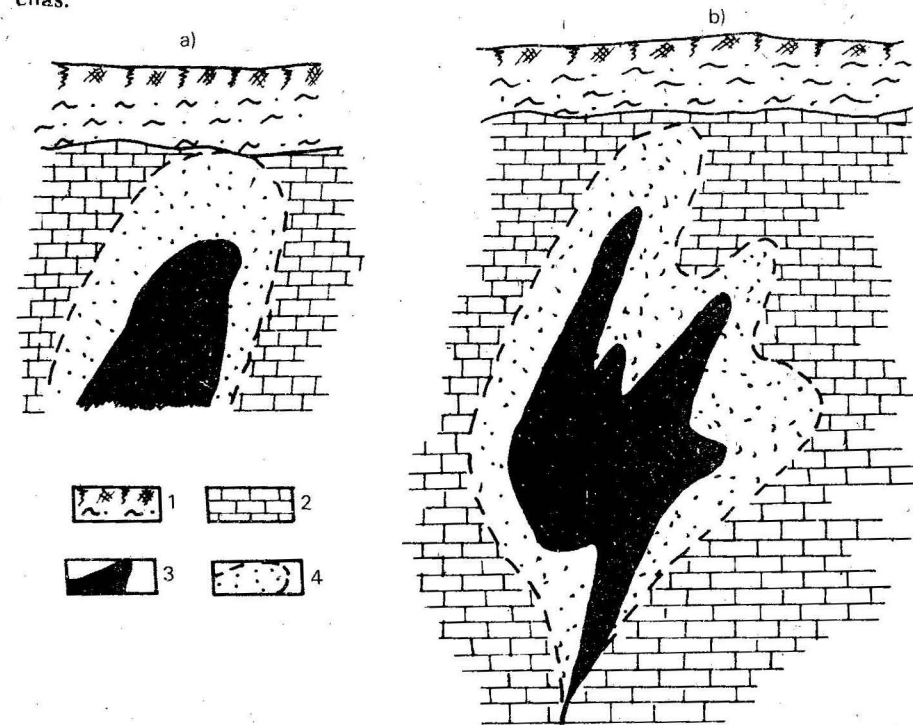


Fig. 3.5 Constitución de la aureolas de dispersión primarias: a) alrededor de los cuerpos minerales de forma simple; b) alrededor de los cuerpos minerales de forma compleja; 1- depósitos friables; 2- caliza; 3- cuerpo mineral; 4- aureola de dispersión

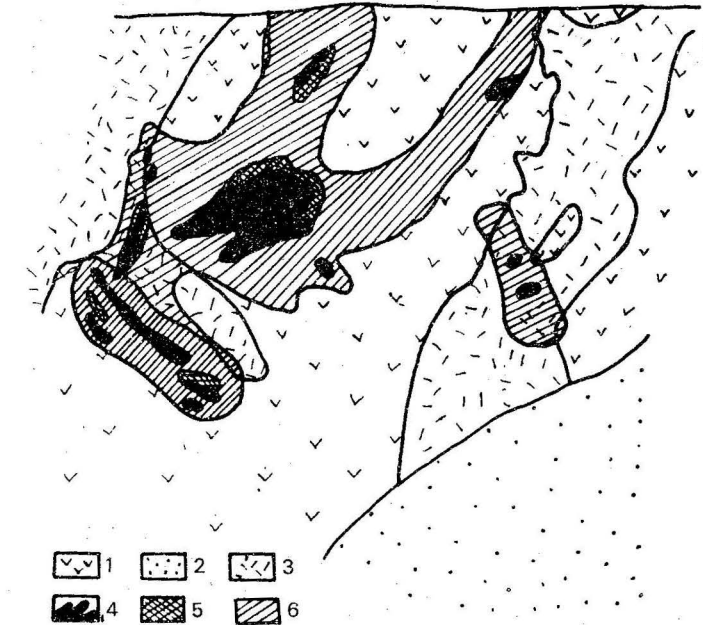


Fig. 3.6 Aureola de dispersión primaria de un yacimiento hidrotermal con cuerpos minerales de morfología simple: 1- felsita; 2- arenisca; 3- toba felsítica; 4- cuerpos minerales industriales; 5- menas fuera de balance; 6- aureola de dispersión primaria

El tipo formacional de yacimientos postmagmáticos influye mucho sobre las condiciones físico-químicas de formación, tanto del mineral útil como de sus aureolas primarias de dispersión. Por esta razón, para las formaciones meníferas de alta temperatura (de greisen, orocuarzifera, etc.) son típicas las aureolas primarias estrechas (desde algunas decenas de metros hasta 100 m) con un predominio de elementos tales como oro, molibdeno y arsénico. Las aureolas primarias de los yacimientos hidrotermales de temperatura media (formaciones polimetálica, pirita-cuprífera y otras) son más largas (hasta 200 a 250 m) y se caracterizan por el predominio de cobre, plomo y cinc. Las aureolas de este género, alrededor de los yacimientos de formaciones meníferas de baja temperatura (polimetálica, antimonio-mercúrica y otras), pueden alcanzar 400 m y más de longitud y se componen principalmente de mercurio, antimonio, arsénico y bario.

En el espacio entre las aureolas primarias de dispersión de los cuerpos independientes se forman las de los yacimientos y, si los procesos de meniferación alcanzan una gran envergadura, pueden surgir aureolas primarias de dispersión de campos meníferos. Ambos grupos de estas aureolas complejas se crean, o por la vía de infiltración como resultado de la circulación de las soluciones mineralizadas a través de las zonas de agrietamiento, fallas, etc., o por la vía mixta de difusión e infiltración. Dichas aureolas, no solo sobrepasan muchas veces las de los cuerpos independientes sino también son de mucho menos contraste (aproximadamente de un orden matemático) y en su composición pueden entrar otros elementos, además de los componentes que constituyen los cuerpos minerales.

En los últimos años, el científico soviético N.P. Yermakov y sus discípulos han establecido que el agua, como el componente más móvil de las soluciones postmagmáticas, forma en las rocas, alrededor de los cuerpos minerales de origen endógeno, las más amplias aureolas primarias de dispersión y ellos han propuesto llamarlas *aureolas de escaldadura* [51]. Dichas aureolas se manifiestan por la presencia en los minerales de las rocas encajantes de algunas inclusiones de tipo gas-líquido que se han conservado durante el cierre de las microhendiduras existentes en estos minerales; la cantidad relativa de inclusiones disminuye a medida que estas rocas encajantes se alejan del cuerpo mineral. Estas aureolas se revelan mediante la toma de muestras de las rocas madres, con una masa de 0,1 a 1,5 kg (en dependencia del tamaño de los granos de la roca), trituración hasta 0,25 a 1,0 mm, y el análisis de decrepitación de este material. Durante este análisis se registran los impulsos correspondientes a las explosiones gas-líquido y se calcula el número de estas explosiones para cada gramo de la muestra. La intensidad de la manifestación de este fenómeno dentro de las aureolas de escaldadura que representan las anomalías decriptométricas sobrepasa el fondo normal en 5 a 15 veces, lo que permite descubrir fácilmente las aureolas cuyo ancho generalmente es de 4 a 10 veces mayor que la potencia de los cuerpos minerales.

En general no se observan relaciones correlativas más o menos estrechas entre las dimensiones de las aureolas primarias de dispersión de los yacimientos postmagmáticos y la escala posible de los cuerpos minerales, ni entre los contenidos de elementos en dichas aureolas y los cuerpos minerales correspondientes. Sin embargo, en algunas regiones esta correlación se puede comprobar y por consiguiente es utilizable para seleccionar las aureolas primarias más favorables y argumentar la evaluación perspectiva de los objetos estudiados. Por ejemplo, en el yacimiento Kounrad en el Kazajastán las aureolas primarias de molibdeno por encima de los filones pobres son estrechas (20 a 30 m) con un contenido de este metal inferior a 0,01%; sobre los cuerpos ricos alcanzan un ancho de 70 a 120 m, contienen molibdeno en un porcentaje de centésimas o décimas y la profundidad de yacencia de los filones es igual. Existen proposiciones para calcular las reservas geológicas posibles del yacimiento a partir del contenido promedio del elemento en la aureola, la superficie de esta, la profundidad de propagación posible, los coeficientes de concentración del mineral útil y el empobrecimiento de la aureola (V.I. Krasnikov, 1959) o por otros procedimientos (Safronov, 1971; E.M. Kviatkovsky, 1977). No obstante, dichos cálculos requieren una serie de suposiciones y por lo general no son más exactos que los pronósticos geológicos ordinarios, por lo cual no tienen una gran utilización.

Las principales tareas que se resuelven sobre la base del estudio de las aureolas primarias de dispersión son la búsqueda de los cuerpos minerales ciegos, la determinación de su profundidad probable de yacencia y la elaboración de una idea aproximada sobre la posición del nivel de erosión con respecto al cuerpo.

Aureolas secundarias y flujos de dispersión

Comprenden todo el complejo de productos que surgen durante la destrucción de los yacimientos minerales o sus aureolas primarias de dispersión. Estas aureolas y flujos de dispersión se forman para los minerales útiles de cualquier composición y procedencia y en todas las condiciones climáticas, pero el estado físico del material en la aureola de dispersión y el tipo de aureola varían mucho en dependencia de la combinación concreta de dichos factores; de acuerdo con

esto, se conocen, en primer lugar, las aureolas secundarias cuya fuente es la meteorización física de las rocas y menas. Estas aureolas (o flujos), que se llaman mecánicas, contienen la materia menífera en forma de minerales o sus agregados. El segundo grupo lo representan las aureolas y los flujos de dispersión vinculados principalmente con la meteorización química y bioquímica, en los cuales la materia menífera se manifiesta en forma de elementos químicos o sus combinaciones. Estas aureolas y flujos de dispersión se denominan geoquímicas.

Las aureolas y los flujos mecánicos de dispersión son el resultado de la destrucción de las rocas o menas que contienen minerales duros y químicamente estables. En dependencia del tamaño de los granos minerales o sus agregados, dichas aureolas y flujos se subdividen en: fragmentos muy grandes (bloques, guijarros y gravas de más de 2 o 3 cm de diámetro), mineralógicos o de jagua (granos minerales o sus agregados, cuyo tamaño varía desde décimas de milímetro hasta 2 o 3 cm) y finamente dispersados o arcillosos (fragmentos de granos de milésimas a décimas de milímetro de diámetro). La subdivisión más detallada tiene en cuenta el tipo genético de los depósitos dentro de los cuales ellas se encuentran.

Las aureolas mecánicas eluviales de dispersión se ubican en las áreas subhorizontales aplanadas de la superficie actual y recubren los afloramientos de minerales útiles, que se encuentran siempre dentro de dichas aureolas. La configuración de estas aureolas refleja más o menos la del cuerpo mineral, pero el alejamiento de los fragmentos meníferos a partir de este puede alcanzar hasta decenas de metros. La formación de dichas aureolas está condicionada por la destrucción más rápida de los minerales de las rocas encajantes con respecto a los meníferos y está acompañada por un proceso que arrastra fuera de la aureola los productos detríticos finamente triturados o ligeros. En los casos de menas duras y resistentes (menas de hierro magnéticas o hematíticas, menas de titanomagnetita, corindón, cromitas, cuarzo piezoóptico y otros) tales aureolas son de fragmentos muy grandes, mientras que para las menas más blandas con granos de minerales estables (oro, casiterita, wolframita, scheelita, berilo, monacita, rutilo, etc.) se añaden las mineralógicas y a veces las arcillosas.

Aureolas y flujos de dispersión deluviales

Ocupan las cuestas del relieve, por lo que resulta difícil trazar el límite entre las aureolas y los flujos. Como regla se consideran como aureolas de este género las acumulaciones más o menos isométricas de los productos de destrucción de los cuerpos minerales adyacentes a los afloramientos de estos. Los límites entre la aureola y el flujo varían en función del carácter de la pendiente. La configuración de la cuesta y la posición del cuerpo mineral con respecto a esta, son los factores principales que influyen sobre la forma del flujo de dispersión y el carácter de la concentración del componente útil en este (fig. 3.7).

Las condiciones más favorables para la formación y conservación de las aureolas y flujos de dispersión deluviales corresponden a las cuestas suaves (con ángulo de pendiente inferior a 20 o 30°), porque en el caso opuesto los flujos se separan de los afloramientos minerales y su importancia desde el punto de vista de búsqueda disminuye. Aunque en las cuestas suaves la aureola deluvial se desplaza hacia abajo, el cuerpo mineral se encuentra dentro de esta y se mueve hacia su parte superior a medida que la pendiente se acentúa.

En las aureolas y flujos deluviales se observa la combinación variable del material detrítico de fragmentos grandes, de jagua y arcilloso.

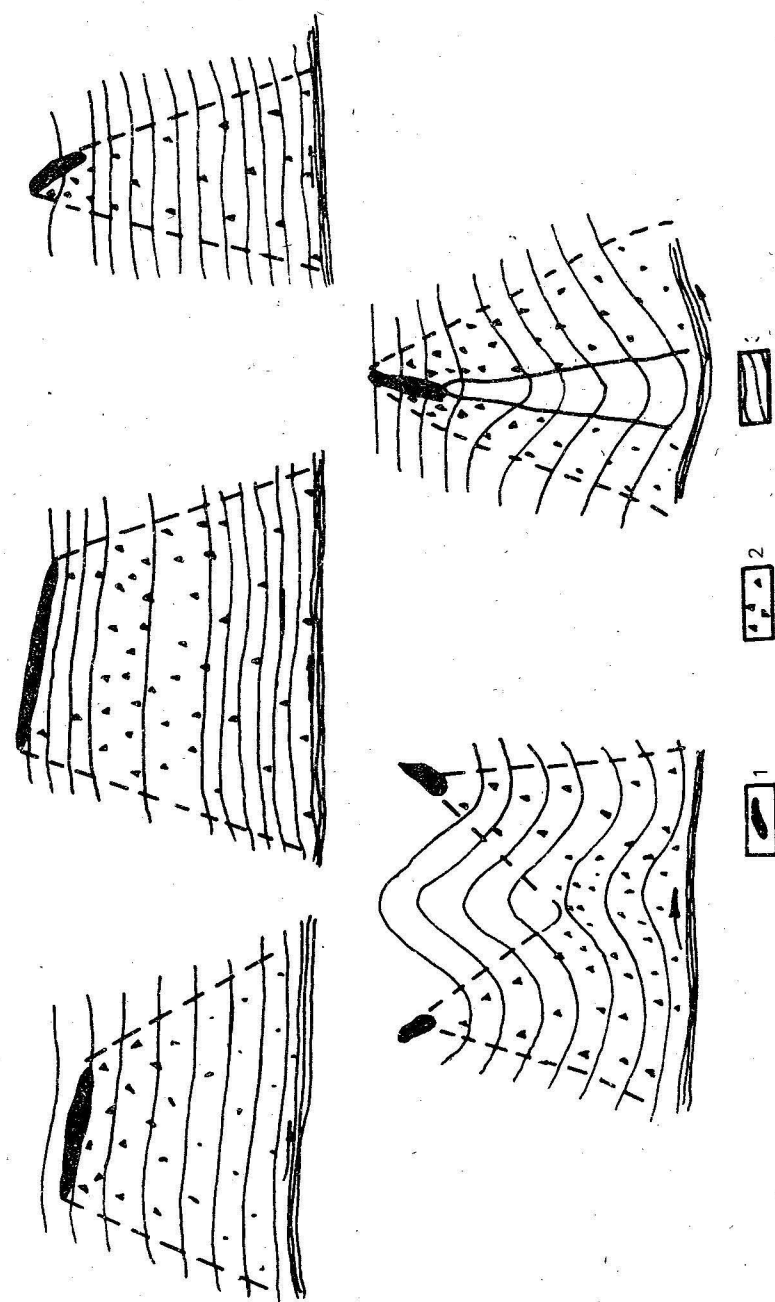


Fig. 3.7 Esquema de la constitución de las aureolas de dispersión deluviales: 1- cuerpo mineral, 2- aureolas de dispersión; 3- curvas de nivel

Los flujos de dispersión coluviales y proluviales se forman al pie de las cuevas abruptas o cerca de las desembocaduras de las corrientes temporales. Ellos representan una mezcla del material detrítico, tanto de fragmentos muy grandes como mineralógico y arcilloso, y se alejan bastante de los afloramientos de mineral útil o sus aureolas; eluviales; por lo tanto, dichos flujos tienen un papel secundario durante la búsqueda.

Los flujos de dispersión aluviales se localizan en los depósitos friables de las corrientes, tanto permanentes como temporales. Por su carácter pueden ser detríticos de fragmentos muy grandes, mineralógicos y arcillosos; estas variedades se ubican regularmente en el espacio de acuerdo con los cambios en el régimen de la corriente y el estado de su valle. En el curso superior de un río predominan los flujos de fragmentos muy grandes y corriente abajo estos ceden su lugar a los de jagua y finalmente a los arcillosos. Este fenómeno es completamente natural, ya que el tamaño de los fragmentos transportados depende de la velocidad de la corriente. La arena de granos finos se puede desplazar con la corriente de una velocidad de 0,15 m/s; la de granos grandes, con una velocidad de 0,20 a 0,25 m/s; la grava pequeña con 0,30 a 0,35 m/s; la grande a 1,0 m/s; los guijarros con diámetro de 10 cm a 3,5 m/s; los bloques más grandes (de diámetro del orden de 20 cm) a 11,0 m/s; etc. Como los ríos de las llanuras se caracterizan generalmente por una velocidad de corriente inferior a 0,5 m/s sus depósitos aluviales con frecuencia son arcillosos o arenosos. En el pie de la montaña la velocidad crece hasta 1,5 a 2,0 m/s y el aluvión se compone de arena con una gran proporción de grava. En los ríos de montaña son típicos los depósitos aluviales de gravas, guijarros y bloques.

El hecho de que la cantidad de fragmentos en el aluvión, su grado de redondeamiento y la probabilidad del descubrimiento de unos u otros minerales dependan de la distancia del transporte del material detrítico, se utiliza para la búsqueda del mineral útil *in situ* a partir de los flujos aluviales.

En los casos generales, los fragmentos de las menas débiles se conservan sin redondear en el aluvión hasta distancias de varias centenas de metros del cuerpo mineral; los fragmentos groseramente redondeados pueden encontrarse a algunos kilómetros de este y los bien redondeados a decenas de kilómetros. Las menas sólidas con fragmentos no redondeados se pueden observar a varios kilómetros de su fuente primaria, mientras que los fragmentos débilmente redondeados indican una distancia de transporte de decenas de kilómetros. Al mismo tiempo que aumenta el grado de redondeamiento de los fragmentos a medida que estos se alejan de la fuente inicial, también disminuye el tamaño de dichos fragmentos y su concentración en los depósitos friables. Sin embargo, esto último no ocurre siempre, ya que la concentración de los fragmentos meníferos pesados en el aluvión depende no solo de la distancia del transporte, que contribuye a la dispersión, sino también de las condiciones geomorfológicas del terreno, que pueden favorecer la acumulación local del material.

Los flujos aluviales mineralógicos, o de jagua, desempeñan un papel de suma importancia durante la búsqueda de minerales útiles pesados y resistentes como: oro, platino y platinoides, casiterita, wolframita, sheelita, rutilo, ilmenita, circon, monacita, tantalita, columbita, diamante, cromita, cinabrio, magnetita, hematita, pirolusita, barita, topacio, corindón y algunos otros.

En los flujos aluviales de dispersión se lleva a cabo la separación de los minerales meníferos de la masa filoniana que comienza ya en el eluvión. Además, los granos meníferos siguen triturándose y redondeándose hasta la pulverización

completa de la materia menífera. El carácter y la intensidad de este proceso depende de la dureza, fragilidad y tamaño inicial de los granos minerales. Así, el oro nativo se comprime, aplasta y desgasta fácilmente y se redondea intensamente; la wolframita también se rompe, pero se redondea con dificultad; la monacita es difícil de romper y redondear.

En función de la velocidad de la corriente y la resistencia de los minerales, los flujos mineralógicos de estos últimos se pueden extender a diferentes distancias desde el yacimiento destruido: para el oro y el diamante esta distancia oscila entre decenas y centenas de kilómetros, para la casiterita entre unos kilómetros y decenas de kilómetros; para la wolframita no sobrepasa unos kilómetros y para los sulfuros (salvo el cinabrio), unas centenas de metros. La idea sobre la distancia del transporte se obtiene partiendo, no solo del grado de redondeamiento de los granos minerales (si estos son bastante grandes para examinarlos), sino también de la existencia de los agregados minerales que siempre señalan la proximidad del cuerpo mineral.

El rasgo característico de los flujos mineralógicos de dispersión es la acumulación predominante de minerales pesados (por regla meníferos) en la parte inferior de los depósitos friables y, sobre todo, en los sectores del valle donde la velocidad de la corriente disminuye bruscamente.

Los flujos aluviales arcillosos de los ríos son poco importantes para la búsqueda de minerales útiles, ya que las partículas minerales finas, cualquiera que sea su peso específico, adquieren una flotabilidad relativa y se transportan fácilmente a una gran distancia de la fuente inicial. Al ser muy dispersado el material de dichos flujos estos tienen una alta capacidad de adsorción de los elementos químicos que migran a través de las rocas friables en estado gaseoso, líquido o sólido. El resultado de este proceso es la formación de aureolas de dispersión secundarias complejas que se tratarán con posterioridad más detalladamente. Este proceso en las aureolas y los flujos arcillosos de dispersión de cualquier otra génesis (eluviales, deluviales, proluviales, glaciales, etcétera).

Los flujos de dispersión arcillosos de las corrientes temporales, por el contrario, ocupan un lugar importante en cuanto a la búsqueda de minerales útiles. Como esas corrientes son de poca extensión, sus flujos atestiguan la presencia cercana de las fuentes primarias de la materia menífera. Dichos flujos se forman en los sedimentos del fondo de las corrientes temporales que transportan el material detrítico de granos relativamente finos.

Flujos de dispersión de guijarros glaciales

Son el resultado de la destrucción mecánica de los yacimientos primarios y del transporte del material detrítico por los glaciares. El grado de trituración y redondeamiento en este caso no depende tanto de la distancia del transporte como de la localización de los fragmentos con respecto al glaciar; los fragmentos que están cerca de su fondo se destruyen fuertemente, mientras que otros penetran dentro del glaciar o quedan en su superficie y casi no se someten al desgaste mecánico. Como regla, el material detrítico resultante del deshielo del glaciar es poco clasificado o no clasificado del todo, según el tamaño de los fragmentos: los bloques muy grandes y las partículas finamente trituradas se pueden encontrar juntos.

La máxima importancia desde el punto de vista de la búsqueda la tienen los flujos de este género procedentes de los glaciares continentales de grandes glacia-

ciones cuaternarias. Dichos flujos son generalmente de forma triangular muy alineada y el vértice del ángulo agudo está dirigido hacia la fuente del material detrítico. Su longitud alcanza decenas y hasta centenas de kilómetros; la dirección de movimiento del glaciar es fácil establecerla mediante los surcos glaciales en las rocas *in situ* o grandes guijarros y las formas apropiadas del relieve.

Los glaciares de montaña dan origen a los flujos de dispersión de forma irregular, y la dirección de movimiento del glaciar se determina con muchas dificultades y a veces de manera insegura. Además, el material detrítico puede llegar en la masa glacial a partir de los glaciares laterales o mediante las corrientes de agua. Por estos motivos, dichos flujos de dispersión prácticamente no se utilizan durante la búsqueda y ceden su lugar a otros índices de mayor confianza.

Aureolas y flujos de dispersión geoquímicos

En dependencia de los procesos predominantes de su formación y teniendo en cuenta el estado físico del material menífero que los compone, estas aureolas, o flujos, se subdividen en salinas, acuáticas, atmoquímicas y bioquímicas.

Las aureolas y los flujos de dispersión salinos surgen a causa de la transición de componentes del cuerpo mineral en estado soluble bajo la acción del intemperismo; la lixiviación de estos productos por las aguas capilares, freáticas, o superficiales; la migración del material menífero hacia las rocas encajantes o sobreyacentes por las soluciones y la redeposición parcial de este material bajo la forma de sales o elementos puros, con la formación de concentraciones locales secundarias. Es importante señalar que la migración de los elementos puede realizarse en todas direcciones, tanto hacia abajo (en el flujo de aguas meteóricas que se filtran en la zona de areación), como lateralmente (en el flujo de aguas freáticas en la zona de circulación activa) y por difusión (en la circulación lenta) o hacia arriba (mediante el ascenso capilar).

La fijación de las aureolas salinas tiene lugar a una distancia bastante grande de la fuente inicial de las composiciones químicas y consiste en la sedimentación de las sales a causa de la evaporación de la fase líquida o los cambios de la acidez o potencial de oxidación reducción de la solución y extracción de los elementos por vía de la sorción por alguna materia mineral u orgánica. Esto también ocurre mediante las reacciones químicas de intercambio entre las soluciones y rocas encajantes. Dichas aureolas no se pueden formar en el vacío y tienen que superponerse sobre algunas rocas preexistentes. Aunque a veces se encuentran en las rocas madres, estas aureolas se desarrollan principalmente en las formaciones eluviales y deluviales, sobre todo cuando estas son el resultado de procesos de larga duración y se forman en la mayor parte del material detrítico finamente dispersado. Además, se conocen los flujos de dispersión salinos vinculados con depósitos aluviales arcillosos.

El clima de la región ejerce una gran influencia sobre la formación de las aureolas y flujos de dispersión salinos; los factores más importantes son la relación de las precipitaciones atmosféricas y la evaporación. En este sentido se ha establecido que en la zona de humedad excesiva (las precipitaciones sobrepasan la evaporación) se desarrollan principalmente las acumulaciones salinas encerradas a una profundidad de 1 m y más. Por otra parte, en el clima caluroso árido se forman aureolas salinas abiertas de gran envergadura hasta que los horizontes superiores del suelo se saturan fuertemente con sales, mientras que en la zona del clima templado húmedo dichas aureolas son de carácter semicerrado y se localizan a poca profundidad (0.2 a 0.5 m).

Las aureolas salinas son más características para los minerales útiles que se componen de elementos inestables en las condiciones exógenas (cobre, plomo, cinc, níquel, cobalto, molibdeno, plata, antimonio, uranio, etc.). Sin embargo, en la escala geológica del tiempo, el concepto de estabilidad de los minerales es muy relativo, razón por la cual hasta los minerales resistentes como la casiterita, la wolframita, el cinabrio, la cromita y otros, pueden proporcionar las combinaciones solubles necesarias para producir las aureolas salinas.

La morfología y estructura interna de la aureolas y flujos de dispersión salinos dependen de las dimensiones y la posición espacial de los cuerpos minerales que se descomponen, de la potencia, la composición litológica y granulométrica de las rocas de cobertura y el relieve del terreno. En el caso del relieve de planicie, se desarrollan las aureolas salinas abovedadas y cónicas, y más raramente las estratificadas o manchadas, condicionadas por la distribución irregular de los tipos de rocas favorables para la acumulación de la materia menifera en el corte de las rocas sobreyacentes (fig. 3.8). Si el relieve es accidentado son más característicos los flujos estriados o escalonados (fig. 3.9).

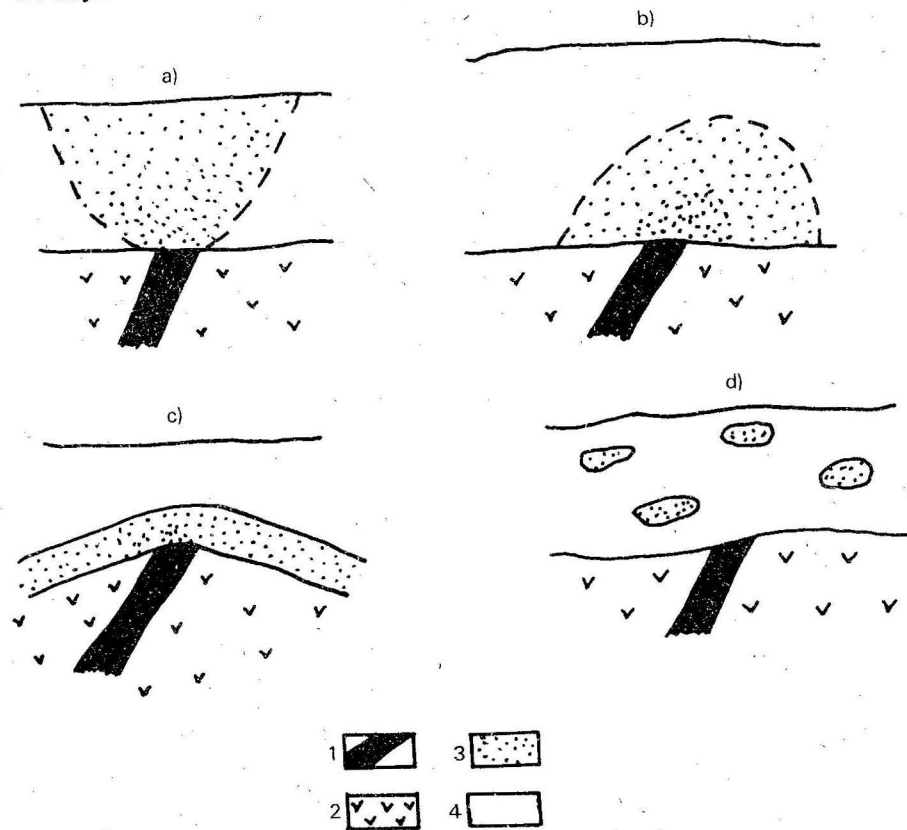


Fig. 3.8 Aureolas de dispersión litogeoquímicas secundarias en el caso de relieve de planicie: a) cónica; b) abovedada; c) mantiforme; d) moteada; 1- cuerpo mineral; 2- rocas encajantes; 3- aureola de dispersión; 4- depósitos friables

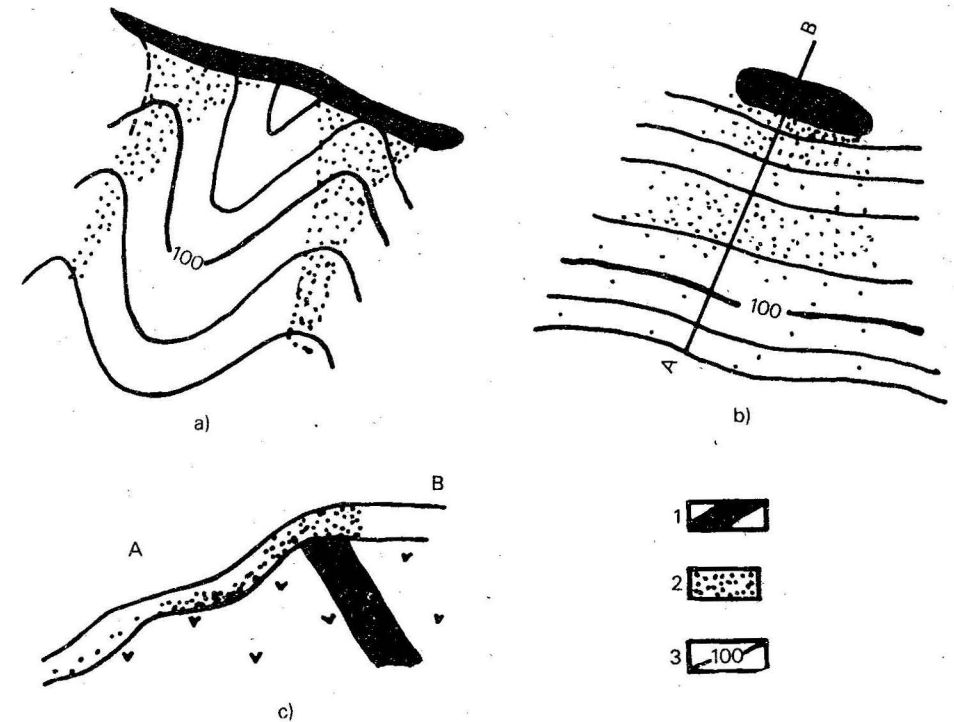


Fig. 3.9 Flujos de dispersión litogeoquímicos secundarios en el caso de relieve accidentado: a) estriado; b) escalonado; c) perfil A-B; 1- cuerpo mineral; 2- aureola de dispersión; 3- curvas de nivel

Los flujos de dispersión salinos vinculados a los depósitos aluviales se pueden encontrar a una distancia considerable (0,3 a 6,0 km) del cuerpo mineral que les da origen.

Aureolas y flujos de dispersión acuáticos (hidroquímicos)

Representan zonas de concentración elevada en las aguas subterráneas y superficiales de algunos elementos participantes en la composición del cuerpo mineral. Como se explicó anteriormente, la destrucción de los minerales útiles en las condiciones exógenas provoca el surgimiento de los productos solubles que migran por vía acuática a partir de su fuente inicial. Si las condiciones son favorables, los componentes meniferos pueden acumularse en las aguas y formar las aureolas y los flujos de dispersión. Como condiciones favorables se consideran las siguientes:

Factores estructurales favorables que aseguran el acceso del agua a los cuerpos minerales o sus aureolas.

Existencia de una zona de oxidación bien desarrollada.

Diferencia marcada de los potenciales eléctricos de los minerales, que facilita la corrosión electroquímica de estos y su traslado en la solución.

Circulación dificultosa de las aguas, lo que garantiza la interacción prolongada entre estas y los depósitos minerales.

Carácter inerte de las rocas encajantes, suficiente para conservar diferentes combinaciones químicas en la solución durante un tiempo considerable.

Ausencia de barreras geoquímicas (tanto termodinámicas como físico-químicas), las cuales pueden provocar un cambio brusco de la capacidad de migración de los elementos.

Cuando las aguas subterráneas o superficiales están en contacto con los cuerpos minerales y sus aureolas de dispersión, por lo general aumenta el contenido en la solución de algunos elementos (cobre, plomo, cinc, plata, molibdeno, mercurio, níquel, cobalto, arsénico, cadmio, uranio, vanadio, boro y otros), que en otras ocasiones se encuentran en las aguas en cantidades pequeñas o insignificantes. Ese aumento de los contenidos puede alcanzar, para diferentes elementos, uno o dos órdenes matemáticos comparado con el fondo normal de contenido de los mismos elementos en las aguas de las regiones no meníferas, y hasta 4 o 5 órdenes en el caso de las aguas ácidas en la proximidad de los cuerpos minerales. Además, en las aguas alrededor de los cuerpos de menas sulfurosas aumenta el contenido del ión sulfato y disminuye el pH del medio.

Los yacimientos de sales minerales condicionan el aumento brusco de la concentración en las aguas de los elementos muy corrientes tales como sodio, potasio, magnesio y cloro. A partir de estos índices, se han revelado en la URSS muchos yacimientos de sales de potasio, como el Verjnekamsk, el Pricarpatsk, el Indersk y otros.

El comportamiento de diferentes elementos químicos en un medio acuático se determina principalmente por su capacidad de migración y de contraste. La primera se caracteriza por el coeficiente de migración acuático K_a que representa la relación entre el contenido del elemento en el residuo seco de la muestra de agua (se puede calcular a partir del contenido de este en el agua) y su contenido en las rocas de la región a estudiar mediante la siguiente fórmula:

$$K_a = \frac{C_a \cdot 100}{aC_r} \quad (99)$$

donde:

a - residuo seco del agua, mg/L;

C_a - contenido del elemento en el agua, mg/L;

C_r - contenido del elemento en las rocas de la región, %.

De acuerdo con el valor del coeficiente K_a los elementos químicos de interés se pueden subdividir en los cuatro grupos siguientes:

Enérgicamente lixiviables (Cl, Br, I): $K_a = 100-1\ 000$.

Fácilmente lixiviables (Ca, Mg, Na, F, Sr): $K_a = 1-10$.

Móviles (Si, P, K): $K_a = 0,1-1,0$.

Inertes y prácticamente inmóviles (Fe, Al, Ti, Sn, W, Au, Pt, Trz Nb, Ta, Zr, Hg): $K_a < 0,1$.

La capacidad de migración de muchos elementos químicos varía considerablemente en dependencia de las condiciones físico-químicas del medio. Por ejemplo, durante el intemperismo de las rocas silicatadas, en el clima templado y en la zona de aereación, de los yacimientos sulfurosos, el cinc se comporta como elemen-

to fácilmente lixiviable, mientras que en un medio reductor de sulfuro de hidrógeno es prácticamente inmóvil. De manera análoga, en el primer caso el níquel, el cobalto, el molibdeno y el wolframio son móviles y en el segundo son inertes. Esta propiedad del elemento se caracteriza por la capacidad de contraste que se puede calcular como la relación entre el coeficiente de migración acuática de dicho elemento en condiciones oxidantes y en condiciones reductoras. Para algunos elementos (por ejemplo, platino, tántalo y circonio) la capacidad de contraste es aproximadamente 1 y para otros puede alcanzar 100 y más (por ejemplo, cinc). Al ocurrir los cambios del medio, la probabilidad de deposición del elemento a partir de su solución crece al aumentar su contraste. Por el contrario, los elementos de poco contraste se conservan en la solución durante mucho tiempo y forman, por consiguiente, flujos de dispersión hidroquímicos más extendidos.

Investigaciones recientes [5,16] han permitido establecer la zonalidad regular de las aureolas y flujos de dispersión hidroquímicos y revelar las series de zonalidad correspondientes para diferentes condiciones físico-químicas, incluso para las aureolas salinas resultantes. Estas series se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2

ZONALIDAD DE LAS AUREOLAS DE DISPERSIÓN ACUÁTICAS Y SALINAS

Tipo de aureolas	Serie de zonalidad (a partir del cuerpo mineral hacia la aureola)
Hidroquímicas en las aguas freáticas y superficiales (pH=5-7,5, Eh>0,28 V)	W, Be, Co, Bi, Au, Cd, As ⁺¹ , Sn, Hg, Ni, Cu, As ⁺² , Mo, Ag, Zn
Hidroquímicas en las aguas termales de horizontes profundos (pH=5,5-6,5, Eh<0,28 V)	Be, Co, Bi, Cu ⁺¹ , Au, Ni, Sn, Mo ⁺¹ , Cu ⁺² , Ag, Mo ⁺² , W, Zn, Pb, Cd, Mn, Sb, As, B, Hg
Salinas en las rocas sedimentarias	W, Be, Au, Bi, Co, Cd, Sn, Ni, Cu, Pb, As, Mo, Ag, Zn, Ba, Mn

Según lo expuesto, es posible explicar la composición compleja de las aureolas y flujos de dispersión hidroquímicos, que se caracterizan por la presencia de numerosos elementos; como regla las aureolas y flujos de los elementos acompañantes son más amplios que los de los elementos principales. Así es que el cobre, cinc, molibdeno, uranio, níquel, cobalto, cadmio, antimonio, arsénico e ión sulfato, se manifiestan claramente en las aureolas y flujos hidroquímicos que alcanzan desde algunas centenas de metros a varios kilómetros de largo. Por esta razón las aureolas hidroquímicas del arsénico y el ión sulfato se utilizan con mucho éxito como índice de búsqueda seguro para revelar numerosos yacimientos polimetálicos (Altai); pirito-cupríferos (Ural del Sur); molibdeníferos (Zabaikal) y de

otros minerales útiles de tipo sulfuroso. Las aureolas de dispersión acuáticas de los cuerpos pegmatíticos con metales raros, en la península de Kola, se caracterizan por concentraciones notables de elementos acompañantes (litio, rubidio y manganeso) que sobrepasan el fondo normal en 10 a 15 veces. En la tabla 3.3 se exponen los datos sobre las asociaciones hidroquímicas típicas de algunos yacimientos meníferos.

Tabla 3.3
ASOCIACIONES HIDROQUÍMICAS MÁS CORRIENTES DE ALGUNOS
TIPOS DE YACIMIENTOS MENÍFEROS

Tipo de yacimiento	Asociaciones de elementos en las aureolas hidroquímicas de los cuerpos minerales	
	Fuertemente oxidados	Débilmente oxidados
Pirito-cupríferos	Cu, Zn, Pb, As, Ni, Co, Mn, Cd, Se, Ge, Au, Ag, Fe, Al	Zn, Pb, Mo, As, Ge, Se, Cu
Polimetálicos	Pb, Zn, Cu, As, Mo, Ni, Co, Ag, Cd, Sb, Se, Ge, Bi,	Pb, Zn, As, Mo, Ni, Ge,
Cupro-niquelíferos	Ni, Cu, Zn, Co, Ag, Ba, Sn, Pb, U	Ni, Zn, Pb, Sn, Ba
Barita-polimetálicas	Ba, Sr, Cu, Zn, Pb, As, Mo, Hg.	Ba, Sr, As, Mo, Zn, Pb
Molibdeníferos	Mo, W, Pb, Cu, Zn, Be, F, Li, Mn, As	Mo, Pb, Zn, F, As, Li
Mercúrico-antimoníferos	Hg, Sb, As, Zn, F, B, Se, Cu, Pb	Hg, As, Zn, Pb, Sb
Estanníferos	Sn, Nb, Pb, Cu, Zn, Li, F, Be	Sn, Li, F, Be, Zn
Auríferos	Au, Ag, Sb, As, Mo, Se, Pb, Cu, Zn, Bi	Ag, Sb, As, Mo, Zn, Pb
Titanomagnetíticos	Ti, Fe, Ni, Co, Cr	Ti, Ni, Fe

El rasgo característico de las aureolas de dispersión acuáticas consiste en la variabilidad considerable de su composición, en dependencia de la temperatura y del régimen de las aguas subterráneas, así como la posibilidad de su contaminación a causa de la actividad económica del hombre (utilización de fertilizantes

minerales, herbicidas e insecticidas; eliminación de los residuos de las empresas industriales, desagüe de residuales de las ciudades y pueblos, etc.). Esto es necesario tenerlo en cuenta para interpretar correctamente los resultados del estudio de dichas aureolas.

En los últimos tiempos, en la URSS y en Canadá se han investigado las aureolas de dispersión en la fase acuática sólida (nieve, hielo del suelo) por encima de los yacimientos sulfurosos. Estas aureolas se extienden en una gran superficie, lo que facilita su revelación. El plazo de su formación no sobrepasa los 2 o 3 meses, lo que también es favorable desde el punto de vista de la interpretación de los resultados obtenidos. Las aureolas son de composición compleja con contenidos importantes de cobre, cinc, plomo, mercurio, cadmio, manganeso y níquel, la concentración de estos y otros metales aumenta con la profundidad.

Las aureolas y los flujos de dispersión atmoquímicos representan concentraciones elevadas de los productos gaseosos en estado de vapor, que surgen como resultado de la descomposición de minerales útiles, localizándose estos en el aire atmosférico o del suelo. Dichos productos emanan de las menas radiactivas, minerales útiles-combustibles, menas de mercurio y yacimientos sulfurosos oxidados (fig. 3.10). No obstante, prácticamente en la búsqueda se utilizan solo las aureolas y flujos atmoquímicos de los cuerpos de menas radiactivas y depósitos de minerales útiles combustibles.

La infiltración de los hidrocarburos, a partir de los estratos de carbón o colectores de petróleo y gas, hacia las capas de las rocas sobreyacentes, trae como consecuencia la formación de las aureolas de dispersión de estos gases en la parte superior de los depósitos friables o de los flujos de dispersión en los horizontes inferiores de la atmósfera.

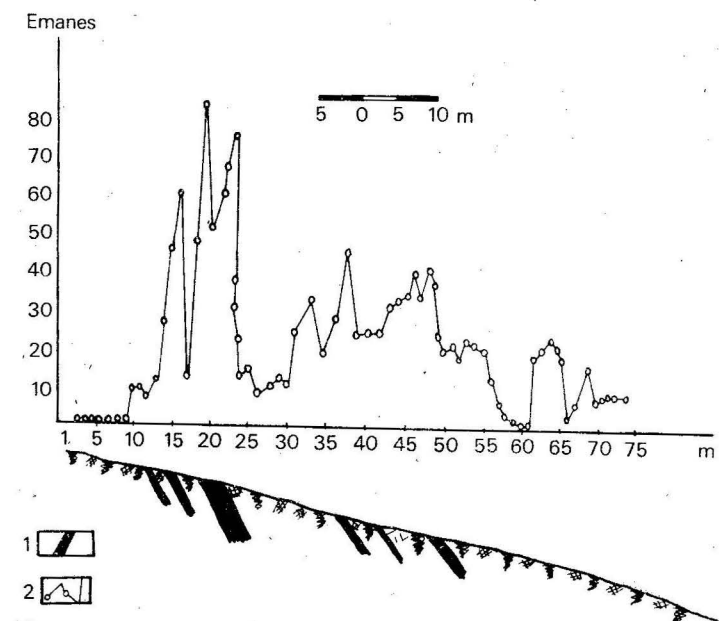


Fig. 3.10 Resultados del levantamiento de emanación en un yacimiento de carbón germanífero: 1- carbón; 2-concentración de radón

Sobre las menas radiactivas se observan las llamadas anomalías de emanación, que son sectores con una concentración elevada de emanaciones radiactivas gaseosas en el aire del suelo o sus partes atmosféricas y representan los flujos de dispersión atmosféricos. Dichas emanaciones están constituidas por radón o más raramente torón, cuyos contenidos de fondo oscilan generalmente entre 0,1 y 10 eman. Por arriba de los cuerpos radiactivos su contenido aumenta de centenas a millares de veces y puede alcanzar unas decenas de millares de eman.

Las áreas de extensión de dichas aureolas atmoquímicas corresponden generalmente a las áreas ocupadas por el mineral útil, excepto los casos en que las anomalías se desarrollan sobre las rocas con capacidad de emanación elevada o se vinculan a otros fenómenos geológicos.

La intensidad y la localización de las aureolas atmoquímicas dependen mucho de la existencia en el corte geológico de pantallas impenetrables para los gases (rocas arcillosas húmedas, suelos empantanados, horizontes acuíferos, etc.). En este caso, sobre dichos horizontes, las aureolas de los cuerpos minerales industriales prácticamente faltan o la concentración de gases disminuye bruscamente, mientras que debajo de ellos se pueden crear anomalías falsas que no corresponden a ninguna acumulación del mineral útil en el subsuelo. Este fenómeno hay que tenerlo en cuenta para determinar correctamente la profundidad a la cual debe realizarse el estudio de las aureolas atmoquímicas y evaluar sin errores graves los resultados obtenidos:

Aureolas de dispersión bioquímicas

Corresponden a las zonas de concentración elevada de algunos elementos, característicos para los cuerpos minerales, en el suelo o las plantas. Debe señalarse que si otras condiciones se mantienen iguales, el contenido del elemento en el suelo no coincide con su contenido en la ceniza de las plantas. Para una serie de elementos (azufre, fósforo, boro, potasio, molibdeno, cloro, bromo, yodo, calcio, magnesio, cinc, cobre, cobalto, manganeso, litio), que se caracterizan por una capacidad de migración elevada, los contenidos en las plantas son más altos que en el suelo. Por el contrario, otros elementos (hierro, níquel, cromo, titanio, aluminio, bario, plomo, silicio, circonio, etc.) se concentran en el suelo más que en las plantas. Además, algunas plantas se caracterizan por su capacidad particular de acumular unos u otros elementos químicos y por eso se desarrollan con más frecuencia sobre los suelos enriquecidos con este.

El contenido de cualquier elemento en las plantas, depende de muchos factores, principalmente del contenido de otros elementos y su forma de existencia en los cuerpos minerales o sus aureolas de dispersión, las propiedades geoquímicas de los elementos, las condiciones climáticas de la región y la acumulación selectiva de los elementos por la planta para sus necesidades vitales. Las concentraciones máximas de los elementos en las plantas que se desarrollan sobre cuerpos minerales, pueden sobrepasar sus contenidos normales en las áreas no meníferas en 1 a 3 órdenes matemáticos, de acuerdo con las propiedades de los elementos químicos: el cobalto muestra un grado de concentración alrededor de 10 veces; el níquel, el cobre, el plomo, el cinc, el molibdeno y el vanadio de 100 veces; el manganeso y el uranio de 1 000 veces, etcétera.

La morfología y las dimensiones de las aureolas bioquímicas coinciden a grosso modo con los parámetros análogos de las aureolas (o flujos) de dispersión salinas.

En la composición de las plantas pueden participar casi todos los elementos químicos conocidos, pero su papel desde el punto de vista de la búsqueda es muy distinto. El potasio, el fósforo, el nitrógeno, el calcio y el magnesio son elementos de necesidad vital para las plantas, se acumulan en estas en gran cantidad y su contenido de fondo siempre es bastante alto, lo que obstaculiza la percepción e interpretación correcta de pequeñas anomalías locales que corresponden a las aureolas bioquímicas. Por este motivo, dichos elementos no se pueden utilizar en el estudio de las aureolas en cuestión. De manera análoga los elementos corrientes de la corteza terrestre, cuyos clarkes son altos (silicio, aluminio, hierro, sodio, etc.), no tienen ningún interés práctico en este sentido. Los macroelementos (cobalto, cinc, cobre, boro, plata, cadmio, bromo, yodo y otros) son móviles en condiciones exógenas, forman concentraciones de fondo bastante altas y sus anomalías locales son de poco contraste, a causa de la capacidad limitada de concentración de los elementos en las plantas. Sin embargo, estas concentraciones anómalas pueden sobrepasar el fondo normal de 10 a 100 veces; por lo tanto, las aureolas bioquímicas de estos elementos son aplicables como índices de búsqueda. En cuanto a los microelementos (wolframio, niobio, tantalio, oro, rubidio, uranio y otros) ellos son inertes en los horizontes superiores de la corteza terrestre, sus aureolas en las plantas son de gran contraste (el grado de concentración comparado con el fondo normal alcanza 1 000 veces y más) y sirven como índices de búsqueda muy rigurosos. Aunque estas últimas aureolas son pequeñas por los valores de los contenidos de elementos y se revelan difícilmente, en la práctica constituyen anomalías del género no menífero; aunque de carácter muy débil.

Es preciso señalar que los elementos químicos se acumulan en diferentes partes de la planta de manera irregular, por cuanto esas partes muestran contenidos distintos de las cenizas: en las hojas este contenido es máximo, en la corteza, el tallo y las raíces es de 2 a 3 veces menor y en la madera disminuye aún más. Además, en dependencia de la temporada, diferentes elementos químicos se acumulan con intensidad variable hasta en las mismas partes de la planta. Estas particularidades de la concentración de los elementos químicos en las plantas se muestran en la tabla 3.4.

En cuanto a las plantas de ciclo anual estas se caracterizan por la concentración máxima de componentes minerales en la primavera y el principio del verano (antes o durante el florecimiento); luego los contenidos de elementos químicos en dichas plantas disminuyen de manera brusca.

Tabla 3.4
PARTICULARIDADES DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS QUÍMICOS EN LAS PLANTAS PERENNES SEGÚN LAS TEMPORADAS

Elementos químicos	Particularidades de la concentración de los elementos en las plantas
Mo, Cu; con menos frecuencia K, Au	El contenido máximo se observa en la primavera
Pb, Sn, Co, Al, TR, Ba, Cd, Hg, W, Sc, Ra	El contenido máximo corresponde al fin del verano y al principio de otoño
Mn, P	El contenido varía poco durante todo el año

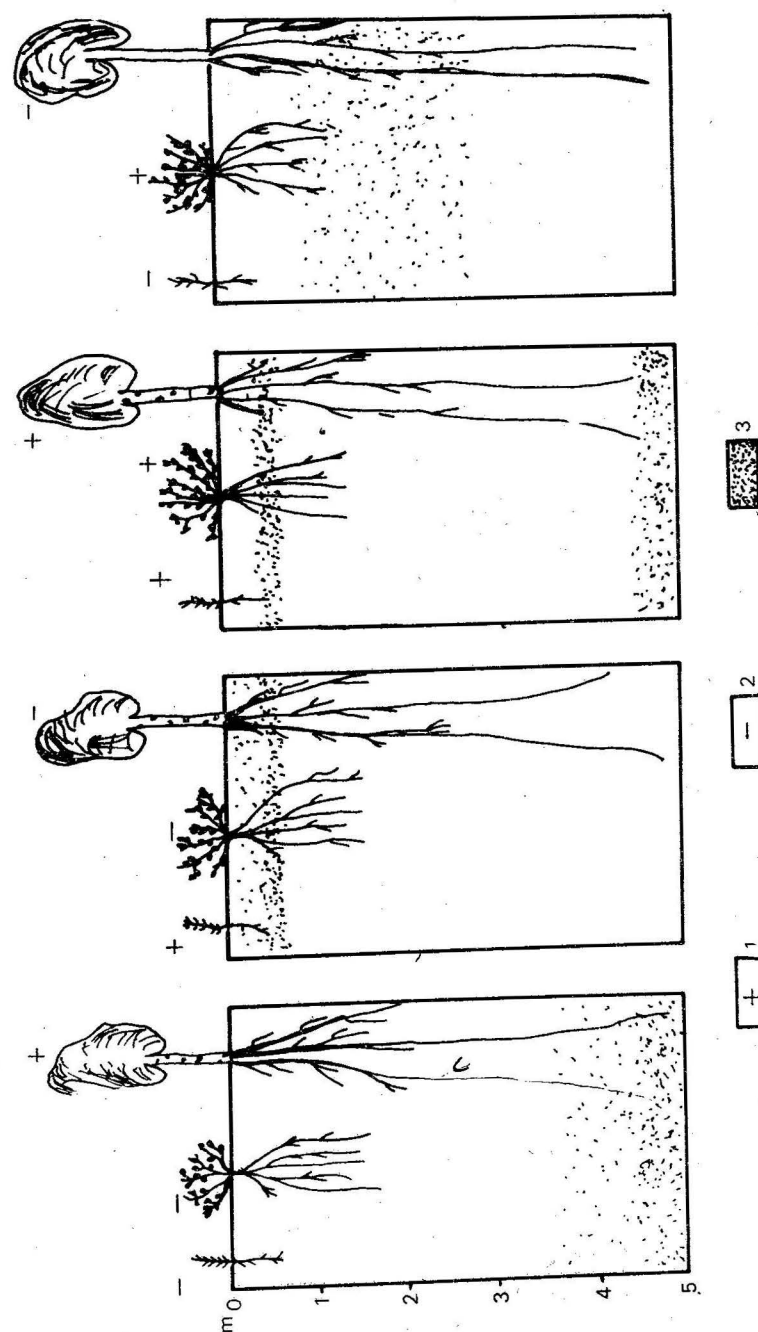


Fig. 3.11 Esquema de la relación entre el contenido de cinc en diferentes plantas, la profundidad de su sistema radicular y el tipo de aureola de dispersión salina: 1- contenido elevado de cinc en la planta; 2- contenido de cinc en la planta equivalente a su clark; 3- horizontes enriquecidos con cinc

Por último, diferentes plantas que se desarrollan en iguales condiciones muestran una capacidad de concentración diversa para el mismo elemento químico, y las aureolas de dispersión en las plantas concentradoras son de mucho menos contraste que en las que no tienen una capacidad notable de concentración exclusiva de este elemento. Todas las particularidades mencionadas de las aureolas de dispersión bioquímicas son muy importantes y deben considerarse durante la búsqueda de minerales útiles, para que los resultados obtenidos sean comparables.

Desde el punto de vista de la búsqueda, las aureolas bioquímicas más importantes son las que se forman en las plantas superiores con un sistema radicular bien desarrollado, el cual puede penetrar en el suelo y las capas subyacentes a una profundidad considerable. Como las aureolas de dispersión salinas se localizan a diferente profundidad, las aureolas bioquímicas más claras pueden surgir en las plantas con un sistema radical tanto profundo como poco profundo (fig. 3.11). Sin embargo, las primeras son de mayor importancia porque permiten obtener datos muy valiosos acerca de los cuerpos minerales, que yacen a una gran profundidad, cuyas aureolas de dispersión de otro género no llegan a alcanzar la superficie actual y por consiguiente no se revelan mediante otros métodos de estudio.

Se ha comprobado que, de manera general, los contenidos de elementos químicos en los suelos y las plantas sobre los depósitos minerales se encuentran en una correlación bastante estrecha y los primeros son, con mucha frecuencia, notablemente más altos que los segundos (figs. 3.12 y 3.13).

Después de estudiar con suficiente detalle cada tipo de aureolas o flujos de dispersión secundarios se debe señalar que la destrucción de las rocas y menas en condiciones exógenas es el resultado de la acción conjunta de diferentes agentes de meteorización. Por lo tanto, no es extraño encontrar diversas aureolas y flujos de dispersión secundarios que acompañan al mismo tiempo a una manifestación de mineral útil y veces hasta se superponen. Por ejemplo, alrededor de los yacimientos polimetálicos se observan aureolas y flujos de dispersión tanto mecánicos como salinos, hidroquímicos y bioquímicos; las menas radiactivas están asociadas con aureolas salinas, atmoquímicas, hidroquímicas y bioquímicas, etc. Las más frecuentes e importantes para la búsqueda son las aureolas de dispersión complejas, que representan una combinación de las mineralógicas y arcillosas mecánicas con las salinas, y se complementan por la acumulación biogénica de elementos químicos en el horizonte superior del suelo. Estas aureolas, llamadas litogeoquímicas secundarias, se caracterizan por la acumulación máxima de diferentes elementos químicos en la fracción fina del material detrítico (menos de 0,5 a 1,0 mm), a causa de un amplio desarrollo de los procesos de sorción y coagulación, así como de la formación de los minerales secundarios finamente dispersados. Los contenidos más altos de metales en las fracciones gruesas de dichas aureolas se confirman mucho más raramente, y solo cerca de los afloramientos de las menas que se componen de minerales resistentes, ya que en este caso la parte salina en la aureola compleja desempeña un papel secundario.

La acumulación biogénica de elementos en los horizontes superiores del suelo se acompaña de su lixiviación durante la infiltración de las aguas meteóricas, el transporte de estos elementos en las capas inferiores y su fijación parcial. Esto trae como consecuencia la redistribución de metales en el perfil del suelo, que se condiciona principalmente por el tipo de este último, su capacidad acuífera y el curso general de los procesos geoquímicos. Así, en el caso de las tierras grises y castañas el horizonte de enriquecimiento secundario (horizonte eluvial) se encuentra a una profundidad de 0,5 m, muestra un contenido elevado de calcita y

crea la reacción alcalina débil de las soluciones que obstaculizan el transporte de los metales hacia las capas más profundas. Las tierras negras se lavan más intensamente, el horizonte iluvial desciende hasta 1,0 m, pero los horizontes superficiales son poco lixiviados. En los suelos de las zonas forestales en el clima húmedo (podzólicos, grises y pardos), las aguas meteóricas están enriquecidas con ácidos orgánicos y tienen una capacidad muy alta de lixiviación con respecto a los metales. Por eso, los horizontes superficiales del suelo son pobres en estos metales, de los cuales una parte considerable se fija en el horizonte iluvial, entre 0,5 y 1,0 m de profundidad con respecto a la superficie actual. Para obtener los resultados positivos durante la búsqueda de minerales útiles, es indispensable tener en cuenta todas estas particularidades de la acumulación biogénica de la materia menífera.

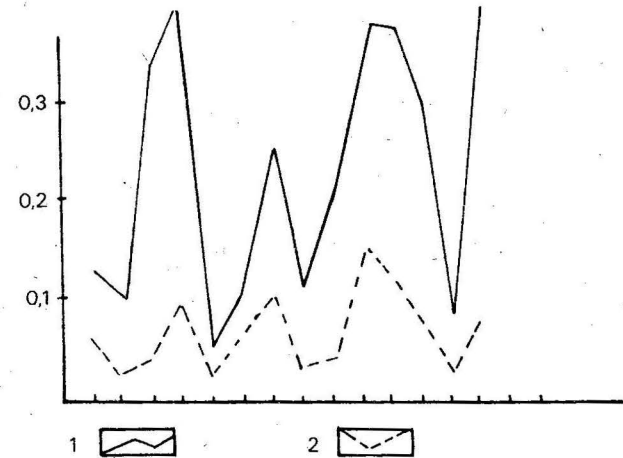


Fig. 3.12 Correlación de los contenidos de níquel en el suelo y las cenizas de las plantas sobre los cuerpos minerales: 1- contenido de níquel en el suelo; 2- contenido de níquel en las cenizas de plantas

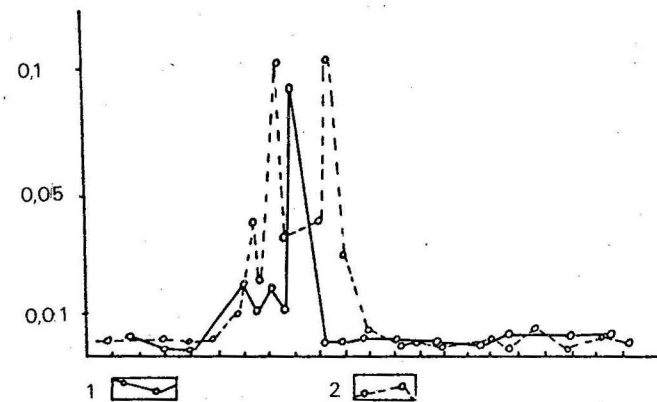


Fig. 3.13 Contenido de cobalto en el suelo y las cenizas de las plantas por arriba de un filón del yacimiento de cobalto: 1- contenido de cobalto en las cenizas de plantas; 2- contenido de cobalto en el suelo

El contenido de elementos químicos en las aureolas y flujos litogeoquímicos de dispersión secundarios depende tanto de las particularidades de la dispersión y acumulación de la materia menífera como de las dimensiones y riqueza de sus fuentes primarias y puede oscilar dentro de límites muy amplios. No obstante, el grado de concentración de elementos en dichas aureolas es bastante alto, en comparación con el contenido de fondo en los suelos y depósitos de las áreas no meníferas y se detectan fácilmente mediante los métodos de estudio existentes. Por ejemplo, para el cobalto, este grado es de 50 a 100 veces; para el manganeso, el vanadio y el molibdeno, alrededor de 100 veces; para el cinc, el níquel y el cromo, de 200 veces; para el cobre, 500 veces; etcétera.

La morfología y las dimensiones de las aureolas litogeoquímicas secundarias, en el caso del relieve de planicie, se determinan principalmente por la configuración y las dimensiones de los cuerpos minerales. Si el relieve es accidentado predominan los flujos de dispersión litogeoquímicos alargados, que se orientan según la dirección del movimiento del material detrítico y cuya morfología depende poco de la forma de los cuerpos minerales.

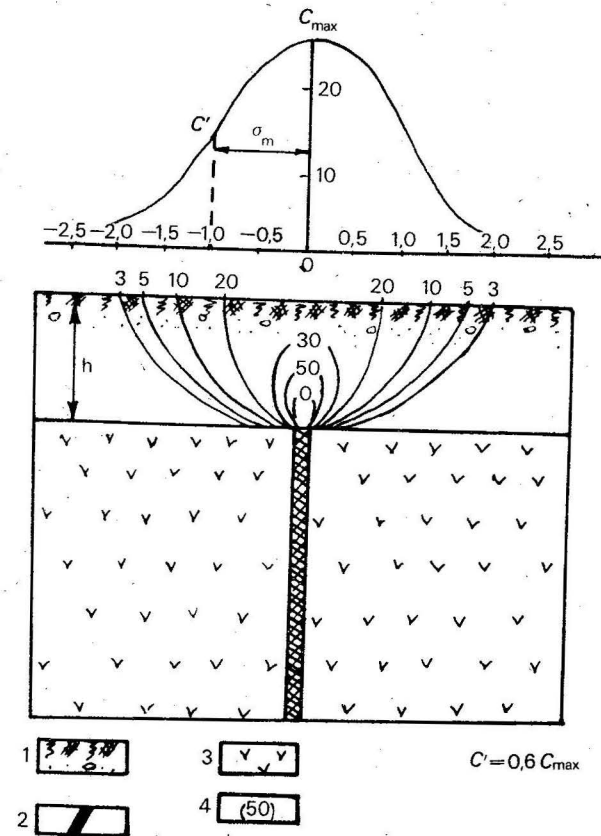


Fig. 3.14 Aureola de dispersión mecánica en el caso del relieve de planicie: 1- eluvio; 2- cuerpo mineral; 3- rocas encajantes; 4- isóneas de la concentración de metal en unidades convencionales

El contenido del elemento en la aureola litogeoquímica secundaria, que se forma en el relieve de planicie poco accidentado, depende en primer lugar de su contenido en el cuerpo mineral intemperizado (fig. 3.14), lo que permite evaluar aproximadamente la calidad de las menas primarias mediante la siguiente fórmula [20]:

$$C_m = KC_{\max} \cdot 2,5\sigma_M \quad (100)$$

donde:

C_m - contenido del elemento en la mena primaria, %;

C_{\max} - contenido máximo del elemento en la aureola de dispersión, %;

σ_M - coeficiente de dispersión, que depende de las condiciones locales y es igual a la distancia entre los puntos con los contenidos C_{\max} y $0,6 C_{\max}$ en el gráfico de resultados obtenidos;

K - coeficiente de corrección local, que se obtiene experimentalmente como la relación entre los valores reales y calculados del contenido del componente, sobre la base del estudio de los cuerpos minerales análogos ya conocidos.

Si se puede probar una correlación suficientemente estrecha entre las aureolas litogeoquímicas secundarias y primarias, es posible seleccionar las áreas más favorables para la búsqueda de unos u otros minerales útiles y establecer el nivel de erosión probable del objeto menífero, teniendo en cuenta la zonalidad de las aureolas primarias de dispersión.

Anomalías geofísicas

Como índices de búsqueda directos pueden servir solo las anomalías geofísicas cuya existencia esté condicionada por la presencia de acumulaciones minerales en el subsuelo. Esta exigencia la cumplen las anomalías claras y de gran contraste de los campos magnético y radiactivo.

Anomalías magnéticas

Comprenden las desviaciones de los valores medidos de los componentes del campo magnético en los puntos de observación con respecto a los valores normales determinados para dichos puntos que aparecen en los mapas especiales. Por su área de manifestación, estas anomalías pueden ser regionales (centenas y millares de kilómetros cuadrados) y locales. Las últimas son más interesantes, ya que representan los índices de búsqueda directos de los yacimientos o cuerpos minerales concretos. Las anomalías magnéticas fuertes, con una intensidad de campo del orden de decenas o centenas de millares de gammas ($1\gamma = 1 \cdot 10^{-5} O_e$), se observan encima de grandes acumulaciones de menas de hierro muy magnéticas: cuarcitas ferruginosas (KMA, Krivoi Rog), *skarn* con magnetita (yacimientos Sokolov, Sarboisk, Daschkesansk, Monte Magnético y otros), menas titanomagnetíticas (yacimientos Kachkanar y Kusinsk en el Ural). Las anomalías de intensidad media (millares de gammas) pueden corresponder a cuerpos de menas hematíticas, cuproniquelíferas con pirrotina o bauxitas.

Sin embargo, es preciso señalar que las anomalías magnéticas muy intensas y de intensidad media pueden encontrarse sobre los macizos de diferentes rocas, que se caracterizan por una susceptibilidad magnética elevada, sobre todo las ro-

cas magmáticas ultrabásicas y básicas. Por lo tanto, las anomalías magnéticas se pueden considerar como índices de búsqueda directos solo después de la interpretación geológica de los resultados obtenidos.

Como la intensidad del campo magnético es función de la distancia entre el plano de las observaciones y el objeto magnetizado, los cambios de la intensidad y del ancho de la anomalía, en dependencia de la altitud de investigación (se utilizan mediciones tanto terrestres como aéreas con diferentes alturas de vuelo), permiten determinar aproximadamente la forma, las dimensiones y las condiciones de yacencia de los cuerpos que provocan las anomalías.

Anomalías radiactivas

Estas se subdividen en anomalías de radiación gamma de menas o rocas radiactivas y las de emanación, que son el resultado de la acumulación de los productos gaseosos de desintegración radiactiva de algunos elementos químicos. Estas últimas ya fueron tratadas como aureolas de dispersión atmoquímicas; por consiguiente se deben estudiar solo las anomalías de radiación gamma. Estas representan áreas con intensidad de radiación gamma natural, anómalas con respecto al fondo normal de la región. Los valores absolutos de la radiación gamma anómala pueden variar considerablemente, desde unidades hasta decenas de millares de microröntgen por hora, lo que se explica tanto por las diferentes concentraciones de los elementos radiactivos en los cuerpos minerales como por las condiciones de yacencia de estos últimos y el carácter de las rocas de recubrimientos. Por esta razón, prácticamente cualquier anomalía de radiación gamma, aunque sea débil, puede señalar la presencia posible de menas radiactivas y debe considerarse como índice de búsqueda directo.

3.2 Índices de búsqueda indirectos

Estos índices permiten suponer la existencia de unos u otros minerales útiles dentro del territorio estudiado. Se conocen como tales las rocas encajantes alteradas, los minerales filoneanos acompañantes de la meniferación, la coloración de las rocas, las anomalías geofísicas, los índices geomorfológicos, hidrogeológicos y botánicos y otros datos utilizables.

Rocas encajantes alteradas por los procesos hidrotermales

Con mucha frecuencia, tanto la formación como la destrucción de las acumulaciones minerales se desarrollan en condiciones físico-químicas específicas que son muy diferentes en comparación con las condiciones normales de existencia de las rocas encajantes. Esto se refleja generalmente en la alteración de dichas rocas alrededor de los cuerpos minerales. Tales alteraciones son más variadas e intensas en el caso de la meniferación endógena y sus zonas de manifestación son mucho más amplias y por consiguiente más visibles que los mismos cuerpos minerales. Estas rocas alteradas, que se estudiarán a continuación, atestiguan solo la existencia de las condiciones favorables para la acumulación de la materia menífera, es decir, el desarrollo indudable en el pasado de procesos que podían conducir a la formación de diferentes minerales útiles. No obstante, esta posibilidad

no tiene por qué llegar a cumplirse y por eso las rocas alteradas pueden encontrarse sin mineralización industrial alguna vinculada con ellas.

Skarn y rocas skarnizadas

Los *skarn* surgen durante la reacción metasomática de contacto entre las intrusiones de composición granítica y rocas carbonatadas o efusivas básicas. De acuerdo con su composición, se subdividen en dos clases: *skarn* calcáreos y *skarn* magnesiales. Los primeros se componen principalmente de piroxenos de la serie diópsido-hedenbergítica y granates de la serie grosularia andradítica y pueden acompañar yacimientos de diferentes minerales útiles: hierro (Ural, Siberia Occidental, Cuba); cobalto (Cáucaso); cobre (Ural); menas polimetálicas (Asia Central, Extremo Oriente); wolframio (Asia Central); molibdeno (Cáucaso); oro (Kazajastán); estaño (Karelia); berilio (EE.UU.) y otros. En los *skarn* magnesiales predominan los minerales con alto contenido de magnesio (diópsido, forsterita, espinela, flogopita, serpentina). Estas rocas son favorables para la búsqueda de flogopita, menas de boro y piedras preciosas.

La formación de los *skarn* no representa un proceso de meniferación. Sin embargo, los *skarn* son un medio extremadamente favorable para la localización de la mineralización endógena. Es importante señalar que algunas variedades de *skarn* muestran capacidad selectiva para acumular unos u otros tipos de minerales útiles. Con los *skarn* de composición piroxénica se asocian principalmente las menas polimetálicas; con los *skarn* cuyos granates son de tipo andradítico se vinculan las menas de hierro, cobalto y parcialmente plomo-cincíferas; si entre los granates predominan grosularias los *skarn* son más favorables para la localización de las menas de wolframio, mientras que los granates de composición intermedia pueden señalar la presencia posible de menas de cobre y parcialmente de wolframio.

Greissens

Los procesos de formación de los greissens son muy característicos para las partes apicales y apófisis de las intrusiones graníticas, o más raramente granodioríticas, que se localizan dentro de las rocas aluminosilicatadas de diferente génesis, pero de composición química mineralógica semejante a la de la intrusión. Es poco frecuente observar los greissens como resultado de metasomatosis en las rocas carbonatadas. Esta especie de greissen se nombra apocarbonático.

Los greissens más favorables para encerrar la mineralización útil son zonales y su composición mineralógica constituye un índice importante para precisar el tipo posible de mineral útil. El predominio de turmalina y clorita es característico para las menas estanníferas de tipo sulfuroso-casiterítico, mientras que los greissens topácicos encierran como regla las menas esencialmente casiteríticas; la abundancia en fluorita es favorable para la búsqueda de yacimientos wolframíticos y si además aparece la moscovita se pueden encontrar las menas de molibdeno.

Los greissens vinculados a las rocas intrusivas ácidas acompañan generalmente a la mineralización no sulfurosa y se observan con mucha frecuencia en el caso de minerales útiles tales como estaño, wolframio, berilio y tantalito. Por el contrario, para las intrusiones granodioríticas las menas sulfurosas son más típicas y sus componentes útiles principales son: molibdeno, estaño, bismuto y arsénico.

Los greissens apocarbonáticos son favorables para la búsqueda de menas de berilio, estaño, litio, boro y fluorita.

Rocas alcalinas albitizadas

El proceso de albitización se desarrolla muy intensamente en las sienitas nefelínicas y llega a formar las llamadas albititas, que son rocas casi monominerales, albiticas y raramente aegirina-albiticas.

En estas formaciones pueden tener lugar acumulaciones industriales de algunos minerales que contienen circonio, cerio, torio y tierras raras.

Rocas cuarcificadas

La cuarcificación representa un proceso de alteración muy común de las rocas encajantes, que acompaña a la mineralización hidrotermal de alta temperatura. Bajo la acción de las soluciones hidrotermales las rocas efusivas ácidas y medias pueden convertirse en cuarcitas secundarias. En el caso de las rocas iniciales ácidas es posible la formación de acumulaciones de materia prima aluminosa vinculada a dichas cuarcitas (alunita, diáspora, pirofilita, andalusita, corindón, esmeril y otras). A expensas de las rocas efusivas de composición media se forman las cuarcitas secundarias que pueden acompañar a los yacimientos de minerales útiles meníferos como: cobre, molibdeno, menas polimetálicas, oro y plata y más raramente bismuto y arsénico.

Una de las variedades del metasomatismo cuarzo-feldespático es la propilitización, que se desarrolla con más frecuencia en condiciones hipoabisales; la temperatura de este proceso es inferior con respecto a la de la formación de los greissens. A veces también se encuentran las propilitas formadas en los horizontes superiores de la corteza terrestre. La propilitización tiene como resultado la cuarcificación de las rocas magmáticas de formación granítica y los agregados minerales finales se caracterizan por el predominio del cuarzo y la albita u ortoclasa, con una gran proporción de epidota, calcita y pirita. Como regla, las aureolas de propilitización son amplias y zonales, las variaciones más intensas de las rocas se relacionan con las zonas de fallas. Las propilitas acompañan con bastante frecuencia a los yacimientos sulfurosos de oro y plata y algunas veces a los polimetálicos.

La cuarcificación de las rocas carbonatadas es típica para muchos yacimientos polimetálicos (Zabaikal, Kazajastán, Asia Central, EE.UU.) y algunos yacimientos de cobre, arsénico, antimonio y mercurio (Asia Central, Cáucaso).

Rocas sericitizadas

La sericitización puede ser resultado, no solo de los procesos hidrotermales que pueden llevar a la formación de diferentes minerales útiles sino también a los procesos metamórficos, los cuales no tienen ningún interés particular desde el punto de vista de la búsqueda. Sin embargo, la sericitización metamórfica es fácil de reconocer a partir de su desarrollo, extremadamente amplio, y la ausencia de cualesquiera otras variaciones hidrotermales de las rocas y minerales hidrotermales típicos, tales como fluorita, barita, pirita y turmalina.

La sericitización puede afectar las rocas de diferentes tipos, pero esto se observa con más frecuencia en el caso de las rocas feldespáticas (granitoides, efusivas y sus tobas de composición ácida y media, algunas rocas sedimentarias y metamórficas), ya que el feldespato se reemplaza muy fácilmente por la sericita.

Por otra parte, las rocas carbonatadas son desfavorables para que en ellas se desarrolle este proceso.

Las rocas sericitizadas acompañan muchos yacimientos minerales hidrotermales de temperatura media, principalmente de tipo sulfuroso (cobre, menas polimetálicas, oro, bismuto). En cuanto a los procesos de temperatura más alta, estas rocas pueden formar las zonas periféricas de los *greissens*, en particular en los yacimientos auro-arsenicales y estanníferos. Si, por el contrario, la temperatura del proceso disminuye se pueden citar las beresitas (rocas alteradas con sericita en forma de grandes escamas impregnadas con piritita), que se localizan generalmente en las zonas de rocas alteradas más próximas a los cuerpos minerales, en algunos yacimientos auríferos o de metales raros.

Rocas cloritizadas

La cloritización de las rocas encajantes bajo la acción de las soluciones hidrotermales se asocia generalmente con otras alteraciones hidrotermales (sericitización, cuarcificación, turmalinización, carbonatización, etc.) y se desarrolla en forma de zonas y bandas estrechas que se vinculan con frecuencia a las zonas de fallas. Todo esto permite distinguir con facilidad este tipo de cloritización de la variedad que surge durante el metamorfismo regional o autometamorfismo de las rocas de la formación espilito-queratofídica y no sirve como índice de búsqueda.

La cloritización puede afectar casi todos los tipos de rocas, excepto las puramente cuarzosas y carbonatadas, pero se manifiesta de manera más intensa en las rocas arcillosas, ultrabásicas y cuarcitas arcósicas. Este tipo de alteración de las rocas encajantes es característico para muchos yacimientos hidrotermales de temperatura media como las de metales raros y no ferrosos (cobre, plomo, cinc, oro, estaño y bismuto). Se ha comprobado que las cloritas ferruginosas junto con la turmalinización, cuarcificación y sericitización son más típicas para los yacimientos sulfuroso-casiteríticos, las cloritas-magnesio ferruginosas con biotitización o sericitización para las menas pirito-cupríferas y las magnesianas con cuarcificación, para los yacimientos de cobre, plomo y cinc.

Rocas serpentinizadas

Los procesos de serpentización son propios de las rocas magmáticas ultrabásicas y se pueden desarrollar durante el autometamorfismo, el metamorfismo de dislocación, el metamorfismo regional y el metasomatismo hidrotermal; el último caso es el único que tiene un valor considerable desde el punto de vista de la búsqueda de minerales útiles. Las rocas serpentinizadas por las soluciones hidrotermales se encuentran generalmente a lo largo de las zonas tectónicas y se acompañan de la carbonatización, cloritización y talcificación. Dichas alteraciones de las rocas ultrabásicas, sobre todo de las peridotitas, pueden señalar la posible presencia de yacimientos de crisotilo-asbesto. A veces también se observan las llamadas bandas de reacción, constituidas por serpentina, talco, actinolita, biotita o clorita, que son características de los yacimientos de plagioclasitas con corindón (marunditas), talco o piedras preciosas.

Rocas caolinizadas

La alteración hidrotermal de las rocas encajantes, con los correspondientes minerales nuevos del grupo de la caolinita, puede acompañar a los yacimientos

de antimonio y mercurio, cristal de roca y barita. Como regla, la caolinización se observa junto con la cuarcificación y la sericitización.

Rocas dolomitizadas

Las rocas dolomitizadas de origen hidrotermal, que se desarrollan de manera local a expensas de las calizas, se caracterizan por la morfología muy compleja de los sectores dolomitizados, controlados generalmente por fallas. Estas particularidades permiten distinguir estas rocas de las dolomitas primarias de origen sedimentario, que forman estratos concordantes y se extienden en grandes superficies. La existencia de rocas dolomitizadas es un índice favorable para la búsqueda de yacimientos telegenéticos de baja temperatura de menas polimetálicas estratiformes, barita, siderita y fluorita.

Listvenitas

Con este nombre se conocen las rocas de composición cuarzo-carbonatada, con talco, clorita y mica verde, resultantes del metasomatismo de baja temperatura de las rocas magmáticas básicas y ultrabásicas. En el primer caso estas rocas pueden acompañar a los yacimientos auríferos, cupro-cobaltíferos y cupro-niquelíferos y en el segundo a los de talco.

Otros tipos de alteraciones hidrotermales de las rocas encajantes, que constituyen menas corrientes, son los siguientes: zeolitización, característica para los yacimientos de baja temperatura oro-argentíferos o de espato de Islandia; boritización y fluoritización, asociadas a los yacimientos de temperatura baja y media de oro, menas polimetálicas y mercurio; turmalinización, que puede observarse en los yacimientos de estaño, wolframio, molibdeno y oro; piritización, en yacimientos sulfurosos de diferentes tipos.

En resumen, en la mayoría de los casos, la alteración hidrotermal de las rocas encajantes precede a la etapa principal de la meniferación o se desarrolla al mismo tiempo que esta. Más frecuentemente las rocas alteradas se vinculan estrechamente con los cuerpos minerales y les rodean de cerca formando una especie de envoltura, ampliando los objetos meníferos y facilitando su revelación. De manera general, la proporción entre el ancho de la zona de rocas alteradas y la potencia del cuerpo mineral puede ser muy diferente (desde partes de uno hasta centenares de veces) y por esta razón la intensidad con la cual se manifiestan dichas alteraciones hidrotermales no predetermina de ningún modo las perspectivas de la meniferación potencial del subsuelo. Desde el punto de vista de la búsqueda de minerales útiles, las condiciones más favorables se crean si la potencia de las zonas de rocas alteradas sobrepasa varias veces a la de los cuerpos minerales.

La alteración de las rocas encajantes durante los procesos exógenos es mucho menos variable y tiene un papel secundario en cuanto a la búsqueda de yacimientos minerales. Como resultados más corrientes e importantes de dichos procesos se estudiarán la formación de los ocre, la clarificación y las rocas "quemadas".

La formación de los ocre acompaña los procesos de oxidación de muchos yacimientos sulfurosos que contienen minerales de hierro, plomo, antimonio, níquel, cobalto y otros. Las formaciones minerales secundarias más corrientes resultantes de estos procesos son diferentes hidróxidos de hierro, por lo cual el conjunto de los productos de oxidación de los cuerpos minerales sulfurosos con frecuencia se nombra "sombrero de hierro". Dichas formaciones se distinguen de las

zonas de ocre, que surgen como resultado de la descomposición de las rocas ferruginosas, por la existencia de las texturas residuales con muchas cavidades de lixiviación, correspondientes por su forma a los granos sulfurados preexistentes. En muchos casos en los "sombreros de hierro" también se pueden observar sulfuros más resistentes que se han descompuesto parcialmente, minerales del tipo de ocre de colores característicos: verdes (annabergita en el caso del níquel o malaquita en presencia del cobre), rosados (eritrina a expensas de los sulfuros de cobalto), azules (azurita en el caso de cobre), amarillo o anaranjados (ocres de plomo y antimonio).

La clarificación de las rocas encajantes tiene lugar a causa de la acción lixiviante de las aguas ácidas y con frecuencia representa un testimonio de la descomposición de los cuerpos minerales de tipo sulfurado.

Las rocas "quemadas" de aspecto escoriáceo son el resultado de los incendios subterráneos y atestiguan seguramente la existencia de estratos carboníferos dentro del área que se estudia, aunque no permiten decidir si estos estratos son de carácter industrial o no industrial. Debido a que en muchos casos el incendio no afecta todo el estrato y su mayoría queda inalterable, las rocas "quemadas" también pueden servir como índices de búsqueda directa para los yacimientos de carbón.

Minerales filoneanos acompañantes de la meniferación

Como los procesos de meniferación endógena se desarrollan en etapas sucesivas, la zonalidad primaria de los yacimientos de este origen es un fenómeno muy corriente que se refleja en la zonalidad mineralógica de los cuerpos minerales y yacimientos, sobre todo, en el caso de los de origen hidrotermal. Por consiguiente, con mucha frecuencia, las zonas periféricas de los cuerpos minerales están constituidas solo por minerales filoneanos, mientras que la mineralización menífera se localiza en las zonas centrales y profundas. Es muy natural que aquellas zonas de minerales acompañantes se pueden descubrir en la superficie actual o los laboreos de prospección, aún cuando los minerales útiles correspondientes yacen a gran profundidad y no se manifiestan directamente. Por eso las zonas de minerales filoneanos son un índice de búsqueda muy valioso que se ha utilizado con éxito para descubrir cuerpos minerales ciegos.

El primer grupo de minerales filoneanos lo forman la barita, la fluorita y parcialmente la siderita y el cuarzo, que se depositan directamente a partir de las soluciones mineralizantes. Las vetas de barita se encuentran en muchos yacimientos polimetálicos del Cáucaso, Kazajistán, Altai, Asia Central y otras regiones. En algunas de ellas con la profundidad aparece una mineralización polimetálica que, según el caso, puede ser pobre, ordinaria y hasta rica. La profundidad a la cual están encerradas estas menas puede ser considerable (hasta de 300 a 500 m). La importancia de tales zonas de minerales filoneanos, desde el punto de vista de la búsqueda, se muestra en la figura 3.15.

Independientemente de que los filones de fluorita sin mineralización útil se encuentran por arriba de los yacimientos meníferos con menos frecuencia que los baríticos, sus ejemplos también son numerosos (Kirguisia; EE.UU., etc.). Ellos pueden señalar la presencia de menas polimetálicas a una profundidad considerable, hasta de 150 a 200 m (fig. 3.16).

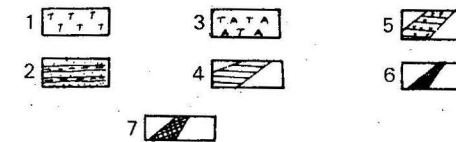
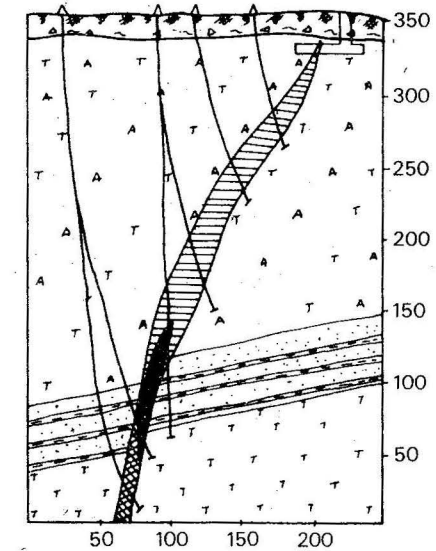


Fig. 3.15 Esquema de la zonalidad vertical del yacimiento Bogaňsk en los Transcárpato: 1- tobas de riolita; 2- argilitas y areniscas; 3- tobas de riolita alunitizadas; 4- menas masivas cuarzo-baríticas; 5- menas masivas cuarzo-baríticas con galenita y esfalerita diseminadas; 6- menas masivas de plata, plomo y cinc; 7- menas de vetillas intercaladas de plata, plomo y cinc

El segundo grupo abarca los minerales que surgen durante la metasomatosis a expensas de la sustancia de las rocas encajantes. Estos minerales pertenecen principalmente a los carbonatos (calcita, más raramente dolomita, ankerita y siderita y algunas veces magnesita y manganocalcita) y se localizan en forma de vetas, filones pequeños y nidos dentro de las rocas carbonatadas, como prolongaciones de los cuerpos minerales. Filones carbonatados estériles de este género se han detectado en los yacimientos auríferos de Aldán, algunos yacimientos polimetálicos de Altai y Asia Central.

Algunas veces los minerales filoneanos del primer grupo, que se han formado durante las etapas iniciales del proceso hidrotermal, pueden redistribuirse en el curso de la metasomatosis intramenífera, lo que trae como resultado la creación de una zonalidad mineralógica singular. Por ejemplo, en los yacimientos de Checoslovaquia (Rudňíye Gori) a medida que los minerales filoneanos se alejan de los cuerpos minerales se observan sucesivamente las zonas estériles de composición barítica, fluorítica y calcítica.

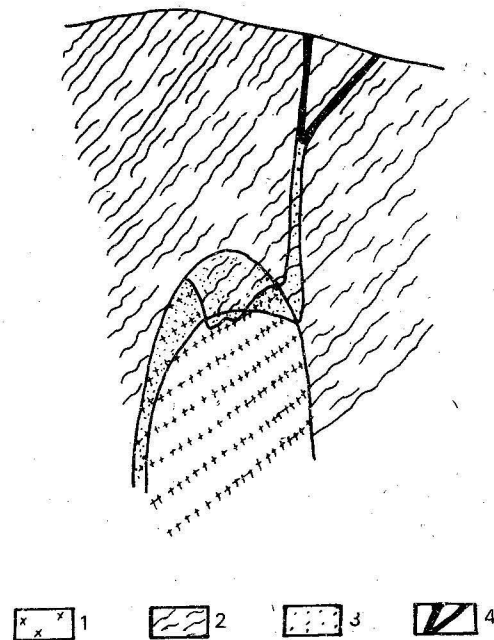


Fig. 3.16 Esquema de la zonalidad de la parte superior del yacimiento polimetálico Aktius en Kirguisia del norte: 1- granófiros; 2- esquistos metamórficos; 3- mena polimetálica; 4- filones cuarzo-fluoríticos

Los minerales filoneanos de cualquier origen deben considerarse solo como índices de búsqueda indirectos, por cuanto no atestiguan más que un desarrollo de los procesos hidrotermales y metasomáticos, los cuales pueden acompañar a la meniferación o desarrollarse independientemente. Esto lo demuestran las observaciones sobre los objetos geológicos reales, ya que no todos los filones estériles se convierten con la profundidad en meníferos. Por este motivo es muy importante asegurar una correcta evaluación de las zonas de uno u otros minerales filoneanos revelados durante la búsqueda. En este caso las investigaciones geoquímicas pueden servir de gran ayuda, por que si en la profundidad las vetas encierran la meniferación industrial, los minerales filoneanos de sus partes estériles generalmente están enriquecidos con los elementos correspondientes.

Coloración de las rocas

Algunas veces puede figurar como indicación directa de la existencia de unos u otros minerales útiles.

En primer lugar, muchas variedades de rocas encajantes alteradas tratadas anteriormente, se caracterizan por sus colores singulares y se destacan fácilmente por esta propiedad sobre el fondo cromático normal de las rocas ordinarias. Por ejemplo, a causa de la greissenización, la sericitización, la cuarcificación, la caolinización y la zeolitización, se forman zonas clarificadas, bien visibles en el fon-

do de color oscuro de las rocas no alteradas. Por el contrario, las zonas de skarnización, turmalinización y parcialmente las de cloritización tienen un color más oscuro que las rocas iniciales. Algunas rocas alteradas (serpentinitas, talcitas, listvenitas) son de color verde característico y se revelan fácilmente por este índice. Además, ya se han señalado los cambios de los colores de las rocas (clarificación y formación de los ocre) a causa de su alteración exógena vinculada con la descomposición de los minerales útiles correspondientes.

En segundo lugar, el color de la roca puede depender de la presencia en ella de algunos minerales útiles en estado disperso y frecuentemente en forma oxidada. Los colores rojos, pardos y amarillos pueden señalar la existencia de bauxita o menas de hierro y níquel de tipo oxidado; la tonalidad verde puede relacionarse con las menas de cobre, crisotilo-asbesto, talco y menas sulfurosas de níquel; los colores negros y grises oscuros son característicos para los yacimientos de manganeso y las series carboníferas; las rocas blancas y grises claras pueden servir como índice de los filones pegmatíticos y cuarcíferos, acumulaciones de creta, caolín, arcillas refractarias y areniscas para la producción del vidrio.

En tercer lugar, el color oscuro de las rocas encajantes crea un medio reductor muy favorable para la deposición de la materia menífera en forma de sulfuros. Por lo tanto, la existencia de rocas oscuras carboníferas o bituminosas es un índice indirecto favorable para la búsqueda de diferentes yacimientos de tipo sulfuroso. Los casos de relaciones semejantes son numerosos y se han detectado en Asia Central, Ural, Altai, península de Kola, EE.UU., RDA, Cuba, y otras regiones.

Anomalías geofísicas

Como anomalías geofísicas se conocen las desviaciones bruscas de algunas características de los campos físicos de la Tierra con respecto a sus valores normales. De manera general, estas desviaciones se condicionan por la heterogeneidad de la estructura interna de los horizontes superiores de la corteza terrestre y la diferencia considerable de las propiedades físicas de las rocas y menas. En muchos casos estas diferencias y las anomalías geofísicas que ellas provocan pueden atestiguar la posible presencia de acumulaciones minerales y a veces hasta se utilizan como índices de búsqueda directos. Sin embargo, con bastante frecuencia dichas anomalías no se vinculan con algún mineral útil encerrado en el subsuelo y no permiten más que obtener una idea sobre las particularidades de la constitución geológica del territorio que se estudia.

Anomalías magnéticas

Las anomalías magnéticas de intensidad alta y media ya fueron tratadas como índices de búsqueda directos. Las débiles (decenas y centenas de gammas) pueden relacionarse, no solo con las acumulaciones de minerales sino también con diferentes rocas de susceptibilidad magnética elevada, y representan por consiguiente índices indirectos. Estas anomalías pueden ser útiles en caso de la búsqueda de bauxita, cromita, skarn meníferos, tubos kimberlíticos (fig. 3.17) y otros minerales útiles poco magnéticos.

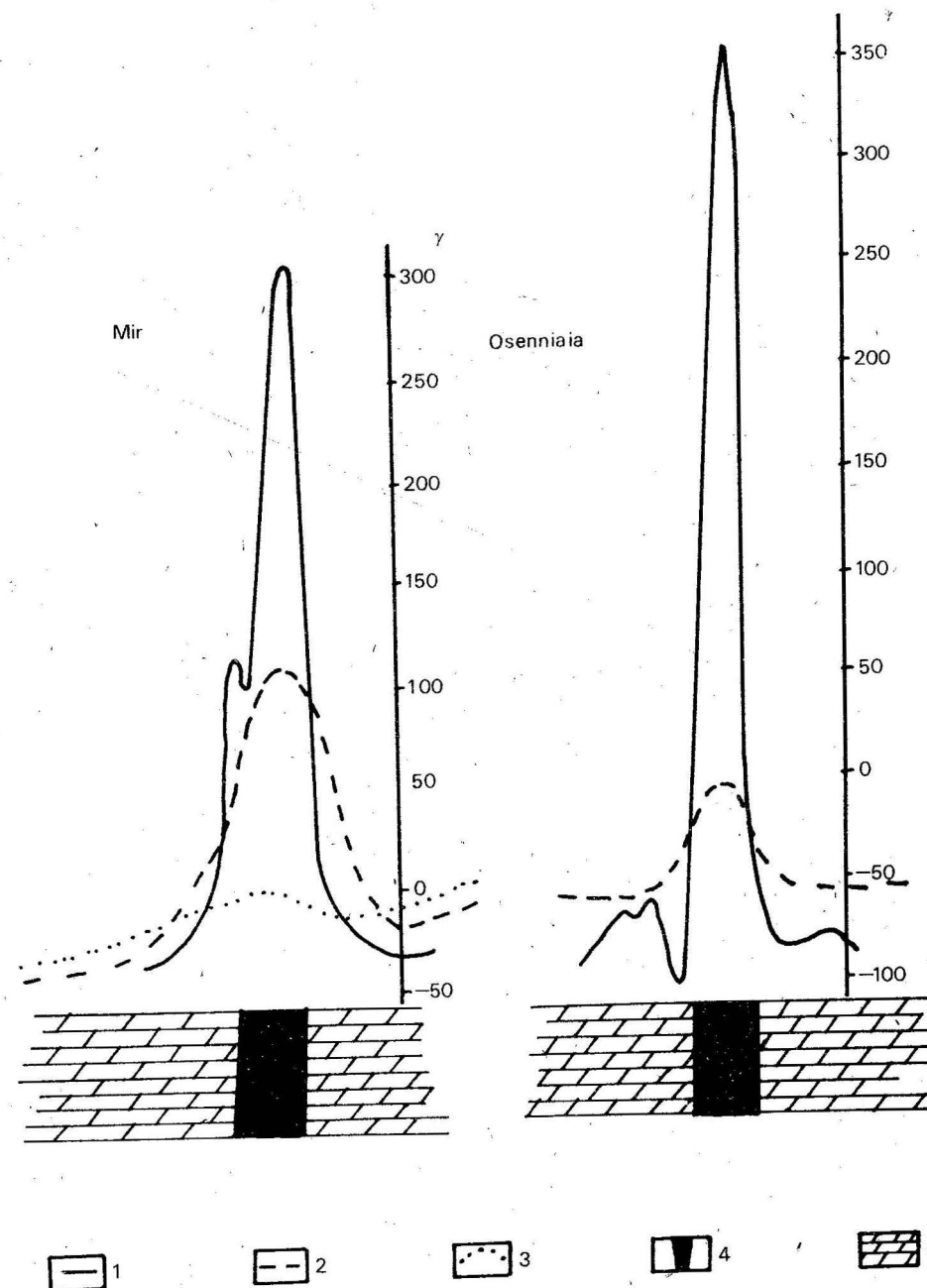


Fig. 3.17 Anomalías magnéticas sobre tubos kimberlíticos: 1- curvas Z_a del levantamiento terrestre; 2- curva Z_a del levantamiento aeromagnético a la altura de 100 m; 3- curva Z_a del levantamiento aeromagnético a la altura de 400 m; 4- tubos kimberlíticos; 5- rocas carbonatadas del Paleozoico inferior

Anomalías eléctricas

Se conocen como tales los cambios bruscos de las propiedades eléctricas (resistencia eléctrica específica, permeabilidad dieléctrica, potencial electroquímico, etc.) de sectores determinados de la corteza terrestre. Estos cambios pueden ocurrir a causa de diferentes variaciones en la composición, estructura, textura, condiciones de yacencia y capacidad acuífera de las rocas y menas, y por lo tanto representan índices indirectos en cuanto a la presencia posible de minerales útiles. Los métodos eléctricos se aplican con mucho éxito para precisar los contactos de diferentes rocas, revelar los cuerpos magmáticos dentro de las series sedimentarias, las fallas, horizontes acuíferos, zonas cársticas, etc.; o sea, para obtener datos complementarios sobre los criterios de búsqueda geológicos. Al mismo tiempo, sobre la base de las anomalías de los campos eléctricos naturales o artificiales se pueden descubrir los cuerpos concretos de minerales útiles, tanto buenos conductores (menas sulfurosas y de manganeso, grafito, schungita, antracita y otros) como dieléctricos (filones cuarcíferos, pegmatita, caliza y otros).

Un tipo de anomalía eléctrica denominada sismoeléctrica se presenta como resultado del paso de las ondas elásticas a través de las rocas y menas. Estas anomalías se vinculan con las fallas, las zonas agrietadas y las rocas acuíferas, pero se forman con más frecuencia cuando las rocas o menas contienen determinados minerales anisótropos con propiedades piezoeléctricas (cuarzo, turmalina, nefelina, esfalerita y otros). Si el contenido de dichos minerales es bastante alto las ondas elásticas inducen un campo electromagnético de intensidad suficiente como para percibirlo con los aparatos receptores existentes. Esas anomalías se utilizan con mucho éxito como índices indirectos para la búsqueda de los filones cuarcíferos y cuerpos pegmatíticos.

Anomalías gravitacionales

Estas anomalías indican las zonas de valores elevados de la aceleración de la gravedad con respecto al fondo normal de este parámetro dentro de las áreas contiguas. Las anomalías gravitacionales surgen a causa de la diferencia del peso específico de las rocas y menas que se encuentran en el subsuelo. De acuerdo con el carácter de su manifestación dichas anomalías pueden ser regionales o locales.

Las regionales reflejan las particularidades de la constitución geológica de la región que se estudia, son pequeñas por su valor absoluto, que no excede a unos miligales (1 mgl corresponde a la variación de la aceleración de la gravedad igual a $1 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}^2$), y son de poco contraste.

Las anomalías gravitacionales locales se relacionan con cuerpos concretos de menas o rocas de peso específico particular, pueden alcanzar de 10 a 20 mgl o más y son de gran contraste. Las anomalías positivas son utilizables como índices de búsqueda indirectos para las menas de hierro, cromo, manganeso, cuerpos de menas sulfurosas macizas, tubos kimberlíticos y otros minerales útiles de densidad elevada.

Anomalías sísmicas

Están condicionadas por las diferencias de las propiedades elásticas de las rocas y menas y se manifiestan por las variaciones de la velocidad de las ondas elásticas naturales o artificiales que las atraviesan. Dichas anomalías se utilizan principalmente para estudiar diferentes estructuras geológicas encerradas a una

profundidad considerable y revelar las estructuras favorables para la localización de minerales útiles determinados.

Son muy importantes como índices de búsqueda indirectos en el caso del petróleo y gas natural, aunque también se pueden aplicar para la búsqueda de minerales útiles de otros tipos.

Para finalizar el estudio de los índices geofísicos, conviene subrayar que la utilización de las anomalías geofísicas como índices de búsqueda indirectos depende mucho de las propiedades físicas de las rocas y menas y sobre todo de su grado de diferenciación. Además, para lograr un resultado positivo, es indispensable tener en cuenta las particularidades ya conocidas de la constitución geológica del territorio, así como otros índices de búsqueda. Una ventaja importante de las anomalías geofísicas es el hecho de que ellas pueden proporcionar al prospector datos valiosos sobre los cuerpos minerales que yacen a gran profundidad y no se manifiestan por otros índices.

Índices geomorfológicos

Se conoce bien que las rocas, según su tipo, se comportan de distinta manera durante la meteorización. La diferencia de las propiedades físico-químicas de las menas y rocas encajantes puede ser aún más grande y tener como consecuencia un ritmo desigual de destrucción y creación de formas singulares del relieve. Los cuerpos minerales más resistentes (filones cuarcíferos y pegmatíticos, cuerpos de cuarcitas secundarias mineralizadas, *stockworks* meníferos y otros) se reflejan en el relieve actual como formas positivas, paredes, escalones, bóvedas, columnas, etc. Por el contrario, sobre los minerales útiles inestables (menas sulfurosas, carbón, bauxita cársica, arcilla, caolín y otros) se crean depresiones bien visibles que con frecuencia están empantanadas (carbón, arcilla, caolín) o hasta contienen lagos (bauxita). Las áreas donde se encuentran los minerales útiles solubles (rocas carbonatadas, sales minerales, yeso) se caracterizan por el desarrollo de formas particulares de microrrelieve cársico. Todo lo expuesto quiere decir que el estudio de las formas locales del relieve actual puede brindar una ayuda importante durante la búsqueda de diferentes minerales útiles.

Índices hidrogeológicos

La existencia de los horizontes acuíferos es el resultado de la presencia en el corte geológico de rocas permeables e impermeables, las cuales pueden encerrar respectivamente diferentes minerales útiles o desempeñar el papel de pantallas durante la formación de esos minerales. Junto con los criterios de búsqueda favorables este fenómeno se puede considerar como índice de la meniferación posible de origen endógeno o de infiltración y especialmente de las acumulaciones de petróleo y gas combustible. Además, con frecuencia, algunos minerales útiles (estratos de carbón, depósitos de gravas y arenas, placeres enterrados, series carbonatadas, haloideas y de yeso con amplio desarrollo de carso, etc.) representan por sí solos horizontes acuíferos. Por eso, el descubrimiento de dichos horizontes, mediante el estudio sistemático de las fuentes, manantiales, pozos de perforación, laboreos mineros, etc., sirve como índice indirecto para la búsqueda de estos tipos de minerales útiles.

Índices botánicos

Estos índices se manifiestan en las variaciones del carácter de la vegetación sobre los cuerpos minerales o sus aureolas de dispersión. En estos casos, los suelos se enriquecen con diferentes elementos químicos con respecto a los suelos de las áreas no meníferas. Entre estos elementos químicos se encuentran elementos útiles para las plantas, que estimulan su desarrollo, y dañinos, que provocan diversas alteraciones en su aspecto exterior y su régimen de desarrollo. Existen elementos tóxicos que depauperan la vegetación a veces hasta su desaparición total. Todas las propiedades botánicas indicadoras se pueden subdividir en florísticas, morfológicas, fitocenóticas y fenológicas.

Las propiedades florísticas consisten en la relación más o menos marcada entre determinados tipos de vegetación y las rocas o suelos enriquecidos con algunos elementos. Las plantas de este género se llaman indicadoras y pueden desempeñar su papel tanto en todos los conjuntos vegetales que se desarrollan en condiciones correspondientes (indicadoras universales) como dentro de las áreas limitadas (indicadoras locales). Las plantas de primer grupo son bastante numerosas y forman los tipos de flora específicos: la flora cincífera (*Viola colominoria*, *Thlopsi colominarium*), la selenífera (algunas especies de leguminosas), la lítica (*Solanocece* y *Ranunculacece*), la aluminica (*Lycopodiapecece*), la cuprífera (*Caryophilacece*), así como la dolomítica y la serpentinitica.

Las plantas indicadoras locales son aún más numerosas, como por ejemplo: la *Gypsophyla patrinii* para los suelos cupríferos de Altai menífero y Tuva; *Primulácea* para las rocas estanníferas de Bohemia; *Alisum* para los yacimientos cupro-niquelíferos de Tuva. Conviene señalar que las *Primulaceae* se desarrollan ampliamente en la zona forestal de la URSS sin ninguna relación con el contenido de estaño en el suelo.

Las propiedades indicadoras morfológicas se manifiestan en diversas variaciones de la forma, tamaño y coloración de las hojas, tallos y flores de las plantas, así como también dimensiones anómalas de toda la planta (gigantismo o enanismo). En algunos yacimientos polimetálicos de Asia Central y América las flores de la amapola (*Papaver*) llegan a ser dobles. El *Alisum*, mencionado anteriormente con respecto a los suelos ricos en níquel, es propenso al gigantismo (su diámetro en las áreas meníferas alcanza 60 cm en comparación con 6 u 8 cm, en las áreas no meníferas), tiene los frutos más grandes y la forma de sus hojas se modifica. El contenido elevado de los bitúmenes en el suelo provoca el gigantismo o monstruosidad de la mayoría de las plantas que se desarrollan sobre dichos suelos. En la Siberia oriental se ha comprobado el gigantismo del álamo temblón y el aumento muy importante del tamaño de las hojas del abedul y el aliso en las zonas de mineralización torio-uranífera. En la región de Leningrado, los suelos sobre las formas cársicas del relieve, que se desarrollan debido a las calizas, son de acidez reducida y esto implica el aumento considerable de la altura de los árboles (especialmente del abedul) y arbustos.

Propiedades indicadoras fitocenóticas

Consisten en la abundancia y carácter de la distribución de las plantas sobre diferentes especies de rocas y minerales útiles; se reflejan claramente en las variaciones de la llamada "proyección del follaje". Este nombre comprende la superficie total de las proyecciones horizontales de las plantas expresada en por-

c ntaje de la superficie total del terreno. La vegetación rarificada, comparada con los sectores vecinos, o su ausencia total, son testimonios de la concentración elevada de elementos dañinos en el suelo y representa un buen índice para la búsqueda de los minerales útiles correspondientes. Los elementos de este género son: plomo, boro, arsénico, estaño, hierro, germanio y otros. Como ejemplo se puede citar el hallazgo de numerosos yacimientos de cobre, cobalto y uranio (Katanga y Zimbawe); hierro (Angaro-Ilinsk, URSS); molibdeno, wolframio y menas polimetálicas (Kazajastán central), a partir del estudio de las áreas de vegetación dispersa.

Al mismo grupo de propiedades indicadoras botánicas pertenece el carácter de las asociaciones de plantas en los conjuntos vegetales locales. Así, por ejemplo, para los yacimientos minerales de Kazajastán y Asia Central son características las asociaciones de artemisa y ce iglo de jardín y para los wolfram feros de las mismas regiones las de cocuela de ovejas (*Festuca ovina*) y artemisa.

Propiedades indicadoras fenológicas

Desempeñan un papel secundario durante la búsqueda. Se manifiestan en diferentes variaciones del ritmo y ciclo de desarrollo de las plantas, que forman las asociaciones locales con respecto a la vegetación normal de las áreas no meníferas. Estas variaciones son la floración, la fructificación o defoliación intempestivas, el despertar primaveral de las plantas fuera de tiempo, la refluoraci n o refructificaci n, etcétera.

La aplicación de los índices de búsqueda botánicos se basa principalmente en el estudio de las plantas indicadoras locales, así como en las regularidades morfológicas y fitoc noticas locales del desarrollo de la vegetación. Para datos más completos se recomiendan libros especiales, tanto científicos como metodológicos [50]. Además, la utilización de dichos índices requiere que el geólogo conozca bien todas las especies de plantas principales en la región que se estudia y sepa determinarlas de modo rápido y correcto.

Otros índices de búsqueda

Una información indirecta se puede obtener a partir de las declaraciones de los habitantes o pobladores que pretenden haber encontrado unos u otros tipos de materia prima mineral. Es muy natural que con mucha frecuencia, dado el desconocimiento de las ciencias geológicas por la población, esas declaraciones sean infundadas y no revelen más que la existencia de otros índices de búsqueda, tanto directos como indirectos. También se considera el estudio de las leyendas que mencionan los hallazgos de minerales útiles o informan sobre su explotación.

Algunas veces se pueden utilizar como índices de búsqueda indirectos los datos de los informes sobre las investigaciones geográficas, viajes importantes, trabajos de agrimensura y silvicultura, exploraciones topográficas para construcciones, etcétera.

Los nombres geográficos en lenguajes locales también pueden desempeñar un papel de índices de búsqueda indirectos, como por ejemplo: Gora Magnitnaya (monte magnético), Reka Sludianka (río de mica), Zolotoi Kliuch (manantial de oro), Termir-Tan (monte de hierro), Altin-Topkan (montículo de oro), Kan-Sai (arroyo menífero), Mis-Kon (yacimiento de cobre), Kurgasin-Kan (yacimiento de plomo), Kumish-Tag (yacimiento de plata), Hierro Santiago (yacimiento de hierro), El Cobre (yacimiento de cobre).

3.3 Mapas de pronóstico de los yacimientos minerales útiles

Como se ha explicado anteriormente, los criterios e índices de búsqueda no sólo son muy diversos, sino también se relacionan mutuamente, lo que hace indispensable su análisis conjunto para elaborar una idea definitiva y correcta sobre las perspectivas del territorio estudiado. La vía principal para resolver este problema consiste en la confección de los mapas de pronóstico, los cuales reflejan todas las particularidades de la constitución geológica de la región y expresan el conjunto de criterios de búsqueda, formaciones geológicas y meníferas favorables y todos los índices de búsqueda detectados. Sobre esta base, en dichos mapas se realiza la subdivisión del territorio en áreas favorables y desfavorables para la búsqueda de unos y otros minerales útiles. En los últimos tiempos, la elaboración de dichos mapas se basa en los métodos matemáticos de generalización y análisis de los datos reales y además tienen en cuenta las condiciones geográfico-económicas de la región.

Los mapas de pronóstico se confeccionan tanto para diferentes tipos de minerales útiles por separado (oro, bauxita, hierro, carbón, mica y otros) como para grupos de minerales útiles, relacionados desde el punto de vista de su génesis y ubicación espacial (antimonio y mercurio; cobre, níquel y cobalto; estaño y wolframio; estaño y oro; platino, cromo y asbesto crisot lico; etc.), o para todo el conjunto de minerales útiles que se pueden revelar dentro de la región.

Según la etapa de los trabajos de búsqueda los mapas se confeccionan a distintas escalas y pueden abarcar diferentes superficies. Los pronósticos más generales se hacen a escala 1:2 500 000 para el conjunto de elementos tectónicos mayores de la corteza terrestre: plataformas, zonas móviles de plegamiento, zonas de bloques, parageosinclinales y otros. En esos mapas se delimitan diferentes provincias metalogénicas y dentro de estas se separan las zonas estructuro-metalogénicas.

Los mapas de pronóstico a esta escala se utilizan para la planificación perspectiva de los trabajos de búsqueda, evaluación comparativa de las regiones meníferas ya conocidas y revelación de las regiones favorables nuevas.

Los mapas de pronóstico a escala 1:1 000 000 o 1:500 000 se extienden en un elemento geoestructural de primer orden: plataformas, zonas de plegamiento, zonas de transición, etcétera.

Estos mapas deben reflejar las relaciones entre las principales formaciones geológicas y meníferas de la región y permitir la limitación de las áreas favorables para la organización de la búsqueda general.

Los mapas de pronóstico a escala 1:200 000 se elaboran para las zonas estructuro-metalogénicas, áreas meníferas o cuencas de minerales útiles, con el objetivo de separar los territorios más favorables para los trabajos especializados de búsqueda detallada.

Los mapas de pronóstico de cualquier escala constituyen un conjunto de materiales (texto y gráficos) que son los siguientes:

- mapa geólogo-estructural o geólogo-formacional;
- mapa del grado de estudio del territorio (incluyendo estudio geológico, geofísico, hidrogeológico y topogeod sico);
- mapa de yacimientos, manifestaciones minerales e índices de búsqueda;

- d) catálogo de yacimientos y manifestaciones de minerales útiles;
- e) mapa geomorfológico;
- f) mapa de pronóstico propiamente dicho;
- g) memoria escrita para el mapa de pronóstico.

Los mapas geólogo-estructurales y geólogo-formacionales deben reflejar, en primer lugar, los siguientes factores: particularidades principales de la constitución geológica de la región, que son necesarias para establecer las regularidades de la ubicación espacial de diferentes minerales útiles en el subsuelo; horizontes estratigráficos y complejos litólogo-faciales favorables; elementos estructurales principales con su edad relativa, orientación y características morfológicas más importantes; áreas de desarrollo de complejos magmáticos de diferente composición y edad e información acerca de sus particularidades geoquímicas; tipos de rocas metamórficas con su subdivisión conforme a las facies del metamorfismo; principales formaciones geológicas y meníferas y su correlación. Los datos geológicos de importancia secundaria, que influyen poco sobre el pronóstico de las perspectivas del territorio, pueden indicarse en el mapa de manera esquemática o excluirlas. Para representar en dichos mapas los elementos principales que controlan la meniferación se recomienda elaborar una leyenda especial.

Los mapas de grado de estudio muestran las áreas que fueron estudiadas en diferentes períodos con diversos objetivos y diferentes detalles.

Los mapas de yacimientos, manifestaciones minerales e índices de búsqueda se confeccionan utilizando los signos convencionales especiales, cuyo tamaño debe reflejar la escala relativa del objeto (yacimiento o manifestación); la forma y coloración del signo deben corresponder con el carácter del objeto revelado y su tipo genético.

En el catálogo de yacimientos y manifestaciones minerales se dan los pasaportes de estos objetos. Estos pasaportes deben contener el número del objeto bajo el cual este ha sido puesto sobre el mapa, nombre, situación geográfica, caracterización geológica breve, tipo genético, datos sobre el grado de estudio o de exploración, resumen sobre el valor industrial posible y datos sobre la explotación (si estos existen).

En los mapas geomorfológicos, mediante signos convencionales apropiados, se indican las áreas de desarrollo de diferentes tipos genéticos del relieve. Estos mapas se utilizan para sistematizar y analizar los criterios geomorfológicos de búsqueda y si estos están ausentes los mapas en cuestión no se confeccionan.

Sobre la base de los materiales mencionados anteriormente, se elaboran los mapas de pronóstico. Las áreas favorables para la búsqueda de determinados minerales útiles se señalan mediante diferente coloración o tipo de rayado. Además, es necesario indicar la autenticidad con la cual estas áreas fueron separadas para asegurar la planificación correcta de los trabajos de búsqueda, e incluso establecer el orden de estudio de dichas áreas.

La memoria escrita para el mapa de pronóstico debe estar compuesta por los siguientes capítulos:

1. Caracterización geográfica breve de la región.
2. Grado del estudio geológico y geofísico del territorio.
3. Metodología de los trabajos realizados para elaborar el mapa de pronóstico.

4. Tipos genéticos y geólogo-industriales de yacimientos de minerales útiles que se encuentran dentro de la región.
5. Regularidades que controlan la ubicación espacial de yacimientos de minerales útiles en la región.
6. Índices de búsqueda.
7. Áreas favorables y su evaluación pronóstica.

Para escribir el último capítulo a veces se requiere la realización del cálculo de reservas de pronóstico para algunos minerales útiles. Este cálculo se basa en la analogía con regiones del mismo tipo metalogénico ya estudiadas y utiliza el método estadístico. Con este objetivo, para las regiones estudiadas se determinan las reservas de mineral útil por kilómetro cuadrado de territorio y los coeficientes de corrección, de acuerdo con la diferencia entre las áreas conocidas y nuevas desde el punto de vista de sus perspectivas para descubrir los minerales útiles. Después, al aplicar los valores calculados a las superficies de las áreas reveladas favorables, es fácil determinar las reservas de minerales útiles. En los últimos años, para resolver este problema han comenzado a utilizarse con gran resultado los métodos matemáticos de discriminación de las imágenes; los cálculos se realizan mediante computadoras.

3.4 Métodos de búsqueda

El conocimiento de los criterios e índices de búsqueda, aunque estos se generalicen en forma de mapas de pronóstico, no basta por sí solo para descubrir las acumulaciones de minerales útiles concretas dentro de las áreas reconocidas como favorables. Para lograr este objetivo también es necesario conocer y saber aplicar los métodos de ejecución de los trabajos de búsqueda más eficientes en las condiciones geológicas y geográficas concretas de la región.

Los métodos de búsqueda se agrupan de la siguiente manera:

Método de levantamiento geológico.

Métodos visuales que utilizan las aureolas y los flujos de dispersión de tipo mecánico.

Métodos basados en las aureolas y los flujos de dispersión geoquímicos.

Métodos geofísicos.

Métodos basados en la aplicación de los laboreos de prospección (métodos técnicos).

Método de levantamiento geológico

El levantamiento geológico a pequeña escala no tiene como objetivo la búsqueda de acumulaciones concretas de minerales útiles. No obstante, cada mapa geológico, a cualquier escala, representa la base necesaria para la ejecución de la búsqueda mediante otros métodos y la interpretación correcta de los resultados obtenidos. Además, la cartografía geológica a gran escala sirve como método de búsqueda propiamente dicho, ya que durante su realización se descubren diferen-

tes yacimientos y manifestaciones minerales o sus índices de búsqueda, tanto directos como indirectos, cuando todos estos son discernibles por el análisis visual.

La escala del levantamiento geológico que se realiza con el objetivo de búsqueda, depende del estadio de los trabajos de búsqueda y del carácter de los objetos que se proponen revelar. En el caso de yacimientos sedimentarios, que se caracterizan por sus grandes dimensiones y composición sencilla, esta escala generalmente es de 1:10 000 a 1:50 000, mientras que para los endógenos o exógenos complejos la escala del levantamiento geológico es mucho más detallada: desde 1:25 000 a 1:10 000 para los campos meníferos enteros; desde 1:5 000 a 1:2 000 para los yacimientos independientes; y de 1:2 000 a 1:500 para la búsqueda de los cuerpos o depósitos minerales.

El levantamiento geológico representa el objeto de estudio de la geología estructural, por lo que no se tratará en este texto la exposición completa de su metodología y técnica de realización, aunque es conveniente esclarecer algunas exigencias que los mapas geológicos tienen que cumplir para desempeñar su papel de documento de búsqueda. Estas exigencias son las siguientes:

1. Correspondencia obligatoria entre el contenido del mapa y su escala, o sea, que mientras la escala del mapa se agranda, la subdivisión estratigráfica del corte geológico de la región tiene que ser más detallada, los límites geológicos se complican y se trazan con más precisión, las estructuras plicativas y disyuntivas reveladas disminuyen, la leyenda se amplía y se detalla (fig. 3.18).

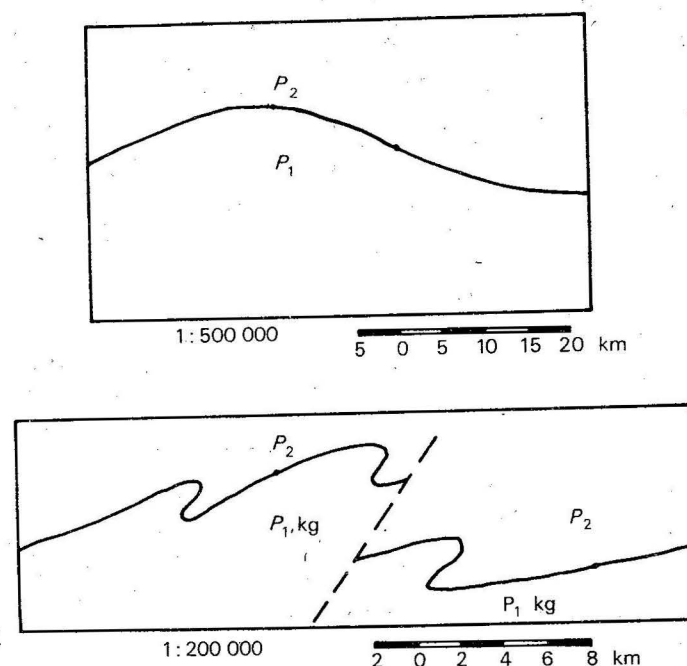


Fig. 3.18 Fragmentos de mapas geológicos de diferente escala para el mismo sector de terreno

2. En los mapas geológicos deben señalarse obligatoriamente los siguientes elementos: horizontes estratigráficos de apoyo; diferentes variedades litológicas de rocas sedimentarias; estructuras principales, tanto plicativas como disyuntivas; complejos magmáticos diferentes desde el punto de vista de su composición; edad geológica y especialización metalogénica. Sobre esta base se puede realizar el análisis completo y universal de los criterios de búsqueda. Además, en el mapa tienen que designarse todos los afloramientos de minerales útiles, sus aureolas y flujos de dispersión mecánicos, zonas de rocas alteradas y otros índices de búsqueda visuales; esta exigencia es obligatoria aunque dichos elementos sean pequeños por sus dimensiones. En este último caso, estos datos se señalan en el mapa fuera de la escala.
3. El área para realizar el levantamiento geológico debe delimitarse de manera tal que las acumulaciones minerales esperadas se encuentren lo más cerca posible del centro del futuro mapa.
4. El levantamiento geológico a gran escala debe realizarse sobre la base instrumental con un amarre exacto de los puntos de observación.
5. Los terrenos con afloramientos de minerales útiles confirmados, deben estudiarse de manera más detallada, e incluir planos geológicos a escala más grande que el mapa principal, documentación detallada de todos los afloramientos minerales, tanto naturales como artificiales, y muestreo del mineral útil.

Si se necesitan los mapas geológicos de las rocas del basamento, estos se acompañan de los mapas de depósitos friables del Cuaternario.

Si el levantamiento geológico se realiza por la vía terrestre tradicional todas estas exigencias serán respetadas, y se situará un punto de observación geológico por cada centímetro cuadrado del mapa, en el caso que la geología de la región sea de complejidad media. Según la escala de los trabajos esto corresponde a una distancia entre puntos en el terreno que varía desde 2 000 m (escala 1:200 000) hasta 20 m (escala 1:2 000). En la naturaleza casi nunca se presenta esta cantidad de afloramientos naturales, los cuales por añadidura deben estar ubicados en el espacio de manera regular. Por lo tanto, la cartografía geológica a gran escala exige la realización de un gran volumen de trabajos mineros o de perforación para crear un sistema de afloramientos artificiales de las rocas madres, y por consiguiente los plazos de trabajo se prolongan y sus costos aumentan.

Últimamente estos trabajos tradicionales ceden su lugar (sobre todo para las escalas medias: 1:50 000 - 1:200 000) al llamado *levantamiento de grupo*, que se basa en la utilización de las observaciones aéreas visuales y el descifrado de las fotografías aéreas y cósmicas, para revelar las particularidades generales de la constitución geológica del terreno que se va a estudiar. A estos trabajos se añaden las investigaciones terrestres de los sectores poco claros o más complejos. La utilización de las fotografías cósmicas que abarcan áreas de 200 000 a 3 000 000 km² permite revelar las estructuras principales del socalo bajo la cobertura de rocas friables, complejos vulcanógenos estructurales antiguos, estructuras anulares, etc. El descifrado de las fotografías aéreas da la posibilidad de establecer los elementos más pequeños, tales como filones cuarcíferos y pegmatíticos, pequeñas intrusiones magmáticas, la mayoría de las estructuras plicativas y disyuntivas, zonas de rocas alteradas, áreas con la vegetación anómala, formas cársicas del relieve, "sombreros de hierro" de yacimientos de menas sulfurosas, tubos kimberlíticos, etc. Todos estos resultados aceleran la ejecución del levantamiento geológico en 3 a 4 veces y disminuyen considerablemente los gastos.

El levantamiento geológico tiene que asegurar no solo el estudio de la constitución geológica del territorio, la revelación de los criterios e índices de búsqueda y el descubrimiento de los objetos meníferos concretos, sino también la acumulación de todos los datos necesarios para la evaluación perspectiva de las áreas meníferas y manifestaciones minerales.

El levantamiento geológico con el objetivo de búsqueda debe ser complejo; es decir, se debe realizar en conjunto con otros métodos de búsqueda y teniendo en cuenta todos los minerales útiles posibles en la región. Solo de esta forma se pueden lograr los mejores resultados en los trabajos de búsqueda.

Métodos de búsqueda visuales

En este grupo se conocen tres métodos basados en el estudio de las aureolas y flujos de dispersión mecánicos: el método de guijarros glaciales, el de fragmentos y el de jagua.

Método de guijarros glaciales

Este utiliza los flujos de dispersión procedentes de los glaciares continentales del tipo cobertura que actualmente se desarrollan en las regiones septentrionales: Escandinavia, norte de la URSS, Alaska, norte del Canadá.

Para organizar la búsqueda mediante este método es preciso establecer la presencia de minerales meníferos o minerales satélites característicos en la parte más gruesa de los depósitos glaciales (guijarros), ya que este hecho atestigua el desarrollo de los flujos de dispersión glaciales. A veces estos guijarros, con índices de minerales útiles, se pueden encontrar durante el levantamiento geológico o itinerarios de búsqueda especiales, pero la mayoría de las veces su descubrimiento es producto del azar y ocurre al realizar los trabajos agrícolas, de construcción, avenamiento y obras viales. Como se conoce, los flujos de dispersión glaciales se pueden extender a unas decenas de kilómetros y las rocas del basamento están recubiertas por un potente manto de depósitos friables e inaccesibles a toda observación. Por esta razón, el método de guijarros glaciales es muy valioso y permite reducir considerablemente el área que se propone para aplicar otros métodos de búsqueda.

Después de encontrar los primeros guijarros meníferos se debe establecer la etapa de glaciación a la cual estos pertenecen y luego determinar la dirección del desplazamiento del glaciar en su época correspondiente, a partir de los surcos y rayas sobre las rocas del basamento y la orientación de las formas del relieve glacial estiradas. Si en la dirección de donde provino el glaciar, el mapa geológico no muestra, a una distancia razonable, ningún afloramiento de las rocas madres que corresponderían a los guijarros que contienen la mineralización útil o minerales satélites, se trazan perfiles de búsqueda a una distancia de 2 a 6 km uno de otro, según la extensión probable del flujo glacial. En cada perfil, durante los itinerarios, se examinan todos los guijarros que se encuentran en la superficie y además se hacen pozos criollos (a una distancia de 200 a 500 m en función del ancho esperado del abanico glacial) para estudiar los depósitos morrénicos, a los cuales pertenecen los guijarros meníferos encontrados anteriormente, y tomar muestras globales de guijarros. Los puntos donde se encontraban los guijarros con índices de meniferación se señalan en el mapa, lo que permite delimitar de manera aproximada el abanico glacial y determinar la posición posible de la fuente inicial de estos guijarros (fig. 3.19).

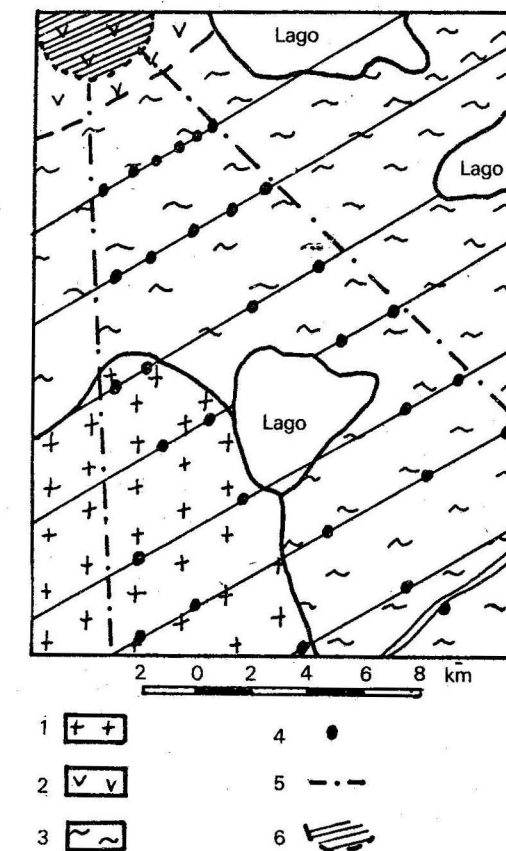


Fig. 3.19 Delimitación del flujo de dispersión en guijarros glaciales: 1- granito; 2- rocas ultrabásicas; 3- gneis del Precámbrico; 4- guijarros con índices de meniferación; 5- límite del flujo de guijarros glaciales; 6- zona de existencia probable de la manifestación primaria del mineral útil

Si en el mapa geológico de la región de la fuente probable se señalan rocas análogas a las de los guijarros, esto significa que el método en cuestión logró su objetivo y en este territorio favorable hace falta organizar la búsqueda mediante otros métodos (geofísicos, geoquímicos, técnicos). En el caso opuesto, en la región se sigue realizando el método de guijarros glaciales de manera más detallada, es decir, disminuyendo la distancia entre los perfiles de búsqueda hasta 500 a 1 000 m y entre los pozos criollos hasta 100 a 200 m para delimitar con más precisión la zona favorable para la búsqueda posterior (fig. 3.20).

El método estudiado es bastante difícil y complicado, pero en muchos casos asegura el descubrimiento de minerales útiles que no se revelan durante el estudio geólogo-geofísico del territorio a pequeña escala. Por ejemplo, en el norte de la URSS y los países escandinavos algunos yacimientos de hierro, cobre, níquel, molibdeno, titanomagnetita y otros minerales útiles han sido revelados mediante este método de búsqueda.

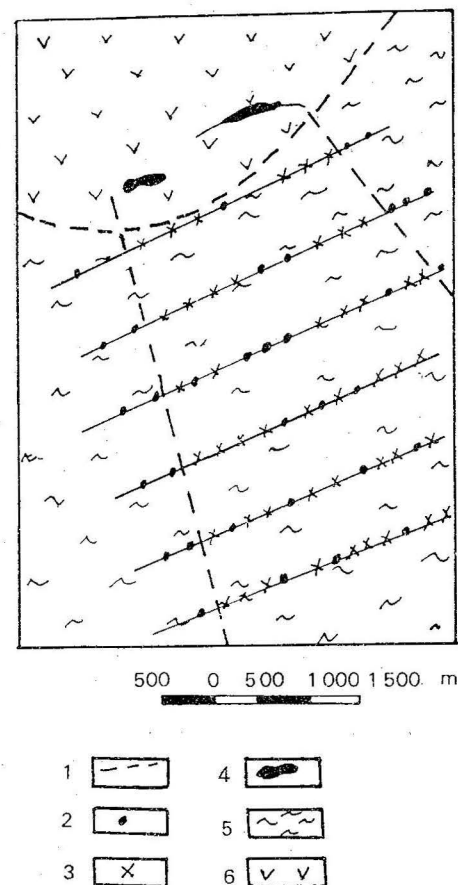


Fig. 3.20 Búsqueda de cuerpos minerales con ayuda del flujo de dispersión glacial: 1- límites del flujo de dispersión; 2- puntos de observación; 3- hallazgos de guijarros con mineralización menífera; 4- cuerpos minerales; 5- gneis del precámbrico; 6- rocas ultrabásicas

Método de fragmentos

Este método se basa en los flujos de dispersión de fragmentos muy grandes, de origen aluvial, parcialmente deluvial o proluvial, razón por la cual se denomina con frecuencia método de fragmentos fluviales. Dicho método es el más antiguo y uno de los más sencillos. Su esencia consiste en el estudio sistemático de los flujos de dispersión mecánicos en los depósitos aluviales con el movimiento a su encuentro, o sea, aguas arriba. Al hacerlo se pueden encontrar fragmentos y gravas con mineralización útil o minerales satélites, cuya cantidad y tamaño aumentan al mismo tiempo que el grado de redondeamiento disminuye, mientras más próximo esté a la fuente inicial. Después de dejar atrás esta fuente, el número de fragmentos, como es natural, disminuye bruscamente hasta su desaparición total. En este caso hay que estudiar minuciosamente el lecho del río y la parte adyacente

del valle, donde con frecuencia se puede descubrir el yacimiento o manifestación mineral primaria. Si este resultado no se logra, inmediatamente se procede al estudio de los depósitos aluviales de los afluentes más próximos, para asegurarse de que el objeto esperado no se localiza en el valle de uno de ellos; luego se investigan las formaciones deluviales de las pendientes del valle principal y se trazan los itinerarios según las curvas de nivel. Es conveniente señalar que el método de fragmentos es eficiente solo en el caso de pendientes abruptas y con débil desarrollo de los suelos, porque en el caso opuesto hay que aplicar otros métodos de búsqueda, utilizando las aureolas y flujos de dispersión, tanto mineralógicos como geoquímicos.

A pesar de su simplicidad, el método de fragmentos se utiliza con gran resultado junto con el levantamiento geológico para la búsqueda de minerales útiles, resistentes a la meteorización, tales como menas oxidadas de hierro y manganeso, cromita, bauxita, menas de wolframio, estaño, mercurio, titanio; además, con importancia secundaria, carbón, espato de Islandia, cristal de roca, asbesto y mica.

Método de jagua

Este método utiliza los flujos de dispersión mineralógicos aluviales y raramente deluviales; consiste en el muestreo sistemático de los depósitos friables, con el objetivo de revelar las zonas donde estos se encuentran enriquecidos con minerales meníferos pesados. La aplicación de dicho método, que también se nombra levantamiento de jagua, permite descubrir tanto las manifestaciones minerales primarias, que representan las fuentes de los minerales correspondientes en el aluvión, como las concentraciones industriales secundarias de estos minerales en los depósitos friables y los yacimientos en placeres. Para lograr este doble objetivo el método en cuestión debe comprender las siguientes operaciones:

- toma de las muestras de jagua;
- beneficio de las muestras (obtención de la jagua);
- investigación de la jagua;
- generalización de los resultados obtenidos bajo la forma de mapas de jagua.

La selección correcta de los lugares de toma de muestras durante la aplicación del método de jagua es de suma importancia, ya que la concentración de minerales pesados en el aluvión fluvial es extremadamente variable, tanto en el plano como según la dirección de su potencia, aunque se somete a regularidades que se deben respetar cuidadosamente.

Si esto no se observa, las muestras tomadas pueden mostrar bajos contenidos de minerales pesados en los depósitos friables, incluso dentro de los terrenos donde estos minerales se acumulan; o sea, la aplicación del método de jagua puede llevar a resultados incorrectos.

En el caso de la diferenciación mecánica del material detrítico por la corriente, los minerales pesados se acumulan principalmente en los lugares donde la velocidad de la corriente disminuye bruscamente y en su mayor parte se localizan en los horizontes inferiores de las formaciones friables. Por tal razón, durante la búsqueda general, cuya tarea principal es la comprobación del enriquecimiento del aluvión con unos u otros minerales, las muestras deben tomarse en los

lugares más accesibles a su concentración máxima, detrás de los salientes de las orillas abruptas: corriente abajo de los recodos bruscos y rápidos; zonas de ampliación brusca del lecho del río; zonas aguas arriba de las lenguas de tierra acumuladas, etc. Como las lenguas de tierra se enriquecen con la fracción pesada, después de cada crecida de agua conviene tomar las muestras en la parte superior, hasta el nivel actual de las aguas. Por el contrario, los depósitos de valle o de lecho deben estudiarse en sus partes más profundas cerca del "lecho de roca" donde se observa la acumulación máxima de minerales pesados, sobre todo si este lecho se caracteriza por salientes o muchas cavernas. Además, la toma de muestras debe realizarse en los depósitos poco clasificados (arenas de granos gruesos con gravas) que se forman a causa de la moderación brusca de la corriente. Los depósitos bien clasificados, especialmente los de granos finos, son mucho más pobres en minerales de jagua, porque la velocidad de la corriente fue insuficiente para transportarlos. Por lo tanto, la toma de muestras de dichos depósitos (arenas de granos finos, limos, cienos, fangos, arcillas) es irracional.

Es conveniente aclarar que los principios de selección de los lugares para la toma de muestras de jagua son válidos durante el estudio de la red fluvial joven o rejuvenecida cuando los ríos erosionan las rocas del basamento o al aluvión formado anteriormente en las etapas de erosión precedentes. Los ríos de edad madura corren lentamente en los valles amplios y no transportan más que las fracciones finas y arcillosas de minerales ligeros, por lo cual el muestreo de las lenguas de tierra y depósitos de lecho no puede tener resultados positivos. En este caso es necesario proceder al estudio sistemático de los depósitos de valle según los perfiles orientados transversalmente a este y tomar las muestras en la parte profunda de los depósitos friables cerca del "lecho de roca" si es posible. La distancia entre los perfiles (1 a 5 km) puede sobrepasar en 20 a 25 veces la existente entre los puntos del muestreo en los perfiles (50 a 200 m).

Al seleccionar los puntos de toma de muestras de jagua conviene asegurar un estudio adecuado de los depósitos friables, no solo en el valle principal sino también en los valles de todos los afluentes. Esto es muy importante ya que, por lo general, en el aluvión del río principal los contenidos de minerales pesados son varias veces inferiores a los del valle del afluente que erosiona la manifestación mineral *in situ*.

Una atención insuficiente al muestreo de jagua de los afluentes puede causar la pérdida de muchos objetivos industriales durante la búsqueda. Para evitarlo se recomienda tomar en la desembocadura de cada afluente y en el valle principal, inmediatamente después de la confluencia, series de 3 a 6 muestras de jagua, que permitan revelar fácilmente las concentraciones elevadas de minerales pesados en el material detrítico transportado por el afluente correspondiente. El resto del valle del afluente se estudia mediante muestras individuales que se ubican regularmente a lo largo de la corriente.

Durante el estudio de los depósitos de las terrazas se toman las muestras por secciones, con el objetivo de revelar las regularidades de la distribución de minerales de jagua en el corte vertical. Para esto se utilizan las partes del valle donde la corriente está orientada casi transversalmente a este y erosiona las terrazas formando orillas abruptas.

Se debe prestar atención especial a las zonas de rocas alteradas que pueden acompañar a la manifestación. En la proximidad de dichas zonas se toman, obligatoriamente, las muestras de jagua de los depósitos tanto aluviales como eluviales y deluviales.

La búsqueda detalladamente mediante el método de jagua se organiza dentro de áreas bastante limitadas y tiene como tarea principal la revelación de regularidades en la concentración de minerales pesados en los depósitos aluviales friables y la delimitación de los flujos de dispersión mineralógicos, lo que lleva al descubrimiento de manifestaciones minerales concretas, tanto primarias como en placeres. Por consiguiente, el objeto del muestreo lo presentan tanto los depósitos de valle en su parte adyacente al lecho de roca como los depósitos proluviales, deluviales y eluviales de las pendientes del valle. La metodología de estudio de los depósitos de valle es la misma que la que se utiliza para la búsqueda general, pero la red de muestreo se identifica notablemente (tabla 3.5) y además se presta una atención aún mayor al muestreo en los valles de pequeños afluentes y arroyos.

Tabla 3.5

DENSIDAD RECOMENDADA EN LA RED DE MUESTREO DE JAGUA DURANTE LA BÚSQUEDA GENERAL Y DETALLADA

Escala de los trabajos	1:200 000	1:100 000	1:50 000	1:25 000	1:10 000	1:5 000
Número de muestras por 100 km ²	5-25	25-100	100-500	500-1 200	1 200-2 500	2 500-5 000

Las muestras de los depósitos deluviales y eluviales se toman mediante una red cuadrada o rectangular, de manera tal que la distancia entre los puntos de muestreo en el perfil corresponda aproximadamente a 1 cm en el mapa.

Las muestras de los depósitos friables, en el lecho y las lenguas de tierra, se toman directamente con pala, mientras que en el caso de los depósitos de valle se laborean las excavaciones de poca profundidad (zanjas, pozos criollos) se perforan pozos de gran diámetro. Es muy importante que el volumen de las muestras tomadas sea constante, ya que en este caso todas las variaciones de la cantidad de minerales pesados en la muestra, corresponden a las variaciones de su contenido en los depósitos friables. Por esta razón, el volumen de la muestra se controla por medio de un recipiente especial de volumen estándar, igual a 0,02 m³, lo que corresponde aproximadamente a un peso de 30 a 32 kg del material. En general, el volumen de la muestra es igual al del recipiente especial; pero si el contenido de minerales pesados en el aluvión es bajo, se toman dos y a veces más recipientes para asegurar el descubrimiento más fácil de dichos minerales. Este hecho hay que señalarlo obligatoriamente en la documentación del muestreo de jagua y con posterioridad recalcular los resultados obtenidos por el volumen estándar.

Las concentraciones elevadas de minerales pesados en los depósitos friables también pueden surgir como resultado de la destrucción de diferentes rocas en las que estos minerales desempeñan un papel accesorio, y es importante distinguirlos

de las anomalías de jagua vinculadas a los yacimientos o manifestaciones minerales primarias. Por lo tanto, el muestreo de jagua de los depósitos friables tiene que acompañarse del estudio del fondo normal de minerales pesados, que llegan al aluvión a partir de las rocas estériles de la región. Con este objetivo hay que tomar sistemáticamente las muestras de trozo para cada variedad principal de dichas rocas. Estas muestras se trituran y pasan al beneficio (como norma, por la misma vía que las muestras de jagua, es decir, en el agua corriente) para determinar luego el contenido de minerales en cuestión.

El beneficio de las muestras de jagua se realiza generalmente por la vía de la clasificación gravitacional de los fragmentos en un medio acuoso móvil y se conoce como lavado de las muestras. Este proceso abarca tres operaciones: levigación, lavado propiamente dicho y rectificación de la jagua.

Durante la levigación, el material de la muestra se sumerge en agua, se ablanda, amasándolo, y se tritura con cuidado; luego se decanta el agua enturbia da con partículas arcillosas, se sacan y eliminan las gravas y los grandes fragmentos que no contienen minerales de interés.

El lavado se realiza mediante cucharones y casos de diferente forma (bateas); consiste en ejecutar un movimiento rotatorio o de vaivén al material de la muestra en el medio acuoso, lo que provoca el enturbiamiento de las partículas ligeras, que se eliminan al decantar cada cierto tiempo el agua. El resultado de esta operación es la acumulación en el fondo de la tarea de un sedimento pesado oscuro denominado jagua.

Cuando la cantidad del material a lavar disminuye hasta 200 o 300 g, debe colarse en una batea de tamaño inferior para realizar la rectificación de la jagua. Este lavado debe ser minucioso y se concluye cuando de la jagua comienza a salir el granate. El producto final, la llamada *jagua gris*, que pesa unas decenas de gramos, se seca al fuego.

No se recomienda la obtención de una jagua más rectificada, llamada *jagua negra*, en condiciones de campo, ya que esto puede provocar la pérdida de muchos minerales valiosos de color más claro y densidad moderada (siderita, corindón, apatito, barita, topacio, diamante, esfena y otros).

Si el volumen de las muestras iniciales es muy grande, lo que puede tener lugar en el caso de una concentración extremadamente baja de minerales valiosos en los depósitos friables (diamante, platino, oro), se recomienda ejecutar las dos primeras operaciones (levigación y lavado) mediante dispositivos especiales o tambores desenlodadores (fig. 3.21).

En las regiones áridas, las muestras de material incoherente son de pequeño volumen (0,4 a 0,6 l), lo que facilita la rápida obtención del resultado. Estas muestras se ponen en platos o grandes tazas y se someten al beneficio por vía aérea, es decir, por medio del flujo de aire creado con los pulmones o pulverizador de mano. Este procedimiento se acompaña de la eliminación manual de los grandes granos no meníferos y tiene como resultado la obtención de la jagua gris cuyo grado de enriquecimiento es inferior con respecto al beneficio acuoso; las pérdidas posibles de minerales valiosos son notablemente más altas. Por esta razón, este muestreo de jagua *seco* tiene que ser controlado por el laboratorio de la empresa geológica con el lavado paralelo de 10 % de todas las muestras tomadas en condiciones estacionarias.

La investigación de la jagua se organiza, en primer lugar, sobre el terreno, con el objetivo de obtener rápidamente los resultados aproximados y orientar bien los trabajos posteriores y consiste en el estudio de la jagua con ayuda de una lu-

pa. Sin embargo, la investigación principal se realiza en los laboratorios apropiados, con el objetivo de determinar todos los minerales de la jagua y sus contenidos relativos. El esquema general de las operaciones durante esta investigación se muestra en la figura 3.22.

La jagua se subdivide, de acuerdo con el tamaño de las partículas, mediante el cribado, en dos fracciones: gruesa (+0,5 mm) y fina (-0,5 mm). La primera se subdivide a su vez en las fracciones magnética y no magnética que se someten al estudio visual (utilizando la lupa binocular), con el fin de determinar los minerales según sus índices externos, seleccionarlos en fracciones monominerales y establecer su porcentaje después de pesar cada fracción. Si la fracción fina tiene una masa considerable hay que mezclarla minuciosamente y tomar a partir de ella una muestra media de peso reducido. En otros casos, toda la fracción fina pasa a las investigaciones posteriores.

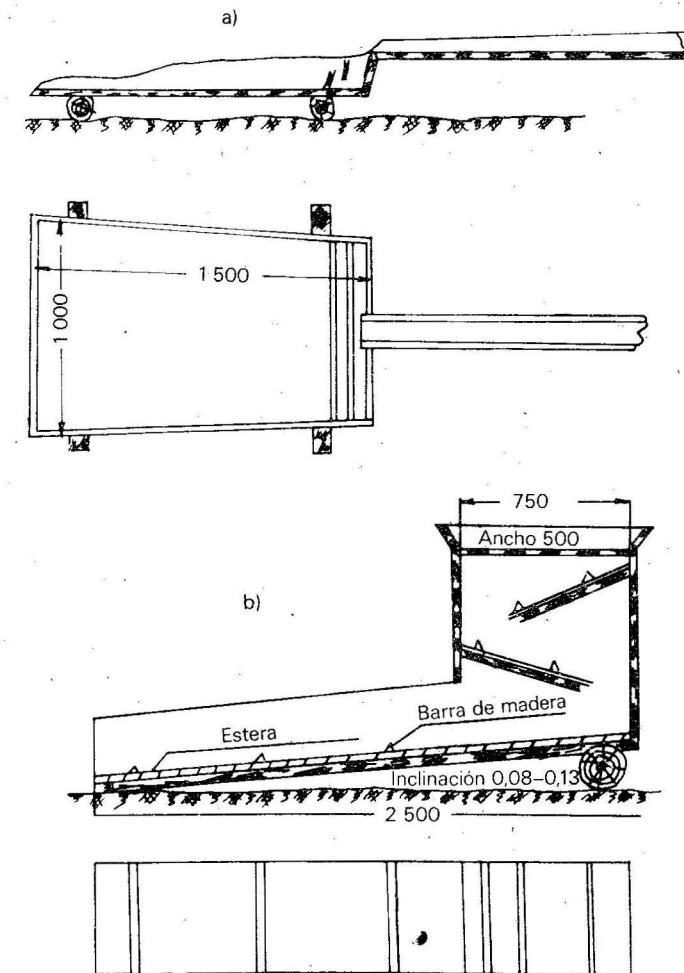


Fig. 3.21 Dispositivos para lavar muestras de jagua de gran volumen: a) Vashgerd; b) tambor desenlodador

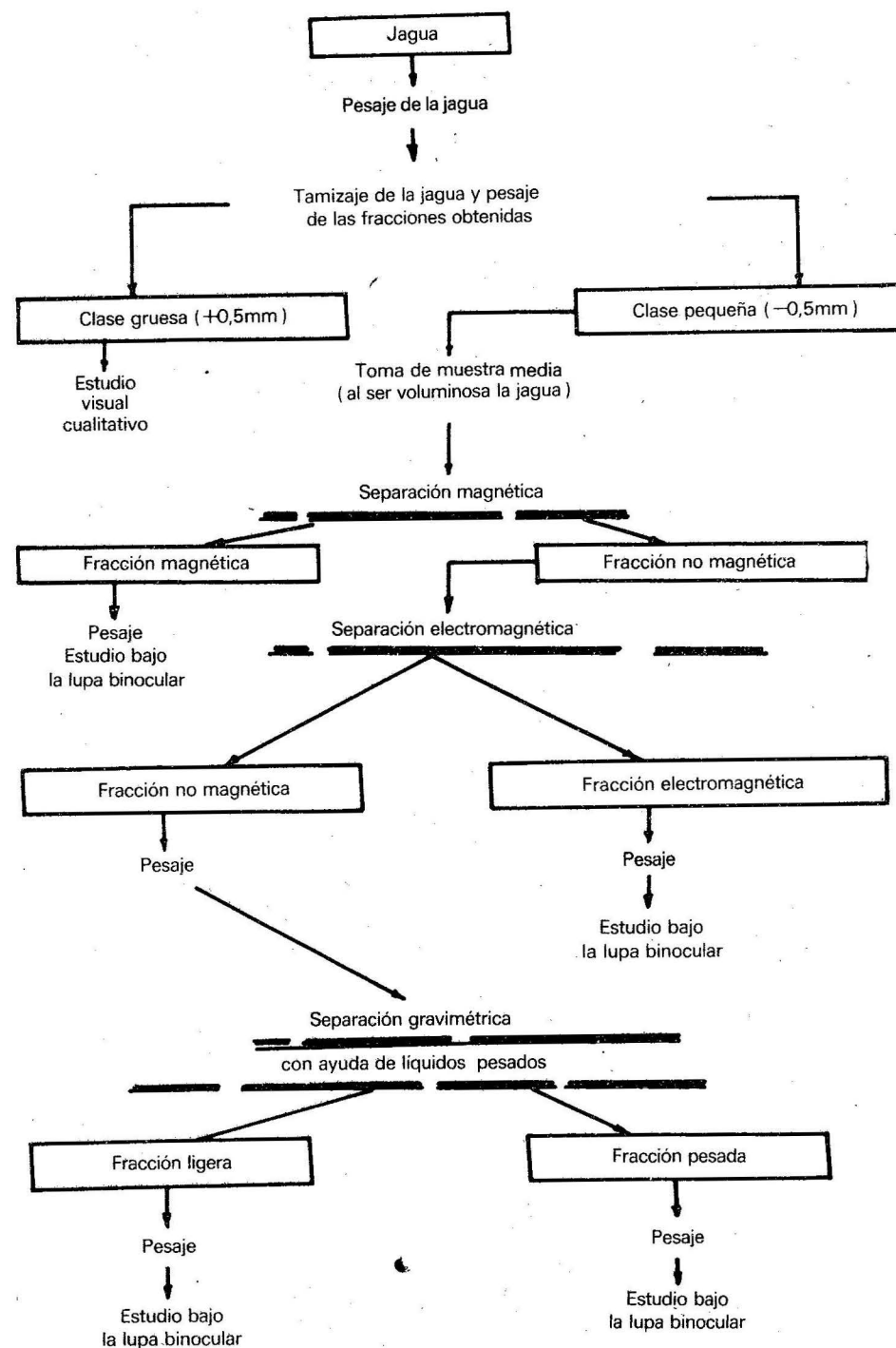


Fig. 3.22 Esquema del estudio de jaguas

La fracción fina o su muestra media se subdivide en diferentes fracciones utilizando las propiedades físicas de los minerales (fracciones magnética, electromagnética, pesada y ligera). Los minerales más característicos de cada fracción son los siguientes:

Fracción magnética: magnetita, titanomagnetita, pirrotina parcialmente platino.

Fracción electromagnética: cromita, hematita, ilmenita, wolframita, granates, anfíboles, piroxenos, turmalina.

Fracción pesada: oro, platino, casiterita, scheelita, monacita, circón, rutilo, sulfuros, siderita, corindón, diamante, apatito, esfena, barita, topacio.

Fracción ligera: minerales petrogénicos cuya eliminación de la jagua resultó incompleta; éstos no tienen ninguna importancia particular desde el punto de vista de la búsqueda de minerales útiles.

La determinación de los minerales de cada fracción se realiza estudiando estas bajo la lupa o microscopio binoculares y utilizando métodos complementarios: reacciones microquímicas, análisis röntgeno-estructurales, estudio luminiscente, medida de las constantes ópticas por el método de inmersión, etc. Además, conviene estudiar y describir los agregados minerales, forma y hábito de los cristales intactos y el grado de redondeamiento de los fragmentos.

No obstante, la determinación cualitativa de minerales es insuficiente y debe completarse por el cálculo de su cantidad relativa en la fracción correspondiente, lo que se ejecuta, bajo la lupa o el microscopio, contando el número de granos de cada mineral por mm de la jagua debidamente mezclada y colocada en forma de banda estrecha. La cantidad relativa del mineral se puede expresar como el número de granos por jagua, índices convencionales (signos únicos, poco, mucho) o puntos de la escala convencional. Más raramente, si la concentración del mineral es muy elevada, se realiza el cálculo de su contenido en peso que se evalúa generalmente en gramos (kilogramos) por metro cúbico o en porcentaje de la jagua.

La vía principal de generalización de los resultados de la búsqueda por el método de jagua consiste en la confección de mapas de jagua, en los cuales se reflejan, no solo la composición mineral de la jagua sino también sus regularidades de distribución y concentración en los depósitos friables dentro de la región investigada. Durante la búsqueda general se utilizan con más frecuencia los mapas de puntos, círculos y bandas. Los primeros se obtienen mediante la señalización de los minerales valiosos encontrados (a veces incluso sus contenidos relativos en las muestras) junto a los puntos de toma de muestra de jagua. Estos mapas son fáciles de confeccionar, pero poco demostrativos y se comprenden con dificultad, sobre todo si en las jaguas se observan al mismo tiempo varios minerales valiosos (fig. 3.23)

En los mapas de círculos (fig. 3.24), en cada punto de toma de muestras se dibuja un círculo cuyo diámetro es proporcional al peso de la jagua obtenida. El círculo se subdivide en sectores que corresponden a los minerales pesados y tienen su coloración apropiada; el área coloreada del sector refleja la cantidad relativa del mineral en cuestión.

Con este objetivo se utiliza la siguiente escala:

Coloración total del sector, si el mineral constituye la masa principal de la jagua.

Coloración de la mitad del sector si se detectan muchos granos del mineral (más de una decena).

Coloración de una cuarta del sector si en la jagua se encuentra un solo grano del mineral.

Sector no coloreado en caso de ausencia del mineral.

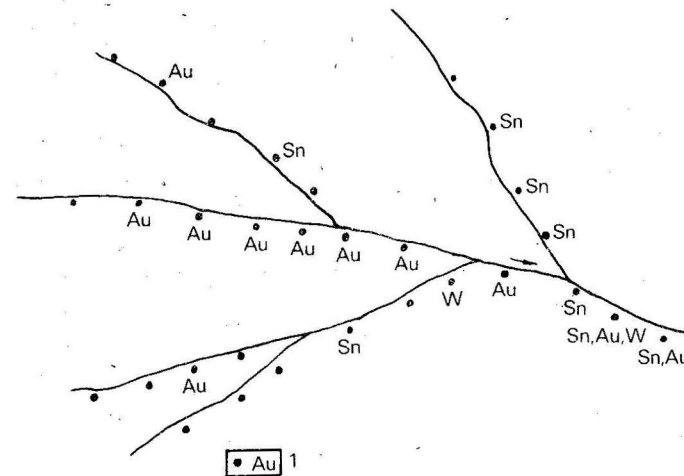


Fig. 3.23 Esquema del mapa de puntos: 1- punto de toma de muestra de jagua y minerales valiosos encontrados en ella

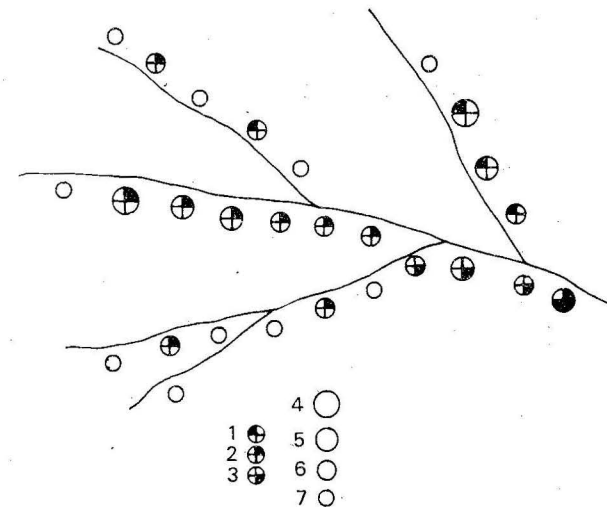


Fig. 3.24 Esquema del mapa de círculos: 1- casiterita; 2- oro; 3- scheelita; 4- mineral que constituye la masa principal de la jagua; 5- más de 10 granos de mineral; 6- granos únicos; 7- mineral ausente

También existe otra variedad de dichos mapas, en los cuales la cantidad relativa del mineral valioso se expresa por el tamaño relativo del sector correspondiente cuando estos están coloreados totalmente.

Los mapas de círculos son más demostrativos y se utilizan frecuentemente en la práctica de los trabajos de búsqueda, pero los círculos ocupan una parte considerable del mapa, lo que resulta incómodo, especialmente en el caso de los mapas a escala media o pequeña.

Los mapas más cómodos son los de bandas (fig. 3.25).

Para confeccionarlos, en los puntos de toma de muestras se dibujan perpendiculares al lecho del río, de manera tal que su largo corresponda a la cantidad de mineral representado en la muestra. Al unir entre sí las extremidades de dichas perpendiculares se obtienen las bandas que demuestran claramente las variaciones del contenido del mineral en los depósitos friables a lo largo del valle. Para diferentes minerales se aplica una coloración distinta o el rayado de diversos tipos. No obstante, si el número de minerales valiosos es grande, estos mapas pierden su carácter demostrativo y se recomienda subdividir el conjunto de minerales confeccionando varios mapas de bandas para la misma área.

Como la búsqueda detallada mediante el método de jagua se realiza dentro de áreas bastante limitadas y las muestras se toman según una red geométrica más o menos regular, la mejor forma de generalizar sus resultados es la confección de los mapas de jagua en isolíneas de contenido de minerales valiosos.

En los mapas de jagua de cualquier tipo se señalan, sin falta, no solo los resultados del estudio de las muestras sino también los criterios e índices de búsqueda principales, las intrusiones magmáticas probablemente meníferas, horizontes favorables o pantallas, fallas, estructuras plicativas favorables, zonas de alteración de las rocas vinculadas a la meniferación, filones estériles, afloramiento de minerales útiles, rastros de los trabajos mineros antiguos y anomalías geofísicas y geoquímicas.

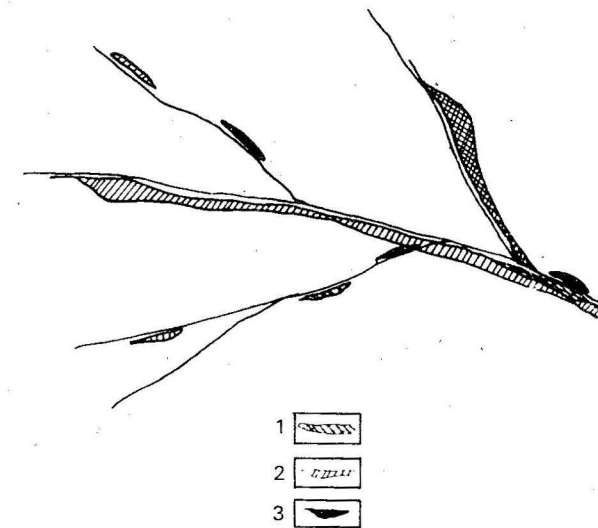


Fig. 3.25 Esquema del mapa de bandas: 1- casiterita; 2- oro; 3- scheelita

Como la acumulación de los minerales pesados en los depósitos friables depende mucho de las condiciones geomorfológicas, los mapas de jagua deben acompañarse de los mapas geomorfológicos y de depósitos del Cuaternario.

El análisis de los mapas de jagua, si se tiene en cuenta la situación geológica y geomorfológica de la región, permite revelar tanto las fuentes primarias de minerales pesados como sus concentraciones secundarias que representan a los placeres. Los últimos son los más fáciles de descubrir, ya que corresponden a sectores de los valles, donde se confirma el contenido elevado de minerales valiosos en el aluvión o deluvión, que alcanza el nivel mínimo industrial o se aproxima a este. La condición necesaria para la existencia de los placeres es la situación geomorfológica favorable que asegure la acumulación de una masa considerable de material fragmentario y la deposición de minerales pesados.

Los factores que se pueden considerar como índice de la existencia de las manifestaciones o yacimientos minerales primarios en la cercanía de las zonas de jagua son los siguientes:

1. Concentraciones bien marcadas de minerales valiosos en algunos sectores del valle y su reducción brusca corriente arriba.
2. Criterios e índices de búsqueda favorables para la existencia de las manifestaciones primarias correspondientes.
3. Asociaciones minerales en las jaguas, que son características para las formaciones meníferas supuestas o ya descubiertas en la región investigada.
4. Bajo grado de redondeamiento de los granos minerales y su tamaño considerable; presencia en la jagua de agregados minerales o minerales inestables en condiciones exógenas (sobre todo de los sulfuros).
5. Hallazgos en las jaguas de minerales satélites, típicos para los yacimientos primarios de mineral útil.

A partir del complejo de minerales encontrados en la jagua y sus índices exteriores, también se puede establecer el tipo genético probable de la manifestación mineral primaria. Así, los granos gruesos (más de 10 mm) de casiterita de color claro y hábito columnar corto, en asociación con la wolframita, topacio, turmalina, berilo y fluorita, señalan objetos meníferos de la formación cuarzo-casiterítica; mientras que los pequeños (2 a 3 mm) alargados, de la misma coloración, con magnetita, granate, turmalina y a veces sulfuros, sugieren la presencia de la formación sulfuro-casiterítica. En cuanto a los yacimientos estanníferos de la formación pegmatítica, estos se caracterizan en las jaguas por asociaciones de la casiterita negra y parda oscura de tamaño medio (7 a 8 mm), en granos más o menos isométricos, con columbita, tantalita, espodumena, turmalina, monacita y wolframita. La presencia en la jagua de piropo, picroilmenita y cromodiopsido permite suponer la existencia de tubos kimberlíticos diamantíferos.

Además de resolver las tareas vinculadas inmediatamente con la búsqueda de minerales útiles, el método de jagua también da la posibilidad de precisar la delimitación de las áreas de extensión de diferentes complejos de rocas en la región que se estudia, utilizando las asociaciones típicas de minerales accesorios que se encuentran en las jaguas. Por ejemplo, en las zonas de amplio desarrollo de rocas magmáticas ultrabásicas predominan en la jagua, olvino, piroxenos, cromita y magnetita; en las áreas de rocas magmáticas ácidas y medias se localiza una gran cantidad de wolframita, monacita, circón, granate, apatito, magnetita, ilmenita y

casiterita; los contactos de los granitoides con las rocas arcillosas se señalan por la presencia en la jagua de cordierita, andalusita, estauroлита, rutilo, espinela, turmalina y granate; mientras que en el caso de rocas carbonatadas estos contactos se suponen por los piroxenos, esfena, vesuviana, espinela, magnetita, perovskita y rutilo; para los esquistos y gneiss, la cianita, andalusita, estauroлита, corindón, granate, piroxenos, anfíboles y cordierita son muy característicos en las jaguas.

El método de jagua se aplica desde la antigüedad, es bastante sencillo y preciso, y asegura la revelación de contenidos bajos e insignificantes de minerales pesados en los depósitos friables (hasta $n \cdot 10^{-5} \%$). Mediante este método se han descubierto muchos yacimientos de oro, platino, estaño, wolframio, diamante, metales raros, mercurio, cromo y otros. Sin embargo, hay que admitir que en los últimos tiempos el papel predominante lo desempeñan los métodos de búsqueda geoquímicos, principalmente porque la ejecución del método descrito requiere mucha mano de obra y las investigaciones de las jaguas demoran mucho en el laboratorio. A pesar de esto, el método es insustituible para el estudio de las aureolas y flujos de dispersión mineralógicos y desde el punto de vista de la búsqueda, es muy importante.

Métodos de búsqueda que utilizan las aureolas y los flujos de dispersión geoquímicos

Los métodos de búsqueda geoquímicos son relativamente jóvenes (menos de 50 años), pero ya ocupan el primer lugar entre los otros métodos. Se utilizan ampliamente en los trabajos de búsqueda y exploración y sus perspectivas futuras son muy buenas. Las ventajas principales de estos métodos son: la simplicidad de la toma de muestras, la rapidez y bajo costo de los análisis, la posibilidad de establecer los contenidos de muchos elementos en la misma muestra y al mismo tiempo la capacidad de revelar contenidos insignificantes de diferentes elementos químicos y la suficiente certeza en los resultados. Por consiguiente, dichos métodos de búsqueda son muy eficientes, sobre todo para el estudio de contenidos extremadamente bajos de la materia menífera finamente dispersa en las aureolas y flujos de dispersión invisibles, los cuales no se detectan por ningún otro método de búsqueda.

Según el carácter de las aureolas y flujos de dispersión que ellos utilizan, los métodos geoquímicos de búsqueda se subdividen en: litogeoquímico, hidroggeoquímico, atmogeoquímico y biogeoquímico.

Método litogeoquímico

Este método se basa en el estudio de las aureolas de dispersión primarias, así como las aureolas y los flujos de dispersión litogeoquímicos secundarios, los cuales representan áreas con contenidos anómalos de unos u otros elementos en comparación con el fondo normal de la región.

Las aureolas de dispersión primarias permiten revelar, durante la búsqueda, los cuerpos minerales que no afloran a la superficie de erosión de las rocas del basamento. Para conseguir este resultado dichas rocas se pueden estudiar, tanto en sus afloramientos en la superficie actual como en la profundidad, mediante po-

zos de perforación y laboreos mineros. Estas aureolas se utilizan con mayor éxito en el caso de la búsqueda de minerales útiles postmagmáticos.

Las muestras litogeoquímicas de las aureolas primarias se toman de las rocas *in situ*, prestando la máxima atención a los sectores más favorables para la localización de la mineralización útil: zonas de fallas o agrietamiento; rocas alteradas por los procesos hidrotermales; horizontes litológicamente favorables; contactos de las rocas magmáticas y sedimentarias, etc. Al mismo tiempo, hay que realizar el muestreo dentro de las rocas no alteradas para establecer el fondo normal de los contenidos de elementos importantes que se deben estudiar en la región. Los mejores resultados se obtienen si las muestras se toman constante y regularmente según perfiles orientados transversalmente al rumbo de las zonas favorables. Al hacerlo, se aplica el método de surco punteado, tomando, cada 3 a 5 m del perfil, una muestra de fragmentos de roca cuya masa oscile entre 20 y 30 g, y que se colocan una de otra a una distancia del orden de 0,5 m. Los límites de las muestras se trazan teniendo en cuenta la posición de los contornos geológicos. Se recomienda tomar, de manera análoga, las muestras litogeoquímicas, a partir del testigo o lodo de los pozos de perforación, en las trincheras y excavaciones subterráneas.

Durante el estudio de las aureolas de dispersión primarias que se manifiestan en la superficie actual, también se pueden tomar muestras de trozo con una masa de 50 a 100 g, en puntos ubicados según una red geométrica más o menos regular.

La distancia entre estos puntos debe ser de unas centenas de metros en la dirección del rumbo de las estructuras geológicas y unas decenas de metros en dirección transversal.

Las muestras tomadas se trituran, hasta que las partículas tengan un diámetro inferior a 0,1 mm, se tamizan, mezclan y dividen por cuarteamiento en dos partes, una de las cuales sirve como duplicado y la otra se mezcla minuciosamente una vez más, se aplanan y se utiliza para tomar una porción de una masa de 10 g, por el método de puntos, mediante la red cuadrada. Esta porción, después de ser triturada hasta obtener partículas inferiores a 0,07 mm, se somete al análisis espectral semicuantitativo que generalmente está orientado hacia los siguientes elementos químicos: Li, Rb, B, F, P, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Ge, As, Sr, Zr, Nb, Ta, Mo, Ag, Sn, Sb, Ba, Ce, W, Hg, Bi, U. Este complejo tan amplio de elementos mineragénicos es necesario para revelar la zonalidad primaria posible de las aureolas de dispersión y establecer la posición del nivel de erosión con respecto a la aureola. La aplicación del análisis espectral como método de investigación principal de las muestras litogeoquímicas se aplica por su gran productividad, rapidez, bajo costo, precisión y sensibilidad, posibilidad de obtener a la vez los contenidos de muchos elementos químicos y simplicidad del trabajo con los aparatos correspondientes.

Mediante las aureolas y flujos de dispersión secundarios es posible descubrir los cuerpos minerales que participan del ciclo de erosión actual o fueron objeto de erosión durante las épocas geológicas antiguas. En este caso las muestras litogeoquímicas se deben tomar en la fracción fina de los depósitos friables donde se fijan las aureolas de dispersión salinas.

Si las aureolas y flujos de dispersión son de tipo abierto y se localizan en los depósitos aluviales, deluviales y glaciales de poca potencia (hasta 5 a 10 m) las muestras se toman a una pequeña profundidad: desde la superficie actual hasta 10 a 20 cm, en las regiones áridas con desarrollo de los suelos alcalinos y neutros

o a la profundidad de 50 cm en la zona forestal del clima húmedo con los suelos ácidos.

En este último caso, la posición del horizonte iluvial es variable en función de las condiciones locales, debido a lo cual la zona de concentración máxima de metales en la aureola puede bajar hasta 1,0 m. Al ser así, es recomendable determinar la profundidad de la toma de muestras litogeoquímicas en cada región por vía experimental, mediante el estudio de las regularidades de distribución de diferentes elementos en los depósitos friables en puntos típicos. Esto se realiza sistemáticamente y por pequeños intervalos desde la superficie actual hasta una profundidad de 1,2 a 1,5 m.

Durante la búsqueda general, las muestras litogeoquímicas de los depósitos friables se toman, según itinerarios geológicos, a una distancia de 50 a 100 m una de otra, prestando atención especial al estudio de los depósitos de las pendientes suaves y divisorias de las aguas niveladas. Al realizar la búsqueda detallada, las muestras se toman en una red rectangular, cuyo lado corto se orienta transversalmente al rumbo de las estructuras geológicas, la extensión de los cuerpos minerales supuestos o sus flujos de dispersión. Las distancias recomendadas entre los puntos de toma de muestras litogeoquímicas en este caso dependen de la escala de los trabajos geológicos (tabla 3.6).

Tabla 3.6

DENSIDAD RECOMENDADA DE LA RED DE MUESTREO LITOGEOQUÍMICO DE LAS AUREOLAS Y FLUJOS DE DISPERSIÓN SECUNDARIOS

Escala de los trabajos geológicos	Distancia entre los perfiles, m	Distancia entre las muestras en el perfil, m	Número de puntos por kilómetro cuadrado
1:25 000	250	25	160
1:10 000	100	20	500
1:5 000	50	10	2 000
1:2 000	20	10	5 000

Como muestra se toma la fracción de los depósitos friables con diámetro de las partículas inferior a 3 mm y una masa entre 20 y 50 g, siendo obligatoria la presencia de las partículas inferiores a 0,5 mm. Después de secarlas, las muestras se someten al cribado por tamices con aberturas de 0,5 mm. La fracción fina, cuyo peso debe ser superior a 10 o 15g, se tritura hasta pasar por el tamiz de 0,7 mm y se somete al análisis espectral semicuantitativo. Al principio de la búsqueda, el complejo de elementos químicos que se determina es el mismo que en el caso del estudio de las aureolas de dispersión primarias. Luego, a medida que se precisa la situación geoquímica general de la región y el conjunto de elementos aureologénicos principales, los análisis espectrales se orientan a un número reducido de elementos (10 a 15 generalmente).

Si la potencia de los depósitos friables es considerable, las aureolas de dispersión secundarias no se manifiestan en la superficie actual y, por consiguiente, para su revelación hay que tomar las muestras litogeoquímicas mediante los pozos de perforación, en las cercanías del límite entre las rocas productivas y las supra-

yacentes, incluyendo los horizontes superiores de la corteza de intemperismo antiguo. Como el volumen de los trabajos de perforación en este caso llega a ser muy grande, el método litogeoquímico se aplica en estas condiciones solo para la búsqueda general a escalas de 1:50 000 a 1:200 000; para esto se utilizan los pozos de la cartografía geológica.

Los flujos de dispersión geoquímicos secundarios en los depósitos aluviales son interesantes desde el punto de vista de la búsqueda, en el caso tanto de las corrientes temporales como de los ríos, salvo las grandes (más de 20 a 25 km de largo), en cuyo aluvión los contenidos de elementos mineragénicos disminuye rápidamente hasta los valores de fondo. Además, los flujos de dispersión proluviales se utilizan con gran resultado. Al estudio de todos estos tipos de flujos de dispersión se le llama generalmente *búsqueda mediante los sedimentos de fondo*. Para realizarlo, las muestras se toman de los depósitos de lecho, a una distancia de 250 m una de otra, en la dirección del flujo de dispersión. Cuando estas muestras señalan el hallazgo del flujo de dispersión concreto, el intervalo entre ellas disminuye hasta 50 a 100 m. La muestra se constituye de la fracción fina de los depósitos friables (menos de 3 mm de diámetro), cuya masa varía de 20 a 50 g, con el objetivo de obtener de 10 a 15 g de la fracción inferior a 0,5 mm. El tratamiento y análisis de las muestras son análogos a las operaciones correspondientes para las muestras de los depósitos eluviales, deluviales y glaciales.

La generalización e interpretación de los resultados del método litogeoquímico de búsqueda consiste en la confección de los perfiles o mapas geoquímicos; estos representan los contenidos de elementos principales bajo la forma de isóneas. El análisis de estos materiales gráficos permite delimitar las zonas de contenidos anómalos correspondientes a las aureolas y flujos de dispersión. Generalmente el contenido anormal mínimo C_a , que determina el contorno exterior, se calcula mediante la siguiente fórmula, válida en el caso de la distribución normal de los contenidos de fondo:

$$C_a = C_f + 3\sigma \quad (101)$$

donde:

C_f - contenido medio aritmético del elemento químico en las rocas de las áreas no meníferas;

σ - desviación cuadrática media de los contenidos de fondo de su valor promedio.

Resulta cómodo expresar los contenidos anómalos en unidades de fondo.

Desde el punto de vista de la búsqueda, las más importantes son las anomalías litogeoquímicas de tipo lineal o superficial; las de punto, en la mayoría de los casos, no tienen interés práctico. Además, es necesario saber distinguir las anomalías litogeoquímicas secundarias mineragénicas (vinculadas a los cuerpos minerales) de las petrogénicas (determinadas por las particularidades de la configuración del terreno). Esto es de suma importancia, sobre todo durante la búsqueda detallada y los trabajos de búsqueda evaluativa. El método más seguro para revelar las anomalías petrogénicas consiste en la confección de los mapas del paisaje geoquímico a gran escala (1:25 000 a 1:100 000).

En conclusión, el método litogeoquímico, a pesar de su importancia, tiene una desventaja esencial que consiste en los plazos muy largos de obtención de los resultados del estudio de las muestras, lo que no permite utilizarlos durante el período de los trabajos de campo y lograr una mejor orientación de la búsqueda pos-

terior. Por esta razón hoy día se presta una gran atención a la creación de métodos de análisis de muestras, muy sensibles y rápidos, inmediatamente en el lugar de su toma o hasta sin tomarlas (métodos de radiactivación, de resonancia nuclear, de curvas de polarización de contacto y otros). La puesta en práctica de dichos métodos en los trabajos de búsqueda y exploración permitirá aumentar considerablemente la eficiencia de la búsqueda por la vía litogeoquímica. No obstante, el método en cuestión desempeña un papel fundamental en la búsqueda, y asegura el descubrimiento de numerosos yacimientos de diversos minerales útiles, incluso dentro de áreas donde la utilización previa de otros métodos de búsqueda no condujo a resultados positivos.

Método hidroggeoquímico

Se basa principalmente en los flujos de dispersión hidroggeoquímicos formados en las aguas subterráneas y superficiales y permite revelar la meniferación oculta, a veces a una profundidad considerable. Los objetos de estudio de este método son fuentes, manantiales, corrientes y depósitos de agua superficiales (incluso pantanos), aguas del suelo, freáticas, manifestaciones de agua en los pozos de perforación y excavaciones mineras. Entre las corrientes de agua superficiales la importancia principal la tienen los arroyos y ríos con pequeño caudal, que se alimentan a expensas de las aguas subterráneas, ya que en las más grandes los contenidos de elementos químicos procedentes de los cuerpos minerales disminuye rápidamente hasta los valores de fondo.

Al organizar la búsqueda hidroggeoquímica es preciso tener en cuenta las variaciones de la composición química de las aguas en dependencia de la temporada, así como la posibilidad de surgimiento de anomalías hidroquímicas falsas a causa de la lixiviación de minerales diseminados que no forman acumulaciones industriales o resultantes de la actividad económica del hombre. Los mejores resultados se obtienen en las regiones montañosas donde se pueden revelar los cuerpos encerrados a una gran profundidad (hasta 200 m), debido a la existencia de estructuras geológicas favorables para la circulación de las aguas (fig. 3.26). Además, en estas condiciones de relieve, surge una multitud de fuentes y manantiales y la mineralización de las aguas permite destacar fácilmente los contenidos anómalos de elementos químicos. La contaminación de las aguas con residuos industriales es insignificante o no existe. En condiciones de peniplanicie accidentada este método es muy bueno para revelar los yacimientos enterrados bajo la potente cobertura de depósitos friables (fig. 3.27).

Los yacimientos sulfurados representan los mejores objetos para la aplicación del método hidroggeoquímico, por cuanto la oxidación de los sulfuros provoca una gran variación de la composición química de las aguas naturales. Este método también es muy eficiente para revelar las acumulaciones de menas de uranio, níquel, cobalto, cromo, vanadio, litio y berilio. Por otra parte, la presencia permanente del hierro y el manganeso en las aguas naturales, en cantidades notables, obstaculiza la utilización eficiente del método para la búsqueda de dichos minerales útiles. El método hidroggeoquímico da los mejores resultados durante la búsqueda general y permite esclarecer rápidamente las particularidades de la especialización metalogénica de la región.

Durante el levantamiento geológico regional a escala 1:250 000 a 1:100 000 el muestreo hidroggeoquímico se realiza mayormente utilizando las corrientes de agua superficiales, así como las fuentes y manantiales en sus valles, y tiene como

objetivo la revelación de grandes anomalías hidrogeoquímicas. En función de la complejidad de la constitución geológica del terreno y el desarrollo del sistema fluvial, una muestra puede caracterizar un área de 2 a 5 km². En primer lugar, las muestras de agua hay que tomarlas en los sectores donde el valle atraviesa las rocas alteradas por los procesos mineragénicos, contactos de los macizos intrusivos y fallas.

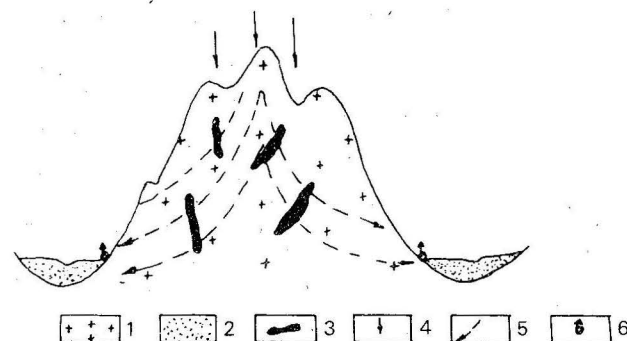


Fig. 3.26 Anomalías hidroquímicas vinculadas con cuerpos minerales "ciegos" en una región montañosa: 1- rocas del basamento; 2- depósitos aluviales; 3- cuerpos minerales "ciegos"; 4- precipitaciones atmosféricas; 5- aguas subterráneas; 6- fuentes

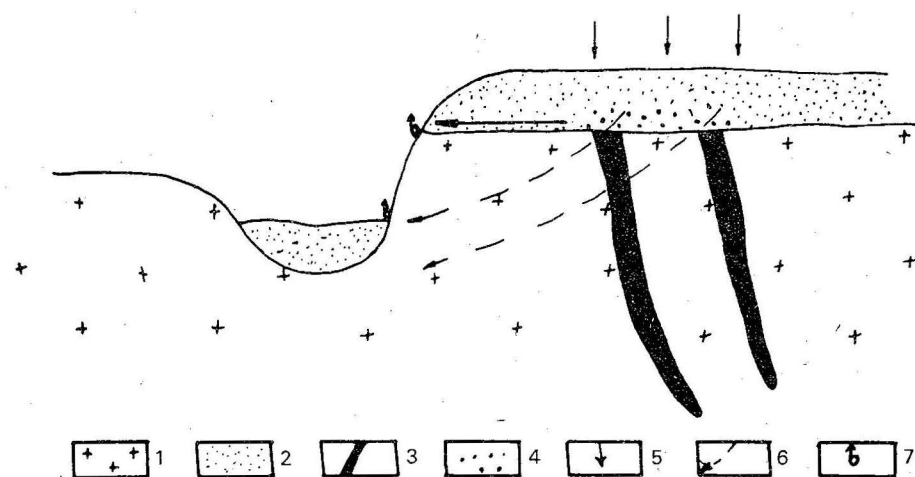


Fig. 3.27 Anomalías hidroquímicas vinculadas con un yacimiento enterrado y su aureola de dispersión secundaria en condiciones de peniplanicie accidentada: 1- rocas del basamento; 2- depósitos friables; 3- cuerpos minerales; 4- aureola de dispersión secundaria enterrada; 5- precipitaciones atmosféricas y aguas subterráneas con el contenido de fondo de metales de interés; 6- aguas subterráneas de la aureola hidroquímica; 7- manantiales

El muestreo hidrogeoquímico a escala 1:50 000 tiene como objetivo el descubrimiento de las aureolas o flujos de dispersión hidrogeoquímicos de la menifera- ción oculta. Para conseguir este resultado las muestras se toman principalmente de las aguas subterráneas (fuentes, manantiales, pozos criollos, pozos de perfora- ción, etc.) y solo si sus manifestaciones son insuficientes se realiza el muestreo de las corrientes y depósitos de agua superficiales. El número de muestras oscila en- tre 2 y 3 por kilómetro cuadrado de territorio.

El levantamiento hidrogeoquímico a escalas más grandes (hasta 1:5 000) se organiza dentro de las áreas especialmente favorables para la localización de la menifera- ción o con el objetivo de esclarecer la naturaleza de las anomalías hidro- geoquímicas reveladas anteriormente. Dicho estudio se realiza tomando las mues- tras de todas las manifestaciones acuáticas en la superficie actual, así como en to- dos los pozos de perforación y excavaciones mineras. La distancia entre puntos del muestreo no debe sobrepasar 1 cm en el mapa a la escala correspondiente con la condición de que su ubicación espacial sea más o menos regular.

La muestra de agua de un volumen de 0,1 a 1,0 L, en dependencia de la can- tidad del residuo seco del agua, se coloca en un recipiente de vidrio o de plástico, lavado y secado previamente, y se cierra enseguida herméticamente para evitar las variaciones de su composición química y contenido de gases disueltos. Al mis- mo tiempo, hay que medir la temperatura del agua y la del aire y anotarlas. La toma de las muestras debe realizarse en plazos cortos y preferentemente durante el período de transición, cuando las concentraciones de elementos mineragénicos en las aguas, tanto subterráneas como superficiales, son máximas.

El análisis preliminar de las muestras hidrogeoquímicas se ejecuta directamen- te en el campo con ayuda del laboratorio portátil PGL-RS-2 (producción soviéti- ca) y se determinan los contenidos de aniones SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , el valor del pH y la suma de metales (lo último por el modo ditizónico). En la base de la brigada geológica o en los laboratorios estacionarios apropiados se realizan los análisis completos (en el caso de las investigaciones de reconocimiento) o selectivos (du- rante la búsqueda general y detallada) del agua, por el método químico, polaro- gráfico o espectral.

Los resultados del levantamiento hidrogeoquímico se generalizan en forma de mapas de isolíneas del contenido de diferentes elementos químicos. Los flujos de dispersión hidroquímicos se delimitan en dichos mapas utilizando el contenido anómalo mínimo calculado según la fórmula (101). Además, se pueden confeccio- nar diferentes perfiles hidrogeoquímicos. La posible posición de los cuerpos mi- nerales se supone teniendo en cuenta la constitución geológica del terreno y la di- rección de movimiento de las aguas superficiales y subterráneas. Al interpretar los resultados del método hidrogeoquímico de búsqueda, es importante establecer correctamente la naturaleza de las anomalías, es decir, si pertenecen a las mení- feras o a las no meníferas. En este sentido es útil recordar que las primeras se caracterizan por un complejo más variado de elementos: indicadores tanto direc- tos como indirectos, aumento de los contenidos de la mayoría de los componentes meníferos en las aguas a medida que se aproximan al cuerpo mineral, constitu- ción zonal regular, presencia más frecuente de elementos raros y dispersados ca- racterísticos para la formación menífera posible.

Una variedad del método en cuestión es el método hidrogeoquímico de suelo, que se basa en el estudio de combinaciones químicas solubles de los suelos. En este caso, las muestras hay que tomarlas a una profundidad de 0,2' a 0,3 m, me- diante una red rectangular análoga a la utilizada en el método litogeoquímico. La

masa de la muestra varía de 200 a 300 g, con el objetivo de obtener, después de secar y tamizar la muestra, la fracción con diámetro de partículas inferior a 3 mm en la cantidad de 100 a 150 g.

A partir de esta fracción se preparan los extractos acuosos que luego se someten a concentración y el residuo seco resultante pasa al análisis espectral que da los contenidos de elementos meníferos y elementos-indicadores. Dicho método permite descubrir los cuerpos minerales ciegos y enterrados a una profundidad de 40 a 60 m. Ya se ha acumulado experiencia exitosa en su aplicación para la búsqueda de menas polimetálicas de cobre, molibdeno, y pegmatitas con metales raros, mediante las aureolas de litio y rubidio.

El método hidrogeoquímico de suelo inicialmente fue propuesto como complemento del método hidrogeoquímico propiamente dicho, en las regiones poco húmedas. Sin embargo, como su esencia consiste en la revelación de las aureolas salinas débiles en la parte superior de los depósitos friables, es más correcto considerarlo como el complemento del método litogeoquímico basado en las aureolas y flujos de dispersión secundarios. Además, se puede utilizar con éxito en las regiones húmedas, como lo atestigua la experiencia de su aplicación práctica en la península de Kola.

Método atmogeoquímico

La utilización de las aureolas y los flujos de dispersión que se forman en el aire del suelo o los horizontes interiores de la atmósfera se ha aplicado hasta ahora solamente para la búsqueda de minerales útiles radiactivos y combustibles. En el caso de las menas radiactivas, la búsqueda mediante este método se nombra levantamiento de emanación.

El levantamiento de emanación se ejecuta según una red regular, cuya densidad para diferentes escalas de los trabajos, es análoga a la que se utiliza para tomar las muestras litogeoquímicas en el caso de las aureolas y flujos de dispersión secundarios. En los puntos de dicha red se hace penetrar una sonda especial en el suelo hasta una profundidad de 1,0 a 1,5 m, destinada a capturar los gases, que van a parar a recipientes apropiados. Luego se efectúa el análisis radiométrico de estas muestras de aire para determinar el contenido de los elementos radiactivos radón y torón. Este análisis es muy sensible, y permite revelar las anomalías correspondientes a un contenido de uranio en la roca, del orden de 0,0001%. Hay que tener en cuenta que el torón es muy inestable y por eso se detecta siempre en la proximidad inmediata de los cuerpos que constituyen las fuentes de las emanaciones, mientras que el radón, cuya vida se prolonga cinco días, puede alejarse de 5 a 8 m del objeto menífero, a causa de la difusión. Lo expuesto limita la profundidad hasta la cual el método atmogeoquímico es válido. Como regla este se utiliza para la búsqueda de cuerpos minerales enterrados bajo la cobertura de rocas friables con potencia inferior a 5 a 7 m, excepto los casos en que las fallas o zonas agrietadas aumentan de manera considerable la capacidad de migración de los gases.

La confección de los mapas del levantamiento de emanación en isolíneas de concentración de los gases radiactivos y la determinación de la concentración anómala mínima mediante la fórmula (101), permiten delimitar las aureolas de dispersión atmogeoquímicas que deben controlarse con posterioridad para comprobar la presencia de minerales útiles radiactivos u otros que contienen dichos elementos como accesorios (pegmatitas, placeres titano-circoníferos, fosforitas).

La búsqueda de minerales útiles combustibles mediante dicho método es completamente análoga a la anterior, con una sola excepción: en las muestras del aire se determina el contenido de hidrocarburos gaseosos.

La utilización de los flujos de dispersión atmogeoquímicos en la atmósfera comenzó recientemente en EE.UU. Con este objetivo fueron construidos aparatos de alta sensibilidad para las observaciones aéreas. Mediante vuelos de aviones o helicópteros especialmente equipados, a alturas de 50 a 60 m, se revelan contenidos muy bajos de productos gaseosos metaloorgánicos, orgánicos y radiactivos, procedentes de la descomposición de los cuerpos minerales. Esta variedad del método atmogeoquímico da buenos resultados para las áreas semiáridas con una vegetación más o menos abundante en el caso de la búsqueda de yacimientos polimetálicos, cupríferos, de mercurio, de metales raros, menas radiactivas y caustobolitos.

Método biogeoquímico

Las aureolas de dispersión biogeoquímicas se utilizan en los casos en que el método litogeoquímico de búsqueda es ineficaz. Estas condiciones corresponden al desarrollo de los depósitos friables de fragmentos muy grandes o con gran potencia de la coraza en el clima tropical húmedo, en los terrenos empantanados o con gran potencia de turba. El método biogeoquímico permite revelar los cuerpos minerales que yacen a una profundidad del orden de 15 a 20 m y hasta 40 o 50 m en condiciones especialmente favorables (las plantas con un sistema radicular profundo y el ascenso intenso de las soluciones por vía capilar).

Este método consiste en la toma de muestras de vegetación, tanto activa como muerta (según una red regular cuya densidad corresponde a la de la red que se aplica para estudiar las aureolas y flujos de dispersión litogeoquímicos secundarios), la calcinación de tales muestras y el análisis espectral de las cenizas obtenidas. A este muestreo sistemático debe preceder un reconocimiento de la región mediante perfiles, con el objetivo de esclarecer las regularidades que controlan la concentración de los elementos en unas u otras plantas, sus diferentes partes, humus, suelo, turba, etc. Sobre esta base, se seleccionan los objetos del muestreo.

Para la toma de muestras se utilizan las plantas de la misma especie y edad que no muestran inclinación especial a la concentración de los elementos investigados. En el caso de las plantas perennes del tipo de las hierbas, se toma toda su parte epigea mientras que las partes más utilizables de los árboles o arbustos son las ramas de dos años de edad o el follaje. Las hierbas anuales se toman por completo. En los pantanos con poca potencia de turba los mejores resultados se obtienen mediante el muestreo de la vegetación activa y si la turba es potente y espesa el muestreo de esta es preferible, sobre todo en los horizontes profundos. El peso inicial de las muestras biogeoquímicas debe ser superior a 50 a 100 g y puede alcanzar de 400 a 500 g si se necesitan los análisis de alta precisión. Todas las muestras hay que tomarlas durante la misma temporada y en plazos muy breves. Al tomar las muestras, se excluyen todas las áreas donde se detecta alguna contaminación de tipo agrícola, industrial o doméstica. Se considera como punto de toma de la muestra biogeoquímica un terreno cuya superficie corresponde a 25 m² en la zona forestal, 5 m² en la de desiertos o semidesiertos, 1 a 3 m² en la estepa y 1 m² en los prados y pantanos.

La calcinación de las muestras se ejecuta en hornos especiales a temperatura inferior a 500 °C, para evitar la pérdida de elementos con capacidad elevada de formar compuestos volátiles (Hg, As, Sb, W, Mo, Ge, y otros).

Los resultados del método biogeoquímico de búsqueda se generalizan confeccionando los perfiles biogeoquímicos y mapas de isolíneas y la metodología de su interpretación no se diferencia de la de los resultados del muestreo litogeoquímico. Hasta el momento se ha acumulado una experiencia bastante amplia de la aplicación acertada de dicho método para la búsqueda de diferentes minerales útiles (níquel, cobalto, cobre, plomo, cinc, molibdeno, cromo, uranio, vanadio y otros) en diversas regiones y zonas climáticas (Ural, Tuva, Kazajistán, Asia Central, Cáucaso, EE.UU., Canadá, Finlandia, Suecia, Noruega).

Métodos geofísicos

Estos métodos utilizan las diferencias de las propiedades físicas entre los minerales útiles y sus rocas encajantes. Se aplican con gran resultado y de manera amplia durante todos los estadios de los trabajos de búsqueda y exploración y su metodología se da en los manuales y libros de estudio apropiados. Por eso, aquí solo se pasará revista a las posibilidades de dichos métodos y las condiciones para su utilización durante la búsqueda.

Magnetometría

Este método se basa en las diferencias de la susceptibilidad magnética de las rocas y menas. Las rocas carbonatadas, sales minerales y carbones son prácticamente no magnéticos; las rocas magmáticas ácidas, pegmatitas, aplitas, gneiss, cuarcitas, arenas y arcillas muestran una débil susceptibilidad magnética; las bauxitas, menas hematíticas, anfíbolitas, dioritas y esquistos cloríticos son de susceptibilidad magnética moderada; las rocas magmáticas básicas, algunas cuarcitas ferruginosas, algunas variedades de bauxita y las menas sulfurosas con pirrotina se caracterizan por valores elevados de esta propiedad; las menas magnetíticas y pirrotínicas, cuarcitas ferruginosas, dunitas, peridotitas y piroxenitas se manifiestan como fuertemente magnéticas. Los minerales útiles que yacen dentro de las rocas encajantes pertenecientes a otros grupos, según sus propiedades magnéticas, se revelan fácilmente mediante el método magnetométrico de búsqueda (bauxita dentro de las calizas, magnesita entre las rocas ultrabásicas, etc.). La búsqueda puede realizarse en las variantes terrestres y aéreas y da los mejores resultados en el caso de las menas de hierro, titanio (en los yacimientos primarios y de placeres) de menas cupro-niquelíferas sulfurosas, bauxitas de plataforma y tubos kimberlíticos. El método también permite precisar el límite de las áreas de extensión de diferentes rocas, trazar con más exactitud los límites geológicos, revelar y seguir las fallas, es decir, obtener la información complementaria acerca de los criterios e índices de búsqueda.

Radiometría

La utilización de la radiactividad natural de las rocas y menas, posibilita la delimitación de las áreas constituidas por diferentes complejos de rocas, permite seguir las zonas tectónicas y revelar las menas radiactivas o minerales útiles que contienen como impurezas algunos minerales radiactivos (piroclore, euxenita, monacita, circón, ortita, uraninita y otros).

Según su radiactividad, las rocas, menas y minerales se pueden subdividir en cinco grupos:

1. Prácticamente no radiactivos, cuya radiactividad natural corresponde al contenido de uranio a 0,0001 % (sales minerales, rocas carbonatadas, arenas

cuarcíferas puras, areniscas, cuarcitas, rocas magmáticas básicas intrusivas y ultrabásicas).

2. Radiactivas, cuya radiactividad equivale al contenido de uranio de 0,0001 % a 0,001 % (rocas intrusivas medias y parcialmente ácidas, aleurolitas, margas, areniscas arcósicas).
3. Rocas de alta radiactividad y menas radiactivas muy pobres, cuya radiactividad equivale al contenido de uranio de 0,001 % a 0,01 % (granitos de granos medios y finos, arcillas, esquistos arcillosos y carbonosos).
4. Menas radiactivas pobres con el contenido de uranio equivalente de 0,01 % a 0,1 %.
5. Menas radiactivas ordinarias y ricas cuya radiactividad corresponde al contenido de uranio superior a 0,1 %.

En el método radiométrico se conocen las variantes terrestre (levantamiento gammabeta) y aérea (levantamiento aerogamma). Los levantamientos aéreos se realizan generalmente a escala 1:25 000 y vuelos a una altura de 50 a 70 m, según perfiles paralelos trazados a 250 m uno de otro. Esta metodología asegura la revelación de todas las anomalías cuya superficie sobrepasa el intervalo de 500 a 1 000 m², siempre que la intensidad de la radiación en la superficie o sus proximidades sea superior a 50 gammas. Los levantamientos terrestres se ejecutan a escalas mayores, a pie o con la utilización de vehículos y tienen como objetivo la revelación de manifestaciones minerales radiactivas que afloran en la superficie actual o están enterradas bajo una cobertura poco potente (hasta 5 m) de rocas friables.

Los métodos radiactivos son muy eficientes durante la búsqueda de menas radiactivas de uranio, torio y otros minerales útiles, como los placeres enterrados ilmenito-rutilicos con monacita y circón, pegmatitas con metales raros, fosforitas, menas sedimentarias de molibdeno y vanadio y conglomerados auríferos antiguos.

Electrometría

Los métodos eléctricos se basan en la diferencia de la conductividad eléctrica de las rocas y menas, la cual depende tanto de las propiedades eléctricas de los minerales que las componen como de la porosidad y humedad del agregado mineral. De acuerdo con el valor de la resistencia eléctrica específica (ρ) se conocen cinco grupos de minerales, rocas y menas:

1. De resistencia eléctrica muy baja ($\rho < 1,0$ ohm-metro). Este grupo abarca los metales nativos, grafito, antracita, muchos sulfuros, arenas y rocas arcillosas húmedas.
2. De resistencia eléctrica reducida ($\rho = 1$ a 100 ohm-metro). En este grupo entran algunos sulfuros, así como aleurolitas y margas.
3. De resistencia eléctrica media ($\rho = 100$ a 1 000 ohm-metro). Las menas de hierro, cromita, antimonita, arenas conglomerados y tufobrechas forman parte de este grupo.
4. De resistencia eléctrica elevada ($\rho = 1 000$ a 100 000 ohm-metro). Los miembros de este grupo son casiterita, sales minerales, yeso, caliza, dolomita, tobas, rocas magmáticas y metamórficas, y carbones.
5. De alta resistencia eléctrica ($\rho > 100 000$ ohm-metro). Como tales se conocen cuarzo, fluorita, barita, feldespatos, mica, cinabrio, esfalerita, scheelita, wol-

framita, parcialmente caliza y dolomita y algunas variedades de rocas magmáticas y metamórficas.

Los métodos eléctricos de búsqueda son numerosos y se basan en el estudio de la resistencia eléctrica de sectores delimitados de la corteza terrestre o en la investigación de los campos eléctricos, tanto naturales como artificiales, vinculados a los cuerpos minerales. Dichos métodos permiten no solo revelar los cuerpos minerales concretos, sobre todo los filones cuarcíferos, menas sulfurosas y de metales raros, grafito, sino también realizar la selección de las rocas en el corte geológico según sus propiedades eléctricas, trazar y seguir los límites geológicos, zonas de fallas y horizontes acuíferos.

Gravimetría

Los métodos gravimétricos se basan en el estudio del campo gravitatorio terrestre y permiten seleccionar las áreas constituidas por rocas de diferente densidad, revelar las estructuras geológicas de gran envergadura y los cuerpos minerales cuya densidad es claramente distinta a las de sus rocas encajantes. Por lo general, la gravimetría se utiliza junto con otros métodos geofísicos, ya que las anomalías del campo gravitacional por sí solas con mucha frecuencia no se pueden interpretar definitivamente. El método gravimétrico da buenos resultados durante la búsqueda de menas ricas polimetálicas, de hierro, manganeso, cobre, cromo, tubos kimberlíticos, filones baríticos y sales minerales.

Sismometría

El estudio de las propiedades elásticas de las rocas representa la esencia de este método y posibilita la revelación de estructuras plicativas y disyuntivas de diferente escala dentro del territorio que se investiga. Por eso, la sismometría en sus variantes clásicas se utiliza principalmente para la búsqueda de yacimientos petrolíferos y de gas natural, así como durante el levantamiento geológico. En los últimos tiempos la variedad del método sismométrico denominado método sismoeléctrico (piezoeléctrico) se aplica con mucho éxito para la búsqueda y delimitación aproximada de los filones cuarcíferos y cuerpos pegmatíticos. En este método, las ondas elásticas que surgen como consecuencia de una explosión provocada, se transforman en ondas electromagnéticas, si en las rocas y menas se encuentran minerales piezoeléctricos (cuarzo, turmalina, esfalerita, nefelina). La percepción, grabación e interpretación de las oscilaciones piezoeléctricas y elásticas permite, no solo revelar la existencia de los minerales útiles correspondientes, sino también determinar su profundidad posible de yacencia y la morfología aproximada del cuerpo mineral [34].

El método en cuestión existe en las variantes terrestres y subterráneas; las últimas se aplican tanto en las excavaciones mineras como en los pozos de perforación. Las investigaciones terrestres aseguran la revelación de los objetos meníferos a una profundidad que puede alcanzar de 30 a 40 m, si dichos objetos yacen dentro de las rocas duras masivas, mientras que la cobertura de rocas friables reduce esta profundidad hasta 3 a 5 m. Durante los trabajos con utilización de las excavaciones mineras y pozos de perforación, el radio eficiente de recepción de las oscilaciones piezoeléctricas alcanza de 50 a 100 m y en casos especialmente favorables aumenta hasta 200 a 300 m.

El método sismoeléctrico es eficaz para la búsqueda de yacimientos filoneanos de oro, estaño, wolframio, fluorita, cristal de roca, cuarzo para fundición, así

como para los yacimientos pegmatíticos de moscovita, piedras preciosas y metales raros.

Métodos técnicos

El nombre de este grupo de métodos, hasta cierto punto, es convencional, ya que todos los métodos geofísicos tratados anteriormente necesitan la aplicación de unos u otros medios técnicos. En este grupo se encuentran los métodos que emplean pozos de perforación y excavaciones mineras como medios de búsqueda principales o elementos auxiliares.

Muy pocas veces los laboreos de prospección tienen un papel predominante durante la búsqueda; solo tienen importancia cuando otros métodos son ineficaces y no permiten probar con suficiente certeza la presencia del mineral útil en el subsuelo y determinar su posición espacial. En primer lugar, esto se aplica a la búsqueda de la meniferación oculta, que no se manifiesta por medio de aureolas de dispersión geoquímicas bien marcadas y se localiza dentro de las rocas cuyas propiedades físicas son análogas a las de la mena. Como ejemplo puede servir la búsqueda de pegmatitas micáceas o cerámicas dentro de las series metamórficas, placeres enterrados, yacimientos de plataforma de manganeso, carbón, arcilla refractaria, bauxita, etc. En todos esos casos la búsqueda se realiza generalmente mediante la perforación de numerosos pozos según una red regular o un sistema de perfiles. Las distancias entre los perfiles y los pozos de perforación en estos se establecen de manera tal que no se omita ningún objeto cuyas dimensiones puedan sugerir la idea de su valor industrial posible en un caso general. El tipo de laboreos de prospección (trincheras, pozos criollos, pozos de perforación, etc.), su profundidad y orientación en el espacio dependen de las particularidades de la constitución geológica del terreno, las condiciones de yacencia supuestas de los cuerpos minerales y la potencia de los depósitos friables. Cuando el buzamiento de los cuerpos minerales es abrupto, y la potencia de la cobertura friable es pequeña (hasta 3 a 5 m), se utilizan las trincheras, mientras que si el mineral útil yace a gran profundidad estas ceden su lugar a los pozos de perforación inclinados. Si los cuerpos minerales suaves se encuentran en los primeros 10 m a partir de la superficie actual, es recomendable realizar la búsqueda mediante pozos criollos y cuando la profundidad de yacencia es considerable se recomiendan los pozos de perforación verticales.

Con mucha frecuencia los laboreos de prospección se utilizan como medio auxiliar de búsqueda. En esos casos estos sirven para realizar la búsqueda geoquímica bajo una cobertura potente de rocas friables, tomar las muestras de jagua en los depósitos de terraza, comprobar la naturaleza menífera de las anomalías geofísicas y geoquímicas, encontrar los minerales útiles *in situ* y asegurar su muestreo. El tipo y la ubicación espacial de dichos laboreos de prospección dependen de los mismos factores que en el caso de la aplicación de los pozos de perforación y excavaciones mineras como medios de búsqueda independientes.

3.5 Complejidad de los trabajos de búsqueda

De acuerdo con el principio de la totalidad en la investigación, la complejidad de los trabajos de búsqueda se argumenta a partir de dos puntos de vista:

1. Revelación de todo el complejo de minerales útiles posibles dentro del territorio que se estudia, con la aplicación, en las condiciones concretas de cada re-

2. Selección del complejo óptimo de métodos de búsqueda por cada tipo de materia prima mineral, con el objetivo de revelar con más confianza sus acumulaciones naturales, con gastos mínimos y en plazos más cortos.

Los complejos de minerales útiles formados en diferentes condiciones geológicas (por ejemplo, vinculados a las intrusiones ácidas y ultrabásicas) son totalmente distintos y se caracterizan por diferentes propiedades físicas, particularidades geoquímicas, condiciones de yacencia, etc.; por estas razones su revelación eficaz requiere la aplicación de diversos métodos de búsqueda.

Estas recomendaciones, aunque generalizan la experiencia acumulada y reflejan bastante bien el nivel teórico actual, no pueden considerarse universales y obligatorias y no sirven más que para dar al prospector una orientación general.

Por ejemplo, las menas de hierro metamorfogénicas y de *skarn* se descubren fácilmente por el método de búsqueda magnetométrico, el cual es totalmente ineficaz en el caso de las menas de hierro sedimentarias. Por lo tanto, las recomendaciones para escoger el complejo de métodos de búsqueda más racional, inevitablemente serán de carácter general, si se trata de un tipo concreto de mineral útil. Dichas recomendaciones deben precisarse en cada región, según su situación geológica y los tipos formacionales esperados de yacimientos minerales. En cuanto a las recomendaciones generales, estas se dan para los principales tipos de materia prima mineral de la tabla 3.8, confeccionada de acuerdo con los datos de V.I. Krasnikov (1959) y A.I. Burde (1972), con las modificaciones y complementos necesarios.

Tabla 3.7

COMBINACIONES RACIONALES DE MÉTODOS DE BÚSQUEDA PARA DIFERENTES SITUACIONES GEOLÓGICAS

[illegible]

Tipos de si- tuación geo- lógica		Métodos de búsqueda recomendados											
		Levan- tamien- to geoló-	Visuales	De ja- gua	Litogeo- químico	Hidro- geoquí- mico	Atmoge- químico	Biogeo- químico	Magneto- metría	Radio- metría	Electro- metría	Gravi- metría	Técnicos
Regiones de desarrollo de rocas intrusivas ácidas moderadas	Menas magmáticas, cupríferas, polimetálicas; menas de skarn: de wolframio y molibdeno; oro, antimonio y mercurio; placeres de metales raros	(x)	x	(x)	(x)	x	x	x	(x)	(x)	(x)		x
Regiones de desarrollo de rocas intrusivas ácidas	Menas de cobre, wolframio, oro, molibdeno, estaño, berilio, tantalio y niobio, uranio; placeres de oro, estaño, metales raros, caolín	(x)	x	(x)	(x)	x	x	x		(x)			x
Complejos de rocas efusivas diferentes	Menas piritocupríferas, polimetálicas, auro-argentíferas; espato de Islandia; bauxita	(x)	x	x	(x)		x	x		x	(x)		x
Complejos sedimentarios geosinclinales	Menas sedimentarias de hierro y manganeso, bauxita, fosforita, cobre, menas polimetálicas; magnesita; placeres de titanio y metales raros	(x)	x	(x)	(x)	x	x	x		(x)	x	x	x
Complejos sedimentarios de plataforma	Carbón, bauxita, fosforita; placeres de titanio y metales raros; sales minerales, yeso, rocas carbonatadas	(x)	x	x	x	x		x	x	(x)	x		x
Complejos metamórficos antiguos	Menas metamórficas de hierro y manganeso; conglomerados auro-uraníferos; pegmatitas micáceas; materia prima aluminica; grafito	(x)	x	x	x	x	x		(x)	(x)	x	x	x

NOTA: (x) - métodos principales
x - métodos auxiliares

Pegmatitas con metales raros	(x)	x	(x)	(x)	x				x	x	x		(x)
Pegmatitas micáceas	(x)			x	x					x	x		(x)
Oro	(x)	x	(x)	x						x	x		(x)
Platino	(x)		(x)	x								x	
Placeres de titanio y metales raros	(x)		(x)						(x)			x	(x)
Uranio y torio	(x)		x	(x)	x	(x)	x		(x)				x
Sales minerales	(x)				x		x		x	x		x	x
Carbón	(x)	(x)				x				x			x
Fosforita	(x)	x		x	x				x	x			x
Menas apatito-nefelínicas	(x)	x	x	x	x			x	x	x		x	x
Asbesto	(x)	(x)						x				x	x
Talco	(x)	(x)						x				x	x
Materia prima piezoóptica (cuarzo, fluorita)	(x)	(x)								x	(x)		(x)
Espato de Islandia	(x)	(x)		x				x		x			(x)
Diamante	(x)		(x)					x				x	x
Grafito	(x)	x								x			x

NOTA: (x) - Métodos principales
x - Métodos auxiliares

Tabla 3.8

MÉTODOS DE BÚSQUEDA PARA DIFERENTES TIPOS DE MATERIA PRIMA MINERAL

Mineral útil	Métodos de búsqueda recomendados												
	Levantamiento geológico	Visuales	De agua	Litogeoquímico	Hidroggeoquímico	Atmogeoquímico	Biogeoquímico	Magneto-metría	Radio-metría	Electro-metría	Sismoe-léctrico	Gravi-metría	Técnicos
Hierro	(x)	x			x			(x)		x		x	x
Manganeso	(x)	x		x	x		x	x		x		x	x
Titanio	(x)	x	(x)	x				(x)	x	x		x	x
Cromo	(x)	x	(x)	x	x		x	x				(x)	x
Cobre	(x)	x		(x)	x		x			(x)			x
Menas polimetálicas	(x)	x		(x)	x		x			(x)	x		x
Bauxita	(x)	x						(x)	x	x			(x)
Magnesita	(x)	x		x	x								(x)
Menas cupro-niquelíferas sulfurosas	(x)	x		(x)	x		x	x		(x)		x	x
Menas de níquel, silicatadas	(x)	x		(x)	x		x	x					x
Estaño	(x)	x	(x)	x	x				x	x	x		x
Wolframio	(x)	x	(x)	(x)	x		x	x		x	x		x
Molibdeno	(x)	x		(x)	x		x			x	x		x
Antimonio	(x)	x		(x)	x		x			x			x
Mercurio	(x)	x	(x)	x	x	x	x			x			x

En los últimos años se han comenzado diferentes estudios referentes a la selección del complejo de métodos de búsqueda racional, sobre la base de la evaluación cuantitativa de la posibilidad de información de cada método, probabilidad de revelación de yacimientos minerales en el caso de su aplicación, plazos necesarios para obtener la información y costo de los trabajos. La mejor combinación de métodos que asegura la obtención de la información máxima posible con tiempo y gastos mínimos se logra por la vía del análisis sucesivo de todas las variantes y la realización de los cálculos mediante computadoras. (I.S. Turkin, 1966; L.L. Ruvinskiy, 1966; A.I. Burde, 1972 y otros). Estas investigaciones tienen buenas perspectivas, pero todavía no se han aplicado lo suficiente en los trabajos de búsqueda, a causa de la formalización insuficiente de los conceptos y fenómenos geológicos y la ausencia de un sistema uniforme de evaluación cuantitativa.

3.6 Búsqueda en diferentes condiciones físico-geográficas

Las condiciones naturales de la región que se estudia, tales como clima, vegetación, carácter de los suelos, grado de afloramiento de las rocas de basamento, potencia de la cobertura friable y desarrollo del sistema fluvial, influyen mucho sobre el grado de manifestación de los criterios y especialmente en los índices de búsqueda. Estas condiciones determinan en gran parte el grado de erosión de los cuerpos minerales y sus aureolas de dispersión primarias, el carácter de las aureolas y los flujos de dispersión secundarios y su accesibilidad para el estudio.

De acuerdo con dichas condiciones, la solución rápida y eficaz de todas las tareas de búsqueda requiere la aplicación de diferentes combinaciones de métodos. Por eso, se debe prestar una debida atención a las particularidades de la búsqueda en diferentes condiciones naturales.

Las áreas con relieves de altas montañas se caracterizan por cotas absolutas medias que sobrepasan los 2 500 m y alcanzan valores máximos entre 4 000 y 7 000 m. Las alturas relativas de las divisorias de las aguas con respecto a los cauces de los valles son del orden de 2 000 a 3 000 m, el relieve es muy accidentado con cuestas abruptas y escarpadas y el grado de afloramiento de las rocas madres es grande. La meteorización física se desarrolla más intensamente que la oxidación y descomposición química de las rocas, por lo cual la zona de oxidación en los yacimientos minerales se manifiesta débilmente o está ausente por completo. En cambio, existen numerosas aureolas y flujos de dispersión mecánicos muy desarrollados. El sistema fluvial es bastante amplio, las estructuras geológicas se someten a la lixiviación hasta una profundidad considerable y por consiguiente se forman flujos de dispersión hidroquímicos claros y muy extendidos. Se comprueba la existencia de una multitud de corrientes temporales con acumulación del proluvio en sus desembocaduras.

Las condiciones de esta zona son muy favorables para la búsqueda de diferentes minerales útiles. Los métodos más aplicables son: levantamiento geológico o hidrogeoquímico, métodos visuales, litogeoquímicos sobre la base de los sedimentos de fondo, radiométricos terrestres y más raramente magnetométricos. En los sectores con situación geomorfológica favorable el método de jagua generalmente da buenos resultados. Por ser muy grandes las alturas relativas, los trabajos de

búsqueda en dichas regiones permiten esclarecer las perspectivas meníferas del terreno para una parte considerable del corte geológico (hasta 2 000 a 4 000 m) y evaluar sin dificultades la amplitud vertical de la meniferación en los objetos revelados.

Las desventajas de las regiones de altas montañas son: la organización y ejecución difíciles de búsqueda de minerales dada la poca accesibilidad de muchos terrenos, problemas de transporte y pocas posibilidades para utilizar diferentes medios técnicos de búsqueda, sobre todo la perforación de los pozos.

Las altiplanicies representan macizos montañosos muy elevados y relativamente poco accidentados. Las altiplanicies altas tienen cotas absolutas hasta 1 000 a 6 000 m y alturas relativas entre 500 y 2 000 m. Su relieve es ondulado con pendientes suaves y anchos valles. En las superficies niveladas de estas altiplanicies abundan los lagos; con mucha frecuencia son pantanosas o están cubiertas de bloques de rocas. Las altiplanicies medias y bajas se caracterizan por cotas máximas hasta 2 000 a 3 500 m y alturas absolutas desde 200 hasta 700 m, relieve atenuado con cimas redondeadas, divisorias de las aguas aplanadas y frecuentemente pantanosas y valles anchos con depósitos aluviales de media o poca potencia. Como regla, las pendientes de los valles están cubiertas de areniscas arcillosas con grava de poca potencia o regueros de piedras.

Los macizos forestales ocupan áreas considerables. Estas regiones son favorables para la búsqueda de minerales útiles mediante métodos de levantamiento geológico, litogeoquímicos, hidrogeoquímicos, biogeoquímicos, geofísicos, parcialmente visuales y de jagua. La utilización de medios técnicos, sobre todo en el caso de los equipos pesados, es difícil debido a la poca accesibilidad de las altiplanicies y el gran desarrollo de los bosques y pantanos.

En las áreas con relieve montañoso moderado, las cotas absolutas máximas alcanzan de 2 500 a 3 500 m, sus valores medios son de 1 500 m y las alturas relativas varían desde 500 a 2 000 m. El relieve puede ser muy accidentado o atenuado, el grado de afloramiento de las rocas del basamento varía desde considerable hasta insignificante y como regla es peor que en las montañas altas; este índice y el desarrollo de la vegetación son función de la orientación de la pendiente. El sistema fluvial está bien desarrollado, la zona de oxidación es profunda y bien marcada y se encuentran aureolas y flujos de dispersión de todos los tipos.

Las condiciones de montañas medias son favorables para la aplicación de cualquier método de búsqueda. Sin embargo, conviene señalar que, debido a la zonalidad climática, en las regiones septentrionales, los métodos visuales y de jagua son más importantes que los geoquímicos y en las regiones meridionales es a la inversa.

En las áreas con relieve accidentado de montañas bajas, las cotas absolutas oscilan entre 300 y 1 000 m y las alturas relativas son del orden de 200 a 400 m. En dichas regiones el clima desempeña un papel importante y determina la mayor parte de las condiciones de realización de la búsqueda. En la zona templada húmeda las pendientes y cimas suaves se enmascaran por el césped y los bosques, por eso los afloramientos de rocas del basamento se pueden encontrar solo en los valles. En las regiones meridionales áridas los afloramientos son numerosos y en las septentrionales no existen debido al amplio desarrollo de los regueros y campos de piedras. En estas condiciones geomorfológicas la zona de oxidación es profunda y el sistema fluvial se desarrolla intensamente.

En estas regiones se pueden utilizar prácticamente todos los métodos de búsqueda, aunque en el clima templado, así como en los valles anchos o depresiones

intramontanas, los métodos visuales son poco eficientes para la revelación de minerales útiles.

Las áreas con relieve de colinas pequeñas o bajas, son aquellas regiones cuyas cotas absolutas varían de 200 a 800 m, las alturas relativas son del orden de 100 a 300 m y las divisorias de las aguas son amplias y suaves, pendientes también suaves y valles muy anchos. Las pendientes y divisorias de las aguas están recubiertas de una capa potente de depósitos eluviales y deluviales y, por lo general, el césped y los bosques están bien desarrollados; además, los depósitos aluviales en los valles son de gran potencia. A pesar de todos estos factores desfavorables, estas áreas, en las regiones meridionales áridas, presentan numerosos afloramientos de rocas del basamento y posibilitan la aplicación de todos los métodos de búsqueda. En las zonas templadas y septentrionales los afloramientos son escasos debido a lo cual el levantamiento geológico se torna difícil y la búsqueda se hace ineficiente, mientras que para otros métodos las condiciones son favorables.

En las áreas con formas "esculturales" del relieve (y también altiplanicies y mesetas), las mesetas se caracterizan por cotas absolutas del orden de 300 a 1500 m y alturas relativas de 200 a 350 m, mientras que las altiplanicies son menos elevadas con cotas absolutas entre 100 y 400 m y alturas relativas de 50 a 100 m. Sin embargo, ambos tipos de relieve tienen muchos aspectos comunes: las divisorias de las aguas son amplias, niveladas, generalmente cubiertas de depósitos friables con desarrollo total del césped; con mucha frecuencia son pantanosas o boscosas y casi no ofrecen afloramientos de rocas del basamento. El sistema fluvial está bien desarrollado y frecuentemente se observan numerosas corrientes temporales, arroyos y barrancos. La mayoría de los afloramientos naturales de rocas se localizan en los valles de las corrientes de agua, tanto permanentes como temporales. En estos valles también se encuentran aureolas y flujos de dispersión mecánicos. Por lo tanto, el volumen principal de los trabajos de búsqueda en estas regiones se realiza en los valles. Los mejores métodos para estas condiciones son el levantamiento geológico, los métodos visuales, los geoquímicos y el de jagua. Dentro de las divisorias de las aguas se pueden aplicar los métodos geofísicos en combinación con los trabajos de perforación y búsqueda geoquímica.

Los territorios de llanuras ocupan superficies muy amplias y se caracterizan por el desarrollo de formas de relieve acumulativas. Con frecuencia las cotas absolutas de las llanuras aluviales varían de 100 a 200 m. En su mayoría estos territorios son pantanosos o boscosos, las rocas del basamento no afloran debido a la cobertura entera de depósitos friables y suelos. En las regiones septentrionales son muy típicas las formas del relieve glaciales, que se manifiestan por elevaciones tipo "cadenas de colinas" con numerosos lagos y muy pantanosas y boscosas. La zona meridional árida (desiertas y semidesiertas) se caracteriza por el desarrollo del relieve acumulativo eólico tipo barjanos o cadenas.

En todas las áreas con relieve de tipo acumulativo faltan prácticamente los afloramientos naturales de rocas madres, lo que es muy desfavorable para la búsqueda de minerales útiles. Estos últimos están recubiertos de una capa potente de depósitos cuaternarios, los cuales son interesantes solo como fuente de materia prima fragmentaria para la construcción. El levantamiento geológico en estas condiciones es imposible sin realizar un volumen considerable de perforación de pozos de mapeo geológico. Los principales métodos de búsqueda para estos territorios son los geofísicos y los técnicos (perforación de los pozos de prospección), a los cuales se añaden en casos favorables el método de guijarros glaciales y los geoquímicos.

3.7 Búsqueda de yacimientos ocultos

La gran mayoría de los yacimientos minerales que afloran en la superficie actual ya están revelados y se ha realizado un estudio de ellos más o menos detallado; incluso muchos yacimientos se han puesto en explotación. Por esta razón las perspectivas del desarrollo ulterior de la base de materia prima natural dependen mucho de los éxitos en la vía del descubrimiento de yacimientos ocultos. Conforme a su posición en la corteza terrestre éstos se subdividen en tres grupos:

1. Yacimientos "ciegos", encerrados dentro de las rocas del basamento sin acceso al nivel de erosión actual o antiguo (fig. 3.28a).
2. Yacimientos enterrados que afloraban en la superficie de erosión antigua y han sido ocultados por los depósitos friables más jóvenes; generalmente son cuaternarios (fig. 3.28b).
3. Yacimientos recubiertos que participaron en los ciclos de erosión durante las épocas geológicas anteriores y actualmente se encuentran bajo las rocas sedimentarias litificadas (fig. 3.28c).

El primer grupo se subdivide a su vez en dos tipos:

- a) yacimientos en las rocas del basamento, las cuales afloran inmediatamente en la superficie actual;
- b) yacimientos en las rocas del basamento, recubiertas de depósitos más jóvenes friables o litificados.

Para el primer tipo, la búsqueda de la manifestación útil es totalmente análoga a la de los cuerpos minerales aflorantes, ya que los criterios de búsqueda en ambos casos son iguales. Sin embargo, debido a la ausencia de afloramientos de minerales útiles y sus aureolas de dispersión mecánicas, los métodos visuales y de jagua son inaplicables y el papel más importante lo desempeñan el levantamiento geológico y los métodos geoquímicos, geofísicos y técnicos. En esas condiciones la búsqueda se torna más complicada y costosa, principalmente porque se realiza un gran volumen de trabajos de perforación para estudiar las anomalías geofísicas y geoquímicas.

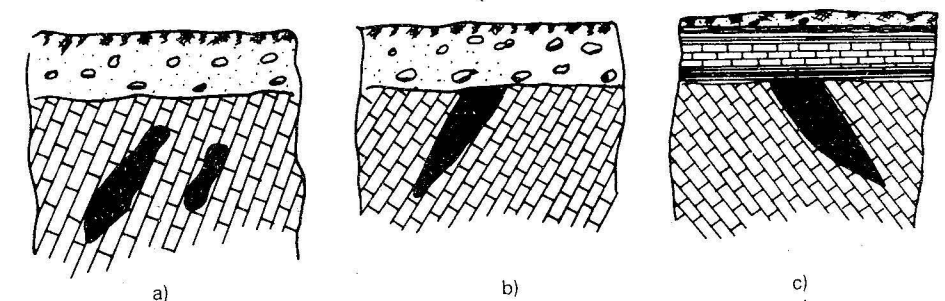


Fig. 3.28 Esquema de la localización de los cuerpos minerales: a) "ciegos"; b) enterrados; c) recubiertos

Los métodos geoquímicos más eficientes para la búsqueda de los yacimientos "ciegos" del primer tipo son los litogeoquímicos, basados en el estudio de las aureolas de dispersión primarias, ya que la extensión de estas últimas, de acuerdo con el realce de los cuerpos minerales, puede alcanzar 1 km. Es evidente que las zonas periféricas de estas aureolas son de poco contraste y por eso su revelación necesita la utilización de aureolas complejas (aditivas o multiplicativas) de elementos-indicadores. Dichas aureolas complejas se diferencian de las monoelementales por tener dimensiones más grandes, contraste más alto y zonalidad más clara. Esto permite evaluar con bastante certeza la posición del nivel de erosión con respecto a la aureola o manifestación mineral y distinguir las partes suprameníferas de las aureolas, que tienen buenas perspectivas desde el punto de vista de la búsqueda, de las inframeníferas que no representen ningún interés práctico.

Con respecto a la eficiencia de la utilización de las aureolas de dispersión primarias se puede citar el siguiente ejemplo: en la URSS, en el año 1974, se analizaron 87 anomalías de este género y en 73 de ellas se encontró en el subsuelo la meniferación industrial oculta encerrada a una profundidad aproximada de 600 m [7].

El pronóstico de la escala posible de la meniferación oculta a partir de los resultados del estudio de aureolas de dispersión primarias se basa en la zonalidad y las relaciones indicadoras de algunos elementos. Investigaciones realizadas en la URSS, han mostrado que las zonas de mineralización diseminada sin ningún valor industrial no manifiestan aureolas primarias con zonalidad contrastante y los valores de sus relaciones indicadoras corresponden a las partes inferiores (inframeníferas) de las aureolas que acompañan a la meniferación industrial.

A veces la utilización de las aureolas de escaldadura de las rocas encajantes da buenos resultados durante la búsqueda de yacimientos minerales útiles "ciegos" del primer tipo, ya que dichas aureolas de escaldadura representan zonas periféricas de las aureolas de dispersión primarias. La delimitación de las aureolas de escaldadura por medio del muestreo decriptométrico de las rocas, puede ofrecer información valiosa en los casos en que la aureola de dispersión geoquímica aún no ha alcanzado la superficie de erosión.

Cuando las condiciones geomorfológicas de la región son favorables, el método hidroggeoquímico puede manifestar su gran eficiencia durante la búsqueda de minerales útiles "ciegos" de este tipo, cuyas aureolas de dispersión litogeoquímicas primarias no se confirman en la superficie actual.

Los yacimientos "ciegos" del segundo tipo, bajo una cobertura poco potente de depósitos friables, se pueden revelar utilizando los mismos métodos de búsqueda que en los del primer tipo. Sin embargo, el levantamiento geológico en estas condiciones se complica, necesita de un volumen considerable de perforaciones de mapeo y las aureolas de dispersión primarias son inaccesibles al estudio directo en la superficie actual. Por estas razones, el papel principal lo desempeñan los métodos geofísicos y geoquímicos, sobre todo los que utilizan las aureolas de dispersión litogeoquímicas secundarias en los depósitos eluviales y deluviales; también se pueden utilizar los métodos bioquímicos, hidroquímicos y, en condiciones favorables, los atmoquímicos. La aplicación de estos métodos se basa en la correlación confiable y estrecha de las aureolas de dispersión primarias y secundarias, la cual se establece con más claridad utilizando aureolas complejas. En este caso, las regularidades de la constitución de las aureolas primarias permiten pronosticar el tipo probable de mineral útil a partir de los resultados del estudio de las aureolas secundarias, así como evaluar la posición de los cuerpos minerales po-

sibles con respecto al nivel de erosión y excluir las zonas de meniferación diseminada sin perspectiva alguna.

La utilización de las aureolas primarias de dispersión litogeoquímicas, durante la búsqueda de yacimientos de este tipo, solo es posible mediante los pozos de mapeo geológico, con la condición de que su número sea suficiente.

Los medios técnicos (pozos de perforación y más raramente excavaciones mineras superficiales) son aplicables para la búsqueda de yacimientos "ciegos", primeramente durante el levantamiento geológico y en segundo lugar para encontrar y estudiar las aureolas de dispersión primarias, cuya existencia se supone a partir de la presencia de las secundarias. Por último, los métodos técnicos son indispensables para comprobar las anomalías geofísicas y descubrir los cuerpos minerales "ciegos", supuestos sobre la base de la generalización e interpretación de los resultados de los métodos geoquímicos de búsqueda.

Cuando las rocas del basamento con meniferación oculta están recubiertas por una potente capa de depósito litificados, la búsqueda de minerales útiles resulta extremadamente difícil, ya que las aureolas de dispersión, tanto primarias como secundarias, en estos casos son inaccesibles a la observación inmediata y la utilización de los métodos geofísicos se complica, debido a la profundidad considerable a la cual yacen los cuerpos minerales y la influencia negativa de la cobertura sedimentaria. En estas condiciones, el levantamiento geológico es totalmente indispensable, aunque se debe realizar mediante un gran volumen de trabajos de perforación. Los resultados de ese levantamiento aseguran un análisis profundo y completo de los criterios de búsqueda y la selección bien argumentada de las áreas perspectivas para la búsqueda, lo que representa una garantía de éxito durante los trabajos posteriores.

Los métodos geofísicos son eficientes durante la búsqueda de yacimientos minerales útiles de este tipo para establecer la posición del límite entre las rocas del basamento y la cobertura sedimentaria, delimitar las áreas de extensión de los complejos principales de rocas madres, revelar las estructuras geológicas más grandes del fundamento, así como para descubrir los yacimientos concretos, si la diferencia de las propiedades de las rocas y las menas es bien marcada (por ejemplo, menas magnéticas masivas).

Los métodos geoquímicos se aplican en las variantes de profundidad y consisten en el muestreo geoquímico del testigo de los pozos de mapeo geológico en la zona inferior de la cobertura sedimentaria y dentro de las rocas del basamento, así como el testigo de los pozos de prospección especialmente perforados dentro de las áreas favorables. Además, todos los horizontes acuíferos encontrados en los pozos de perforación se someten al muestreo hidroggeoquímico.

Como se puede deducir de lo expuesto, se utiliza un gran volumen de medios técnicos durante la búsqueda de yacimientos minerales "ciegos" de cualquier tipo, no solo para resolver tareas secundarias sino también como método de búsqueda principal, sobre todo si los minerales útiles tienen propiedades físicas análogas a las de las rocas y no están acompañadas de aureolas de dispersión geoquímicas bien definidas.

Yacimientos enterrados

Se caracterizan por la existencia de diversas aureolas de dispersión secundarias que se manifiestan de diferente forma en dependencia de la potencia de la cobertura friable y las condiciones del paisaje geoquímico de la región que estudia. Los métodos principales de búsqueda son el levantamiento geológico, los métodos

geoquímicos, los geofísicos y los técnicos, a los cuales se añaden en casos favorables los que se basan en el estudio de las aureolas y flujos de dispersión mecánicos (placeres enterrados).

El análisis geólogo-estructural del territorio, el estudio de los criterios de búsqueda y la selección de las áreas perspectivas representan la base necesaria para lograr éxitos durante la búsqueda de los yacimientos minerales de este grupo, por lo cual es indispensable la cartografía geológica y una amplia utilización de los trabajos mineros y de perforación. Los laboreos de la cartografía también se utilizan para organizar el muestreo geoquímico de los horizontes inferiores de los depósitos friables y el estudio de las aureolas de dispersión primarias en las rocas del basamento.

Los métodos geofísicos no solo permiten precisar la posición y el relieve de la superficie de erosión antigua, sino que también en muchos casos revelan los cuerpos minerales cuando su yacencia es poco profunda.

Los métodos geoquímicos se utilizan con mucho éxito en sus variantes terrestres para revelar las aureolas de dispersión litogeoquímicas secundarias y las atmoquímicas, que se vinculan inmediatamente a los cuerpos minerales en caso de poca potencia de la cobertura friable. Cuando esta potencia es considerable, estos métodos descubren las aureolas litogeoquímicas superpuestas y las biogeoquímicas. Además, se utilizan las aureolas y flujos de dispersión hidroquímicos en las aguas y los suelos.

Los métodos técnicos se aplican para comprobar las anomalías geofísicas y geoquímicas, encontrar directamente los cuerpos minerales *in situ* y realizar su muestreo.

Por su profundidad de yacencia relativamente pequeña y la existencia de aureolas de dispersión bien definidas en la superficie actual, los yacimientos minerales útiles enterrados representan objetos más favorables para la búsqueda en comparación con otros yacimientos ocultos.

Yacimientos recubiertos

Son muy complejos desde el punto de vista de la búsqueda, ya que en las series litificadas postmeníferas no solo faltan las aureolas primarias de dispersión de la materia menífera, sino que también se manifiestan muy débilmente las aureolas y flujos de dispersión secundarios. Las aureolas litogeoquímicas secundarias, como regla, se observan únicamente en los horizontes inferiores de la cobertura sedimentaria cerca del límite entre esta y las rocas del basamento.

El complejo de métodos de búsqueda eficaz para revelar estos yacimientos abarca el levantamiento geológico basado en la aplicación de los pozos de perforación, el muestreo geoquímico de los testigos de estos pozos, los métodos geofísicos, incluso las investigaciones geofísicas en los pozos de perforación; el muestreo hidrogeoquímico y la aplicación de los medios técnicos para encontrar los cuerpos minerales que se suponen por la existencia de anomalías geofísicas y geoquímicas.

Como conclusión, conviene señalar que los yacimientos minerales útiles ocultos predominan claramente sobre los que se manifiestan en la superficie actual. Esos yacimientos representan una enorme reserva de fuentes potenciales de materia prima mineral, que constituyen, según los datos de V.I. Krasnikov, cerca de 70% de todos los yacimientos minerales útiles endógenos dentro de los escudos y zonas de plegamiento, 90% dentro de las partes afloradas de las plataformas y 100% en sus partes recubiertas. Por eso, actualmente se presta una gran atención

a la elaboración y perfeccionamiento de los métodos de búsqueda de la menífera oculta. Los principales aspectos de estos trabajos son: el perfeccionamiento de los métodos del pronóstico geológico de localización de los minerales útiles y el aumento de la confianza en sus resultados; la creación de métodos geoquímicos de búsqueda más sensibles; la investigación de las regularidades de la zonalidad geoquímica en correlación con los procesos de meníferación y el perfeccionamiento del equipamiento geofísico y de las instalaciones de perforación.

3.8 Evaluación de los yacimientos y manifestaciones de minerales útiles durante la búsqueda

De acuerdo con el principio de las aproximaciones sucesivas, la evaluación de los resultados obtenidos representa una parte integrante de cada estadio de los trabajos de búsqueda y exploración. La evaluación se realiza tanto durante la búsqueda orientativa como en la detallada y tiene como objetivo la selección de las áreas y los objetos favorables para su estudio posterior. Sin embargo, la evaluación más completa y argumentada de la manifestación revelada se obtiene solo después de finalizar los trabajos de búsqueda evaluativa. Esto no significa que esa evaluación sea definitiva, ya que los datos reales sobre la manifestación mineral son insuficientes y el objeto fue estudiado principalmente en la zona superficial donde la potencia, calidad y condiciones de yacencia del mineral útil pueden estar fuertemente modificadas por los procesos de meteorización y oxidación. Por esta razón, los objetos que han obtenido una evaluación positiva durante este subestadio de los trabajos geológicos, no tienen que llegar a ser industriales finalmente. Por otra parte, la conclusión sobre la ausencia total de perspectivas industriales de cualquier objeto geológico debe ser absolutamente confiable y bien argumentada, ya que de ser así, el paso posterior es abandonarlo.

Los factores principales que determinan la evaluación de las manifestaciones minerales durante este subestadio son: la necesidad de la materia prima mineral en cuestión, las condiciones geográficas de la región, el tipo genético y formacional del objeto geológico, la forma y condiciones de yacencia de los cuerpos minerales, la amplitud vertical de la meníferación y la calidad del mineral útil.

La necesidad de cada especie de materia prima mineral que puede encontrarse en la región que se estudia, debe ser conocida de antemano.

Esto se establece sobre la base de los balances ramales de la necesidad y extracción del mineral útil correspondiente teniendo en cuenta las perspectivas del desarrollo de la economía nacional para un período de 20 a 25 años como mínimo. Una vez establecida esta necesidad de mineral útil se formulan las tareas geológicas oficiales (tarea técnica) para la ejecución de la búsqueda.

La obtención de los datos sobre las condiciones geográficas de la región, incluso las económicas, no tiene ninguna dificultad, aunque debe señalarse que, al hacerlo, hay que prestar atención especial a la infraestructura económica general de la región, la existencia de mano de obra disponible, las fuentes de energía, condiciones de transporte y alejamiento de las vías de ferrocarriles y acuáticas principales con respecto al objeto que se va a evaluar. Hay que recordar que para algunos tipos de materia prima mineral preciosa, escasa y poco voluminosa (moscovita, diamante, oro, materia prima piezoóptica y otros), la distancia que las separa de las vías de transporte principales tiene una importancia secundaria.

El tipo genético o formacional de la manifestación o yacimiento de mineral útil se determina mediante el análisis completo de toda la información geológica,

geoquímica y geofísica acumulada durante la búsqueda. La vía principal para resolver esta tarea es la creación del modelo geológico pronóstico del objeto y la amplia utilización del método de analogía, sobre la base de los datos de los yacimientos ya conocidos del mismo mineral útil. En este caso, los métodos matemáticos pueden ser de gran ayuda para la elaboración y sistematización de los resultados obtenidos.

La forma y las condiciones de yacencia de los cuerpos minerales se esclarecen solo parcialmente durante la búsqueda, lo que se obtiene como resultado de la utilización de laboreos de prospección especiales. Por eso, la mayoría de las veces, las ideas sobre estos parámetros se basan principalmente en la interpretación de los datos geofísicos y geoquímicos y en la consideración de las particularidades de la constitución geológica del terreno. Esto se aplica, sobre todo, en los casos de la evaluación de yacimientos minerales "ciegos" y recubiertos, los cuales no se pueden estudiar debidamente por medio de los pozos de perforación, dada su yacencia profunda. No obstante, los yacimientos que se encuentran cerca de la superficie actual y hasta afloran en ella también se estudian durante la búsqueda hasta una pequeña profundidad y mediante un número muy reducido de laboreos de prospección, por lo cual la certeza sobre su morfología y posición espacial depende mucho de la autenticidad del pronóstico geológico. Aquí conviene notar que, al pronosticar la forma y condiciones de yacencia de los cuerpos minerales durante la búsqueda, es necesario tener en cuenta las variaciones posibles de estos parámetros en la zona superficial del yacimiento que pueden reflejarse en la existencia del buzamiento falso del cuerpo mineral, estrechamientos o ensanchamientos bruscos de su potencia, etcétera.

Uno de los factores más importantes de la evaluación del objeto revelado durante la búsqueda es su escala, que se determina en primer lugar por la amplitud vertical de la meniferación. Para establecer esta amplitud los datos que proporcionan los laboreos de prospección generalmente son insuficientes y se necesita una amplia utilización de datos indirectos (geofísicos y geoquímicos), así como de la analogía con otros yacimientos bien estudiados anteriormente del mismo tipo formacional. En el caso de relieve accidentado con grandes alturas relativas, la extensión vertical de la meniferación a veces se puede precisar observando los cuerpos minerales a niveles hipsométricos diferentes.

El pronóstico correcto de la profundidad hasta la cual se extienden los minerales útiles, siempre es muy importante y requiere un análisis profundo y minucioso del mapa geológico y de los cortes geológicos correspondientes, y tiene como objetivo la determinación de la posición espacial de los horizontes y estructuras favorables que controlan la localización de los minerales útiles.

La experiencia adquirida en el dominio del estudio de diferentes tipos de campos meníferos endógenos demuestra que, como regla general, la amplitud vertical de la meniferación industrial en el caso de los campos meníferos de tipo aureólico o con raíces poco profundas, no sobrepasa los 100 m, mientras que para los campos con raíces profundas oscila entre 2 y 3 km y alcanza a veces de 2,5 a 3,0 km. También se ha comprobado que los yacimientos cuya extensión vertical sobrepasa los 3 o 4 km, son extremadamente raros. La forma, asimetría y zonalidad de los campos meníferos de tipo radical se determinan por el carácter del movimiento de los fluidos magmáticos en las zonas hipoabisales y superficiales, lo que significa que las particularidades de dichos campos reflejan hasta cierto punto las etapas de mineralización, la intensidad de los procesos de meniferación y el orden de las reservas probables de diferentes minerales útiles. Por esta razón, la utilización de las particularidades formacionales de la mineralización y sus condicio-

nes concretas de manifestación dentro del campo menífero representa el método principal de pronóstico del comportamiento de la la meniferación en la profundidad.

Para establecer la amplitud vertical de la meniferación es importante utilizar los resultados del estudio de su intensidad en el corte vertical de los campos meníferos conocidos. Las curvas de variaciones de este índice muestran que si la amplitud vertical del campo menífero es inferior a 1 km, se puede observar un solo máximo de intensidad de meniferación (curvas monocíclicas), mientras que los campos más profundos se caracterizan por curvas con varios máximos (policíclicas). La comparación de la intensidad de meniferación del objeto a evaluar con las curvas características de este índice para todo el campo menífero o para otros campos meníferos del mismo tipo, permite evaluar las perspectivas de dicho objeto en profundidad, de manera bastante argumentada.

En muchos casos, al evaluar la amplitud vertical de la meniferación hay que tener en cuenta el grado de erosión del objeto. Esta tarea se puede resolver sobre la base del análisis geólogo-estructural, pero los mejores resultados se obtienen mediante la generalización e interpretación de los datos geoquímicos. Como se señaló anteriormente, la utilización de la zonalidad vertical de las aureolas de dispersión primarias y su correlación con las secundarias, con mucha frecuencia permite precisar la posición del nivel de erosión con respecto al objeto, a partir de los resultados del estudio de ambos tipos de aureolas. También permite pronosticar la escala de la meniferación en los horizontes profundos y excluir del estudio posterior, con gran confianza, los sectores que representan las raíces de los cuerpos minerales o yacimientos casi completamente destruidos por la erosión.

En cuanto a la determinación de la profundidad de extensión y perspectivas industriales de meniferación, proporciona buenos resultados la comparación de los parámetros principales de las aureolas de dispersión primarias reveladas durante la búsqueda, con los de las aureolas patrones que fueron estudiadas detalladamente en otros yacimientos industriales análogos.

La idea sobre el grado de erosión de la manifestación mineral también se puede adquirir sobre la base de las asociaciones minerales de los cuerpos minerales, el contenido de impurezas en algunos minerales, la forma de los cristales y las propiedades físicas de los minerales. La presencia en la superficie actual de filones baríticos, calcíticos y fluoríticos estériles, para los horizontes superiores de yacimientos de menas polimetálicas, es un testimonio de su débil erosión. Según los datos de V.G. Soloviev, el contenido de antimonio en la galenita de algunos yacimientos disminuye regularmente con la profundidad desde 0,5 hasta 0,0%, mientras que el contenido de bismuto en el mismo mineral aumenta desde 0,01 hasta 1,0%. La temperatura de homogeneización de las inclusiones gaseoso-líquidas en la galenita aumenta aproximadamente en 1 °C cada 5 o 6 m de profundidad. A veces, el peso específico de este mineral disminuye regularmente con la profundidad. V.G. Soloviev también comprobó, regularidades semejantes para la pirita, la esfalerita y otros minerales meníferos. N.S. Ievsikova estableció para los yacimientos estanníferos del Extremo Oriente la evolución regular de la forma de los cristales de la casiterita con el tiempo, lo que se refleja en la zonalidad cristalomórfica de los cuerpos minerales. Esto propuso la metodología de determinación del grado de erosión de los cuerpos minerales y el carácter de su acumamiento a partir del análisis del hábito de los cristales de este mineral. La utilización de esta metodología también permite pronosticar la posición de las columnas dentro del cuerpo mineral.

La calidad del mineral útil representa, sin duda ninguna, uno de los factores principales de la evaluación del objeto menífero, ya que determina la posibilidad de la utilización industrial de la materia prima mineral y su valor relativo. Sin embargo, durante la búsqueda, los datos sobre la calidad del mineral útil se obtienen con frecuencia solo para las partes superiores del cuerpo mineral, las cuales generalmente están alteradas y oxidadas. En dichos casos, para tener una idea correcta sobre la calidad de las menas primarias, se necesita la utilización de datos complementarios, tales como fenómenos indicadores que se pueden observar en la zona de oxidación y regularidades generales de la alteración de los minerales útiles en condiciones exógenas (fig. 3.29).

Como fenómenos indicadores se pueden considerar los minerales primarios residuales alterados parcialmente o inalterados, los secundarios tipomórficos, las texturas indicadoras de las limonitas en la zona de oxidación y las cavidades de lixiviación.

Los minerales primarios residuales en forma de granos independientes o agregados se encuentran a menudo hasta en las menas fuertemente oxidadas, debido a la diferencia en la resistencia de los componentes de las menas primarias. Por ejemplo, entre los sulfuros los más resistentes son: el cinabrio, la pirita, la galeinita y la argentita, y los menos resistentes: la pirrotina, la esfalerita y la calcosina. La presencia de la zona de oxidación de sulfuros inestables es un índice del bajo grado de descomposición de la mena. Por el contrario, las asociaciones constituidas solo por los minerales resistentes atestiguan una fuerte alteración de las menas primarias. Debe añadirse que a veces los minerales residuales facilitan la conclusión correcta acerca de la composición mineral de las menas primarias y la pertenencia de la manifestación de mineral útil a una formación menífera determinada, por lo cual hay que prestar una debida atención al estudio y determinación de esos minerales (fig. 3.30).

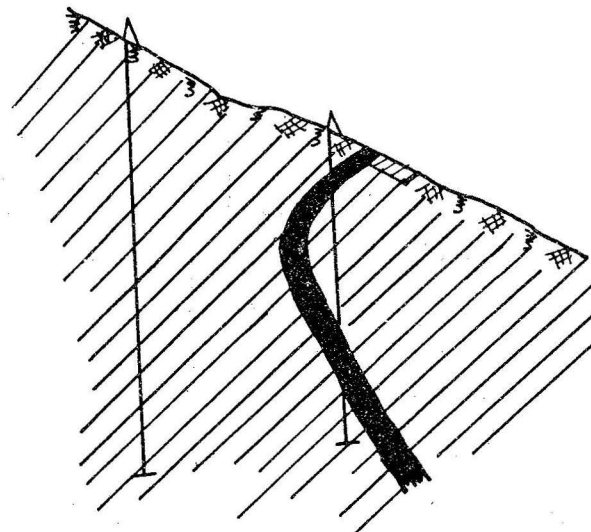


Fig. 3.29 Desfiguración de los elementos de yacencia del cuerpo mineral cerca de la superficie actual

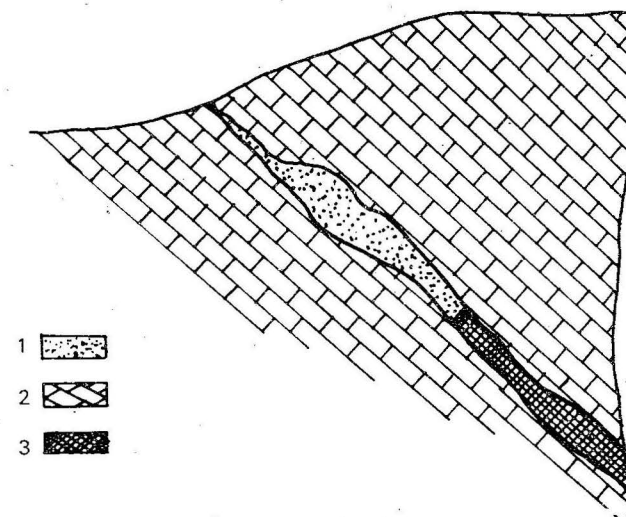


Fig. 3.30 Cambios en la morfología del cuerpo mineral y composición sustancial de la mena en la zona de oxidación: 1- mena anglesito-cerusítica; 2- caliza; 3- mena polimetálica sulfurosa

Bajo el nombre de minerales tipomórficos se agrupan los que permiten suponer la presencia de unos u otros elementos y compuestos químicos en la mena primaria y a veces hasta predecir la forma de su existencia mineral. Así, por ejemplo, los hallazgos de eritrina en la zona de oxidación señalan la presencia de arseniuros de cobalto en las menas primarias; la annabergita corresponde, en dichas condiciones, a los arseniuros de níquel, la jarosita a los arseniuros de hierro, la malaquita y la azurita a los sulfuros de cobre.

Las texturas indicadoras de la limonita representan texturas porosas de tipo esquelético, que surgen a causa del remplazo de los granos sulfurosos totalmente descompuestos por limonita friable o cuarcífera, reflejándose todos los contornos de las caras de cristales, fisuras y superficies de clivaje en el agregado mineral resultante. Para las menas intensamente descompuestas que no contienen minerales residuales o tipomórficos, el carácter de las estructuras indicadoras es el índice utilizable para adquirir una idea sobre las asociaciones minerales primarias. Entre estas texturas se pueden mencionar como la más importante la de armazón esponjosa, que surge generalmente cuando las rocas encajantes neutralizan débilmente las soluciones mineralizadas ácidas. Al ser las rocas más activas (las calizas) esta estructura se vuelve confusa, y si estas son inertes no se observa. Cuando el contenido de pirita en la mena inicial es alto (más de 25% de la masa total de sulfuros) la oxidación implica la formación de un gran volumen de limonita friable, las estructuras indicadores se enmascaran y no son discernibles (fig. 3.31).

Las cavidades de lixiviación formadas en la mena o en la masa filoneana, en los lugares de los granos de minerales útiles inestables completamente descompuestos o disueltos, a veces permiten determinar estos minerales ausentes y precisar la idea sobre la composición mineral de las menas primarias. Para conseguir este resultado es necesario que los granos minerales tengan formas cristalográficas características y claramente expresadas.

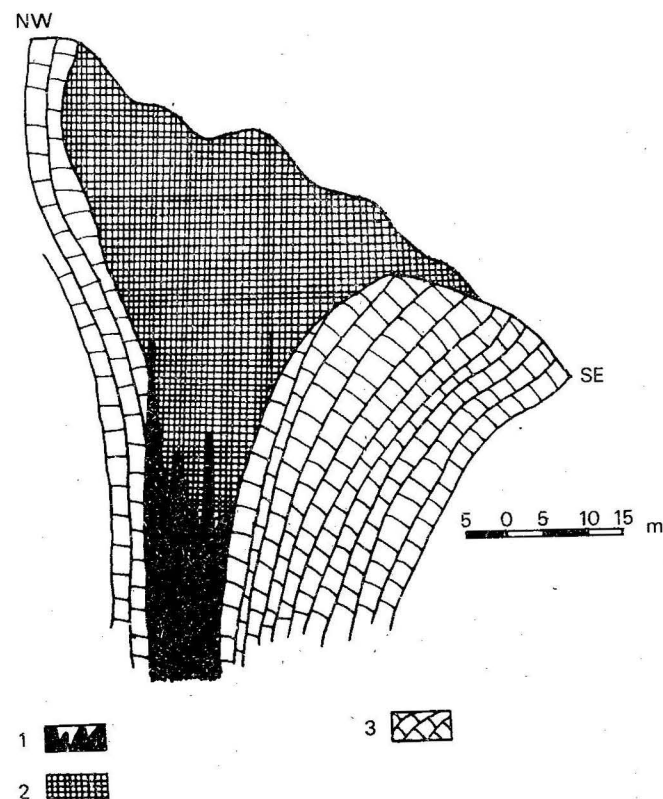


Fig. 3.31 Aumento de la potencia del cuerpo mineral en su parte aflorada:
1- mena arsenopirítica; 2- mena escorodítica; 3- caliza

Para evaluar correctamente la calidad de las menas primarias a partir de los resultados del estudio de la zona de oxidación es indispensable tener en cuenta las diferencias en estabilidad de diversos minerales y el carácter de su alteración en la zona superficial. De acuerdo con estas particularidades, todo los minerales útiles se pueden subdividir en minerales útiles metálicos y minerales útiles no metálicos.

Minerales útiles metálicos

Este grupo de minerales comprende las siguientes menas:

1. Menas constituidas por minerales primarios estables (menas oxidadas e hidróxidos de hierro, manganeso, estaño, cromo, aluminio; menas de wolframio y mercurio; oro, platino). Los datos sobre su composición química y mineral, obtenidos durante el estudio de las partes superficiales de los cuerpos minerales, también son válidos para las partes profundas, sin modificaciones o corrección alguna.
2. Menas con minerales primarios inestables que tienen en la zona de oxidación minerales secundarios análogos (menas de plomo, antimonio, bismuto, arsénico; menas carbonatadas de hierro y manganeso).

Para estos minerales útiles los resultados del muestreo de los horizontes superiores se pueden extender en las partes profundas de los cuerpos minerales solo desde el punto de vista de su composición química, mientras que la composición mineral de las menas primarias es totalmente distinta.

3. Menas con minerales primarios inestables cuyos componentes principales son eliminados fácilmente hacia afuera de los cuerpos minerales y no forman minerales secundarios estables (menas de cinc, cobre, níquel, cobalto, molibdeno, uranio; oro en los sulfuros). En la zona de oxidación el contenido de dichos componentes disminuye bruscamente y la composición mineral de la mena sufre grandes cambios. Por lo tanto, los resultados del muestreo de la zona superficial no proporciona ninguna información confiable sobre la calidad de las menas primarias. Solo conviene tener en cuenta que los contenidos bajos, no industriales, de dichos metales en la zona de oxidación se pueden observar en el caso de menas primarias industriales, tanto pobres como ricas, y por consiguiente, para evaluar definitivamente estos objetos se requiere la toma de muestras de menas no oxidadas.
4. Menas con minerales primarios inestables que muestran una inclinación particular a su concentración en la zona de oxidación mediante la formación de minerales secundarios estables (molibdeno y vanadio en las menas sulfurosas de plomo). En la zona de oxidación se observa el aumento brusco en los contenidos de los elementos químicos correspondientes y hasta se detectan concentraciones industriales debido a la formación de minerales plumbosos complejos (wulfenita y vanadinita). Estas concentraciones nunca corresponden a un contenido bajo en dichos elementos en las menas primarias que a menudo coincide con sus clarke. Es comprensible que los resultados del muestreo de los horizontes superiores de los cuerpos minerales no representan ningún interés para la evaluación de los contenidos de dichos metales en sus partes más profundas.

Minerales útiles no metálicos

Comprenden las siguientes especies mineralógicas:

1. Minerales útiles con minerales principales estables en condiciones superficiales (cuarzo, feldespato, arcilla, fluorita, cianita, andalucita, corindón, diamante, mica, asbesto, talco, piedras decorativas, materia prima piezoóptica y para la construcción). Para los minerales útiles de este grupo, cuya calidad se determina en primer lugar por su composición química, los datos obtenidos mediante el muestreo en la zona de oxidación son completamente válidos para caracterizar los horizontes profundos de los cuerpos minerales. Es necesario tener en cuenta la posible contaminación de la materia prima mineral con diferentes impurezas de género mecánico y químico durante la meteorización del mineral útil. En cuanto a los minerales útiles, cuya calidad depende principalmente de sus propiedades físicas, la evaluación de los horizontes profundos del yacimiento se realiza o en completa conformidad con la calidad del mineral útil en la zona superficial (si faltan los defectos secundarios vinculados a la meteorización, agrietamiento, enturbiamiento, diferentes deformaciones de los cristales, defectos mecánicos, etc.), o teniendo en cuenta el mejoramiento posible de la calidad de la materia mineral con la profundidad (si tales defectos secundarios han sido confirmados en la superficie).

2. Minerales útiles con minerales principales parcialmente solubles (calizas, dolomitas, magnesitas, margas, yeso, anhidrita). La composición mineral y química de estos minerales útiles cambia en la zona superficial de diferente forma y es muy variable el grado de dichas modificaciones, según las condiciones geológicas y climáticas concretas de la región. Por esta razón, una extensión mal argumentada de los resultados del muestreo de los horizontes superiores a la profundidad puede llevar a errores muy graves. No obstante, una evaluación bastante confiable de la calidad del mineral útil primario, sobre la base de su estudio en la zona de oxidación se puede lograr teniendo en cuenta las particularidades del desarrollo de los procesos de lixiviación y descomposición en dichas rocas.
3. Minerales útiles constituidos por minerales inestables y muy solubles (sales minerales). Su alteración en condiciones exógenas es tan intensa que es muy raro el hecho de encontrar afloramientos naturales en la superficie actual; estos fenómenos se observan solo en el clima árido. La composición química y mineralógica de dichos minerales útiles en la zona superficial nunca corresponde a la de la materia prima inalterada y por eso los resultados del muestreo en los horizontes superiores de los depósitos minerales no puede servir como base para la evaluación de sus horizontes profundos.

El análisis conjunto de todos los factores expuestos, durante la evaluación de los objetos geológicos, representa un proceso creador que requiere la utilización obligatoria de la analogía bien argumentada con los objetos patrones del mismo tipo de materia prima mineral.

La ejecución de un trabajo tan complejo y voluminoso para cada manifestación mineral descubierta durante la búsqueda es totalmente racional. Por ese motivo, actualmente se le presta una atención muy grande a la elaboración de los métodos de la evaluación de catastros de yacimientos y manifestaciones minerales, a partir de los resultados de los trabajos de búsqueda [2]. Esta especie de evaluación tiene como base las relaciones funcionales entre las particularidades naturales de los yacimientos minerales y los valores de los parámetros de evaluación principales. Además, el criterio principal de la evaluación es la obtención del efecto económico máximo, expresado en forma monetaria como resultado de la utilización industrial de las reservas de mineral útil.

Para evaluar los objetos meníferos de acuerdo con estos métodos se necesitan los catastros geólogo-económicos de yacimientos minerales industriales para cada especie de materia prima mineral, basados en el principio de la rentabilidad de utilización de las reservas de minerales útiles en una situación geográfica concreta. En el catastro, para cada yacimiento se da la información geográfica, minero-geológica, minero tecnológica y técnico-económica que asegura su característica completa. Los datos de dichos catastros sirven como base para todos los cálculos técnico-económicos y diferentes argumentaciones y evaluaciones. Además, para caracterizar el estado general de la base de la materia prima mineral también se confeccionan los catastros de manifestaciones y yacimientos minerales revelados durante la búsqueda. Hay que señalar que los catastros en cuestión tienen un gran número de índices y por eso el cómputo y la generalización de los datos es más racional si se confeccionan las tarjetas perforadas y se utilizan las computadoras.

El análisis de los catastros permite establecer para cada región la correlación de los parámetros principales que determinan la rentabilidad de la explotación

del objeto y expresarla en forma de diferentes gráficos y nomogramas mediante los cuales es fácil evaluar rápidamente el objeto.

Por ejemplo, U.M. Arskiy propuso para los yacimientos de estaño primarios el modelo de evaluación que aparece en la figura 3.32.

Los datos obtenidos durante los trabajos de búsqueda y evaluación de un objeto concreto sobre la calidad de las menas estanníferas y sus reservas de pronóstico dan la posibilidad de poner el punto correspondiente en este esquema y, en función del campo dentro del que se encuentra, obtener la evaluación rápida y argumentada de las perspectivas de este objeto.

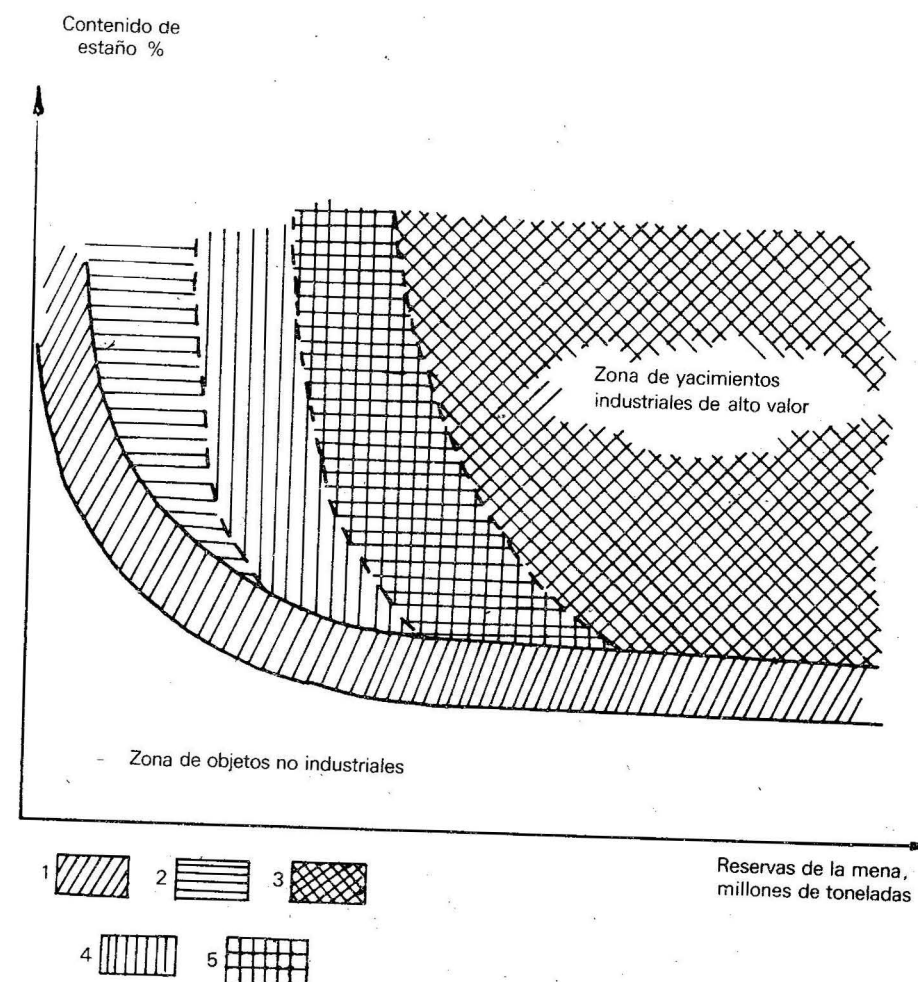


Fig. 3.32 Modelo esquemático para la evaluación aproximada de yacimientos y manifestaciones de estaño durante la búsqueda: 1- zona de yacimientos de valor industrial dudoso; 2- zona de yacimientos de poco valor industrial; 3- zona de yacimientos valiosos; 4- zona de yacimientos ordinarios; 5- zona de yacimientos industriales

CAPÍTULO 4

Muestreo de minerales útiles

El muestreo comprende el conjunto de procedimientos que se realiza con el propósito de establecer la calidad del mineral útil o sus rocas encajantes y tiene una gran importancia, ya que los índices de calidad del mineral útil determinan con mucha frecuencia el límite entre la mena y la roca estéril, la morfología y las dimensiones del cuerpo mineral y el valor industrial del yacimiento. Todos los trabajos, complejos y costosos, que se ejecutan durante la búsqueda o exploración del yacimiento, pueden ser inútiles si el muestreo de la materia prima mineral se organiza erróneamente y no asegura la obtención de resultados confiables y precisos.

Como la calidad del mineral útil (así como todos los demás parámetros geólogo-industriales del yacimiento) se establece sobre la base de observaciones separadas en puntos relativamente apartados, la confiabilidad de los datos obtenidos depende, en primer lugar, de lo típicos que puedan ser los objetos elegidos en dichos puntos para realizar las investigaciones referentes a su composición, estructura y textura con respecto al mismo cuerpo mineral. Estos objetos de investigación están constituidos por la muestra, o sea, determinada cantidad de material del cuerpo mineral o roca encajante tomada de acuerdo con las reglas establecidas. La correspondencia entre las particularidades de la muestra y las del cuerpo mineral se llama *representatividad de la muestra* y se puede definir como la capacidad de reflejar, en un volumen muy limitado, todas las particularidades del mineral útil en el punto en que se tomó dicha muestra. Desde el punto de vista de la representatividad, el concepto de muestra se puede expresar de otra manera: la muestra representa una parte de algo íntegro que tiene todas sus propiedades. Desde luego que es ilógico tomar muestras no representativas, por lo cual, con posterioridad, se considerará como muestra, según reglas establecidas, la parte de algo íntegro que conserva sus propiedades.

La calidad del mineral útil es variable y por eso, para caracterizar este parámetro geólogo-industrial, no solo hay que tomar muestras representativas sino también ubicar espacialmente los puntos de toma, de acuerdo con el grado, carácter y estructura de la variabilidad del objeto que se estudia. Para esto se deben tener en cuenta las regularidades espaciales en la variabilidad de la calidad (se-

gún la potencia, el rumbo o buzamiento del cuerpo mineral, con respecto a la posición de las estructuras geológicas que controlan la manifestación, etc.), así como las correlaciones entre diferentes índices de la calidad del mineral útil.

Aunque el estudio de la calidad de la materia prima mineral representa el objetivo principal del muestreo, éste también resuelve otras tareas importantes, como las siguientes:

Trazar los límites del cuerpo o esclarecer su estructura interna si es gradual el paso de la mena a la roca encajante estéril.

Establecer las regularidades de las variaciones espaciales de la calidad del mineral útil.

Asegurar el cómputo de pérdidas y dilución de la mena durante la explotación.

Extender los certificados para la materia prima o concentrados (productos finales) enviados a los consumidores.

Las exigencias principales para el muestreo de minerales útiles son la autenticidad de sus resultados y su plenitud desde el punto de vista, tanto del estudio de todo el yacimiento según su volumen total, como de la revelación de todos los componentes valiosos en la mena y todos los minerales útiles secundarios. Además, el muestreo no debe estorbar la ejecución de otros trabajos y tiene que asegurar una alta productividad y eficiencia económica en el estudio de la calidad del mineral útil.

El muestreo será fructífero, solo si tiene en cuenta todos los aspectos de la calidad de la materia prima.

4.1 Concepto general sobre la calidad del mineral útil

La calidad del mineral útil se determina por el conjunto de sus propiedades, de las cuales dependen el valor industrial y las formas de utilización de la materia prima mineral en la economía nacional. Dichas propiedades son variadas y se estudian por diferentes métodos. Los principales rasgos de la calidad del mineral útil son su composición química y mineral, sus particularidades texturo-estructurales y sus propiedades físicas y tecnológicas.

La composición química es un índice importantísimo para los minerales útiles a partir de los cuales se extraen diferentes elementos químicos o sus compuestos (menas de todos los metales y muchos tipos de materia prima no menífera, como azufre, apatito, fosforita, sales minerales, etc.) o para aquellos cuya utilización depende, en primer lugar, de las particularidades de su composición química (flujos metalúrgicos, materia prima refractaria y cerámica, para producir cemento, etc.). Sin embargo, la composición química por sí sola, también representa un concepto completo y debe considerarse bajo diferentes aspectos para obtener los resultados correctos durante el muestreo.

Los componentes que determinan la composición química del mineral útil generalmente se subdividen en útiles, dañinos y de balasto (inertes). Los útiles son decisivos al evaluar la utilidad de la materia prima y escoger sus formas de utilización; los dañinos obstaculizan el tratamiento de las menas y afectan la calidad del producto final; mientras que los inertes empeoran los índices económicos del tratamiento de la materia prima mineral, provocan gastos complementarios

de transporte, elevan el consumo de combustibles, fundentes, reactivos y energía eléctrica, y producen un daño complementario al ambiente. Por ejemplo, en las menas de hierro, resultan útiles elementos tales como: el hierro, el cobalto, el níquel y el manganeso; como dañinos: el azufre, el fósforo y el arsénico; inertes o de balasto: el silicio, el aluminio, el sodio y otros elementos petrogénicos. En las arcillas refractarias, por el contrario, el aluminio, y hasta cierto punto el silicio, son componentes útiles mientras que el hierro, el titanio y los metales alcalinos son dañinos. Esta subdivisión de los componentes es convencional y tiene un carácter relativo, porque los mismos elementos pueden figurar como útiles en unos tipos de materia prima mineral (hierro en la mena de este metal; aluminio en la bauxita o arcilla refractaria; plomo, cinc, azufre y arsénico en la mena sulfurosa), dañinos en otros (hierro en la arcilla refractaria; azufre y arsénico en la mena de hierro; plomo y cinc en los filones estanníferos) e inertes en los terceros (aluminio en la mena de hierro, hierro en la mena de níquel silicatada).

Además, los componentes químicos en las menas se subdividen en principales y secundarios (acompañantes). Los principales determinan la forma de utilización de la materia prima mineral y su valor industrial; los límites de los cuerpos minerales o clases industriales de la mena se trazan sobre la base de sus contenidos. Según su carácter, los componentes principales pueden ser tanto útiles (hierro en la mena de este metal, plomo y cinc en la polimetálica, aluminio en la bauxita o arcilla refractaria) como dañinos (azufre en la mena de hierro, hierro en la arcilla o dolomita refractarias) o inertes (silicio en la bauxita, elementos petrogénicos, cenizas en el carbón). Las menas de las cuales se extrae un solo componente útil principal se llaman simples (monominerales).

Los componentes secundarios también influyen mucho sobre la calidad del mineral útil, pero no determinan la posición de los límites del cuerpo mineral o clases industriales de mena. Dichos componentes siempre son útiles y su presencia aumenta el valor industrial de la mena, la cual, en ese caso, se denomina compleja. La gran mayoría de las menas se consideran complejas; no obstante, en estos momentos no se puede decir que la extracción de componentes secundarios a partir de cualquier mena compleja sea técnicamente realizable y económicamente racional. Además, con frecuencia es difícil trazar un límite entre los componentes principales y secundarios: al ser alto el contenido de estos últimos el valor de la mena aumenta, aunque no de manera considerable, lo que implica el cambio de los índices de las condiciones industriales para la materia prima mineral y por consiguiente influye sobre los límites de los cuerpos minerales o clases industriales de mena. Cuando esto ocurre, el componente secundario llega a desempeñar el papel principal (cobalto en las menas pirito-cupríferas, cobre en la de plomo cinc, germanio en las cenizas del carbón, etcétera).

Los componentes secundarios se subdividen a su vez en elementos impurezas y elementos satélites, según su forma de existencia en la mena. Los primeros forman sus propios minerales que se pueden seleccionar en concentrados independientes durante el beneficio de la mena (cobre en las menas magnetíticas o de plomo-cinc y bario en las polimetálicas). Los elementos satélites pertenecen en su mayoría al grupo de elementos diseminados, entran en la composición de los minerales principales de la mena como impurezas isomórficas o mecánicas y solo se pueden separar de ellos durante el tratamiento metalúrgico de los concentrados (renio en la molibdenita; vanadio y cobalto en la magnetita; cadmio, germanio e indio en la esfalerita; plata en la galenita; cobalto en la pirita; selenio y telurio en los sulfuros, etcétera).

El contenido total de algún elemento o compuesto químico determinado por medio de los análisis químicos ordinarios tiene mucha importancia para evaluar la calidad del mineral útil, pero a veces es insuficiente. Por ejemplo, las menas diseminadas magnetíticas y hematíticas pueden caracterizarse por el mismo contenido de hierro, pero según su capacidad de beneficio, su valor industrial, es absolutamente diferente. Asimismo la dolomita y el mármol brucítico son muy semejantes por su composición química, pero el último es totalmente inutilizable en la producción de materiales refractarios en la que la dolomita se aplica con gran resultado. Por lo tanto, una adecuada característica de la calidad de la materia prima mineral no se obtendrá sin conocer su composición mineral.

La composición mineral no solo complementa los datos sobre la constitución química, a la vez que permite establecer el balance de la distribución de los componentes entre diferentes minerales de la mena, sino que en ocasiones también representa el índice predominante de la calidad del mineral útil (placeres, yacimientos de mica, piedras preciosas, asbesto y otros). Al conocer la composición mineral es fácil calcular tanto los contenidos de algunos componentes vinculados a unos u otros minerales como su contenido total en la mena y predecir las principales particularidades tecnológicas del mineral útil para escoger de manera argumentada su esquema general de tratamiento. Por ejemplo, las menas de hierro magnetíticas permiten realizar el beneficio por la vía más fácil de la separación magnética, mientras que las hematíticas requieren la aplicación de la flotación que es más compleja y costosa; las arcillas refractarias caoliníticas tienen que calcinarse a temperaturas del orden de 1 300 a 1 350 °C, las hidrargilito caoliníticas a 1 450 °C y más y las hidromica-caoliníticas de 1 150 a 1 200 °C, aunque su composición es casi la misma o muy similar.

De acuerdo con su importancia industrial, los minerales que componen los minerales útiles se subdividen generalmente en meníferos, que determinan el valor industrial de la materia prima mineral, y filoneanos (no meníferos), aunque a veces esa división es convencional y relativa. Como ejemplos se pueden mencionar la calcita, que desempeña el papel de mineral filoneano en las menas polimetálicas y representa al mineral principal en la caliza; cuarzo filoneano de los filones auríferos que puede convertirse en mineral principal al utilizarlo para producir cuarzo fundido. Generalmente los minerales filoneanos en las menas de minerales útiles metálicos figuran como componentes del balasto y tienen que eliminarse en las colas del beneficio, pero también pueden ser minerales útiles secundarios y seleccionarse en concentrados independientes (barita en los yacimientos polimetálicos, caolín y arena cuarcífera en los placeres titanio-circoníferos, etc.). Además, los minerales filoneanos pueden concentrar ciertos elementos diseminados y por consiguiente llegan a ser minerales principales. En la mica y el feldespato se pueden acumular rubidio y cesio y en los silicatos e hidróxidos de aluminio, el galio. Por eso, al estudiar la composición mineral de los minerales útiles hay que prestar debida atención a los minerales tanto meníferos como no meníferos.

Por su proporción cuantitativa en las menas, los minerales se pueden subdividir en principales, secundarios y accesorios, agrupándose separadamente los meníferos y filoneanos según este principio. Por esta razón, el oro nativo se considera como mineral menífero principal a pesar de su carácter accesorio en cuanto a todo el volumen del filón cuarcífero y esto es bien comprensible, ya que su contenido determina el valor industrial de este mineral útil. Durante el muestreo, el estudio más completo se realiza para los minerales meníferos principales y secundarios, y a veces para los minerales filoneanos principales. Los minerales ac-

cesorios y filoneanos secundarios influyen muy poco sobre la calidad del mineral útil y se estudian de manera reducida y en poco volumen.

La textura y estructura del mineral útil son de gran importancia en lo referente a sus propiedades tecnológicas y formas de utilización: en primer lugar, ellas influyen sobre la elección del esquema del beneficio posible. Las menas de granos gruesos con textura moteada, groseramente bandeada o diseminada, son fáciles de enriquecer hasta en la etapa de trituración gruesa, mientras que las de granos finos de tipo diseminado o finamente bandeado, necesitan la trituración fina del material durante su beneficio. Las menas criptocristalinas o colomórficas, con frecuencia, no se pueden enriquecer de manera económicamente eficaz. Además, el carácter de las relaciones mutuas de los minerales en sus agregados determina en gran parte la posibilidad de separarlos durante el beneficio, obtener los concentrados de alta calidad y reducir las pérdidas de componentes útiles en las colas.

En segundo lugar, las particularidades texturo-estructurales pueden determinar por completo el valor industrial del mineral útil para ciertas formas de utilización. Los mármoles decorativos representan un buen ejemplo en este sentido, diferenciándose de las calizas ordinarias solo por su imagen textural y estructural. Lo mismo se aplica a otros tipos de piedras decorativas (labradorita, cuarcita, granito rapakiwi, serpentinita, jadeita, jaspe, etcétera.)

En tercer lugar, las particularidades texturo-estructurales pueden influir esencialmente sobre el desarrollo del proceso de elaboración del mineral útil. Por ejemplo, la dolomita de granos finos, después de su calcinación, muestra fragmentos densos y de poca capacidad de hidratación, por lo que puede servir como material refractario, mientras que la de granos gruesos se densifica mal durante dicho proceso y la obtención del producto conveniente requiere la utilización de procedimientos especiales que afectan los índices económicos del tratamiento. La bauxita criptocristalina es más difícil de elaborar y esto se realiza con pérdidas incrementadas en comparación con la de granos medios o gruesos.

Las propiedades físicas del mineral útil y los minerales independientes que lo componen tienen una gran importancia para el cálculo de reservas, la elección de los procesos de tratamiento convenientes y las formas de utilización de la materia prima mineral, la confección de los proyectos de las empresas mineras y la planificación de los trabajos de explotación. Como las reservas de la mayoría de los minerales útiles se computan en unidades de peso y sobre la base de los resultados de análisis químicos expresados en materia seca, la determinación de la masa volumétrica y humedad de la mena es indispensable. Además, hay que conocer la dureza y resistencia del mineral útil para escoger el sistema de arranque de este y el de su mantenimiento o entibación en la zona de extracción, así como tener una idea sobre el coeficiente de esponjamiento y el tamaño de los fragmentos de la mena que surgirán durante la explotación, para proyectar el transporte y tratamiento de la masa menífera extraída. Para ciertos minerales útiles (fosforitas obólicas o del tipo concrecional, menas oolíticas friables, placeres y otros) el conocimiento de su composición granulométrica es necesario por cuanto la parte más valiosa de la mena está vinculada a determinadas fracciones.

Al mismo tiempo existen muchos minerales útiles no metálicos cuyo valor depende principalmente o por completo de sus propiedades físicas, como son: mica, materia prima piezoóptica o para construcción, asbesto, grafito, talco, piedras preciosas y decorativas, arcillas refractarias y otros. Para dichos minerales útiles, tiene una importancia decisiva el estudio de propiedades tales como dimen-

siones de los cristales, homogeneidad y transparencia; coloración de los minerales o de toda la roca; dureza, elasticidad y propiedades eléctricas; composición granulométrica del mineral útil, su resistencia, capacidad de pulido, etcétera.

Se conoce bien que solo una pequeña parte de los minerales útiles se utiliza en la economía nacional en su estado natural y la mayoría se somete a una u otra elaboración previa. Las menas, tanto metálicas como no metálicas, pasan generalmente por el beneficio con el propósito de obtener diferentes concentrados y eliminar los componentes dañinos e inertes en las colas. A veces estas últimas también se pueden utilizar en otras ramas de la economía nacional, como por ejemplo las colas de las plantas niquelíferas cubanas que servirán de materia prima para la siderurgia integrada. Los concentrados, en su momento, pasan por el proceso metalúrgico que da como resultado diferentes metales, aleaciones o compuestos. La materia prima refractaria se somete a la calcinación y luego el material obtenido se utiliza para moldear diferentes artículos, los cuales, inmediatamente, o después de cocerlos, se colocan en el revestimiento interior de diversas instalaciones térmicas.

Las piedras de construcción se labran, se sierran o se trituran hasta gravas, las decorativas se sierran y se pulen.

Las particularidades del mineral útil, desde el punto de vista de su tratamiento, se conocen como propiedades tecnológicas.

La elección del esquema del tratamiento del mineral útil está condicionada por muchos factores: composición química y mineral, particularidades texturo-estructurales, propiedades físicas y nivel técnico alcanzado en las ramas correspondientes de la economía nacional. Por lo tanto, los esquemas tecnológicos de utilización de la materia prima pueden ser distintos, no solo para diferentes tipos naturales de menas sino también para diferentes tipos naturales de mena del mismo yacimiento. Los índices más importantes del esquema de tratamiento del mineral útil son la calidad del producto final, su proporción con respecto a la materia prima utilizada, el grado de extracción de los componentes útiles en el concentrado o producto final y las pérdidas en las colas del beneficio o durante otros procesos de su elaboración. Además, es necesario determinar y tener en cuenta los índices económicos que caracterizan el esquema de tratamiento: gastos específicos de energía eléctrica, combustible, agua, reactivos y otros materiales, por tonelada de producto final.

Las variaciones de calidad del mineral útil se deben a los cambios en las condiciones geológicas de formación, lo cual se refleja en la composición mineral y en las particularidades texturo-estructurales de este. Por esta razón, durante el muestreo es preciso distinguir y estudiar separadamente las variedades de materia prima mineral que se diferencien por estos índices. Tales variedades se denominan tipos naturales de menas (menas esfalerito galeníticas diseminadas, calcopirito-piríticas bandeadas, piritas masivas, etc.), los cuales tienen que revelarse al ejecutar la documentación geológica y utilizarse para esclarecer la estructura interna del cuerpo mineral y las regularidades de su formación. Para lograr este objetivo las muestras tomadas deben presentar cada tipo de mena por separado y nunca su mezcla.

En la mayoría de los casos, los tipos naturales de menas son más o menos diferentes por su composición química y por consiguiente pueden mostrar diferentes propiedades tecnológicas, aunque lo último no sea obligatorio. Por eso, algunas veces resulta que varios tipos naturales de menas se elaboran según el mismo esquema tecnológico, para hacer el proceso más eficiente desde el punto de vista

económico. Las menas que se elaboran de la misma manera y se caracterizan por determinada composición química se llaman tipos industriales de mena, las cuales pueden estar constituidas por uno o más tipos naturales de mineral útil. Por ejemplo, las menas polimetálicas oxidadas representan un tipo industrial y las primarias otra; en los yacimientos de arcillas refractarias cada tipo natural de mineral útil coincide generalmente con uno u otro tipo industrial. Por otra parte, diferentes tipos naturales de menas magnéticas en los yacimientos de *skarn* (menas diseminadas, bandeadas, brechiformes y de vetillas diseminadas) constituyen un solo tipo industrial de menas pobres; de manera análoga las menas pirito-cupríferas de dos tipos naturales, diseminadas y de vetillas, forman un solo tipo industrial.

Los tipos industriales de mena se establecen solo a partir de los resultados del muestreo y se utilizan para calcular por separado las reservas de dichas clases y planificar su extracción selectiva de acuerdo con las formas previstas de utilización.

4.2 Tipos de muestreo

El estudio de los diferentes índices de la calidad del mineral útil se realiza por diferentes procedimientos, utilizando distinto material. Para determinar la composición química de la mena se necesitan pequeñas porciones (como regla, desde unos gramos hasta decenas de gramos) de material finamente triturado (partículas inferiores a 0,07-0,1 mm de diámetro), que se someten a los análisis químicos cuantitativos, espectrales semicuantitativos o colorimétricos, mientras que para establecer las propiedades tecnológicas hay que tomar muestras de masa mayor (desde decenas de kilogramos hasta millares de toneladas) con tamaño de los fragmentos correspondientes al que se espera durante la explotación posterior del yacimiento y someterlas al beneficio experimental, calcinación, etc. Para investigar cada aspecto de la calidad se debe aplicar su propio complejo de operaciones que determina un cierto tipo de muestreo. En plena conformidad con las particularidades ya estudiadas de la calidad del mineral útil se conocen cuatro tipos de muestreo: químico, mineralógico, técnico y tecnológico.

Muestreo químico. Tiene como objetivo la determinación de la composición química de la mena o roca encajante y representa el principal tipo del muestreo para la gran mayoría de los minerales útiles metálicos y una parte de no metálicos. Mediante el muestreo químico se pueden establecer los contenidos de elementos o compuestos químicos en toda la mena o en los diferentes minerales que la componen, delimitar los cuerpos minerales y tipos de mena industriales dentro de estos, calcular las reservas de mena o del componente útil y realizar los cálculos económicos. Las muestras iniciales para este aspecto del muestreo pueden ser prácticamente de cualquier peso y tamaño de las partículas.

Muestreo mineralógico. Se organiza para estudiar la composición mineral de la materia prima o roca encajante, así como sus particularidades texturo-estructurales. Junto con el muestreo químico, este también permite determinar la composición química de diferentes minerales, precisar la forma de existencia de los componentes valiosos y su balance en la distribución entre diversos minerales de la mena. El muestreo mineralógico desempeña un papel principal durante el estudio de los minerales útiles cuya calidad depende en primer lugar de las particularidades de su composición mineral, textura y estructura. Además, para la mayoría de los minerales útiles asegura la revelación de diferentes tipos naturales de me-

na, permite predecir sus propiedades tecnológicas, establecer las regularidades de la distribución de componentes secundarios y garantizar la extracción más completa durante la elaboración de la mena, esclarecer muchos rasgos de la génesis y zonalidad del yacimiento, etcétera.

Muestreo técnico. Se utiliza para estudiar las propiedades físicas del mineral útil. Para muchos minerales útiles es el muestreo principal, ya que la calidad se determina por dichas propiedades. Además, como se señaló anteriormente, el muestreo técnico es necesario para cualquier tipo de mineral útil con el propósito de obtener los datos indispensables para el cálculo de reservas (masa volumétrica, humedad) y confección del proyecto de explotación del yacimiento (dureza y resistencia de las menas y rocas encajantes, coeficiente de esponjamiento, tamaño de los fragmentos de la mena).

Muestreo tecnológico. Debe esclarecer las propiedades tecnológicas del mineral útil y elaborar sobre esta base un esquema racional del tratamiento de la materia prima mineral, incluso determinar los principales índices técnico-económicos del proceso tecnológico. Este muestreo es necesario para todos los tipos de minerales útiles y prácticamente en todos los estadios de estudio del yacimiento, pero a niveles diferentes. Conviene señalar que, como regla, la ausencia de los resultados del muestreo tecnológico no permite efectuar una evaluación geólogo-económica bien argumentada del objeto estudiado y a veces causa la solución negativa en cuanto a comprobar las reservas calculadas del mineral útil o su traslado a las categorías inferiores por su grado de estudio.

4.3 Operaciones del muestreo

La realización práctica de cualquier tipo del muestreo necesita la obtención de material para las investigaciones, su debida preparación para los ensayos y la ejecución de estos últimos, de acuerdo con lo cual se distinguen tres operaciones principales del muestreo.

Toma de muestras.

Tratamiento o elaboración de las muestras.

Análisis y ensayos de las muestras.

Toma de muestras. Representa la operación más importante, porque debe asegurar la obtención del material representativo, que caracterizará con autenticidad al mineral útil en el punto de su toma. De no cumplirse esta exigencia, todas las demás operaciones del muestreo serán inútiles y sus resultados finales serán falsos. Si se tiene en cuenta la diferencia de las propiedades de diversos minerales útiles y las particularidades de los ensayos para cada tipo del muestreo, hay que aplicar diferentes formas de toma de muestras.

Tratamiento de las muestras. Tiene como objetivo prepararlas para los ensayos correspondientes (análisis químico o espectral, estudios mineralógicos, determinación de la resistencia mecánica, calcinación, flotación, etc.) y se realiza de diferente manera según el tipo de muestreo y el tipo de muestra. Sin embargo, cualquiera que sea el modo de tratamiento de las muestras se debe conservar su representatividad. En otras palabras, el material enviado al ensayo debe poseer las mismas propiedades (solo desde el punto de vista de los aspectos de la calidad que se desea estudiar) que la muestra inicial no elaborada.

Análisis y ensayos de muestras. Se efectúan mediante diferentes procedimientos en dependencia del tipo de muestreo, el tipo de mineral útil y su supuesta utilización. Deben asegurar una característica confiable y auténtica de los aspectos correspondientes de la calidad del mineral útil.

Las tres operaciones mencionadas se relacionan mutuamente, de manera que ninguna puede existir por sí sola; son igualmente inútiles tanto la toma o tratamiento de muestras sin sus ensayos convenientes, como el análisis de muestras no preparadas para ellos. Por lo tanto, se puede aplicar el término *muestreo* solo al conjunto de dichas operaciones y hay que considerar totalmente falsa la terminología corrientemente utilizada en la práctica de los trabajos de búsqueda y explotación conforme a la cual llaman muestreo únicamente a la primera operación (muestreo por surco, muestreo global, etc.), o sea, a la toma de la muestra.

Además, hoy día comienza una amplia utilización de nuevas vías de determinación de la calidad del mineral útil (mejor sería decir de algunos índices de la calidad) sin la toma de muestras, directamente en el macizo o en la masa menífera arrancada. Aunque formalmente la aplicación del término *muestreo* en este caso es correcta, los trabajos de este género son muy específicos y no tienen nada que ver con las operaciones tradicionales del muestreo (toma y tratamiento de muestras), por lo cual resulta más racional denominarlos *modos de determinación de la calidad de la materia prima mineral sin la toma de muestras*.

4.4 Métodos de toma de muestras

Los numerosos métodos de toma de muestras existentes en la actualidad deben agruparse lógicamente, de acuerdo con el carácter del material que se va a estudiar, de la siguiente manera:

Métodos de toma de muestras de menas y rocas en su propia yacencia (en el macizo).

Métodos de toma de muestras de la masa menífera arrancada o el mineral útil elaborado.

En el primer grupo, en dependencia de la forma de poner el mineral útil al descubierto, se pueden distinguir dos subgrupos:

- a) métodos de toma de muestras en las excavaciones mineras y afloramientos naturales;
- b) métodos de toma de muestras en los pozos de perforación.

Toma de muestras en excavaciones mineras y afloramientos naturales

En estos casos el mineral útil y sus rocas encajantes son accesibles a las observaciones directas en su yacencia propia y, por lo general, dentro de sectores considerables del cuerpo mineral. Esto crea condiciones favorables para aplicar diferentes métodos de toma de muestras teniendo en cuenta las particularidades de la estructura interna del cuerpo mineral y el carácter de la distribución de componentes valiosos dentro de este. Existen diferentes agrupamientos y clasificaciones de dichos métodos, pero en la opinión de los autores, todos carecen de

lógica y precisión, por esta razón se propone agruparlos según el elemento geométrico del cuerpo mineral el cual está caracterizado por las muestras tomadas. Tal agrupamiento es el siguiente:

1. Método de trozo: la muestra caracteriza un punto independiente del cuerpo.
2. Métodos lineales: las muestras tomadas dan la idea sobre la calidad del mineral útil según determinada dirección en el cuerpo mineral.
3. Métodos superficiales: las muestras caracterizan determinada sección superficial del cuerpo mineral.

En la mayoría de los manuales y libros de estudio las muestras volumétricas denominadas globales también se incluyen en el grupo de muestras tomadas *in situ*. Esto es totalmente erróneo, ya que ellas representan la toma de la masa previamente arrancada, por lo cual se consideran como tal y se le prestará con posterioridad su debida atención.

Cualquier clasificación de las muestras según sus particularidades geométricas es inevitablemente convencional, ya que cada muestra a cierto volumen del cuerpo, mientras que el punto, o la superficie, no poseen ningún volumen desde el punto de vista geométrico. Aún más, el concepto de línea en el muestreo es más amplio que en matemática: las muestras lineales abarcan siempre una determinada superficie del objeto aunque esta sea pequeña.

Método de trozo

Este método consiste en la toma de trozos típicos del mineral útil o sus rocas encajantes. Como regla general, la muestra se compone de un solo trozo cuya masa oscila entre 0,2 y 2,0 kg, determinándose visualmente lo típico que es este, a partir de su composición mineralógica y sus particularidades texturo-estructurales. Si el mineral útil es heterogéneo exteriormente, la muestra puede estar constituida por varios trozos, caracterizando cada cual a sus diferentes variedades naturales. En este caso, la masa de cada trozo debe corresponder a la proporción de la variedad correspondiente en el volumen del cuerpo mineral. Estas muestras compuestas representan en la realidad la transición de las de trozo hacia las lineales o superficiales, pero son menos representativas que estas últimas.

El método en cuestión es sencillo y de alta productividad, pero tiene como desventaja principal el carácter subjetivo de la selección de los puntos de toma de los trozos. Por esta razón, resultados más o menos confiables se pueden obtener solo al ser homogéneo el mineral útil o su tipo natural. En estos casos, dicho método se utiliza principalmente para tomar las muestras mineralógicas y técnicas, así como las destinadas a la búsqueda litogeoquímica. Tales muestras permiten revelar con bastante autenticidad las propiedades físicas y particularidades texturo-estructurales del mineral útil, determinar su composición mineral de manera cualitativa y revelar aureolas de dispersión primarias. Cuando se trata de lograr datos cuantitativos seguros acerca de la composición química y mineralógica del mineral útil, este método de toma de muestras se puede recomendar solo durante la exploración detallada o de explotación, cuando ya se conoce bien la homogeneidad de los tipos de materia prima naturales y sus rasgos distintivos exteriores. La utilización de este método para tomar las muestras químicas durante los estadios iniciales de los trabajos geológicos (búsqueda y exploración orientativas) puede provocar errores muy graves en la evaluación de la calidad del mineral útil.

Métodos lineales

En este subgrupo se conocen dos métodos que se complementan mutuamente: el de surco y el de barreno. El primero asegura el estudio de la calidad del mineral útil, según una determinada línea en la superficie aflorada del cuerpo mineral y el segundo permite estudiar las partes más profundas de este fuera de dicha superficie. Los métodos lineales se utilizan para tomar las muestras cuando el mineral es anisótropo por su calidad y su variabilidad es mucho más alta en una dirección que en las otras dos dimensiones. La línea de la toma de muestras tiene que coincidir si es posible con esta dirección de la variabilidad máxima de la calidad (la cual corresponde generalmente a la potencia normal del cuerpo), aunque para hacer más cómoda la ejecución de este trabajo, esta a veces puede trazarse en un determinado ángulo con esta dirección.

Los métodos lineales de toma de muestras son aplicables para efectuar el muestreo de la mayoría de los minerales útiles y son especialmente eficientes en los casos de las menas bandeadas o estratificadas. Por otra parte, son inconvenientes cuando la textura de la mena es moteada o la menificación se concentra en nidos dispersos. Además, al ser pequeña la potencia del cuerpo mineral (menos de 0,2 m) el volumen de la muestra obtenida es insuficiente para asegurar su representatividad, razón por la cual no se recomienda la utilización de los métodos en cuestión en dichas condiciones.

El método de surco comprende tres variedades. En primer lugar, se realiza mediante el surco de sección transversal regular. Para esto, sobre la superficie previamente nivelada del cuerpo mineral, se traza una banda rectilínea de ancho determinado y se ejecutan las hendiduras a lo largo de sus límites laterales en la mena, hasta la profundidad necesaria; el mineral útil dentro de estas secciones se arranca y se recoge sobre una lona impermeabilizada u otro material conveniente, formando la muestra. La sección transversal de este surco generalmente es rectangular, y raramente triangular. Sus dimensiones están en función de la variabilidad de la menificación, dureza del mineral útil y potencia del cuerpo mineral. Como recomendaciones generales en este sentido se pueden utilizar los datos presentados en la tabla 4.1.

Al utilizar el surco de sección transversal regular la representatividad de la muestra tomada se puede garantizar solo cuando de cada unidad de longitud se obtiene la misma cantidad del material. Esto se logra mediante una nivelación cuidadosa de la superficie correspondiente del cuerpo y un control permanente de la sección transversal del surco con ayuda de un patrón. A continuación se dan las principales operaciones de la toma de muestras por el método de surco y los gastos promedio de tiempo para su realización (en porcentajes de tiempo de toma de la muestra) en el caso de las menas duras:

- Preparación de la superficie y trazado del surco: 17%.
- Ejecución de las hendiduras según sus límites laterales: 52%.
- Arranque del material entre dichas hendiduras: 16%.
- Recuperación del material y empaquetamiento de la muestra: 9%.
- Documentación de la muestra: 6%.

Como se observa, la segunda operación es la más difícil y prolongada, ya que al realizarla a mano con un martillo y un cincel, hay que vencer la resistencia de la mena o roca a la compresión, la que excede varias veces su resistencia cortante, a vencer durante la tercera operación. Es por esta razón que la profundi-

dad del surco, siempre tiene que ser mucho menor que su ancho. Además, al ejecutar la toma de muestras manualmente es difícil asegurar la sección transversal del surco, regular y constante, dadas las diferencias de las propiedades físicas de los minerales que componen la mena, sobre todo la diferente fragilidad y agrietamiento del mineral útil. Así por ejemplo, los minerales frágiles, como regla, se desprenden del fondo y las paredes del surco y su cantidad en la muestra aumenta en comparación con su contenido real en la mena y por consiguiente surge el error sistemático del muestreo.

Tabla 4.1

DIMENSIONES RECOMENDADAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL SURCO REGULAR

Distribución de los componentes	Minerales útiles duros Potencia del cuerpo mineral, m			Minerales útiles blandos cualquiera que sea la potencia del cuerpo mineral
	más de 2,5	0,5-2,5	Menos de 0,5	
Muy regular y regular	2 x 5 cm	2 x 6 cm	2 x 10 cm	Desde 2 x 5 cm hasta 5 x 10 cm
Irregular	2,5 x 8 cm	2,5 x 9 cm	2,5 x 10 cm	Desde 5 x 10 cm hasta 10 x 20 cm
Muy irregular y extremadamente irregular	3 x 8 cm	3 x 10 cm	3 x 12 cm	

Nota: La primera cifra corresponde a la profundidad del surco y la segunda a su ancho.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la actualidad se presta una gran atención a la elaboración y perfeccionamiento de los medios mecanizados para tomar las muestras de surco. Hasta el presente se han construido muchos dispositivos de este género, una parte de los cuales están constituidos por martillos neumáticos picadores, equipados con barrenos especiales de diferentes formas, para cortar rápidamente el material según la sección transversal deseable; otros se basan en la utilización de las sierras con discos de diamantes para efectuar las hendiduras laterales y eliminar por consiguiente la más difícil de las operaciones manuales. En el Instituto de Minas de Sverdlovsk fue construido el toma muestras SGI-3, basado en el principio de perforación de pequeños barrenos hasta una profundidad constante y la recuperación completa de todo el polvo resultante, lo que asegura un volumen constante del material en cada punto de su toma y una buena representatividad de las muestras. Además, en este caso se reduce al mínimo el desprendimiento de los minerales frágiles y se facilita el tratamiento posterior de la muestra. Todos los dispositivos para tomar las muestras aumentan la productividad del trabajo de manera considerable (en 3 a 7 veces) y aseguran una mejor representatividad de las muestras. Lamentablemente su fabricación en serie todavía no está organizada y se utilizan poco en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración.

En lo que se refiere a los minerales útiles blandos, la toma de muestras a mano requiere poco de los métodos mecanizados y el aumento de la sección transversal del surco hace menos probables los errores debidos al desprendimiento selectivo de diferentes minerales y a la regularidad del ancho o profundidad del surco.

La toma de muestras mediante el surco de sección transversal regular garantiza la ejecución del muestreo químico, mineralógico y tecnológico a nivel de laboratorio. Algunas veces esas muestras también permiten la realización de los ensayos físico-técnicos.

La segunda variedad de muestras de surco se conoce como punteada. En este caso el material que compone la muestra se toma según la línea del muestreo en forma de pequeños fragmentos (de 1 a 3 cm de diámetro) arrancados de la superficie del cuerpo mineral. Con más frecuencia los puntos de toma de dichos fragmentos forman una serie continua, aunque al ser bastante regular la meniferación estos se pueden colocar a 2 o 3 cm uno de otro (fig. 4.1). La masa de la muestra tomada por este procedimiento varía desde 0,2 hasta 2,0 kg por cada metro del surco y generalmente su valor promedio varía entre 1,0 y 1,5 kg. Es preciso señalar que para cada cuerpo mineral concreto la masa de las muestras de igual largo tiene que ser más o menos equivalente.

La toma de muestras por este método es varias veces más productivo que al aplicar el surco de sección transversal regular, ya que la operación más difícil (ejecución de las hendiduras laterales) se excluye por completo y el volumen de la muestra tomada disminuye. Al mismo tiempo, dichas muestras son menos representativas, sobre todo al ser muy diferentes las propiedades físicas de los minerales que constituyen el cuerpo. Además, este método de toma de muestras es inaplicable para asegurar el muestreo técnico o tecnológico cuando se necesita una gran masa de material menífero en forma de fragmentos importantes.

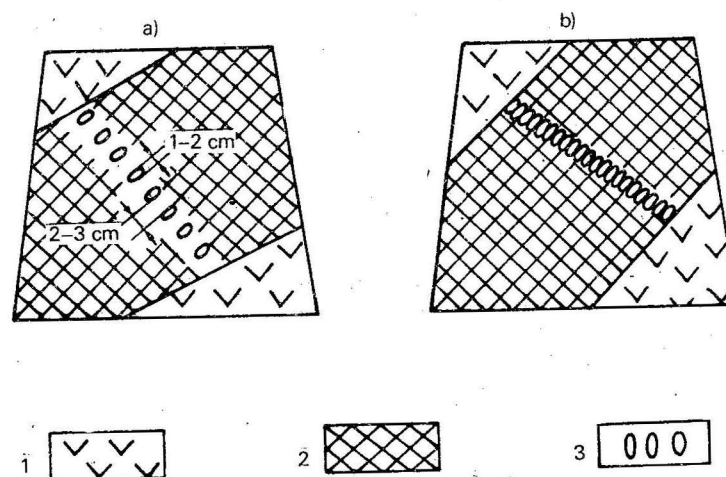


Fig. 4.1 Toma de muestras por surco punteado: a) meniferación regular; b) meniferación irregular; 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral; 3- fragmentos que se arrancan para formar la muestra

La tendencia a combinar la alta productividad de la toma de muestras por surco punteado y la buena representatividad que se obtiene utilizando el surco de sección transversal regular dió como resultado la creación del método de toma que se conoce como *surco volumétrico*; en este caso la toma del material es completamente análoga a la del método precedente, pero se controla rigurosamente el hecho de que el volumen de la muestra correspondiente a cada unidad de longitud del surco sea constante. Como regla general, dicho control se efectúa por cada 10 cm de surco mediante un recipiente graduado, donde se deposita un volumen determinado de agua. Luego, el material arrancado se sumerge en esa agua, hasta que el nivel del líquido alcance la marca determinada, lo que corresponde al volumen necesario de la muestra parcial (generalmente 100 a 300 cm³).

Una vez hecho esto, se vierte el contenido del recipiente sobre un tamiz con pequeñas aberturas para recuperar el material sólido y se recomienzan todas las operaciones antes mencionadas para el siguiente intervalo del surco. En el caso de menas duras este procedimiento asegura una productividad más alta que la del método de surco regular (de 2 a 3 veces y aún más) y una suficiente representatividad de las muestras. Sin embargo, es inaplicable para efectuar el muestreo de minerales útiles solubles o que contienen una considerable proporción de polvo o partículas arcillosas, ya que puede provocar el surgimiento de errores sistemáticos. Además, este método de toma de muestras necesita bastante agua en la proximidad del lugar donde se realiza el muestreo.

Las muestras de surco se ubican en las excavaciones mineras teniendo en cuenta las particularidades de la yacencia de los cuerpos minerales, la variabilidad de la meniferación y la necesidad de crear condiciones normales para los trabajadores. En las excavaciones orientadas por el rumbo o buzamiento (realce) de los cuerpos minerales (galerías, socavones, contrapozos, pozos inclinados) las muestras se toman por lo general en el frente de la excavación a intervalos determinados de su avance. En las excavaciones que atraviesan los depósitos minerales en dirección de su potencia (cruceos, recortes, cortavetas, galerías transversales, pozos criollos, calicatas, pozos de mina, pozos ciegos) la toma de muestras se efectúa según sus paredes. Si la meniferación es regular es suficiente tomar muestras de una sola pared, mientras que para las menas más variables se recomienda utilizar dos paredes opuestas. Los surcos se orientan en la dirección de la potencia normal del cuerpo mineral o formando un ángulo con ella (fig. 4.2): verticalmente en el caso del buzamiento suave (menos de 30°) y horizontalmente al ser este abrupto (más de 60°).

En las trincheras transversales el surco se traza, como regla, horizontalmente según una o dos paredes laterales y como excepción según su fondo (fig. 4.3), porque en este último caso el mineral útil se contamina frecuentemente con las rocas friables de la cobertura. Cuando la trinchera sigue el rumbo del cuerpo mineral, las muestras se toman de su fondo a intervalos determinados trazándose los surcos por la potencia del cuerpo (fig. 4.4).

La toma de muestras por el método de barrenos se utiliza al laborear las excavaciones mineras mediante trabajos de voladura. Como muestra sirve el lodo o polvo de perforación que surge durante la ejecución de los barrenos, tanto destinados al arranque de la mena o roca en el ciclo ordinario de avance de la excavación como los perforados especialmente para realizar el muestreo (fig. 4.5). Este método permite estudiar la calidad del mineral útil y establecer la posición de los límites del cuerpo mineral en el espacio fuera de las excavaciones mineras.

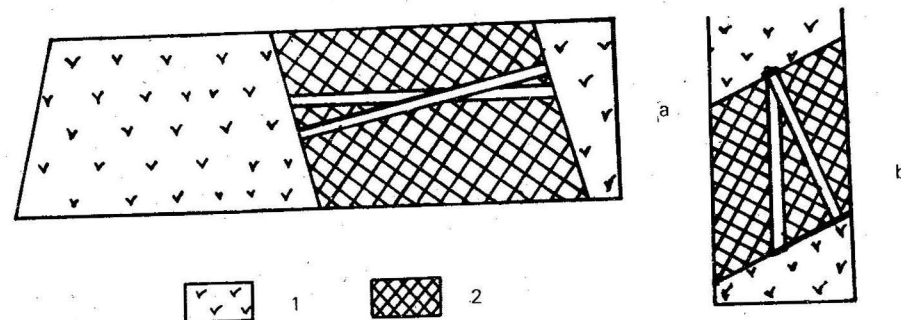


Fig. 4.2 Diferente orientación de las muestras de surco en dependencia del ángulo de buzamiento del cuerpo mineral: a) en un recorte; b) en un pozo criollo; 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral

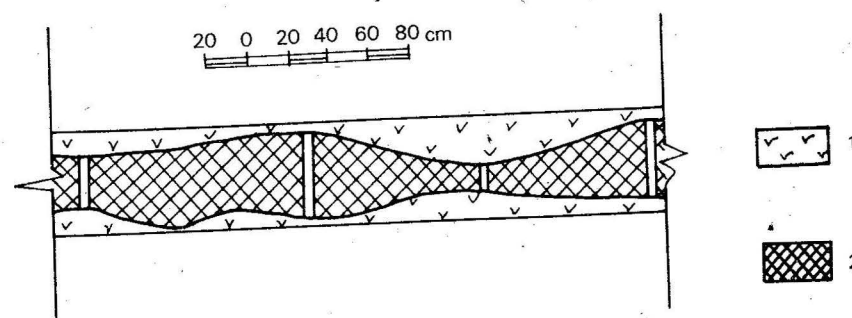


Fig. 4.3 Toma de muestras de surco en el fondo de la trinchera orientada en el rumbo del cuerpo mineral: 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral

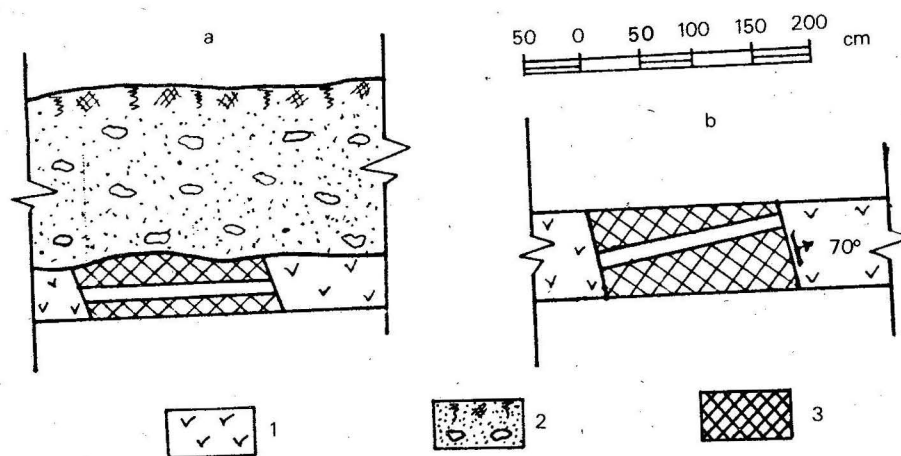


Fig. 4.4 Toma de muestras de surco de la trinchera orientada transversalmente al rumbo del cuerpo mineral: a) en la pared; b) en el fondo; 1- roca encajante; 2- depósitos friables; 3- cuerpo mineral

Por su esencia, las muestras de barreno representan una variedad de las de surco y este se realiza dentro del macizo de la mena o roca con ayuda de medios mecanizados. Por lo tanto, si la recuperación del polvo de perforación es completa, las muestras en cuestión son tan representativas como las de surco. Aún más, se ha demostrado que la representatividad es suficiente aún cuando sean considerables las pérdidas de polvo de perforación, si estas no tienen un carácter selec-

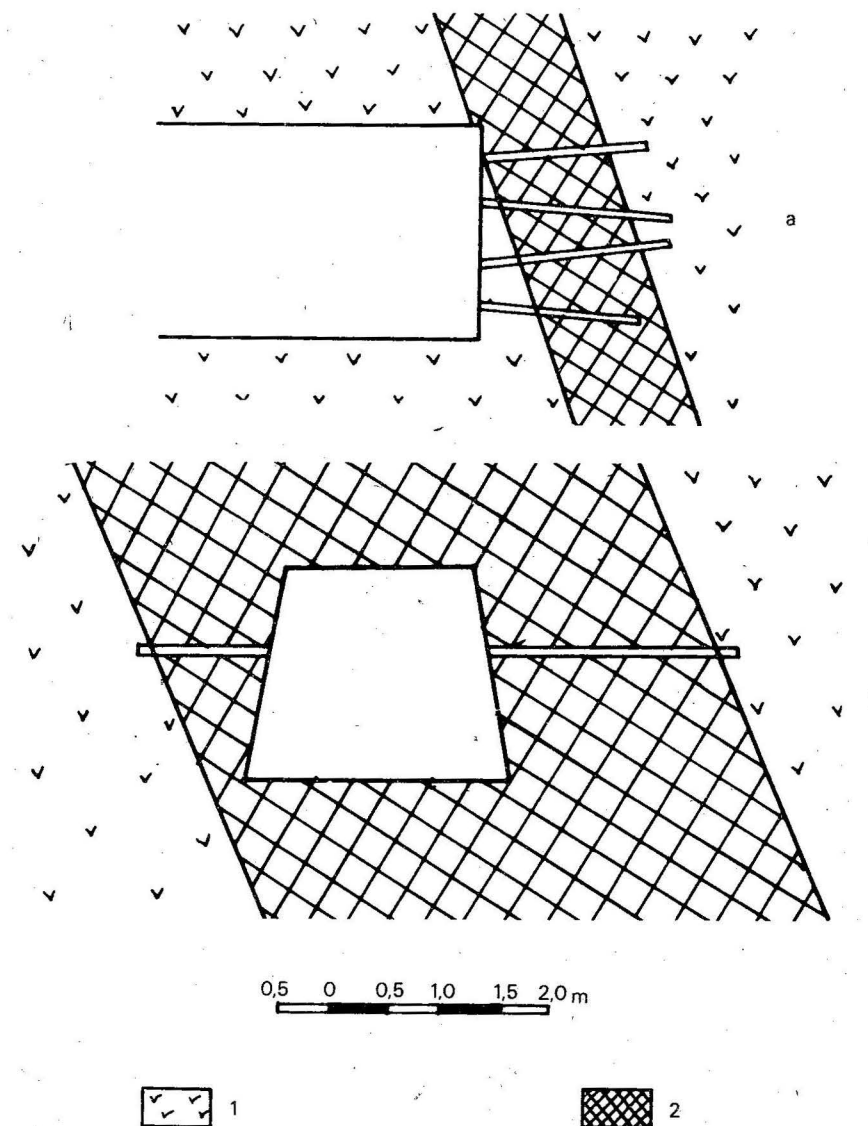


Fig. 4.5 Aplicación del método de barreno: a) para tomar las muestras en una cortaveta; b) para tomar las muestras en una galería; 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral

tivo. Sin embargo, cuando las menas o rocas encajantes están agrietadas o presentan cavernas, la composición del polvo o lodo que sale del barreno se altera de manera importante: en las grietas y cavernas se depositan, o las partículas más grandes y pesadas, generalmente las meníferas (perforación con lavado del barreno), o las más pequeñas y ligeras (perforación neumática), lo que tiene como consecuencia una representatividad insuficiente de las muestras. Por esta razón, en esos casos no se puede recomendar la toma de muestras por el método de barreno. De manera análoga, la aplicación de dicho método no es recomendable cuando es muy diferente la fragilidad de los minerales que componen la mena, ya que durante la perforación los más frágiles se fragmentan en grado sumo y la composición de la muestra no concuerda con la del mineral útil que se va a estudiar.

Para recuperar el lodo y el polvo de perforación se utilizan los tanques de sedimentación (perforación con lavado) o colectores de polvo de diferente construcción. Tres tanques de sedimentación en una serie sucesiva aseguran una recuperación de polvo del orden de 95% de todo el lodo y los colectores, de 50 a 95%. La profundidad del barreno puede alcanzar de 7 a 8 m y hasta 50 m al utilizarse las perforaciones telescópicas de columna, con lo cual la productividad de la perforación y toma de muestras es bastante alta y el tratamiento de las muestras para el análisis químico se simplifica mucho. Además, la recuperación del polvo crea mejores condiciones de trabajo en las excavaciones mineras.

No obstante, dicho método es practicable solo para tomar las muestras químicas y parcialmente mineralógicas, ya que no permite establecer con precisión los límites del cuerpo mineral y esclarecer su estructura, a causa del atraso considerable con el cual el lodo o polvo llega al orificio del barreno y a la mezcla del polvo de las diferentes capas perforadas. Por eso, con frecuencia el método de barreno se reemplaza por la perforación a columna y el muestreo del testigo, y a veces hasta por el laboreo de las excavaciones mineras (recortes) y su muestreo.

Métodos superficiales

En este grupo se conocen dos métodos de toma del material: arranque de una capa entera y de espesor constante dentro de toda la superficie que se va a estudiar o mediante varios puntos ubicados regularmente dentro de dicha superficie. El primer método se llama de hueco y el segundo de puntos. Ambos son racionales si la distribución de los componentes en la mena es irregular en dos direcciones mutuamente perpendiculares que se encuentren en el plano de la superficie aflorada del cuerpo mineral.

Estos métodos, también son utilizables al ser más sencilla la variabilidad de la calidad del mineral útil, pero en esos casos los métodos lineales resultan bastante confiables y con mucha frecuencia más rápidos y menos costosos.

El método de hueco consiste en el arranque de toda una capa de mena de la superficie del cuerpo mineral previamente nivelada. El espesor de dicha capa fluctúa generalmente de 3 a 10 cm y alcanza a veces 20 cm. La representatividad de la muestra se garantiza por la cantidad constante del material que se toma de cada unidad de superficie. Como todas las operaciones de toma de muestras de hueco se efectúan a mano es difícil asegurar una superficie perfectamente nivelada del cuerpo y la profundidad constante del hueco, sobre todo al ser conside-

rable su área. Además, las diferentes propiedades físicas de los diversos minerales de la mena provocan la formación de un microrrelieve bastante accidentado en el fondo del hueco, con muchas concavidades, debido a los minerales frágiles y blandos que causan el surgimiento del error sistemático del muestreo. Este método de toma de muestras es el más difícil de realizar. Por estas razones se utiliza solo en los casos en que los minerales útiles se caracterizan por bajos contenidos de componentes útiles y su distribución es muy irregular en la sección del cuerpo mineral (meniferación bajo la forma de nidos o manchas ubicadas desordenadamente) o para efectuar el muestreo de los cuerpos minerales poco potentes (menos de 0,2 m). Como norma, la superficie del hueco se determina por la potencia del cuerpo mineral y su largo por el rumbo o buzamiento dentro de la pared aflorada de este. Es raro que el largo del hueco sobrepase 1 o 2 m. Como conclusión, el método de hueco asegura la toma de muestras para cualquier aspecto del muestreo (fig. 4.6).

El método de puntos se basa en la toma de muestras parciales según una red regular, las cuales en su conjunto forman la muestra total que caracteriza la superficie que se estudia (fig. 4.7).

Las muestras parciales representan fragmentos de 1,5 a 3,0 cm de diámetro arrancados del macizo del mineral útil. Su masa varía desde 10 hasta 20 g y raramente alcanza 50 g. A veces en lugar de arrancar dichos fragmentos a mano (con martillo y cortadora) se prefiere perforar pequeños barrenos con la completa recuperación de polvo mediante el toma muestras SGI-3. La red para tomar las muestras parciales puede ser cuadrada, rectangular o rómbica según el carácter de la variabilidad de la calidad del mineral útil: la primera se aplica si el carácter de la variabilidad es igual en ambas direcciones de la red, la segunda si es más marcado este carácter en una dirección que en otra, y la tercera se recomienda en los casos intermedios. Las distancias entre los puntos de toma de muestras parciales también dependen del carácter de la variabilidad de la meniferación y van desde 10 hasta 20 cm, y a veces hasta 40 o 50 cm, para las redes cuadradas; si la red es rectangular, las cuadrículas varían desde 10×20 cm hasta 20×40 cm. En estos casos el número total de muestras parciales que constituyen una muestra definitiva puede oscilar entre 20 y 100 y raramente más; la masa total de dicha muestra definitiva alcanza 0,3 a 2,0 kg. Es conveniente señalar que mientras aumenta el número de muestras parciales, más alta llega a ser la representatividad de la muestra total y por eso la red de toma de muestras parciales debe densificarse al ser más irregular la meniferación.

El método de puntos da buenos resultados en el caso de la toma de muestras de menas masivas diseminadas, y regularmente moteadas y de vetillas diseminadas. Algunas veces este método también es aplicable para efectuar el muestreo de menas bandeadas. Sin embargo, de ser conmensurables las dimensiones de acumulaciones minerales (nidos, manchas, bandas, etc.) y las distancias entre los puntos de toma de muestras parciales, o de ser inferiores las primeras a las segundas, puede surgir el error del muestreo (fig. 4.8). Dicho método tampoco se recomienda para el muestreo de las menas cuyos minerales se diferencian mucho por su fragilidad, ya que en este caso los más tenaces crean formas positivas en el microrrelieve de la superficie a estudiar y, por consiguiente, se arrancan en primer lugar y abundan en la muestra, causando el surgimiento del error sistemático en el muestreo.

El método de puntos puede asegurar la toma de muestras de minerales útiles para el muestreo químico y parcialmente para el mineralógico.

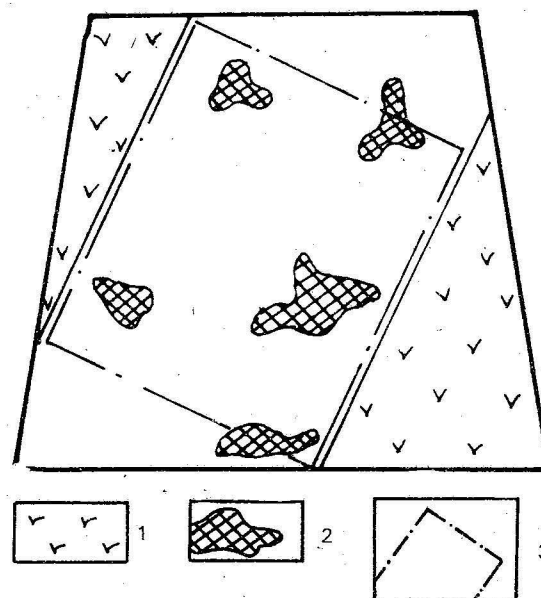


Fig. 4.6 Toma de muestras de hueco en el caso de la menesteración de nidos: 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral con nidos de mineral valioso; 3- área dentro de la cual se toma la muestra de hueco

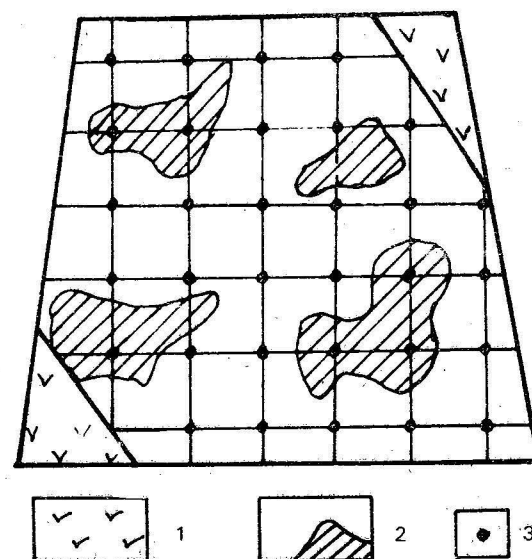


Fig. 4.7 Toma de muestras puntuales en la mena "manchada": 1- roca encajante; 2- cuerpo mineral con acumulaciones de mineral valioso; 3- puntos de toma de muestras parciales

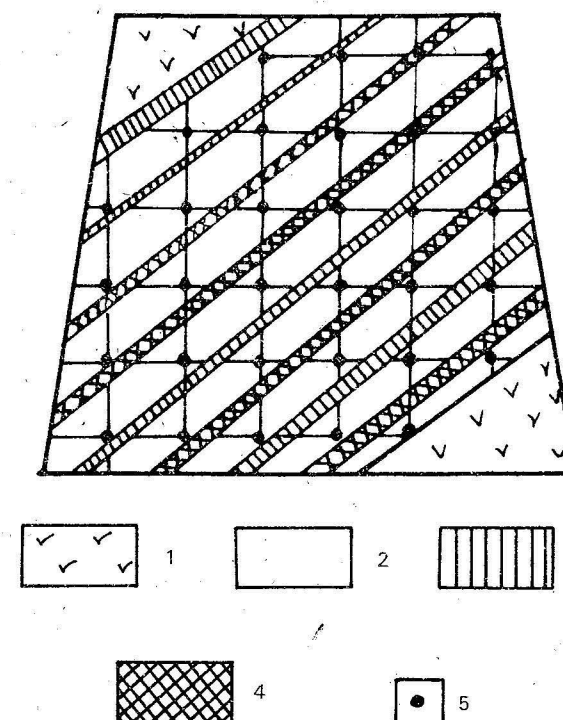


Fig. 4.8 Surgimiento del error sistemático en las muestras puntuales en el caso de textura finamente bandeada en la mena: 1- roca encajante; 2- mena del I tipo natural; 3- mena del II tipo natural; 4- mena del III tipo natural; 5- puntos de toma de muestras parciales

Para concluir el análisis de los diferentes métodos de toma de muestras en las excavaciones mineras y afloramientos naturales se debe señalar que en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración, se utiliza con más frecuencia el método de surco en sus tres modificaciones. Los datos estadísticos obtenidos en 800 yacimientos minerales han demostrado que por dicho método se tomaron cerca de 89% de todas las muestras. El segundo lugar lo ocupa el de hueco con 8,5%, el tercero, el de puntos con 1,5%, el cuarto, el de trozo con 0,6% y el último el de barreno con 0,4%.

Toma de muestras en los pozos de perforación

Como la perforación a columna representa hoy día el medio técnico principal en la ejecución de los trabajos de búsqueda y exploración, el muestreo, en dichos pozos tiene un papel predominante: cerca de 50% del volumen de muestreo total para 2 000 yacimientos estudiados estadísticamente. Para tomar las muestras se pueden utilizar el testigo o el lodo de perforación y a veces el material arrancado de las paredes del pozo con ayuda de los dispositivos sacamuestras especiales.

Los resultados más exactos se pueden conseguir mediante el muestreo del testigo que representa, por así decirlo, un surco de sección transversal cilíndrica realizado en el macizo de la mena o roca encajante. De no existir las pérdidas en el testigo, será constante la cantidad del material tomada por cada unidad de longitud del pozo de perforación y llegará a ser alta la representatividad de la muestra. Por lo general, la recuperación del testigo durante la perforación es incompleta y puede disminuir considerablemente en dependencia de las propiedades físico-mecánicas de las menas y rocas encajantes, así como de la técnica y tecnología de perforación utilizadas. Se considera como satisfactoria la recuperación del testigo de mineral útil superior a 70 a 80%. En tales casos se utiliza únicamente el testigo para tomar las muestras, mientras que, de ser menor su recuperación, hay que utilizar tanto el testigo como el lodo de perforación. Conviene señalar que durante la perforación, este lodo puede perderse parcialmente y estar fuertemente contaminado, razones por las cuales no es aconsejable efectuar el muestreo basándose solo en el lodo, ni aun cuando este sea predominante en el intervalo perforado. En dichos casos es mejor desviar artificialmente el pozo de perforación para perforar una vez más el cuerpo mineral y obtener una mejor recuperación del testigo.

Algunas veces no solo se observan las pérdidas totales del testigo sino también su desgaste selectivo (cuando los minerales más friables y blandos pasan al lodo con más rapidez que los tenaces y duros); cuando esto ocurre la representatividad del testigo se afecta y por consiguiente se necesita el muestreo del lodo, aunque sea bastante alta la recuperación total del testigo. El desgaste selectivo del testigo se manifiesta de manera muy clara en yacimientos de mercurio, antimonio, molibdeno, wolframio, cobre, fluorita y carbón. Las medidas a tomar para aumentar la recuperación del testigo se tratan de manera detallada en la literatura especial sobre la perforación de exploración a columna y es totalmente irracional prestarle alguna atención en este curso.

La determinación de la recuperación real del testigo (R_t) con frecuencia se hace por el método lineal y tiene como resultado el porcentaje del largo total del testigo obtenido (l) con respecto a la longitud del intervalo perforado (L). El cálculo se ejecuta mediante la siguiente fórmula:

$$R_t = \frac{l}{L} \cdot 100 \quad (102)$$

Sin embargo, esto es aplicable solo cuando el testigo se obtiene bajo la forma de columnas bastante regulares. Por otra parte, si las menas o rocas encajantes están agrietadas y son débiles, el testigo se fragmenta y no se observan más que trozos de forma irregular. En esos casos se aplican el método volumétrico o el de peso, cuya esencia consiste en la comparación del volumen o peso del testigo obtenido con la cifra teórica correspondiente para el intervalo perforado. Las fórmulas que se deben emplear son las siguientes:

$$R_t = \frac{V_1}{V} \cdot 100 \quad (103)$$

$$R_t = \frac{P_1}{P} \cdot 100 \quad (104)$$

donde:

V_1 y P_1 - volumen y peso reales del testigo;

V y P - volumen y peso teóricos del testigo.

Dichos valores teóricos se determinan mediante las siguientes fórmulas:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} L \quad (105)$$

$$P = \gamma \frac{\pi d^2}{4} L \quad (106)$$

donde:

d - diámetro del testigo que corresponde al diámetro interior de la corona medido según las cuchillas;

γ - masa volumétrica del mineral útil.

El volumen real del testigo se determina por medidas directas o mediante su sumersión en un recipiente graduado donde se vierte una cantidad determinada de líquido; el peso real se obtiene por medio del pesaje del testigo. Para tomar las muestras del testigo este se corta o se sierra longitudinalmente en varias partes; como duplicado geológico sirve una de estas y como material para los ensayos la otra. Raramente (aproximadamente en 20% de todos los casos) todo el testigo se toma como muestra. Esto se hace si es pequeño su diámetro o insuficiente la recuperación. El corte del testigo puede ser manual (mediante un martillo y una cortadora o un cortatestigo manual), pero últimamente se utilizan con más frecuencia los cortatestigos hidráulicos especiales. La fracción fina que se obtiene durante esta operación hay que mezclarla rigurosamente, dividirla en porciones en proporción con las masas de las partes del testigo obtenidas y añadirlas a estas últimas. De la misma manera se divide el polvo obtenido al serrar el testigo, aunque a veces todo este polvo se utiliza como muestra química independiente de bastante representatividad. Para serrar el testigo se utilizan diferentes sierras de diamantes o aleaciones duras y se obtienen tanto mitades o cuartos del testigo como barras rectangulares o segmentos.

Además, existen aparatos especiales que permiten fresar longitudinalmente el testigo, o sea, tomar del testigo una muestra de surco triturado. Este procedimiento se puede recomendar para los minerales útiles con categoría regular y relativamente regular por su calidad. Durante el muestreo de las sales minerales, la toma de muestras del testigo se efectúa taladrándolo según su eje longitudinal, lo que asegura la obtención del material representativo, inclusive si se observa la disolución selectiva del testigo en su parte superficial.

La experiencia acumulada hasta el presente muestra que el diámetro mínimo del testigo para asegurar suficiente representatividad varía desde 22 a 32 mm (cromitas, menas sideríticas, cuarcitas ferruginosas, menas pirito-cupríferas y titanomagnéticas, areniscas cupríferas, menas de skarn polimetálicas y de hierro, yacimientos de oro primarios) hasta 60 mm (menas de molibdeno, wolframio, antimonio, mercurio, arsénico y metales raros). La amplia utilización de los equipos de perforación a columna con tubos intercambiables, que se ha comenzado en etapas recientes, inevitablemente traerá consigo la reducción ulterior del diámetro del testigo. Por esta razón, las investigaciones en el campo de la representatividad del muestreo, sobre la base de testigos de poco diámetro para diferentes tipos de minerales útiles, son muy importantes y urgentes.

En los casos en que además de tomar las muestras del testigo, hay que efectuar el muestreo del lodo de perforación se necesitan medidas especiales para su extracción completa y para reducir su contaminación, taponamiento de las zonas agrietadas y cavernosas en el pozo, encamisado del pozo en los horizontes de rocas friables, utilización de agua para lavar el pozo y lavado de este después de terminar el ciclo de perforación hasta obtener agua clara. Como muestra sirve todo el lodo obtenido en los depósitos de sedimentación durante el ciclo de perforación. Hay que tratar de hacer coincidir los intervalos de toma de muestras del lodo con los de muestras del testigo para poder calcular el contenido promedio del componente útil para el intervalo estudiado (C) a partir de su contenido en el testigo (C_t) y en el lodo (C_e). La fórmula que se debe utilizar también tiene en cuenta la proporción del testigo y el lodo, y es la siguiente:

$$C = C_t \frac{V_t}{V} + C_e \left(1 - \frac{V_t}{V}\right) \quad (107)$$

donde:

V_t - volumen total del testigo obtenido para el intervalo muestreado;

V - volumen teórico del mineral útil que se debe extraer al perforar este intervalo.

El volumen teórico se determina en función del diámetro del pozo de perforación (D) mediante la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (108)$$

Si el testigo falta totalmente o su recuperación es baja (menos de 40 a 50%), las muestras hay que tomarlas inmediatamente en el pozo de perforación, utilizando diferentes dispositivos especiales, llamados sacamuestras, para arrancar el material de las paredes. Esos equipos se basan en diferentes principios, por ejemplo, penetración del recipiente en la roca bajo el efecto de una explosión o mediante un resorte fuerte (torpedeo); laboreo del surco vertical con ayuda de un vibropercusor; ensanchamiento del pozo por su diámetro; taladreo de muestras en la pared del pozo; etc. Todo el material obtenido por esos procedimientos y llevado a la superficie sirve como muestra, y su representatividad es suficiente en la mayoría de los casos.

Las muestras del testigo permiten realizar el muestreo químico y mineralógico y algunas veces, si es grande el diámetro del testigo y se aplica la perforación en frentes múltiples, también permiten los ensayos técnicos y tecnológicos.

Si la perforación se realiza sin recuperación del testigo, las muestras se toman del lodo aplicando el complejo de medidas destinadas a asegurar una completa recuperación y contaminación mínima. Durante la perforación rotaria con brocas utilizando lavado, estas medidas son las mismas que en el caso de la perforación a columna; en la perforación neumática se aplican para la hermetización del orificio del pozo, diferentes colectores de polvo en la línea de salida. El polvo o lodo obtenidos se subdividen en determinados intervalos según sus particularidades visuales (coloración, presencia de unos u otros minerales, etc.). Las muestras se toman para cada uno de dichos intervalos por separado; la dificultad principal consiste en la correlación del material muestreado con determinado intervalo de la profundidad del pozo. Este problema se puede resolver de manera aproximada mediante cálculos basados en el tiempo necesario para que el polvo o lodo lleguen hasta la superficie en dependencia de la profundidad del pozo y la velocidad de

la corriente ascendente del líquido o del aire. A veces, para conseguir un resultado más exacto, antes de empezar el ciclo de perforación, se introducen en el frente del pozo indicadores especiales (colorantes, pedazos de celofán, etc.) que marcarán el comienzo de la salida del material proveniente del intervalo a estudiar. Además, en los pozos de perforación rotaria se pueden tomar las muestras directamente de sus paredes con ayuda de diferentes dispositivos sacamuestras.

Al ejecutar la perforación a percusión con cable, el lodo se extrae mediante cubetas de diferente construcción. La representatividad de las muestras se logra al extraer totalmente el lodo de cada intervalo muestreado y aislar con seguridad el frente del pozo para excluir la llegada de las rocas sobreyacentes, lo que a veces requiere el encamisado total del pozo de perforación y hasta el avance de las camisas con respecto al frente, en el caso de minerales útiles friables e inestables (placeres). La extracción completa del lodo debe controlarse sistemáticamente comparando su volumen o peso teórico con lo que se está obteniendo realmente. Los resultados de este control se anotan en un registro especial.

Como el diámetro del pozo de perforación con cables generalmente es considerable, la masa del lodo obtenido alcanza un valor importante de 50 a 200 kg por cada metro de profundidad. Además, este mineral es bastante regular por su composición debido a su mezcla durante la perforación o extracción del lodo. El lodo es enviado a tanques de sedimentación especiales y después de mezclarlo rigurosamente se toman las muestras por el método de agotamiento completo según toda la potencia de la capa de lodo en cinco puntos: en el centro y los rincones del tanque utilizando cubetas manuales o tubos con válvulas.

Las muestras tomadas del lodo en los pozos de perforación rotaria o con cable permiten realizar el muestreo químico y parcialmente el mineralógico.

Durante la perforación rotaria con barrenas espirales, que se utiliza ampliamente en la búsqueda y exploración de los placeres y yacimientos de corteza de intemperismo, a veces se puede obtener el testigo usando barrenas huecas y coronas apropiadas, pero con frecuencia el testigo no se recupera. En esas condiciones para cada intervalo perforado correspondiente a una barrena se obtiene en la superficie su propia porción de material destruido. Dichas porciones se colocan en forma de montones separados alrededor del orificio del pozo en un orden determinado, según la sucesión natural de los intervalos perforados. Después de mezclar minuciosamente la pila, esta se transforma en un disco aplanado y según dos diámetros mutuamente perpendiculares se toma el material con una paleta por toda su potencia hasta el fondo. La muestra así tomada permite organizar el muestreo mineralógico o químico.

La perforación a mano hoy día se ejecuta muy raramente y en poco volumen. En estos casos se utiliza como muestra todo el mineral que se encuentra dentro de la cuchara de perforación, cilindro de penetración, cubetas, etc., o sobre la hélice de la barrena espiral. En este último caso antes de tomar la muestra hay que cortar la capa superficial delgada para evitar la contaminación posible del material.

Toma de muestras en la masa menífera arrancada o el mineral útil elaborado

En este grupo se reúnen los métodos de toma de muestras, tanto directamente en las excavaciones mineras y afloramientos naturales como durante diferentes

etapas del tratamiento del mineral útil: en los medios de transporte, depósitos, montones y colas. Desde el punto de vista de la porción caracterizada del mineral útil todos ellos se pueden subdividir en dos grupos: métodos superficiales y métodos volumétricos.

Los superficiales proporcionan las muestras que no pueden caracterizar más que la superficie de la masa menífera, lo que puede provocar el surgimiento del error sistemático del muestreo al manifestarse de manera marcada la segregación del material por la altura del montón o apilamiento. Este método es muy parecido al de puntos, que se aplica para efectuar el muestreo de las menas y rocas encajantes *in situ*. La red generalmente es cuadrada o rectangular con distancias entre los puntos de toma de muestras parciales iguales a 20 a 50 cm y 20 a 100 cm respectivamente; esta distancia es función de la irregularidad de la distribución de componentes de la mena, tamaño de los fragmentos en la masa menífera derrumbada, precisión necesaria del muestreo y la amplitud del área a estudiar. Como regla, el número de muestras parciales que componen la muestra total varía desde 10 hasta 50 y sus masas oscilan entre 0,05 y 0,5 kg. Tratándose del muestreo de la masa menífera en los vehículos autopropulsados, vagones, vagonetas y otros equipos de transporte, el número de muestras parciales disminuye y su ubicación es diferente: según una o dos diagonales del vagón (fig. 4.9).

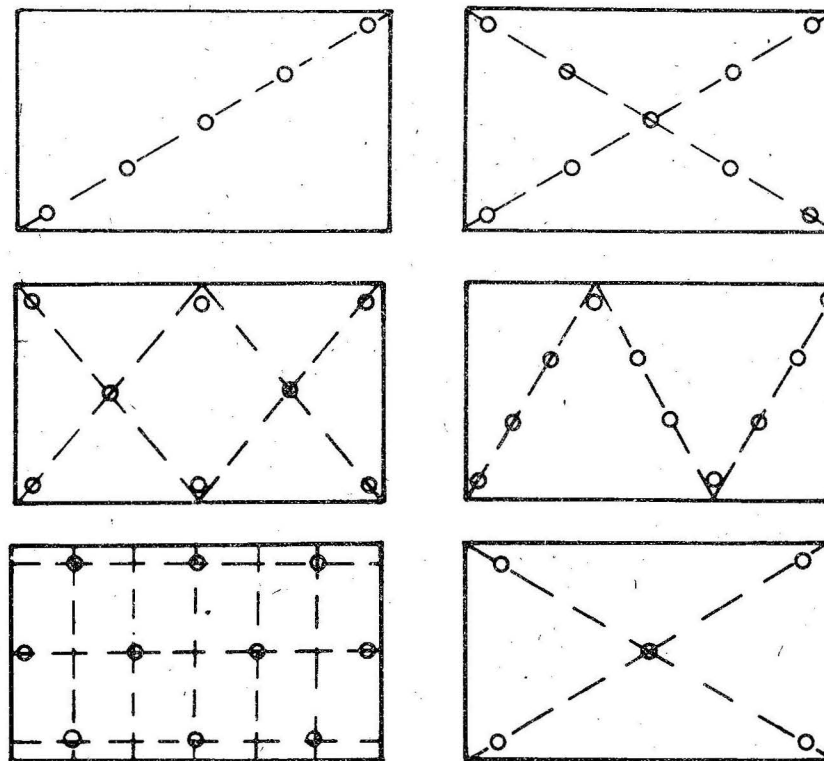


Fig. 4.9 Métodos recomendados para ubicar los puntos de toma de muestras parciales en el caso de muestreo de la masa menífera en los medios de transporte (vagones, máquinas autopropulsadas y otros)

Las muestras parciales se toman en la superficie de la masa menífera con la mano o paleta, razón por la cual el método en cuestión se llama "de puñado". Al caer el punto de toma sobre un bloque o fragmento grande hay que arrancarle una porción de 20 a 200 cm³, mediante un martillo y a veces una cortadora. Es preciso recordar que la representatividad de la muestra total está garantizada sólo a condición de obtener en ella la misma porción del material diferente según su granulometría y particularidades exteriores que se observa en la masa menífera.

El método de puñado es utilizable en el caso del muestreo químico y parcialmente mineralógico de la mayoría de los minerales útiles, ya que durante la extracción, embarque y transporte se realiza la mezcla de la masa menífera, lo que aumenta la representatividad de las muestras tomadas, aún cuando sean muy variables las menas. Las ventajas de dicho método son su alta productividad, superada solo por el método de trozo, y la posibilidad de efectuar el muestreo sin detener los trabajos de avance de las excavaciones mineras o la extracción del mineral útil. Sin embargo, este método no puede asegurar el muestreo selectivo de la mena y su roca encajante, así como los tipos naturales y clases industriales de mena y no se aplica durante el muestreo del mineral útil cuya calidad se determina en primer lugar por el tamaño de los fragmentos o cristales que se obtienen realmente y la falta de defectos en ellos (mica, asbesto, materia prima piezoóptica y otros). Además, la segregación posible de los fragmentos según su densidad y granulometría por la altura del montón o profundidad del recipiente de transporte puede hacer no representativo el método. Por lo tanto, se usa muy poco en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración y se utiliza principalmente durante el servicio geológico en las empresas mineras en funcionamiento.

Los métodos volumétricos de toma de muestras permiten estudiar el mineral útil arrancado o triturado, no solo en la superficie sino también en todo su volumen. Se conocen tres métodos en este grupo: el total, el de porciones múltiples y el de agotamiento completo.

En el método total, toda la masa menífera sirve como muestra. Esta masa se obtiene, por ejemplo, al ejecutar un ciclo de avance de la excavación minera, el arranque de la mena durante su extracción, el envío de toda la producción de la mina por un periodo determinado (turno, día, semana) etc. Dicho método generalmente está bien mecanizado y forma parte del ciclograma de trabajos mineros, lo que representa ventajas indudables. Además, como consecuencia de tomar una masa considerable de material (desde unidades hasta millares de toneladas) las muestras son representativas en grado sumo y permiten realizar todos los aspectos del muestreo. Por otra parte, el tratamiento de muestras tan grandes con el propósito de obtener una pequeña para el laboratorio (para los análisis químicos y espectrales) es difícil y costoso. Por eso es muy rara la utilización del método total para tomar las muestras químicas y solo es racional al ser extremadamente irregular la distribución del componente útil en las tres dimensiones del cuerpo mineral. Su aplicación principal corresponde al muestreo mineralógico y técnico de minerales útiles específicos (mica, materia prima piezoóptica, o para construcción, piedras preciosas y decorativas, etc.), así como el tecnológico en la mayoría de los yacimientos minerales útiles durante la exploración orientativa y detallada.

Si la potencia del cuerpo mineral es pequeña el método total, como regla, no permite efectuar únicamente el muestreo de la mena, ya que la masa menífera arrancada se contamina con la roca encajante. En cuanto al muestreo selectivo según diferentes tipos naturales o industriales de mena solo es posible si estos son

de gran importancia, pero prácticamente se realiza con muchas dificultades y se aplica principalmente en el caso de la explotación a cielo abierto.

Si el material es bastante homogéneo y el peso necesario de la muestra es reducido no tiene ningún sentido tomar como muestra toda la masa menífera obtenida. En este caso es mejor aplicar el método de porciones múltiples, que consiste en la toma regular de porciones determinadas del material dentro de intervalos iguales; dichas porciones en conjunto forman una muestra total. Por ejemplo, al salir del pozo de mina o socavón la masa menífera en las vagones cada quinta, séptima, décima, etc., de estas se envía a un lugar definido para formar la muestra total. Al realizar el embarque del material del montón o escombrera se pueden utilizar cada quinta, décima, etc., pala o cuchara. Para efectuar el muestreo del material en las bandas transportadoras se toma toda la masa menífera en determinados intervalos establecidos. Esta operación se denomina separación de muestras parciales.

El número de muestras parciales (porciones múltiples), su masa y la periodicidad de su toma se establecen en dependencia de la masa necesaria de muestra total, irregularidad de la menífera, tamaño de los fragmentos de la masa menífera y precisión deseable del muestreo. Hay que recordar que en todos los casos la representatividad más alta en la muestra total se obtiene al tomarse numerosas porciones de poca masa en lugar de recoger una cantidad reducida de muestras parciales importantes.

El método de porciones múltiples se aplica en las mismas condiciones que el total; en la mayoría de los casos no le aventaja en representatividad y asegura una economía considerable durante la siguiente operación del muestreo: la preparación de la muestra para los ensayos.

El método de agotamiento completo representa una variante del método de puñado con el objetivo de eliminar las desventajas de este. Para ejecutarlo en los puntos de toma de muestras parciales, que se ubican según redes regulares análogas a las del método de puñado, el material se toma desde la superficie del montón, pila o recipiente de transporte hasta el fondo mediante cubetas con válvulas o sondas especiales; a veces, al ser pequeña la profundidad, se utiliza la pala o paleta. En este caso no solo aumenta la masa de muestras tanto parciales como totales, sino que también aumenta de manera considerable su autenticidad, como consecuencia de la exclusión de la influencia negativa de la segregación del material. El método de agotamiento se caracteriza por su alta productividad y representatividad, pero su aplicación es imposible si los fragmentos de la masa menífera son mayores que 3 a 5 mm. Por eso sirve principalmente para tomar las muestras químicas o mineralógicas durante el estudio de los placeres, lodo de los pozos de perforación sin recuperación del testigo, depósitos de sedimentación, escombreras y colas de plantas de beneficio o instalaciones de trituración y selección del mineral útil.

4.5 Particularidades de la toma de muestras durante la exploración de los placeres

Los yacimientos de este tipo se caracterizan por el bajo contenido de componentes útiles, la distribución muy irregular según la potencia del estrato productivo ("arenas") y la segregación (separación) muy clara de las partículas según su densidad. Todo esto trae como consecuencia el surgimiento de ciertas particula-

ridades específicas en la realización de su exploración y sobre todo en el muestreo de los placeres. Así, por ejemplo, para evaluar correctamente la calidad del mineral útil es necesario conocer no solo el contenido del mineral valioso en "las arenas", sino también otras propiedades tales como capacidad de lavado, contenido de guijarros y a veces de hielo.

La exploración de los placeres se realiza mediante excavaciones mineras (más frecuentemente de pozos criollos) o pozos de perforación a columna de gran diámetro, de percusión con cable o rotaria con barrenas espirales. Las rocas y mineral útil obtenidos durante el laboreo de los pozos criollos se extraen separadamente, por intervalos de avance de la excavación, los cuales varían desde 0,2 hasta 0,5 m para "las arenas" y hasta 1,0 m y aún más para "las turbas". Con el material de cada intervalo se forma una pila; estas pilas se ubican alrededor de la boca del pozo en un orden determinado, generalmente en el sentido de las manecillas del reloj, en sucesión normal a su llegada a la superficie actual. Después de mezclarse el material de cada pila se aplana en un disco y se ejecuta la toma de muestras mediante dos surcos mutuamente perpendiculares. El volumen de esa muestra debe ser de 0,04 a 0,1 m³.

También se puede utilizar otro procedimiento y tomar la muestra directamente en el pozo por surco vertical. De acuerdo con la variabilidad del contenido de mineral valioso, la sección transversal del surco debe tener entre 10 x 20 cm y 20 x 40 cm y se puede tomar un surco o dos, colocados en paredes opuestas; el material de ambos surcos forma la misma muestra.

Si el estudio de la muestra tomada por uno de dichos procedimientos revela el contenido en peso del mineral valioso, hay que tomar para el intervalo correspondiente la muestra complementaria, utilizando todo el resto del material de la pila. Esto es absolutamente indispensable para obtener datos más confiables: auténticos sobre el contenido del componente útil, ya que la práctica de la exploración y explotación ha probado que muchos sectores de los placeres industriales que contenían minerales útiles bajo la forma de granos gruesos fueron desechados a causa del volumen insuficiente de muestras el cual no garantizaba la existencia de al menos un grano mineral en la masa estudiada.

Cuando la exploración de los placeres se efectúa con ayuda de los pozos de perforación a columna, la muestra se constituye con todo el material obtenido durante el avance cada 0,2 a 0,5 m para "las arenas". El volumen de este material se calcula teóricamente a partir del diámetro interior del tubo portatestigo controlándose periódicamente estos cálculos por medio de la determinación del volumen real con ayuda de cajas con medidas especiales.

Al realizar la exploración mediante la perforación de percusión con cable o perforación manual, las muestras representativas se obtienen solo si las camisas adelantan el avance del pozo de perforación, ya que "las arenas" generalmente son friables, acuíferas e inestables. Como muestra sirve todo el material extraído del intervalo a estudiar con ayuda de las cubetas. Según el tipo de mineral útil y el estadio de los trabajos de búsqueda y exploración una muestra corresponde al avance del pozo en "las arenas" en el orden de 0,2 a 2,0 m. En el estadio de la exploración orientativa el largo de la muestra varía desde 0,2 m para el oro hasta 0,5 a 1,0 m para otros minerales útiles, mientras que durante la exploración detallada puede alcanzar 1,0 m o 2,0 m respectivamente. Además, en las muestras de "arenas" hay que tomar las muestras del lecho de roca hasta la desaparición completa de los minerales valiosos. En este caso, los intervalos de toma de muestras oscilan entre 0,2 y 0,5 m.

Cualquiera que sea el método de toma de muestras en los pozos de perforación pueden surgir errores considerables por diferentes razones: esponjamiento irregular de "las arenas" durante la perforación; deshielo de las rocas; material fuera de la camisa durante el avance del pozo o extracción del lodo; penetración de "las arenas" en el pozo en el espacio fuera de la camisa en terrenos movedizos; migración de las partículas pesadas hacia los horizontes inferiores al producirse los golpes; extracción incompleta de dichas partículas desde el lecho de roca; flotación y pérdida del oro o platino nativos al utilizar lubricantes orgánicos. Por lo general, los errores de este género implican la devaluación en el contenido del mineral valioso y la determinación incorrecta de la potencia y profundidad de yacencia de "las arenas".

Durante los estadios iniciales de la búsqueda o exploración, la toma de muestras de "las turbas" es obligatoria, tanto en los pozos criollos como en los de perforación. Esta toma se realiza de la misma manera que en el estrato productivo, pero su largo es mucho más grande (de 1,0 m a 5,0 m). Si "las turbas" son estériles su muestreo posterior se efectúa solo con carácter selectivo en determinados laboreos de prospección, con el objetivo de comprobar la ausencia del mineral valioso. En estos laboreos seleccionados las muestras hay que tomarlas según toda la potencia de "las turbas".

Al explotarse los placeres por la vía subterránea se necesita su muestreo para poder planificar correctamente los trabajos de extracción. En este caso, las muestras se toman del estrato de "arenas" por surco vertical de gran anchura, a mano, o utilizando martillos neumáticos picadores. El surco se subdivide, como regla, en cuatro secciones: la zona extraíble del lecho de roca; la parte inferior de "las arenas" (0,4-0,5 m); la parte intermedia (1,0-1,5 m), y la parte superior del estrato productivo (0,3-0,5 m).

Al efectuarse el muestreo de los frentes de explotación en los placeres explotados a cielo abierto por dragado, los puntos de toma de muestras se ubican según una red rómbica cuya diagonal mayor, orientada a lo largo del polígono de draga, es igual a 30 m y la corta varía desde 20 m para los placeres regulares hasta 15 m para los irregulares. Cada punto de toma, en realidad, corresponde a un surco punteado ya que a la muestra es enviado el material de los cucharones durante el desplazamiento del chasis con cucharones. Como norma, es suficiente tomar las muestras parciales cada tercer cucharón y componer la muestra total de cinco parciales. Como muestra parcial se toma el material recientemente obtenido que se encuentra sobre el borde del cucharón (fig. 4.10).

El largo de este surco corresponde al descenso vertical del chasis que fluctúa desde 0,2 a 0,5 m para "las arenas" hasta 1,0 m para "las turbas". Las muestras del lecho de roca se toman separadamente, empezando su toma al aparecer en los cucharones el eluvión de las rocas madres y termina después de obtener los datos que indican la ausencia de minerales valiosos en el piso del frente de excavación.

Cuando la explotación del placer se hace mediante canteras, el muestreo de sus escalones se efectúa por el método de surco. Estos son verticales y se ubican a una distancia de 10 m uno de otro. El largo de una muestra generalmente es de 1,0 m. Las muestras se toman sucesivamente de arriba hacia abajo. Las del lecho de roca, que representa el piso de la cantera, se toman utilizando pozos criollos de poca profundidad ubicados según su red cuadrada (10 x 10 m), de acuerdo con la metodología usual del muestreo de dichas excavaciones durante la explotación de los placeres, y el largo de la muestra es de a 0,2 a 0,5 m.

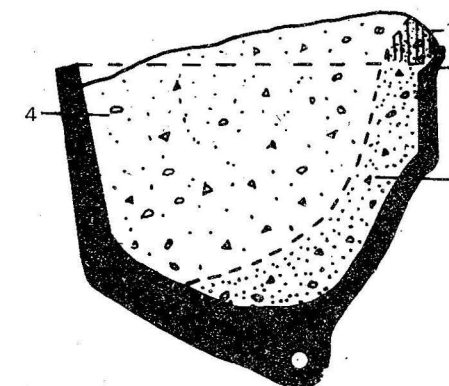


Fig. 4.10 Toma de muestra con el cucharón de la draga: 1- material para tomar la muestra; 2- borde del cucharón; 3- material proveniente del horizonte a estudiar; 4- rocas sobreyacentes

4.6 Toma de muestras por secciones

Cualquiera que sea el método de toma de muestras de las menas o rocas en su propia yacencia, ellas deben asegurar la característica completa de la calidad del mineral útil a lo largo de todo el crucero de prospección correspondiente. Si son claros los contactos del cuerpo mineral y perfectamente homogéneo este último por su estructura interna, dicha tarea se resuelve con éxito mediante la toma de una sola muestra en cada crucero de prospección. No obstante, en la mayoría de los casos, los cuerpos minerales homogéneos anteriormente citados, manifiestan una cierta variabilidad en el contenido de componentes en la dirección de su potencia, sin hablar de los cuerpos que se constituyen por diferentes tipos naturales de menas visualmente distintos. Con mucha frecuencia los límites del depósito mineral son invisibles y se pueden trazar solo sobre la base de los ensayos de muestras tomadas y de la comparación de su calidad con las exigencias industriales en vigor. Todo lo expuesto implica la necesidad de efectuar por separado el muestreo de partes del mismo cuerpo mineral, que son diferentes, o pueden serlo, por su calidad, separándose por lo general esas partes según la potencia del cuerpo. Este problema surge principalmente al aplicarse los métodos lineales de toma de muestras, así como durante el muestreo de los pozos de perforación, aunque también se puede encontrar cuando se utilizan los métodos de huecos, de puntos y a veces el total (fig. 4.11 y 4.12).

Las partes del cuerpo mineral separadas para el muestreo selectivo en un crucero de prospección se llaman secciones y la toma de las muestras correspondientes que aseguran el estudio de cada una por separado se denominan toma de muestras por secciones. En primer lugar, esta toma de muestras se aplica para caracterizar separadamente diferentes tipos naturales de menas y los límites de las secciones coinciden con los de dichos tipos (fig. 4.13a). A menudo esta variedad se nombra toma de muestras por capas seccionadas.

En segundo lugar, las muestras se toman por secciones para establecer los límites industriales del cuerpo mineral al ser gradual el paso entre el mineral útil y la roca encajante. En este caso la precisión en el trazado de dichos límites depende mucho del largo de las secciones utilizadas y las últimas muestras deben

ubicarse obligatoriamente fuera del límite supuesto para comprobar la ausencia de la meniferación industrial (fig. 4.13b y c).

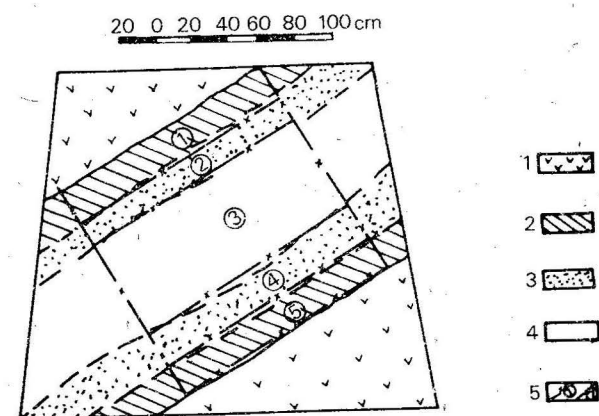


Fig. 4.11 Toma de muestras de hueco por secciones: 1- roca encajante; 2- menas diseminadas ricas; 3- menas diseminadas pobres; 4- cuerpo mineral con meniferación en nidos; 5- límites y números de secciones de las muestras de hueco

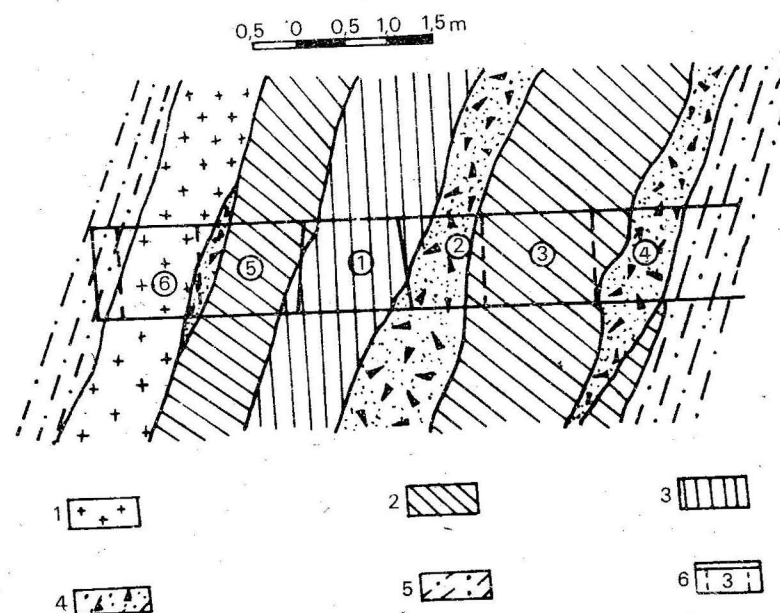


Fig. 4.12 Toma de muestras volumétricas por secciones: 1- pegmatita de textura apográfica; 2- pegmatita de textura pegmatoidal; 3- pegmatita de textura de bloques; 4- complejo cuarzo-moscovítico; 5- gneis granato-biotítico; 6- límites y números de la muestra volumétrica

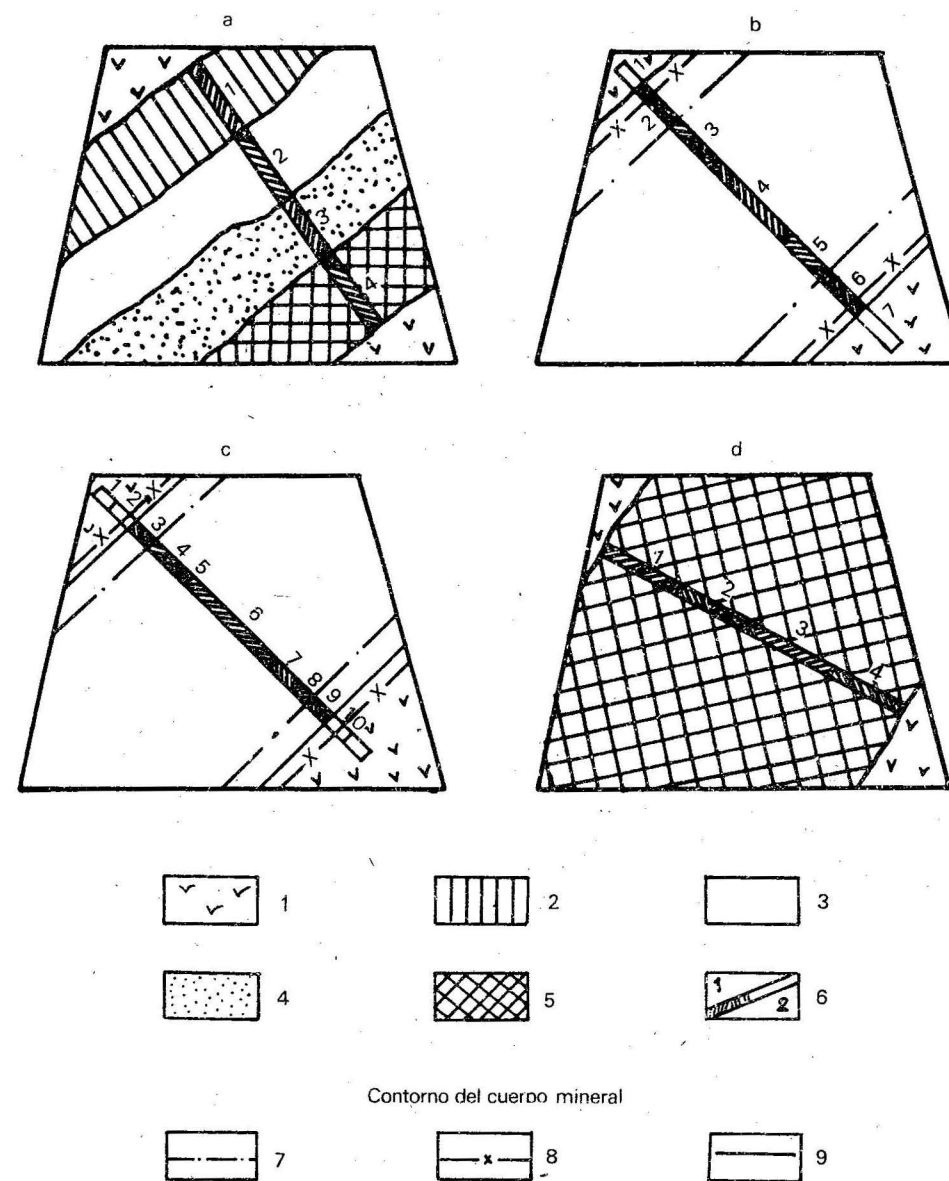


Fig. 4.13 Utilización de la toma de muestras por secciones: a) para estudiar por separado diferentes tipos naturales de mena; b) y c) para delimitar el cuerpo mineral según su potencia con diferente exactitud; d) para estudiar la variabilidad de la calidad en los límites de un cuerpo potente; 1- roca encajante; 2- mena del I tipo natural; 3- mena del II tipo natural; 4- mena del III tipo natural; 5- mena del IV tipo natural; 6- secciones de contenido industrial y no industrial del componente útil; 7- supuesto sobre la base de los documentos geológicos; 8- real; 9- industrial

En tercer lugar, la toma de muestras por secciones tiene como objetivo el estudio de la variabilidad de la calidad y la revelación de las particularidades de la estructura interna de los cuerpos minerales potentes, que exteriormente parecen ser homogéneos. En este caso el largo de una sección se obtiene en función de la precisión necesaria para los resultados del estudio (fig. 4.13d).

En la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración, dichos casos se pueden encontrar, tanto por separado como en diferentes combinaciones. Por ejemplo, para el mismo cuerpo mineral se puede necesitar el trazado de su contorno invisible, el estudio selectivo de sus diferentes tipos de mena, así como de la estructura interna y la variabilidad de algunos tipos de mena más potentes (fig. 4.14).

En los comienzos de los trabajos de búsqueda y exploración el largo de la sección independiente se determina de acuerdo con las particularidades naturales del cuerpo mineral y por lo general varía desde 0,5 hasta 2,0 m, y a veces disminuye hasta 0,2 a 0,3 m. Las secciones más cortas no se utilizan durante los trabajos de índole práctico. Además, en estos estadios de estudio del yacimiento es inadmisibles enviar en una misma muestra diferentes tipos naturales de mineral útil, razón por la cual las muestras generalmente son diferentes por su largo. La división formal de la línea de toma de muestras en secciones iguales representa entonces un error muy serio, ya que esto no permite resolver correctamente las tareas que hacen necesario el muestreo por secciones. Luego, durante la exploración detallada y de explotación, el largo de la sección puede aumentar hasta 5 a 10 m y a veces hasta 20 m si ya se estableció suficientemente la homogeneidad del mineral útil, y se determinaron sus clases industriales, potencias posibles y límites aproximados de los horizontes de explotación dentro del cuerpo mineral.

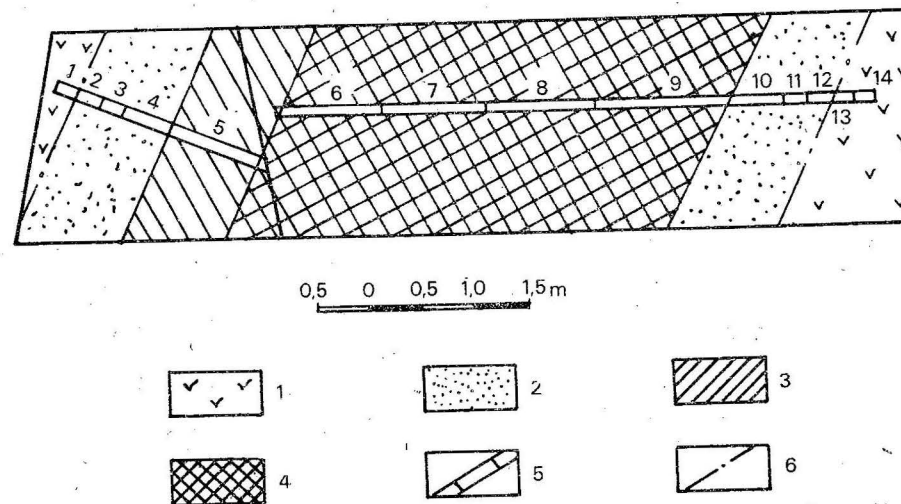


Fig. 4.14 Toma de muestras por secciones para la solución de diferentes tareas: 1- roca encajante; 2- menas pirito-cupríferas diseminadas; 3- menas pirito-cupríferas bandeadas; 4- menas pirito-cupríferas masivas; 5- secciones de muestras de surco y su número; 6- contorno supuesto del cuerpo mineral

4.7 Distancia entre las muestras

En cada crucero de prospección que corta al mineral útil en toda su potencia, hay que estudiar todos los intervalos, y las muestras por secciones (si se toman) deben abarcar toda la potencia sin espacios vacíos o duplicidades. En este caso no se puede plantear el problema referente a la distancia entre las muestras. Sin embargo, tales cruceros de prospección se ubican a una distancia determinada uno de otro, lo que influye mucho sobre la distancia existente entre las muestras. Al realizar la perforación de exploración, la densidad de la red determina inmediatamente la distancia entre los puntos de toma de muestras; si las excavaciones mineras están orientadas transversalmente al rumbo de los depósitos minerales ellas se muestrean totalmente y se puede tratar solo de las distancias entre tales excavaciones. Por el contrario, en las excavaciones mineras que siguen el rumbo o buzamiento del cuerpo mineral, la distancia entre los puntos de toma de muestras puede variar considerablemente. Esta distancia es función del grado y carácter de la variabilidad del mineral útil, tipo de muestreo y precisión necesaria en los resultados, así como de las dimensiones del cuerpo mineral y la riqueza de la mena.

Uno de los métodos más sencillos para escoger la distancia entre las muestras en dichas excavaciones mineras se basa en la utilización de la experiencia adquirida y la analogía bien argumentada. Esta experiencia fue generalizada en el año 1941 por los científicos soviéticos N.V. Baryshev y V.M. Kreiter y desde entonces las recomendaciones se repiten en muchos manuales y libros de consulta relativos al muestreo (tabla 4.2).

Las distancias indicadas en la tabla 4.2 no sirven más que para dar al geólogo una orientación preliminar a partir de la cual él debe asegurar la solución más exacta del problema, precisándolas para cada objeto geológico concreto en el transcurso de la realización de los trabajos de búsqueda y exploración.

Otro método ampliamente utilizable consiste en los cálculos de la distancia entre las muestras mediante fórmulas de la estadística matemática. Para realizarlo hay que conocer las dimensiones del sector del cuerpo mineral, para el cual se determinarán con posterioridad los valores promedio que caracterizan la calidad del mineral útil, la variabilidad de la menificación y la precisión necesaria de los resultados. Si todos estos datos existen, se efectúa primeramente el cálculo de número de muestras indispensables (N) según la fórmula (93):

$$N = \left(\frac{V_t}{\delta} \right)^2$$

donde:

V - coeficiente de variación del contenido del componente principal, %;

δ - error relativo admisible en la determinación del contenido de dicho componente, %;

t - coeficiente de probabilidad de confianza.

Luego, teniendo en cuenta el largo del sector que se propone para efectuar el muestreo (L) se puede determinar la distancia entre las muestras (l) como:

$$l = \frac{L}{N}$$

Además, las distancias necesarias y suficientes entre las muestras se puede obtener por medio de la dispersión de la red del muestreo excesiva resultante del estudio experimental de ciertos sectores del cuerpo mineral o realizada durante la extracción del mineral útil en un bloque de explotación.

Tabla 4.2
DISTANCIAS RECOMENDADAS ENTRE LAS MUESTRAS

Distribución de los componentes en el mineral útil	Coefficiente de variación del contenido del componente principal, %	Minerales útiles típicos	Distancias recomendadas entre las muestras, m
Muy regular	Menos de 20	Sedimentarios (carbón, esquistos combustibles, materia prima para construcción, azufre, fosforita, fundentes metalúrgicos, parcialmente menas de hierro y manganeso)	20 - 25
Regular	20 - 40	Sedimentos (sales minerales, caolín, bauxita, parcialmente menas de hierro y manganeso); metamorfogénicos (menas de hierro) y magmáticas (menas cupro-niquelífera y de metales raros)	6 - 20
Irregular	40-100	Hidrotermales y de skarn (cobre, polimetales, parcialmente wolframio y molibdeno), pegmatitas (mica)	4 - 6
Muy irregular	100-150	Hidrotermales y parcialmente neumatolíticos (estaño, wolframio, molibdeno, parcialmente oro)	
Extremadamente irregular	más de 150	Hidrotermales y parcialmente neumatolíticos (oro, metales raros), magmáticos (platino, diamante)	1,0 - 2,5

4.8 Tipos de muestras

La existencia de diversos tipos del muestreo y la necesidad de estudiar los mismos índices de la calidad del mineral útil a diferentes niveles, para asegurar la evaluación geólogo-industrial completa del yacimiento, se reflejan en el hecho de que las muestras tomadas para lograr este objetivo caracterizan diferentes volúmenes del cuerpo mineral y están destinadas a resolver diferentes tareas. De

acuerdo con esto, se puede hablar de los tipos de muestras que se explican a continuación.

Las *muestras ordinarias* están destinadas a precisar los límites del cuerpo mineral según su potencia y superficie de extensión, estudiar por separado diferentes tipos naturales de mineral útil y esclarecer la regularidad en la variabilidad de su calidad en el espacio. Estas se toman en los cruceros de prospección independientes orientados según la potencia del cuerpo mineral o en una dirección aproximada a ella. Las muestras de este género se pueden tomar según toda la potencia del cuerpo de una vez o por secciones que caractericen sus diferentes horizontes.

Según el tipo de mineral útil, las muestras ordinarias pueden asegurar el muestreo químico, mineralógico o técnico. Dichas muestras se someten a los análisis para determinar solo el contenido de componentes principales o pasan por un complejo de ensayos mineralógicos o físico-técnicos que permiten estudiar los índices principales de la calidad, determinantes de la utilidad de la materia prima mineral para la economía nacional.

Las *muestras unidas* se utilizan en los últimos estadios de los trabajos de búsqueda y exploración cuando ya se conocen diferentes tipos naturales o hasta clases industriales del mineral útil. Se componen del material de las muestras ordinarias tomadas dentro del mismo tipo natural o industrial de mena en un solo crucero de prospección o varios contiguos (hasta 3 a 5 cruceros), con el propósito de reducir los gastos durante el tratamiento y ensayos de las muestras y por consiguiente caracterizan un volumen más grande del cuerpo que las ordinarias. El estudio de dichas muestras permite revelar las regularidades más generales de la variabilidad de la calidad del mineral útil, ya que se excluyen las variaciones locales. Por su naturaleza, las muestras unidas no son aplicables para delimitar el cuerpo mineral en la dirección de su potencia. Su utilización es racional si se toman las ordinarias en las excavaciones mineras orientadas por el rumbo o buzamiento cuando la distancia entre las muestras es bastante pequeña. En el caso de los pozos de perforación no se recomiendan las muestras unidas. Hay que señalar que la muestra unida puede componerse de las ordinarias, tanto antes como después de su tratamiento, pero en el último caso las porciones tomadas de cada muestra ordinaria deben ser proporcionales a las partes de la potencia del cuerpo mineral que ellas representan. Las muestras unidas se someten a los análisis y ensayos cuyo programa coincide con el utilizado en el caso de las muestras ordinarias.

Las muestras agrupadas están destinadas al estudio más profundo de la calidad del mineral útil, teniendo en cuenta todos los componentes útiles secundarios o índices complementarios que influyen sobre la calidad del producto final al utilizarse industrialmente la materia prima mineral. Las muestras agrupadas se componen por separado para cada clase industrial de mineral útil y pueden caracterizarlo tanto en un crucero de prospección independiente como en el plano de alguna sección del cuerpo mineral (perfil de prospección, plano de horizonte, etc.), o en determinado volumen de este. La toma de material de las muestras ordinarias o unidas para componer una agrupada se ejecuta después de su tratamiento, en cantidades proporcionales a los volúmenes del cuerpo que estas representan. Como regla, una muestra agrupada se puede formar de 3 a 10 muestras ordinarias o unidas y sus límites coinciden con los del tipo industrial correspondiente a la mena, aunque si es muy grande la potencia de esta última, el largo total de la muestra agrupada no debe sobrepasar la altura del horizonte o bloque

de explotación (20 a 40 m). La toma de muestras agrupadas debe ser sistemática y debe abarcar todo el conjunto de muestras ordinarias y unidas. Las muestras de este género compuestas de manera selectiva y sin un sistema general no aseguran la solución de la tarea planteada (la del estudio completo y profundo de la calidad del mineral útil) y por consiguiente no permiten calcular las reservas de componentes valiosos secundarios.

Las muestras agrupadas se pueden utilizar durante el muestreo químico, mineralógico y técnico. Ellas son analizadas para obtener los contenidos de componentes principales y secundarios o se someten a los ensayos físico-técnicos según un programa completo para determinar todos los índices necesarios para evaluar la calidad del tipo de materia prima mineral dada.

Las muestras combinadas caracterizan el cuerpo mineral en todo su volumen o dentro de un sector importante. Ellas corresponden a los tipos industriales del mineral útil o si es imposible su extracción selectiva a la mezcla de estos que se considera probable en el caso de la explotación futura del yacimiento. Con dichas muestras se persigue la finalidad de estudiar las propiedades tecnológicas del mineral útil y realizar las investigaciones detalladas de su composición química, teniendo en cuenta las particularidades de la explotación proyectada del yacimiento mineral.

Las muestras monominerales se componen separadamente para diferentes tipos naturales e industriales de mineral útil y a veces también para diferentes etapas de la mineralización o generaciones del mismo mineral. Cada muestra de este género representa uno u otro mineral independiente seleccionado del material de las muestras ordinarias, unidas o agrupadas. Las muestras monominerales se utilizan para estudiar la distribución de los elementos secundarios en diferentes minerales, establecer el balance de la distribución de los componentes tanto principales como secundarios en la mena, evaluar el grado de extracción posible de los componentes valiosos durante el beneficio de la mena y escoger el esquema óptimo de beneficio, tratamiento metalúrgico u otro proceso de elaboración de la materia prima mineral.

4.9 Tratamiento de las muestras

El tratamiento de las muestras tiene como objetivo su preparación para los análisis y ensayos correspondientes y la garantía de la conservación obligatoria de la representatividad de la muestra inicial. El tratamiento forma parte de cualquier aspecto del muestreo, pero la preparación para los ensayos de las muestras mineralógicas (separación de la mena en diferentes fracciones, preparación de las secciones pulidas y delgadas, etc.), técnicas (aserramiento o moldeo de modelos de forma y tamaño determinados, calcinación del material, división de la muestra en fracciones granulométricas, etc.) y tecnológicas (trituración del material hasta obtener la proporción necesaria de las partículas de tamaño diferente, introducción de diferentes adiciones o reactivos, moldeo de artículos industriales, corte y pulimentación del mineral útil, etc.) es tan específica y variada que no resulta racional estudiarla aquí y con más razón porque existen muchas normas estatales e instrucciones apropiadas que reglamentan todas estas operaciones.

Por otra parte, el tratamiento de las muestras químicas tiene un carácter más general, ya que siempre se prevé la obtención de una pequeña muestra de laboratorio (decenas, raramente centenas de gramos) finamente triturada (décimas y

centésimas de milímetros de diámetro) a partir del material inicial que tiene una masa considerable (kilogramos hasta decenas de toneladas) y que se constituye de fragmentos bastante grandes (decenas de milímetros hasta unos metros) con la condición obligatoria de que la composición química de la porción de laboratorio sea la misma que la de la muestra inicial. Por lo tanto, el tratamiento de las muestras químicas debe consistir en la trituración del material y la reducción de su cantidad, respetándose las reglas que aseguren la conservación de la representatividad de esta. También se debe señalar que los principios fundamentales del tratamiento de las muestras químicas son igualmente válidos en los casos del muestreo mineralógico, técnico y tecnológico, puesto que en todos ellos se presenta la necesidad de reducir su masa antes de ejecutar los ensayos.

Principios del tratamiento de las muestras

Se conoce bien que al triturarse la muestra las partículas meniferas se separan de las filoneanas y el número total de partículas en la muestra crece de manera importante, por lo cual en el mismo volumen de material separado de la muestra total se garantiza una proporción más verdadera de las partículas meniferas y filoneanas con respecto a la muestra inicial. Por esta razón, el primer principio del tratamiento de las muestras se puede formular de la siguiente manera:

Cuanto más finas son las partículas de la muestra y más rigurosamente sean mezcladas, tanto menor es la porción representativa del material.

Sin embargo, la trituración de muestras requiere un equipamiento especial, gastos considerables de energía y tiempo, lo que aumenta enormemente el costo de la trituración a medida que se reduce el diámetro de las partículas (fig. 4.15). Por eso, la trituración de toda la muestra inicial hasta el tamaño deseable de las partículas es económicamente irracional, ya que la gran mayoría del material finamente triturado es inútil y los gastos para obtenerlo son injustificados.

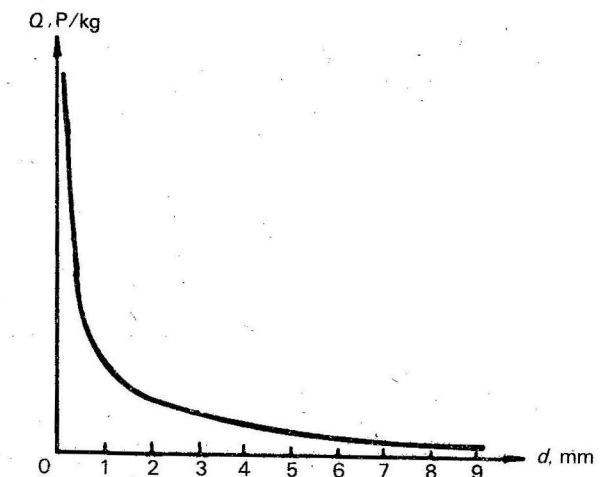


Fig. 4.15 Relación entre los gastos específicos para la trituración de muestras (Q) y el diámetro de partículas obtenidas (d), cuando el grado de trituración es equivalente

A partir de razones económicas, el segundo principio del tratamiento de las muestras consiste en lo siguiente: *excluir la trituración del material superfluo dejando para su tratamiento posterior sólo la cantidad mínima necesaria.*

Es fácil comprobar que los principios aquí tratados son contradictorios en grado sumo: si el primero requiere la trituración más completa posible de la muestra para garantizar la representatividad de la porción que será finalmente separada, el segundo aconseja reducir esta operación al mínimo sin hacer caso de la representatividad de la muestra que en tales condiciones se puede afectar fácilmente. La solución correcta en este problema es la siguiente: *trituration de la muestra en etapas sucesivas dejando al final de cada etapa la cantidad mínima necesaria del material que asegure la conservación de la representatividad de la muestra.*

Para determinar la masa mínima necesaria de la muestra se utiliza la dependencia del tamaño de sus partículas basada en el primer principio estudiado. Conviene señalar que las partículas en la muestra triturada son desiguales por su diámetro y por esta razón las dependencias en cuestión se basan en el tamaño de las partículas que se controla más fácilmente, o sea, en su diámetro máximo.

La primera fórmula para expresar dicha relación, denominada ecuación de Vezin-Brunton, fue deducida teóricamente a partir de la suposición de que el peso de la partícula es proporcional al cubo de su diámetro:

$$Q = Kd^3 \quad (109)$$

donde:

Q - peso mínimo representativo de la muestra ya reducida, kg;

d - diámetro máximo de las partículas, mm;

K - coeficiente de heterogeneidad, que tiene en cuenta el contenido del componente a estudiar en la mena y su variabilidad, tamaño de los granos de mineral valioso y su morfología, diferencias en la densidad y fragilidad de diferentes minerales de la muestra.

Como en lugar del diámetro medio de las partículas se utiliza el diámetro máximo, la fórmula propuesta provoca una exageración considerable en el peso mínimo representativo de la muestra y no puede garantizar la confección de los esquemas de tratamiento de muestras económicamente eficiente, debido a lo cual la ecuación de Vezin-Brunton no alcanzó una aplicación notable en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración y hoy día no representa más que un hecho histórico. Para remplazarla, el científico inglés Richards, basándose en los resultados de los trabajos experimentales propuso considerar el peso mínimo representativo de la muestra como proporcional al cuadrado del diámetro máximo de sus partículas y el profesor del Instituto de Minas de Leningrado G.O. Chechett, expresó esta relación empírica bajo la forma de una ecuación conocida actualmente como de Richards-Chechett:

$$Q = Kd^2 \quad (110)$$

Hoy día esta ecuación se utiliza muy ampliamente durante el muestreo de minerales útiles y representa la base teórica para confeccionar los esquemas del tratamiento de muestras químicas. Si bien al comienzo de su aplicación el coeficiente de heterogeneidad variaba desde 1 hasta 10, las investigaciones posteriores han probado que su valor se puede reducir de manera notable. Para orientar al geólogo al confeccionar los esquemas del tratamiento de muestras, V.M. Kreiter pro-

puso las siguientes recomendaciones, en cuanto al valor de este coeficiente K , los cuales son válidos hasta el presente:

Distribución regular y muy regular de los componentes: $K=0,05$.

Distribución irregular: $K=0,1$.

Distribución muy irregular: $K=0,2$ a $0,3$.

Distribución extremadamente irregular: $K=0,4$ a $0,5$.

Distribución extremadamente irregular de las partículas gruesas (más de $0,6$ mm) de oro nativo: $K=0,8$ a $1,0$.

Las recomendaciones más concretas relativas al tratamiento de muestras de diferentes tipos de minerales útiles pueden encontrarse en las instrucciones estatales correspondientes.

Como el coeficiente de heterogeneidad depende del tamaño y de la forma de las partículas de la muestra, los cuales varían incesantemente durante su tratamiento, su valor debería también variarse conforme a diferentes etapas de la trituración del material. Además, la fórmula de Richards-Chechett tiene en consideración la fragilidad o tenacidad diferente de los minerales solo de manera incompleta, aunque estas propiedades influyen mucho sobre el diámetro medio de las partículas en la muestra triturada. Para eliminar estos defectos fue propuesta la tercera fórmula, llamada ecuación de Demond-Halherdal que es la siguiente:

$$Q = Kd^a \quad (111)$$

El exponente a varía entre 1,5 para los minerales útiles frágiles y blandos y 2,7 para los tenaces y duros y tiene que determinarse empíricamente con más precisión en cada caso concreto. Asimismo conviene establecer por vía experimental el valor del coeficiente de heterogeneidad que varía independientemente de dicho exponente. Por eso, la fórmula de Demond-Halherdal, aunque da mejores resultados en comparación con la de Richards-Chechett, resulta difícil aplicarla prácticamente y por esta causa se utiliza poco durante los trabajos de búsqueda y exploración alcanzando, en compensación, una gran aplicación en las plantas de beneficio.

Operaciones del tratamiento de las muestras

A partir de lo expuesto anteriormente en el transcurso del tratamiento de cualquier muestra deben realizarse las siguientes operaciones:

Trituración

Tamizaje con el objetivo de verificar el tamaño de las partículas obtenidas por la trituración

Mezclado para asegurar la homogeneidad de la muestra.

Reducción de la muestra con el fin de disminuir su masa y facilitar su tratamiento posterior.

Trituración de las muestras

En dependencia del tamaño de las partículas resultantes, la trituración se subdivide en gruesa (100 a 30 mm), media (12 a 3 mm), pequeña (1 a $0,5$ mm) y fina ($0,2$ a $0,07$ mm). Actualmente en la mayoría de los casos esta operación se ejecuta por vía mecanizada.

La trituración gruesa se hace mediante las trituradoras de mandíbulas de tipo industrial, cuyo parámetro más importante, el grado de trituración (G_t), varía desde 2 hasta 4 veces. Se llama grado de trituración a la relación entre el diámetro de las partículas que entran en la trituradora y el de las partículas que salen de estas. El funcionamiento de la trituradora de este tipo consiste en la fragmentación del material por golpes y compresión entre dos placas de acero manganeso estriadas, denominadas "mandíbulas", una de las cuales es inmóvil y la otra se mueve según una trayectoria completa realizando un movimiento de vaivén y parcialmente rotatorio (fig. 4.16). Como consecuencia de esto la distancia entre las mandíbulas disminuye periódicamente en su parte superior de manera brusca, provocando la fragmentación intensa del material. La trituración

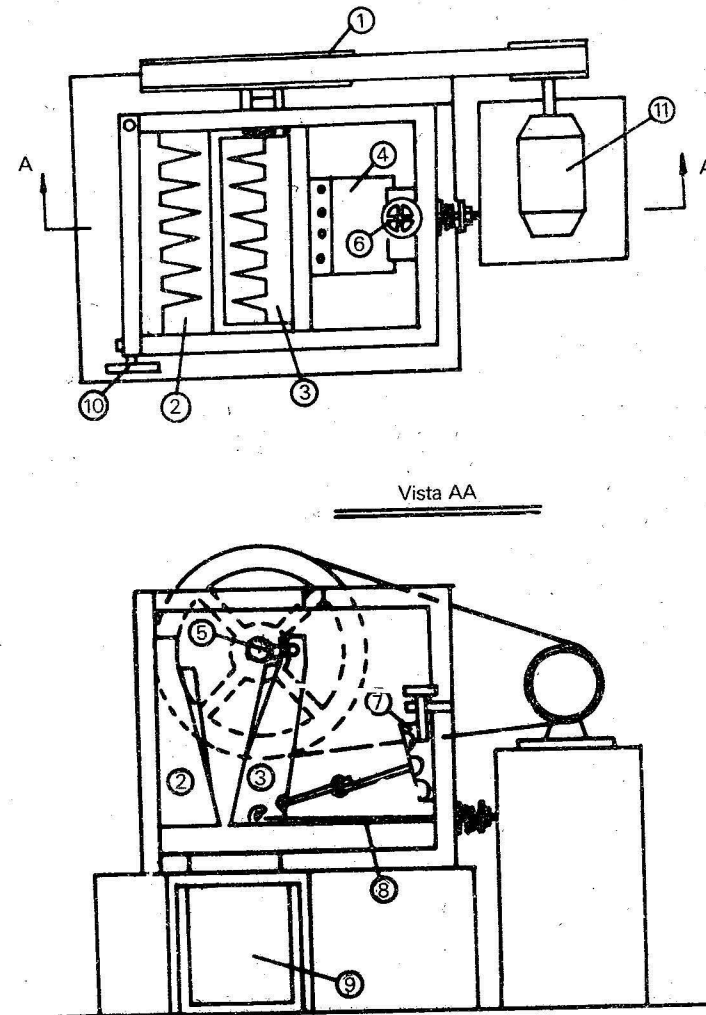


Fig. 4.16. Esquema principal de la construcción de una trituradora de mandíbulas

continúa a medida que el material desciende hacia el orificio de descarga. Para excluir las averías a causa de la entrada en la trituradora de fragmentos grandes y muy tenaces, la placa distanciadora se hace de dos partes unidas entre sí con remaches, los cuales se parten si es muy grande el esfuerzo. La regulación del ancho del orificio de salida de la máquina se logra mediante el cambio de la posición de la placa distanciadora sobre la cuña de regulación o desplazándose este en dirección vertical.

Para la trituración media, se utilizan las trituradoras de mandíbulas de laboratorio en diferentes modelos. Estas aseguran la trituración de los fragmentos, cuyo diámetro es inferior a 100 mm, hasta un tamaño final del orden de 2 a 5 mm; el grado de trituración óptimo por ciclo de trabajo de la máquina es de 4 a 6 veces. La productividad de estos agregados alcanza de 250 a 650 g/h. Se debe señalar que la regulación de la trituradora permite tanto disminuir el grado de trituración (aunque al hacerlo el proceso se hace menos eficiente económicamente) como aumentarlo hasta en 8 a 10 veces; en este último caso crece enormemente el desgaste de la trituradora y la probabilidad de diferentes averías. Además, hay que tener en cuenta que dadas las particularidades constructivas de la trituradora de mandíbulas (el largo del orificio de salida sobrepasa varias veces su ancho; este último determina el diámetro nominal de las partículas trituradas y varía durante el funcionamiento de la máquina) esta no puede garantizar la trituración completa de todo el material hasta el tamaño de las partículas y ello trae consigo casi siempre la trituración manual de los restos que quedan sobre la criba.

El tratamiento de minerales útiles de alta plasticidad (arcillas, caolín y otros) con ayuda de trituradoras de mandíbulas es ineficaz, porque sus fragmentos en lugar de triturarse se aplastan. En este caso, las muestras de gran masa (decenas de kilogramos y más) se trituran con desintegradores especiales tipo martillo o de tambor, mientras que las muestras pequeñas se fragmentan a mano mediante una maza de madera o porcelana hasta que su diámetro sea inferior a 10 mm.

La trituración fina de las muestras se hace con ayuda de las trituradoras de rodillos, cuyo esquema principal se muestra en la figura 4.17. Esas trituradoras pueden recibir el material con un diámetro máximo de partículas inferior a 10 mm y reducirlo hasta 0,5 mm. El grado de trituración óptimo para un ciclo de trituración varía entre 4 y 6 veces con regulación posible, tanto para disminuir como para aumentar este índice. La productividad de dichos agregados no sobrepasa los 80 o 90 kg/h. Durante su funcionamiento el material se mueve desde la tolva de carga hacia la rendija entre dos cilindros horizontales (rodillos) que giran uno al encuentro del otro y por consiguiente arrastran al material y lo aplastan al hacerlo pasar entre sí. Los cilindros tienen las bandas exteriores de acero manganeso para aumentar su resistencia. Además, los resortes amortiguadores que fijan la posición de uno de los cilindros (móvil), aseguran su desplazamiento, al encontrarse entre estos cilindros fragmentos extremadamente duros y tenaces, lo que excluye las averías graves. El ancho de la rendija de descarga se puede regular por medio del desplazamiento horizontal del cilindro móvil con ayuda de dos tornillos especiales.

Las trituradoras de rodillos son absolutamente inaplicables en el caso de minerales útiles de alta plasticidad, ya que producen piezas aplastadas cuyo diámetro excede varias veces su espesor, que se corresponde con la distancia entre los cilindros, es decir, el tamaño deseable de las partículas. Por eso, para dichos minerales útiles se recomiendan los morteros de porcelana especiales de tipo mecánicos.

nico, los cuales permiten triturar en un ciclo, muestras de una masa de 0,2 a 0,5 kg con un diámetro en los fragmentos inferior a 10 mm, hasta partículas cuyo diámetro va desde 0,8 hasta 1,0 mm, y la productividad del trabajo es del orden de 5 kg/h.

La tritución fina de muestras de poca masa (menos de 1 kg), como regla, se realiza mediante trituradoras de disco (fig. 4.18) cuyo grado de tritución óptimo varía desde 10 hasta 25 veces con un aumento o reducción posible en este valor. El diámetro máximo de las partículas al entrar en dicha trituradora tiene que ser inferior a 3 mm y al salir de esta se reduce hasta 0,05 a 0,1 mm, lo que se corresponde con las exigencias del laboratorio químico en cuanto al material destinado a los análisis. La productividad máxima de esta trituradora es de 20 kg/h.

Durante el funcionamiento de estas trituradoras el material de la muestra llega desde la tolva de carga al espacio entre dos discos verticales, uno móvil y otro inmóvil. La rotación del disco móvil rechaza, por fuerza centrífuga, al material a través de los canales de profundidad variable hacia la periferia de los discos, donde se tritura y pasa al cajón receptor. La rendija entre los discos, determinante del grado de tritución del material, se puede regular mediante un tornillo apropiado. La seguridad del trabajo y la protección contra las averías al ser excesiva la llegada de material se logran por medio del tensado conveniente de la correa de transmisión; si los esfuerzos son mayores que los posibles, la correa se sale de la polea matriz y provocan la parada de la trituradora.

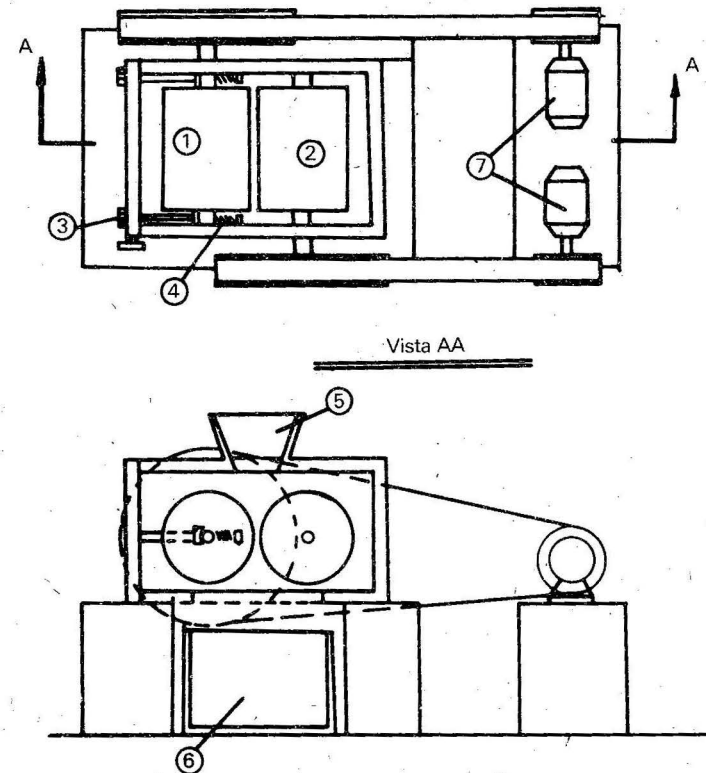


Fig. 4.17 Esquema principal de construcción de una trituradora de rodillos

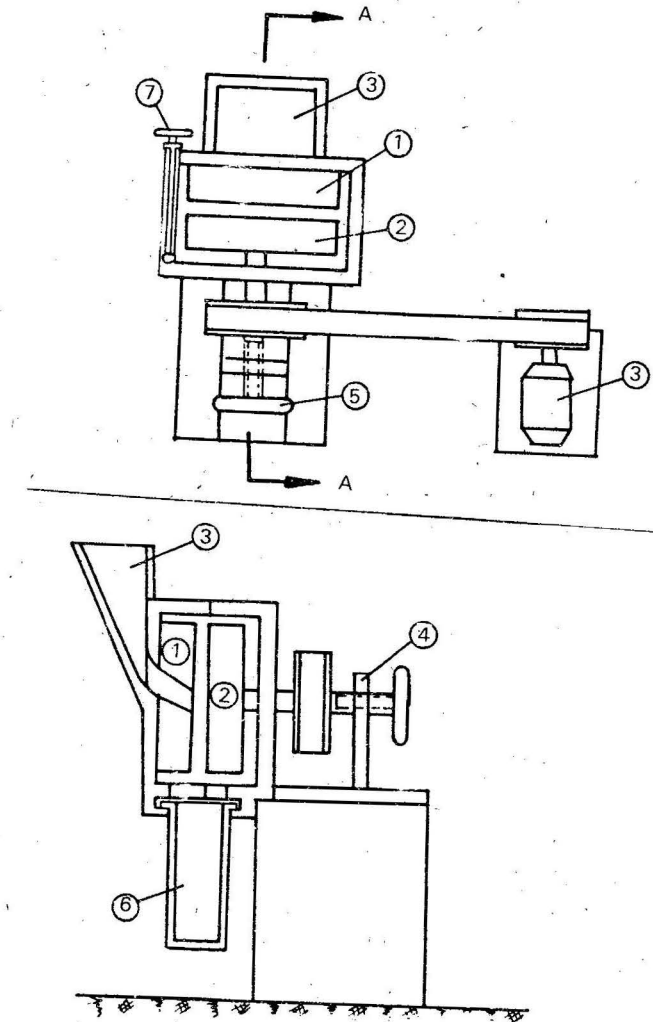


Fig. 4.18 Esquema del mecanismo del molino de discos

Finalmente, para triturar las muestras de masa considerable, hasta 5 kg y a veces aún más, se utilizan los molinos de tambor con bolas o barras. Tales molinos representan un cilindro de acero o porcelana cuya boca cierra herméticamente con una tapa asegurada con tornillos. Este cilindro se carga con bolas o barras cilíndricas del mismo material y se coloca la muestra a tratar; luego el cilindro se cierra y se coloca horizontalmente sobre rodillos paralelos con bandas de goma (roldanas) uno de las cuales da vueltas y por consiguiente trasmite la rotación al molino y al otro rodillo. Las bolas o barras se mueven rodando dentro del molino y trituran el material. La duración de esta operación es de 30 a 60 min al ser las partículas iniciales inferiores a 3 mm, obteniéndose un diámetro final inferior a 0,1 mm.

La trituración fina de muestras pequeñas, cuya masa no sobrepasa 100 g se practica con ayuda de la vibrotrituradora. Esta máquina puede triturar a la vez cuatro muestras en vasos metálicos independientes disminuyendo el diámetro de las partículas desde 2 hasta 0,7 a 0,1 mm en un tiempo de 2 a 8 min.

En cuanto a los minerales útiles de alta plasticidad su trituración fina no es viable por los medios técnicos analizados, dada su capacidad extraordinaria para pegarse contra las superficies activas de los mecanismos.

Por ello, en estos casos se utilizan los morteros de ágata mecánicos, que funcionan bajo una cubierta hermética transparente y trituran, durante un ciclo, no más de 5 a 10 g de material cuyo diámetro máximo de partículas debe ser inferior a 1,0 mm; el tiempo necesario para realizar esta operación es de 5 a 10 minutos. Muy a menudo, esta trituración se ejecuta a mano, utilizándose morteros de ágata análogos.

Como conclusión conviene señalar que si el grado de trituración del material es el mismo (por ejemplo, 4 veces), las trituradoras de mandíbulas aseguran los gastos mínimos por unidad de peso de la muestra; estos gastos crecen en el caso de la utilización de las trituradoras de rodillos aproximadamente en 4 veces y al aplicarse los equipos de la trituración fina casi en 25 veces. Por esta razón hay que tratar de obtener el material más fino posible en cada etapa precedente para disminuir el peso de la muestra que debe ser triturada posteriormente utilizando los agregados menos eficientes.

Tamizaje o cribado de muestras

Esta operación tiene como objetivo establecer la correspondencia entre el tamaño de las partículas de la muestra y el requerido, considerando la reducción de dichas partículas, o separar de la muestra la fracción fina que ya cumplió las exigencias en cuanto al diámetro máximo de las partículas. El primer tipo de tamizaje se nombra de control y el segundo, auxiliar.

Al realizar el tamizaje de control todas las partículas de la muestra deben pasar a través del tamiz cuyas aberturas correspondan a su diámetro admisible y una parte de ellas tiene que quedarse sobre el tamiz inferior que sigue en la serie normalizada, inmediatamente después del tamiz principal. Las dimensiones de las cuadrículas o mallas de los tamices se reglamentan en las normas estatales, lo cual se debe tener en cuenta al escoger el diámetro deseable de las partículas trituradas en el esquema del tratamiento de muestras, ya que es imposible trabajar con tamices con aberturas de cualquier tamaño. Los tamices fabricados industrialmente más corrientes y recomendados son los siguientes (las cifras corresponden al lado de la cuadrícula expresado en milímetros): 3; 2; 1; 0,8; 0,63; 0,5; 0,25; 0,2; 0,1; 0,07; 0,06. Si son más grandes las aberturas, los tamices se llaman cribas. La forma de las aberturas de estas últimas puede ser circular (sus diámetros normalizados en milímetros son 12; 10; 6; 5; 3), cuadrada o alargada. Hay que señalar que para las cribas con aberturas de gran tamaño no existen normas estatales y estas se fabrican según la necesidad, para controlar los fragmentos de cualquier diámetro y con mucha frecuencia por el propio organismo que realiza los trabajos de muestreo.

En la mayoría de los casos, las muestras de masa pequeña (unos kilogramos) se someten al tamizaje y para las de peso considerable esta operación es practicable tanto a mano como mediante tamices y cribas mecánicas de tipo vibratorio, de balance o de tambor, así como juegos de tamices herméticamente cerrados puestos sobre vibradores mecánicos.

El tamizaje auxiliar se utiliza durante la trituración media y fina cuando la masa de la muestra es importante y se puede esperar una proporción considerable de fracción fina con el tamaño requerido de las partículas, ya que en tal caso su eliminación aumenta la eficiencia de la trituración de los fragmentos más grandes. En este caso el material que pasa a través del tamiz es enviado al tratamiento posterior sin trituración complementaria. En cuanto a la trituración fina el tamizaje auxiliar es siempre aconsejable.

El tamizaje auxiliar representa una operación bastante difícil y lenta, sin hablar ya de las pérdidas posibles del material de la muestra al realizarlo y por consiguiente su aplicación debe estar bien argumentada. En lo referente al tamizaje de control este puede ser absolutamente inútil si la muestra pasa por la trituración sucesiva sin reducirse, debido a que la poca proporción presente de fragmentos mayores a los previstos no tiene en este caso ninguna importancia.

Durante el tratamiento de las muestras es necesario vigilar rigurosamente las pérdidas del material y reducirlas al mínimo posible, porque de no asegurarlo se puede afectar la representatividad de la muestra.

Mezclado de muestras

El mezclado se practica para hacer homogéneo el material de la muestra antes de proceder a su reducción y eliminar el efecto posible de la separación de sus partículas según su tamaño, forma y densidad a causa del tamizaje. Se conocen muchos métodos de mezclado de los cuales se han escogido solo cinco que merecen ser tratados.

El *método de traspaleo o de las palas* es aplicable si es grande la masa de la muestra (centenas de kilogramos, decenas de toneladas) y se realiza al arrojar el material de un montón cónico a otro, utilizando palas. Esta operación se repite consecutivamente tres veces, lo que asegura generalmente una buena mezcla. Para proceder de esta manera hay que preparar previamente una plataforma especial de madera tapada con hierro, de cemento y hormigón. El método en cuestión necesita mucha mano de obra y es lento, pero es insustituible para las muestras de gran volumen con tamaño considerable en sus fragmentos.

El *método de anillo y cono* es el más utilizado durante el tratamiento de muestras de masa media (kilogramos hasta decenas de kilogramos). Para realizarlo, generalmente se prepara una plataforma especial o una mesa con superficie lisa, en cuyo centro se coloca verticalmente una barra metálica. El material a mezclar se arroja hacia dicha barra utilizando paletas hasta que se forme un montón cónico, que luego se aplanan con un tablero especial puesto sobre la barra, formando un anillo. El material que queda dentro del anillo se recoge con la paleta y se coloca regularmente sobre la superficie del anillo. Luego se vuelve a formar el cono a partir de este anillo y se reanudan todas las operaciones cuya repetición triple se considera suficiente como para asegurar un buen mezclado. Conviene subrayar que dicho método necesita un trabajo manual considerable y una ejecución lenta, razones por las cuales hoy día se considera anacrónico debido a que existen otros métodos de mezclado mucho mejores y productivos, los cuales, en la mayoría de los casos, pueden remplazar con éxito al de anillo y cono.

En el caso de *utilización de molinos de tambor*, el material tamizado se vierte en dichos molinos, sin cargarlos con bolsas o barras y después de cerrar el molino este se coloca sobre roldanas, asegurándose así un buen mezclado de la muestra durante 1 a 2 min de rotación del molino. Luego, este se descarga y el material pasa a la reducción. El método en cuestión posee bastante productividad y da

buenos resultados si el peso de la muestra va desde uno hasta unas decenas de kilogramos y sin que se manifieste la segregación bien marcada de sus partículas debido a su densidad.

El *método de tamizaje* se aplica para las muestras de poca masa (hasta 1 a 2 kg) y consiste en el tamizaje reiterativo del material que ya pasó a través del tamiz de control utilizando otro con aberturas dos veces más grandes. Tal procedimiento es rápido y asegura una homogeneidad suficiente de la muestra.

Finalmente, para las muestras cuya masa oscila entre 3 y 5 kg y el tamaño de las partículas es inferior a 0,5 mm se recomienda el siguiente procedimiento: la muestra tamizada se pone sobre un gran pedazo de material liso (polietileno, goma, lona impermeabilizada, lienzo denso, etc.); el cual se toma por los dos extremos opuestos para subirlos simultáneamente y luego cambiarlos por otros dos extremos.

Esto hace que el material de la muestra se mueva rodando sobre el tejido en diferente dirección, lo que garantiza una mezcla bastante homogénea, excepto en los casos en que la gran diferencia en densidad de las partículas no permite eliminar por completo su segregación.

Reducción de muestras

Esta operación es la de mayor importancia durante el tratamiento de la muestra, ya que al dividir la muestra inicial en partes se puede afectar su representatividad. Para evitarlo, cada parte obtenida debe ser superior por su masa en comparación con la porción mínima representativa, calculada para el tamaño correspondiente de sus partículas mediante la fórmula de Richards-Chechett. Los métodos más corrientes y seguros para realizar esta operación son los siguientes:

1. **Método de palas múltiples.** Este se aplica al ser grandes las muestras y consiste en la formación de dos montones a partir del material previamente mezclado con palas. De acuerdo con el grado de reducción necesario de la muestra (relación entre su masa inicial y masa de la muestra reducida) en la porción reducida destinada al tratamiento posterior de uno de los montones, se envía cada segunda, tercera, quinta, décima, etc., pala y el resto del material representa los desechos. Dicho método asegura una alta precisión en la reducción y conservación de la representatividad, por cuanto la muestra reducida se forma de numerosas porciones pequeñas tomadas regularmente de todo el volumen de la muestra a reducir. Además, en un solo ciclo permite obtener cualquier grado de reducción de la muestra.
2. **Método de cuarteo.** Durante el tratamiento de las muestras, este método es el más utilizable debido a la tradición, aunque no sea el mejor. Para realizarlo, después de mezclar la muestra mediante el método de anillo y cono y aplanarla en forma de disco sobre la barra, se coloca encima de ella una cruz especial y apretándola al disco se divide en cuatro sectores iguales. El material de dos sectores opuestos se recoge y se envía a las escombreras, mientras que los otros dos sectores corresponden a la muestra reducida. Si el mezclado de la muestra fue realizado por otros métodos, el material se aplanan en forma de disco el cual se divide en cuatro sectores según dos diámetros mutuamente perpendiculares mediante una plancha o regla. El cuarteo permite obtener, en un ciclo, el grado de reducción igual a dos y al ser necesaria una reducción ulterior de la muestra hay que reanudar su mezclado. Con mucha frecuencia, di-

cho método no puede llevar a la toma de la porción representativa mínima posible, dado su grado de reducción estrictamente determinado (igual a 2, 4, 8, etc.), y además puede provocar el surgimiento del error de reducción cuyo valor alcanza a veces 8 a 10%. Por lo tanto su amplia utilización está fundamentada.

3. **Método de agotamiento.** Este se puede practicar después de realizada la trituration media o fina de la muestra y por el carácter de su ejecución es totalmente análogo a la toma de muestras por agotamiento. Consiste en la toma de porciones iguales según la red cuadrada mediante la paleta, sonda, tubo, regla metálica, etc., a partir del material mezclado y colocado en forma de disco aplanado. El conjunto de dichas porciones representa la muestra reducida; el tamaño de las cuadrículas de la red y la cantidad del material tomado en cada punto es función de la masa necesaria de la muestra. Sin embargo, el número de tales puntos nunca puede ser inferior a 20 o 25. El método de agotamiento es rápido y garantiza cualquier grado de reducción con bastante precisión y por eso se recomienda su amplia utilización cualquiera que sea la masa de la muestra a reducir.

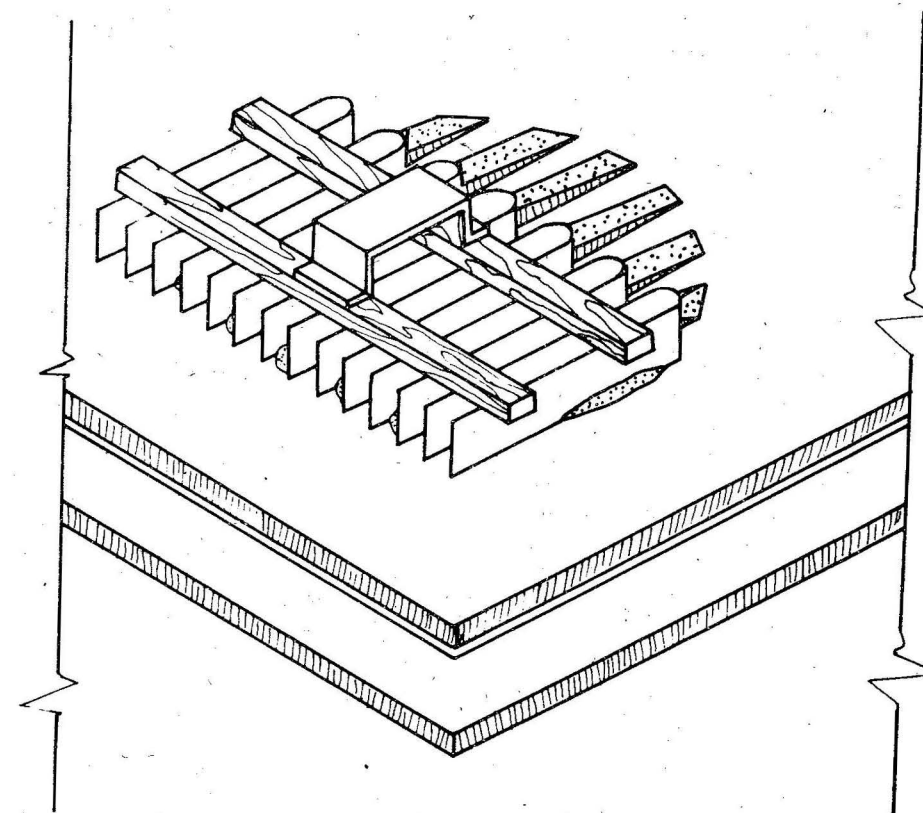


Fig. 4.19 Dispositivo para reducir las muestras de S.M. Kolomichenko

4. Método de S.M. Kolomiychenko. Para realizarlo se necesita una mesa especial con dos hendiduras mutuamente perpendiculares y un equipo sencillo que representa 6 a 8 bandas de hierro encorvadas en forma de U, unidas paralelamente con listones de madera, de manera tal que la distancia entre los extremos opuestos de una banda sea igual a la existente entre las bandas contiguas (fig. 4.19). Al desplazarse sobre la mesa donde está colocada la muestra ya mezclada, este equipo arrastra consigo la mitad de esta hacia una de las hendiduras para enviarla a los desechos, mientras que la otra mitad queda intacta representando la muestra reducida. Si es necesario se puede reanudar esta operación después de girar el equipo 90° para reducir la muestra una vez más. Este método es más rápido y exacto que el de cuarteo, pero tampoco permite obtener otro grado de reducción que el proporcional a 2^n veces, siendo n el número de reducciones.
5. Utilización del divisor de Johns. Este aparato representa un recipiente cuneiforme en cuyo vértice del ángulo agudo están hechas aberturas iguales en tamaño con ranuras que se abren en direcciones opuestas una tras otra (fig. 4.20). Para garantizar la suficiente precisión en la reducción de la muestra el número de tales aberturas debe ser superior a 16 o 20. Bajo los orificios de las ranuras, a ambos lados, se colocan cajones receptores y la muestra se

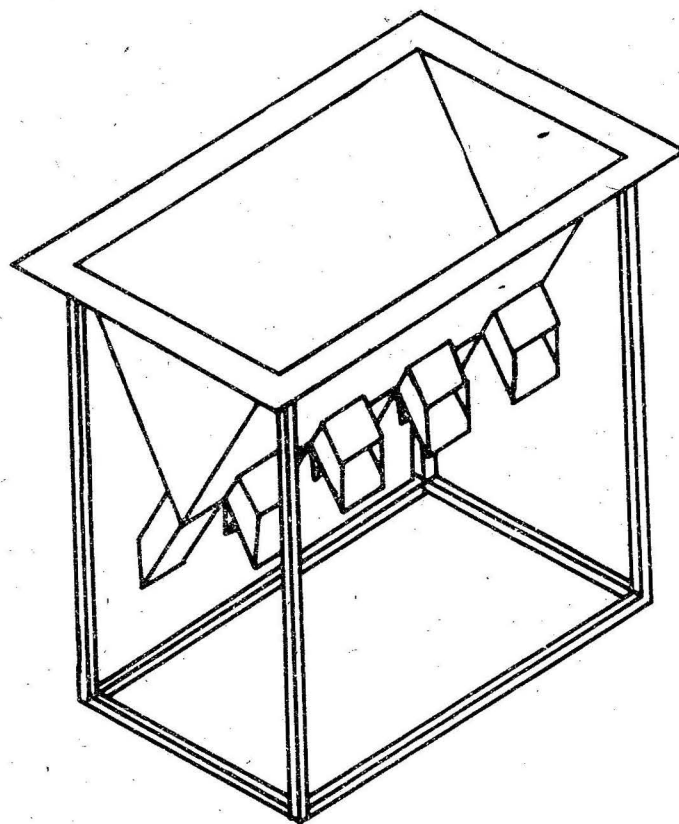


Fig. 4.20 Divisor de Johns

echa en el divisor desde un recipiente ancho, de manera tal que el material se distribuya regularmente a lo largo del divisor, lo que trae como resultado la división de la muestra en dos mitades prácticamente iguales. Una buena representatividad de cada una se obtiene hasta en los casos en que el material fue mezclado insuficientemente o a veces no lo fue nunca. El método en cuestión es bueno para reducir las muestras cuyo peso va desde 1 hasta 10 o 20 kg.

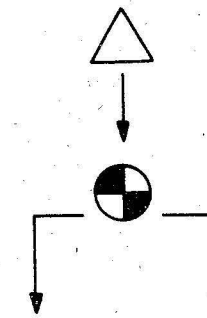
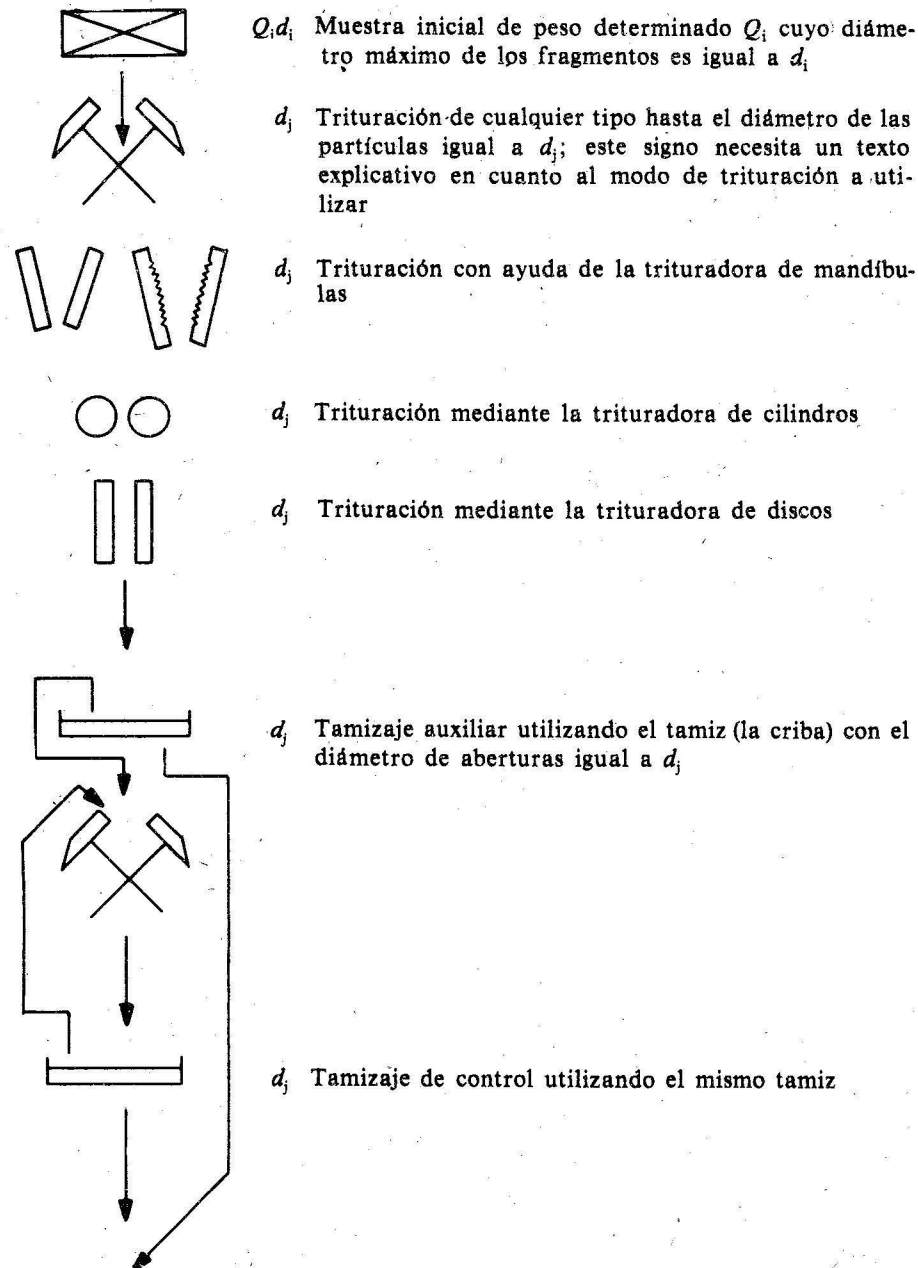
6. Utilización del divisor cónico. Este representa un cono vertical dividido en cuatro sectores iguales, dos de ellos opuestos que están abiertos y los dos restantes cerrados. Ambos orificios están provistos de ranuras que aseguran la descarga del material. Al poner el cono en movimiento giratorio rápido y verter la muestra regularmente desde arriba, esta se divide en dos mitades, una de las cuales sale y es enviada a los desechos y otra sirve como muestra reducida. El método es rápido, la precisión de la reducción es bastante alta y no se necesita la mezcla de la muestra antes de reducirla. Su única desventaja consiste en la imposibilidad de obtener cualquier grado de reducción, pues este siempre es proporcional a 2^n , tal como en el método precedente.

Como conclusión, conviene señalar que la mayoría de las operaciones del tratamiento de muestras se realizan a mano, con poca mecanización, lentamente y al mismo tiempo pueden causar pérdidas del material o su contaminación con restos de las muestras anteriormente elaboradas. Para eliminar esos defectos, en la URSS fue proyectada y puesta en fabricación en serie la instalación para el tratamiento de muestras geológicas (UOGP) que ejecuta, en un ciclo único: la trituración de la muestra inicial por vía húmeda en el molino de rodillos centrífugo hasta el diámetro de las partículas inferior a 0,1 mm; la toma de la porción de laboratorio representativa de una masa de 50 a 150 g a partir de este material triturado por el método de cortes múltiples (más de 100 veces) la deshidratación y el secado de la muestra final. Esta instalación es aplicable si el diámetro máximo de los fragmentos es inferior a 15 mm y la masa de la muestra es inferior a 15 o 20 kg; se alcanza una productividad máxima de 200 kg/h. La representatividad de las muestras de laboratorio obtenidas con dicha instalación es suficiente, su productividad sobrepasa a la alcanzada con el equipamiento ordinario y se crean mejores condiciones de trabajo. No obstante, su utilización aumenta los gastos del tratamiento de las muestras y además para ciertos minerales útiles que se caracterizan por su contenido bajo y extremadamente irregular, así como por su comportamiento específico durante el tratamiento (oro, platino) la aplicación del UOGP no se recomienda, ya que puede dar origen al surgimiento del error sistemático del muestreo.

Confección del esquema de tratamiento de muestras

Todas las operaciones estudiadas tienen que unirse en un esquema de tratamiento de muestras, el cual se confecciona en cada yacimiento según el tipo de muestra a preparar (las de surco, de hueco, de testigo, etc.). Para cada tipo determinado este esquema se realiza para las muestras de masa máxima, ya que será válida igualmente para tratar las muestras de masa inferior, con pequeñas modificaciones en cuanto al número de reducciones del material, durante cada etapa del tratamiento. Los datos iniciales necesarios para confeccionar dicho esquema son la masa inicial de la muestra, el diámetro máximo de sus fragmentos (el cual se determina por experiencia de los trabajos análogos o por vía experimental), la masa requerida de la muestra de laboratorio, el tamaño de sus partí-

culas y el carácter de la meniferación, el cual permite escoger el valor del coeficiente de heterogeneidad en la fórmula de Richards-Chechett. El esquema se presenta utilizando signos convencionales, la mayoría de los cuales están aceptados, y se acompaña de un texto explicativo mínimo y necesario. A continuación se dan los signos convencionales recomendados para los esquemas del tratamiento de muestras.



Mezclado, este signo se explica dentro del texto

Reducción de la muestra por cuarteo hasta la masa igual a Q_i ; al aplicarse otros métodos de reducción ello tiene que precisarse textualmente.

Las flechas en el esquema de tratamiento indican la vía que sigue la muestra o parte de ella. Se debe subrayar que al designarse la reducción de la muestra deben surgir dos flechas en lugar de una las cuales corresponderán a la muestra reducida y los desechos. Para simplificar la representación gráfica del esquema de tratamiento y hacerlo más demostrativo, entre reducciones sucesivas de la muestra, como regla, no se señalan los mezclados intermedios, aunque ellos son absolutamente indispensables.

Al confeccionarse el esquema de tratamiento de muestras hay que asegurar la utilización más eficiente del equipamiento, evitar su sobrecarga y disminuir el número total de operaciones por cuanto cada una de ellas que sea inútil hace más lento el tratamiento, provoca pérdidas complementarias del material y hace más probable la contaminación de la muestra. A propósito, es preciso señalar que la limpieza y hasta el lavado de las trituradoras, tamices y mesas después de terminado el tratamiento de cada muestra (los cuales son absolutamente obligatorios) no garantizan la eliminación definitiva de sus partículas.

La metodología más racional para confeccionar un esquema del tratamiento de muestras es la siguiente:

Para empezar, se verifica la posibilidad de reducir la muestra sin tratarla, calculando su peso mínimo representativo por la fórmula (110): $Q = Kd_i^2$. En la gran mayoría de los casos se confirma que $Q_i < Q$ y la reducción inmediata de la muestra no se puede realizar. Esto no significa en absoluto que la muestra inicial sea no representativa: la ecuación de Richards-Chechett se aplica solo al dividirse la muestra entera en varias partes para garantizar su identidad, mientras que la representatividad de la muestra inicial está asegurada por la aplicación correcta en su toma del método conveniente.

Si la reducción de la muestra es imposible se procede a su trituración utilizando la trituradora más económica según el diámetro inicial de sus fragmentos (d_i). Después de escoger el agregado apropiado y teniendo en cuenta su grado de trituración óptimo (S_i) se puede calcular el diámetro posible de las partículas trituradas (d_i):

$$d_i = \frac{d_i}{S_i}$$

Como dicho grado de trituración es variable, se obtienen los límites correspondientes del tamaño de las partículas, los cuales tienen que compararse con las aberturas de los tamices estandarizados (o disponibles). Si después de pasar la

muestra a través de uno de ellos se puede reducir (lo que se determina mediante un cálculo auxiliar por la fórmula de Richards-Chechett), se fija definitivamente el diámetro necesario de la trituración; es decir, se efectúa una regulación correspondiente en la trituradora y se selecciona un tamiz de control conveniente. Como regla, antes de la primera trituración es irracional el cribado auxiliar.

De ser imposible la reducción de la muestra triturada su tamizaje de control es innecesario y el diámetro de las partículas se establece como correspondiente al grado de trituración máximo posible (dentro de los límites óptimos) con una aproximación razonable y luego se procede a escoger la siguiente trituración para disminuir más el diámetro de las partículas. En este caso hay que recomendar todos los razonamientos expuestos hasta que se presente la posibilidad de reducir la muestra.

Después de realizados el tamizaje de control y el mezclado de la muestra por uno de los métodos más convenientes esta se reduce hasta la masa Q_1 . Al hacerlo es necesario garantizar la representatividad igual de todas sus partes respetando la siguiente desigualdad:

$$2Kd_1^2 > Q_1 \geq Kd_1^2$$

El ciclo completo de operaciones mencionadas se llama etapa del tratamiento de la muestra.

Si la muestra reducida no corresponde a las exigencias de laboratorio por su masa o por el diámetro de las partículas hay que proceder a su trituración ulterior utilizando una trituradora apropiada y reanudando todos los razonamientos expuestos; o sea hay que acometer la siguiente etapa del tratamiento hasta obtener el resultado final deseado.

A continuación se aclara dicha metodología con un ejemplo concreto.

Se requiere confeccionar el esquema de tratamiento de muestras químicas de surco en un yacimiento de estaño. La masa máxima inicial de la muestra es igual a 12 kg, el diámetro máximo de sus fragmentos es de 80 mm, la distribución de la casiterita en la mena es muy irregular. Para los análisis se necesita una porción cuya masa puede variar desde 50 hasta 100 g y cuyo diámetro de partículas no debe sobrepasar 0,07 mm.

Según el carácter de la meniferación se puede escoger el valor del coeficiente de heterogeneidad igual a 0,3, a partir de lo cual se verifica la posibilidad de la reducción inmediata de la muestra:

$$Q = 0,03 \cdot 80^2 = 1\,920 \text{ kg} > 12 \text{ kg}$$

La reducción es imposible

Si se tiene en cuenta el diámetro inicial de los fragmentos, es racional utilizar la trituradora de mandíbulas de laboratorios con $S_1^{\text{opt}} = 4-6$. Entonces, el diámetro posible de los fragmentos después de la trituración varía desde $\frac{80}{6} = 13,3 \text{ mm}$ hasta $\frac{80}{4} = 20 \text{ mm}$. Como el valor mínimo no permite realizar la reducción de la muestra ($Q = 0,3 \cdot 13,3^2 = 53,1 \text{ kg} > 12 \text{ kg}$), se determina este diámetro como igual a 15 mm y se procede a la elección de la siguiente trituradora. Como el material es todavía bastante grueso también hay que utilizar la trituradora de mandíbulas, pero menos grande. Si $S_1^{\text{opt}} = 4-6$, se pueden obtener partículas con diámetros desde $\frac{15}{6} = 2,5 \text{ mm}$ hasta $\frac{15}{4} = 3,75 \text{ mm}$. En ambos ca-

sos la reducción de la muestra es posible ($Q = 0,3 \cdot 2,5^2 = 1,9 \text{ kg} < \frac{12}{2}$ y $Q = 0,3 \cdot 3,75^2 = 4 \text{ kg} < \frac{12}{2}$) y para controlar el tamaño de las partículas se puede utilizar el tamiz normalizado de 3 mm. Por consiguiente, se fija el diámetro de la trituración igual a 3 mm, lo que da un peso mínimo representativo de la muestra: ($Q = 0,3 \cdot 3^2 = 2,7 \text{ kg}$).

Para mezclar la muestra después de realizado el tamizaje de control se aplica el método de anillo y cono sin repetir sus operaciones y luego la reducción mediante el divisor de Johns. El número de reducciones será igual a dos:

$$Q_1 = \frac{12}{2} = 6 \text{ kg} \quad Q_2 = \frac{6}{2} = 3 \text{ kg}$$

Con esto termina la primera etapa del tratamiento de la muestra.

En la segunda etapa es preciso utilizar la trituradora de rodillos que es más eficiente dado el diámetro ya alcanzado en las partículas. Su grado de trituración óptimo (4 a 6 veces) permite obtener partículas con un diámetro que varía desde $\frac{3}{6} = 0,5 \text{ mm}$ hasta $\frac{3}{4} = 0,75 \text{ mm}$; la reducción de la muestra es posible en ambos casos, hasta una masa inferior a 0,2 kg ($Q = 0,3 \cdot 0,75^2 = 0,17 \text{ kg}$). Sin embargo, no se debe disminuir mucho la masa, ya que se necesita no solo la muestra de laboratorio sino también un duplicado equivalente. Por esta razón, se toma como tamiz de control uno con aberturas de 0,63 mm y se efectúa la regulación correspondiente de la trituradora.

Como la experiencia demuestra claramente la baja proporción de las fracciones finas (menos de 0,5 a 0,8 mm) en las muestras que pasan a través de la trituradora de mandíbulas, hace que el tamizaje auxiliar durante esta etapa del tratamiento sea inútil.

Para mezclar la muestra, se aplica siempre el método de anillo y cono en tres repeticiones y para reducirla el método de agotamiento que es más exacto y productivo. Teniendo en cuenta el peso mínimo representativo igual a $0,3 \cdot 0,63^2 = 0,12 \text{ kg}$ se admite el peso mínimo de la porción de laboratorio igual a 0,06 kg con un duplicado equivalente, lo que hace en total 0,12 kg como peso de la muestra reducida ($Q_3 = 0,12 \text{ kg}$). De acuerdo con esto se utiliza la red cuadrada con 60 puntos de toma de material y la masa tomada en cada punto es del orden de 2 g. Aquí termina la segunda etapa del tratamiento.

Para la trituración fina del material restante se aplica la trituradora de discos cuyas posibilidades técnicas son ampliamente suficientes para obtener el diámetro necesario de las partículas:

$$S_1 = \frac{0,63}{0,07} = 9$$

Como se puede esperar una proporción suficiente de partículas finas (menos de 0,07 mm) en la muestra previamente triturada, es racional organizar el tamizaje auxiliar utilizando el tamiz normalizado correspondiente. Después de realizar la trituración y el tamizaje de control, la muestra se mezclará tamizándola tres veces mediante el tamiz con aberturas de 0,2 mm y será reducida por cuarteo, lo que dará como resultado la muestra de laboratorio y el duplicado.

El esquema confeccionado para el tratamiento de muestras se da en la figura 4.21.

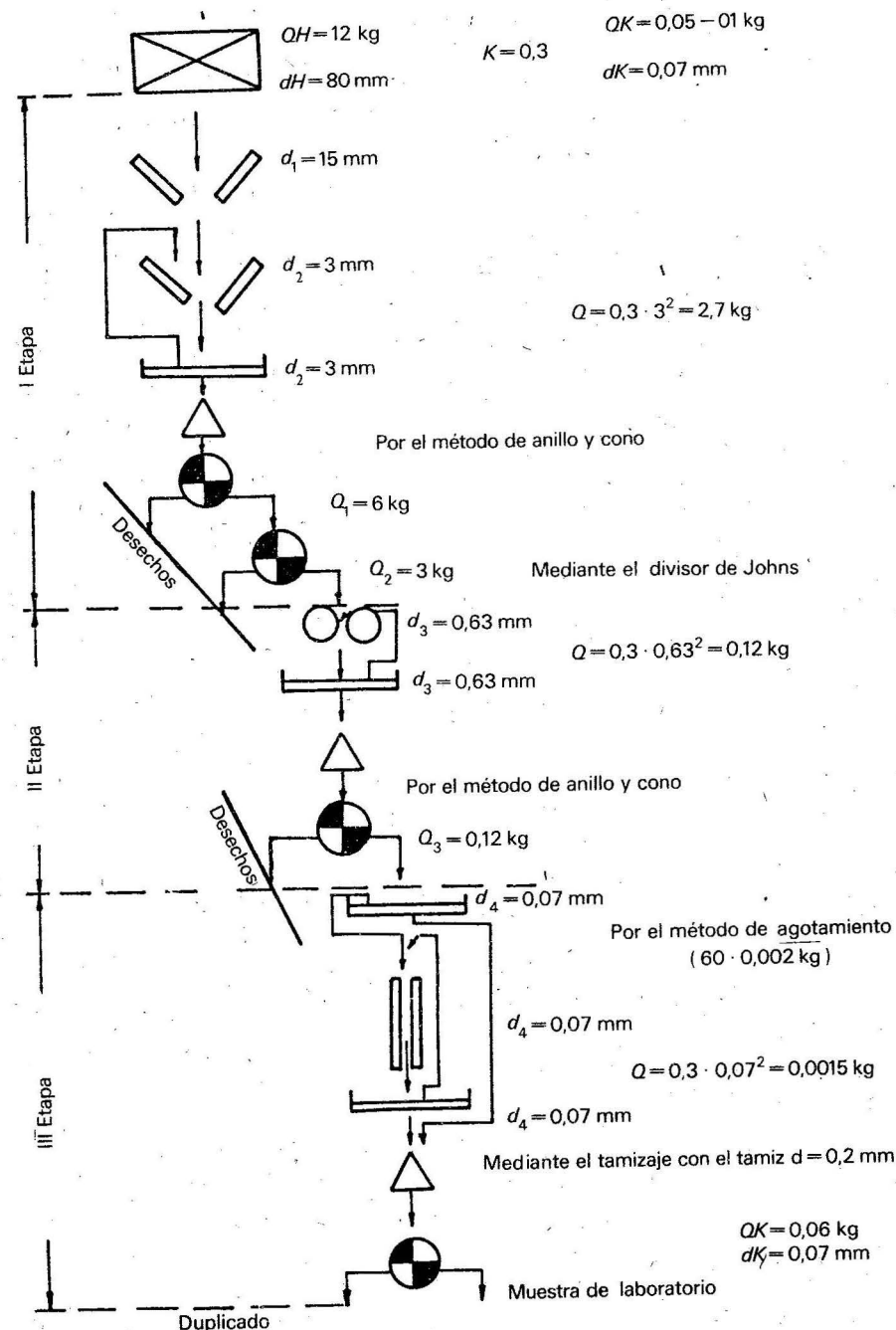


Fig. 4.21 Esquema del tratamiento de una muestra de surco en un yacimiento de estaño

4.10 Análisis y ensayos de las muestras

El carácter y programa de los ensayos de las muestras se determinan por el tipo de muestreo, tipo de mineral útil y vía de utilización posible en la economía nacional, estadio de los trabajos de búsqueda y exploración y tipo de muestras. La metodología de la gran mayoría de los ensayos se reglamenta en las normas estatales correspondientes, por lo cual el papel del geólogo consiste solo en escoger el tipo de ensayo y el complejo de índices de calidad que se desea obtener como resultado.

Muestreo químico

La forma principal de ensayo para este tipo de muestreo es el análisis químico cuantitativo que se puede complementar o remplazar por el espectral u otros métodos de análisis.

El análisis químico tiene un papel predominante para la mayoría de los minerales útiles meníferos, sobre todo si es alto su contenido en componente útil. Existen diversos métodos de análisis químico para diferentes tipos de materia prima mineral, que se realizan según las normas existentes. Sin entrar en detalles, puede notarse que la determinación del contenido de cualquier elemento se puede lograr con diferentes procedimientos (análisis de peso o colorimétrico); por eso, la selección del tipo de análisis más conveniente y exacto representa una tarea de gran importancia. Dicha selección depende mucho del contenido de componente útil y su forma de existencia mineral en la mena y por esta razón a veces antes de proceder al análisis químico se hace el estudio mineralógico o espectral de las muestras. Además, con bastante frecuencia, a partir del análisis químico total se realizan los análisis físicos para establecer en qué forma se encuentran los elementos en la mena (compuestos de valencia variable del elemento, óxidos, silicatos, sulfuros, etcétera).

Como regla general, los análisis químicos son de alta precisión, pero carecen de sensibilidad para bajos contenidos de componentes. Su calidad se caracteriza por los valores del error absoluto y relativo en la determinación del contenido; para este análisis se preparan generalmente de 50 a 100 g de material finamente triturado con el diámetro de partículas inferior a 0,07 a 0,1 mm, aunque la ejecución del análisis mismo requiere una cantidad de material mucho más reducida. Esto se explica por la necesidad de asegurar la realización de los análisis principales y de control a partir de la misma muestra de laboratorio, así como facilitar la repetición del análisis si el primer ensayo resulta erróneo. Siempre es aconsejable ponerse de acuerdo con el laboratorio correspondiente en cuanto a la masa necesaria de la muestra química, ya que de acuerdo con la metodología del análisis utilizado, esta masa puede ser superior o inferior (hasta 10 g) con respecto a las cifras mencionadas anteriormente. Cuando el laboratorio químico prefiere ejecutar por su propia cuenta la trituración final de la muestra antes de su análisis, la empresa geológica tiene que enviar hacia este las muestras con una masa de 200 g y con partículas inferiores a 0,2 mm.

El análisis espectral es muy sensible y en este sentido generalmente sobrepasa al químico en 2 a 10 veces. Para algunos elementos (tántalo, telurio) su sensi-

lidad es hasta 100 veces más grande en comparación con la del análisis químico. Este análisis requiere solo unos gramos y hasta menos de material finamente triturado; los resultados se obtienen rápidamente, con pocos gastos y durante un mismo análisis se pueden establecer los contenidos de numerosos elementos químicos. Como se señaló anteriormente, dicho análisis representa una forma de ensayo principal para el muestreo geoquímico. En lo que se refiere al muestreo químico del mineral útil el análisis espectral permite seleccionar de manera aproximada las muestras meníferas y sin mena, determinar el rango del contenido de cualquier elemento antes de proceder al análisis químico, revelar todos los componentes secundarios (tanto útiles como dañinos) en la mena, y determinar cuantitativamente los contenidos de elementos raros y diseminados. El complejo de elementos a estudiar al realizar tales análisis, así como la precisión necesaria, dependen del estadio de los trabajos de búsqueda y exploración y de las propiedades concretas del objeto geológico.

Los métodos físicos de análisis (magnetométricos, roentgenoespectrales, de absorción atómica, de activación artificial mediante la radiación gamma o neutrónica, radiométricos, etc.), hasta ahora no han alcanzado un gran desarrollo, salvo los magnetométricos y el análisis radiométrico de menas radiactivas en las investigaciones geológicas corrientes. No obstante, dichos métodos aseguran la más alta sensibilidad y precisión del análisis para muchos elementos químicos (Be, V, Au, Cd, Co, Nb, Re, Ag y otros) en comparación con los métodos tratados anteriormente, y su productividad es bastante alta. Al realizar los análisis físicos el material de la muestra no se desgasta y a veces no necesita su trituración, lo que eleva sus perspectivas en cuanto a la determinación instantánea de la calidad del mineral útil *in situ*, sin tomar las muestras. Si estas últimas se toman, las porciones necesarias para los análisis físicos varían desde unos gramos hasta 200 g según el tipo de mineral útil. La amplia utilización de estos métodos es obstaculizada por el precio elevado de los aparatos correspondientes, pero ya hoy día se aplican con gran éxito para estudiar las menas de uranio, torio, estaño, berilio, boro, litio y cadmio. Ya está aprobada oficialmente la utilización de los métodos físicos nucleares para determinar los contenidos de elementos tales como manganeso, hierro, tantalio, niobio, wolframio, molibdeno, antimonio, mercurio, plomo, bario y estroncio. Se espera dentro de poco la admisión de métodos análogos para el cobre, cinc, aluminio, silicio, oro y plata.

Muestreo mineralógico

El método de ensayo principal durante este aspecto del muestreo consiste en la determinación cualitativa y cuantitativa de la composición mineral del mineral útil o sus rocas encajantes, así como en el estudio de sus particularidades estructuro-texturales. Con este objetivo se hacen los estudios visuales de muestras de trozo en su estado natural o pulidas, análisis microscópicos con la utilización de secciones delgadas o pulidas, y los polvos de menas naturales o triturados sumergidos en líquidos de inmersión; análisis visual de muestras de trozo del material friable o triturado bajo la lupa o microscopio binocular. Algunas veces estas investigaciones puramente mineralógicas se complementan con el análisis químico de unos u otros minerales que forman la mena.

Para determinar la composición mineral de la mena densa o compacta, se puede utilizar tanto la vía visual como la de cálculo. La primera consiste en establecer la cantidad de uno u otro mineral en la muestra por medio del estudio visual

macroscópico o microscópico (incluso utilizando diferentes dispositivos para el cálculo como el integrador de Glagolev Glagolev, la mesita de integración de Andin y otros), así como con ayuda de la instalación automática *Contraste* basada en el efecto fotoeléctrico y la diferencia en la transparencia o capacidad de reflexión de los minerales. Los métodos visuales según su carácter de aplicación pueden ser puntuados (se establece el número de puntos de la red cuadrada que corresponden a cada mineral), lineales (se mide el largo de las líneas correspondientes a cada mineral) o superficiales (se determinan las superficies ocupadas por cada mineral). Sobre esta base el contenido de mineral se calcula como la relación entre el número de puntos (largo total de las líneas o superficie total) que le corresponden y el número total de puntos observados (largo total de las líneas estudiadas, superficie total de la muestra). Los métodos visuales de determinación de la composición mineral son ampliamente utilizados, sencillos y se caracterizan por una productividad bastante alta. Su precisión depende del número de medidas (observaciones) realizadas y si estas son suficientes su error relativo no sobrepasa 5%. Como los resultados de los cálculos se expresan en porcentajes volumétricos, a veces es necesario recalcularlos en porcentajes de peso; con este objetivo el volumen total de cada mineral se multiplica por su densidad teórica (o determinada por vía experimental) y el producto se divide entre la masa total de todos los minerales de la muestra.

El método de cálculo utiliza las relaciones regulares entre la composición tanto mineralógica como química del mineral útil y es aplicable si todos los minerales de la mena representan compuestos químicos de composición constante. Si este es el caso, es suficiente conocer los resultados del análisis químico y establecer cuales minerales entran en la composición del mineral útil para calcular su composición mineral cuantitativa a partir de las relaciones de masas moleculares o atómicas correspondientes. Esta vía es muy exacta pero su aplicación resulta difícil si es grande el número de minerales que forman el mineral útil.

Para estudiar la composición mineral de la materia prima friable o triturada, hay que separarla en fracciones monominerales, determinar sus masas y calcular sobre esta base los contenidos de minerales correspondientes. Este método de análisis es fundamental en el caso del muestreo de los placeres y los métodos de selección de las fracciones monominerales son análogos a los utilizados en el estudio de las muestras de jagua. Además, para algunos minerales útiles, esas fracciones se obtienen mediante la frotación o separación electrostática y en los casos especialmente importantes por la selección manual bajo la lupa o microscopio binocular.

Otra vía utilizable en condiciones semejantes es la del peso estadístico cuando las muestras friables divididas en fracciones solo se estudian según el diámetro de los granos. Para obtener el contenido de cualquier mineral en la muestra se realizan las siguientes operaciones:

Selección de las fracciones granulométricas diferentes y determinación de su porcentaje en la muestra.

Mezclado minucioso de cada fracción y toma de muestras medias de cada una.

Determinación de la masa de cada muestra media.

Selección de gran número (unas centenas de granos) del mineral a estudiar a partir de cada fracción granulométrica.

Determinación de la masa total de todos los granos del mineral, seleccionados para cada fracción, y cálculo de la masa estadística media de un grano.

Colocación de la muestra media en una banda estrecha y cálculo de los granos del mineral de interés en ella bajo el microscopio binocular.

Cálculo de la masa total de dichos granos a partir de su masa estadística media.

Determinación del contenido del mineral en la muestra media de la fracción estudiada.

Cálculo del contenido promedio del mineral en la muestra total por el método de la media ponderada.

Muestreo técnico

Este aspecto del muestreo necesita diferentes ensayos físico-técnicos, cuyo carácter depende de la vía de utilización probable de la materia prima mineral: determinación de la resistencia mecánica a la compresión y al impacto, humedad, porosidad, masa volumétrica, coherencia, plasticidad, composición granulométrica, coeficiente de esponjamiento, resistencia al desgaste y congelamiento, capacidad refractaria, densificación durante la calcinación, resistencia eléctrica, capacidad calorífica, transparencia, homogeneidad óptica, intensidad de coloración, etc. Estos ensayos específicos y bastante complejos se describen en cuanto a su metodología en diferentes normas estatales y ramales, por lo cual es racional exponer aquí los métodos concretos. Sin embargo, es conveniente pasar una breve revista a las particularidades del estudio de algunas propiedades indispensables para el cálculo de reservas de cualquier mineral útil, ya que el geólogo tiene que organizar los ensayos correspondientes y muy a menudo hasta realizarlos en su quehacer diario; esas propiedades son: humedad, masa volumétrica, composición granulométrica del mineral útil y coeficiente de esponjamiento durante la extracción.

La humedad del mineral útil es muy importante para determinar correctamente las reservas de cualquier mineral útil menífero, porque su masa volumétrica se estudia en su estado natural húmedo, mientras que los contenidos de componentes en la mena se calculan para la sustancia absolutamente seca. Como la humedad puede oscilar entre 2% para las menas masivas sulfurosas o magnetíticas, filones cuarcíferos, etc., y 15 a 35% para las de limonita, manganeso, níquel silicatado y las bauxitas, el cálculo de reservas puede ser falso si no se hacen las correcciones correspondientes.

La humedad W (en porcentaje) se determina a través del peso de la muestra en estado natural y su peso después de triturarla (P_c) hasta un diámetro de fragmentos inferior a 10 a 20 mm y secarlos bajo la temperatura $+110^\circ\text{C}$ utilizando la siguiente fórmula:

$$W = \frac{P - P_c}{P} \cdot 100 \quad (112)$$

Para conservar la humedad natural en el caso de las menas muy porosas sus muestras se sumergen en parafina fundida con el objetivo de cubrirlas con una película protectora, eliminándose esta al triturar y secar la muestra.

La masa volumétrica del mineral útil representa uno de los parámetros más importantes para el cálculo de reservas, ya que permite convertir el volumen del

cuerpo mineral en reservas expresadas en unidades de peso. Para determinarla se puede aplicar la vía de laboratorio estudiando las muestras de trozo en su estado natural húmedo, incluso conservándolas mediante parafina, si es necesario, según el procedimiento expuesto. Por otra parte, esta propiedad también se obtiene realizando los estudios de campo del mineral útil en su yacencia propia. En el primer caso cada clase industrial de mena tiene que caracterizarse al menos por 20 o 30 muestras de trozo. Estas se pesan en su estado natural (P), después de pasar a través de la parafina (P_1) y finalmente en agua mediante balanzas especialmente equipadas (P_2), remplaceándose a veces esta última operación por la determinación directa del volumen de la muestra (V) a través del volumen de líquido suplantado. La masa volumétrica (d) se calcula según una de las siguientes fórmulas en dependencia de que se utilice o no la parafina:

$$d = \frac{P}{P_1 - P_2 \frac{P_1 - P}{\gamma}} \quad (113)$$

donde:

γ — densidad de la parafina.

$$d = \frac{P}{P - P_2} \quad (114)$$

$$d = \frac{P}{V} \quad (115)$$

Los ensayos de laboratorio son incapaces de evaluar la influencia del agrietamiento, las cavidades y cavernas sobre la masa volumétrica del mineral útil y por esta razón los resultados más confiables los prestan los estudios de campo. Con este propósito se toma la muestra volumétrica de unos metros cúbicos y se determina su peso. Luego se realizan medidas minuciosas para calcular el volumen extraído del mineral útil *in situ* y al dividir el peso de la muestra por este volumen se obtiene la masa volumétrica necesaria. Tales estudios de campo se hacen mediante una a tres muestras para cada clase industrial del mineral útil.

Recientemente se han comenzado a utilizar los aparatos geofísicos para determinar la masa volumétrica de las menas y rocas en el macizo, sin tomar las muestras. Estos métodos, basados en la medición de la radiación gamma inducida, son de alta productividad y precisión, y su error relativo no sobrepasa 2% del valor medido.

La composición granulométrica del mineral útil o el tamaño de los fragmentos tiene mucha importancia durante la exploración de los placeres, yacimientos de materia prima fragmentaria para construcción, arcillas, asbesto, fosforitas de tipo concrecionario y otros, así como para confeccionar los proyectos de las empresas que realizarán el tratamiento de cualquier mineral útil. Esta propiedad también se utiliza para planificar correctamente la cantidad y calidad del mineral útil extraído. Por ejemplo, en los yacimientos de dolomita para metalurgia, la fracción fina (menos de 5 mm) no se utiliza, aunque forme parte de las reservas calculadas. Su cantidad durante la explotación puede alcanzar una cifra considerable (hasta 20%) y por consiguiente la calidad de la fracción gruesa se diferenciará esencialmente de la admitida para las reservas totales.

En la mayoría de los casos, la composición granulométrica se determina mediante el cribado de la muestra con ayuda de un sistema de cribas o tamices. Al pesar cada fracción obtenida es fácil calcular su proporción en porcentajes de la masa total de la muestra. El tamizado de minerales útiles arcillosos es totalmente ineficaz, por lo cual en este caso se utiliza la separación de las fracciones granulométricas basada en la velocidad de la caída de las partículas en suspensión acuosa (método de pipetas).

El coeficiente de esponjamiento es necesario para proyectar el transporte del mineral útil extraído, ya que su volumen aumenta en este caso de 1,2 a 1,8 veces comparado con su estado natural en el macizo. Este índice se determina durante el estudio de campo, al mismo tiempo que la masa volumétrica del mineral útil. Con este objetivo se mide el volumen de la masa extraída (V_e) con ayuda de las cajas de medida apropiadas y como el volumen del mineral útil en el macizo (V) ya es conocido, se efectúa el cálculo del coeficiente en cuestión (K_e) según la fórmula:

$$K_e = \frac{V_e}{V} \quad (116)$$

La gran mayoría de los índices físico-técnicos de los minerales útiles se determinan en los laboratorios especializados o institutos de investigación científica con los cuales en cada caso concreto hay que coordinar el tipo, número y dimensiones de las muestras a tomar y el programa de los ensayos necesarios.

Como conclusión conviene señalar que, frecuentemente, los ensayos físico-técnicos se realizan solo para una parte de las muestras (como regla, para todas las muestras agrupadas) y luego se utilizan las regularidades establecidas, para determinar los valores de los índices correspondientes en otros puntos de observación mediante diferentes ecuaciones, gráficos y nomogramas, lo que permite hacer el muestreo técnico más rápido y barato. Como ejemplos se pueden citar las relaciones regulares que se establecen regularmente, con bastante confianza, entre el contenido del metal en la mena y su masa volumétrica; masa volumétrica y resistencia mecánica del mineral útil; composición mineral y plasticidad de las arcillas; composición química de las arcillas y su capacidad refractaria, etcétera.

Muestreo tecnológico

El complejo de ensayos tecnológicos es muy amplio y diverso en función de la utilización de la materia prima mineral: desde el estudio de su comportamiento durante el beneficio y obtención de los concentrados correspondientes, hasta la fabricación y ensayos de los productos refractarios en las instalaciones industriales; preparación de las placas decorativas, del hormigón armado y detalles ópticos o pulido experimental de las piedras preciosas. En la gran mayoría de los casos esos ensayos se realizan en laboratorios especializados o institutos de investigación científica, limitándose el papel del geólogo a escoger el nivel de dichos ensayos de acuerdo con el estadio correspondiente de los trabajos de búsqueda y exploración y tipo de muestras necesarias, así como asegurar la autenticidad indudable de dichas muestras.

Según el carácter del material que ellas representan, las muestras pueden ser tecnológicas propiamente dichas o mineralógico-tecnológicas. Las primeras se toman para cada clase industrial del mineral útil por separado y las segundas corresponden a sus tipos naturales. A veces también se utilizan las muestras tecno-

lógicas compuestas, que caracterizan todo el yacimiento o un sector determinado, y representan una mezcla de diferentes clases industriales de materia prima mineral en la proporción adoptada para la explotación futura del yacimiento.

En dependencia del nivel de ensayo, las muestras tecnológicas se subdividen en: de laboratorio, de laboratorio agrandadas y semiindustriales.

Las muestras de laboratorio sirven para elaborar los esquemas tecnológicos nuevos de tratamiento del mineral útil o comprobar la posibilidad de utilizar los esquemas ya existentes para su tratamiento. Según su carácter, estos esquemas son mineralógico-tecnológicos y su número debe ser proporcional al desarrollo de los tipos de menas naturales correspondientes. Basándose en el estudio de dichas muestras se pueden establecer diferentes regularidades que reflejan las relaciones entre la composición y particularidades del mineral útil de una parte y sus propiedades tecnológicas de otra (el contenido del componente y rendimiento del concentrado; estructura de la dolomita y calidad del polvo metalúrgico refractario que se obtiene por calcinación; contenido de hierro en la arcilla refractaria y resistencia térmica de los artículos que se preparan con ella, etc.). La masa de las muestras de laboratorio oscila entre unas decenas y las primeras centenas de kilogramos.

Las muestras de laboratorio agrandadas con una masa de unas centenas de kilogramos hasta toneladas (raramente más de 10 t) se toman con el objetivo de comprobar y precisar las propiedades tecnológicas del mineral útil al tratarlo según el régimen óptimo elegido sobre la base de los ensayos del nivel precedente. Dichas muestras permiten realizar el ciclo de tratamiento del mineral útil complejo e ininterrumpido en condiciones de laboratorio y obtener como resultado una cantidad importante del producto final, lo que asegura la correcta evaluación de la calidad de este último y la obtención de los índices principales que caracterizan el proceso tecnológico elegido. Según su naturaleza, las muestras en cuestión son tecnológicas propiamente dichas.

Las muestras semiindustriales son necesarias cuando la tecnología industrial de tratamiento del mineral útil falta totalmente (nuevos tipos de materia prima mineral) o se propone un esquema tecnológico nuevo para ciertos minerales útiles, ya aplicados ampliamente en la economía nacional (extracción de componentes secundarios a partir de la mena compleja, modificación del procedimiento para moldear o cocer los artículos, etc.). La masa de estas muestras es de decenas hasta centenas de toneladas y raramente alcanza 1 000 t o más; según su carácter pueden ser tanto tecnológicas propiamente dichas como tecnológicas compuestas. Los ensayos de este mineral se realizan en las instalaciones experimentales especiales de tipo semiindustriales o industrial (hasta se construyen plantas experimentales) y permiten obtener una característica cuantitativa de todos los índices del proceso tecnológico investigado.

Las muestras industriales de masa importante (millares de toneladas) están destinadas a comprobar el comportamiento del mineral útil a estudiar durante su tratamiento según el esquema tecnológico existente de las empresas industriales en funcionamiento y obtener las características cuantitativas de este proceso indispensables para confeccionar el proyecto de elaboración de la materia prima mineral. Estos ensayos, complejos y costosos, se realizan al ser poco confiable la determinación de dichas características tecnológicas por analogía, a partir de los resultados del estudio de las muestras de laboratorio agrandadas. Las muestras industriales, como regla, son compuestas y representan a todo el yacimiento o a un gran sector de este.

4.11 Determinación de la calidad del mineral útil sin la toma de muestras

Los métodos de muestreo tradicionales tratados con anterioridad garantizan resultados muy seguros y auténticos, pero en su mayoría son de larga duración y necesitan mucha mano de obra. Por eso en estos últimos años se inició la creación e introducción en la práctica de los trabajos de búsqueda y exploración de otros métodos de estudio de la calidad del mineral útil basados en las relaciones existentes entre la composición sustancial y sus particularidades mineralógico-petrográficas, físicas y geofísicas. A partir de dichas relaciones, con frecuencia es posible determinar la calidad de la materia prima mineral *in situ* sin tener que tomar y analizar sus muestras. Estos nuevos métodos de muestreo hasta el presente son aplicables solo para establecer la composición química o mineralógica de la mena y su masa volumétrica. Según su carácter, dichos métodos se pueden subdividir en tres grupos:

Los que se basan en el estudio de los índices geológicos externos del mineral útil.

Los geofísicos.

Los que utilizan las regularidades geoquímicas.

En el primer grupo, el método principal es el muestreo por tipos de mena naturales que fue propuesto por el científico soviético N.V. Ivanov en el año 1963 [8]. Su aplicación exitosa es posible si los cuerpos minerales están constituidos de tipos de mena naturales bien delimitados y cuya identificación visual no ofrece dificultad alguna, con la condición obligatoria de que el contenido del componente de interés en cada tipo sea muy regular. Entonces, a partir de los resultados del muestreo químico ordinario para cada tipo de mena natural se puede establecer el contenido promedio del componente (C_i) y el intervalo de aceptación de sus valores posibles ($C_i \pm t\delta_i$) conforme a las reglas correspondientes de la estadística matemática. Nótese que el error relativo del valor promedio de este parámetro (δ_i), teniendo en cuenta el coeficiente de probabilidad adoptado (t), no debe sobrepasar el error admisible del muestreo químico. Luego, conociendo la proporción de cada tipo de mena en la constitución del cuerpo mineral (a_i), la cual se determina a partir de las potencias o superficies ocupadas por ellas en la sección estudiada, sobre la base de la documentación geológica, es fácil calcular el contenido promedio de dicho componente en el cruce de prospección (C) mediante la siguiente fórmula:

$$C = \sum_{i=1}^n a_i C_i \quad (117)$$

donde:

n - número de tipos de menas naturales encontradas en el cruce de prospección.

Al calcular la proporción de cada tipo de mena a partir de sus superficies, es obligatorio escoger un sector del cuerpo, orientado en la dirección de su potencia, de forma rectangular perfecta, porque de lo contrario pueden surgir errores muy graves (fig. 4.22).

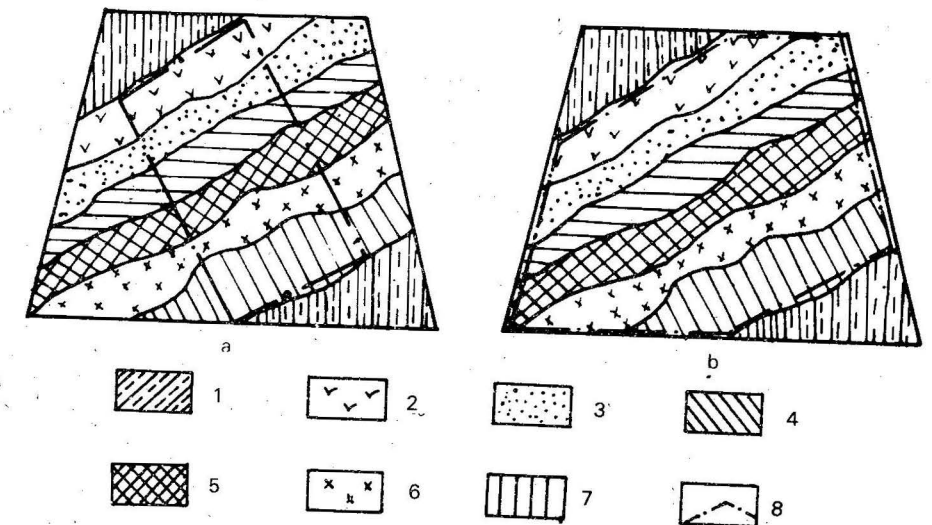


Fig. 4.22 Determinación de las proporciones de tipos de mena en el cuerpo mineral a través de su área: a) correcta; b) incorrecta; 1- roca encajante; 2- mena del I tipo natural (en a: 17,2%, en b: 11,4%); 3- mena del II tipo natural (en a: 13,0%, en b: 14,2%); 4- mena del III tipo natural (en a: 16,5%, en b: 17,3%); 5- mena del IV tipo, natural (en a: 21,8%, en b: 14,6%); 6- mena del V tipo natural (en a: 14,6%, en b: 19,5%); 7- mena del VI tipo natural (en a: 24,1%, en b: 15,6%); 8- contorno del área dentro de la cual se determina la proporción de tipos de mena

Al aplicar el método en cuestión se pueden cometer errores en la determinación del contenido del componente en el cruce de prospección a estudiar, debido tanto a la variabilidad de su contenido en cada tipo de mena como a la imprecisión de la documentación geológica. Al ser así, el muestreo por tipos de mena debe controlarse por medio del muestreo químico paralelo organizado en cada tercero, quinto o décimo cruce de prospección, conforme a la variabilidad de los tipos naturales de mena y a la complejidad de la estructura interna del cuerpo mineral.

El muestreo por tipos de mena se recomienda principalmente durante la exploración de explotación y solo parcialmente durante la detallada.

Otro método que utiliza los índices geológicos externos del mineral útil es el muestreo mineralógico visual en las excavaciones mineras y afloramientos naturales, sin la toma de muestras. Este método es aplicable si son grandes y están bien identificados los granos de mineral útil o sus agregados diseminados en la masa filoneana (pegmatitas cerámicas o micáceas, flogopita, asbesto, espato de Islandia, cristal de roca, piedras decorativas, menas nodulosas, etc.). Sobre la base de la documentación geológica rigurosa, se establecen el área total ocupada por el mineral valioso (S_m) y la superficie total del cuerpo dentro de la cual estos se observan (S), lo que permite calcular fácilmente el porcentaje volumétrico del mineral en cuestión (C) por la fórmula:

$$C = \frac{S_m}{S} \cdot 100 \quad (118)$$

Al conocerse la morfología y orientación de los cristales de mineral valioso, se puede determinar su volumen total a partir de las medidas realizadas en la superficie estudiada y, comparándolo con el volumen mínimo del cuerpo adyacente a la sección documentada, dentro del cual dichos cristales se pueden colocar sin defectos, se determina su contenido por unidad de volumen. Este sistema de cálculo es más complicado, pero ofrece resultados más confiables y precisos, de la misma exactitud que los del estudio tradicional de las muestras volumétricas. El muestreo mineralógico visual es racional aplicarlo durante la exploración de explotación y ejecutar sistemáticamente, en cada quinto o décimo crucero de prospección, su control mediante métodos ordinarios de toma, tratamiento y análisis de muestras.

Los métodos geofísicos de muestreo se pueden utilizar con gran resultado en cualquier estadio de los trabajos de búsqueda y exploración. Aquí nos limitaremos al estudio de los más corrientes.

El método *magnetométrico*, se utiliza para determinar la calidad de las menas de hierro cuyo mineral predominante sea la magnetita y se conocen en varias variantes que permiten lograr este objetivo tanto en las excavaciones mineras y afloramientos naturales como en los pozos de perforación. Para determinar el contenido de hierro vinculado a la magnetita se dibujan previamente los gráficos de calibración del aparato magnetométrico, que reflejan la relación entre el contenido de hierro debido a la magnetita y la susceptibilidad magnética de las muestras estudiadas. Dichos gráficos se basan en los resultados de los análisis químicos de las mismas muestras. Una vez establecida esa relación, el gráfico permite transformar la indicación del aparato en el contenido de hierro correspondiente. La precisión del método magnetométrico es de ± 5 a $\pm 20\%$ del contenido real de la magnetita, menor en este sentido que la del muestreo químico, pero en compensación su productividad es varias veces más alta.

El método *radiométrico* se basa en las medidas del nivel de la radiactividad natural de las menas, la cual se encuentra en correlación estrecha con el contenido de elementos radioactivos (uranio, torio, radio) en estas. En dependencia de la composición sustancial de la mena, su génesis y grado de contraste (relación entre los contenidos máximo y medio del elemento a determinar) el carácter de dicha correlación puede variar. Por eso, en primer lugar, en cada yacimiento concreto hay que revelar esa correlación mediante el estudio radiométrico de unas decenas de muestras químicas y dibujar los gráficos correspondientes que luego permitirán determinar los contenidos de componentes de interés en las excavaciones mineras o pozos de perforación sin tomar las muestras.

Al establecer las relaciones suficientemente estrechas y seguras entre los contenidos de componentes principales (niobio, tantalio, circonio, tierras raras y otros) y la intensidad de la radiación gamma debida a las impurezas radiactivas, el método radiométrico se puede aplicar con gran resultado para evaluar la calidad de las menas de dichos metales y calcular sus reservas. No obstante, en este caso el método es inferior en mucho al muestreo químico por su precisión y debe controlarse sistemáticamente con ayuda de las muestras químicas especialmente tomadas.

El método de la radiactividad artificial permite determinar el contenido de cobre en las menas pirito-cupríferas con un error relativo del orden de 10 a 15%. Para aplicarlo, las menas se someten a la irradiación con neutrones durante 1,5 a 2 h, lo que trae como consecuencia la creación de isótopos radiactivos artificiales, de elementos cuya vida puede ser corta o larga. Los primeros se descomponen

por completo en un intervalo de 40 a 50 min después de terminada la irradiación, razón por la cual las medidas realizadas más tarde (dentro de 1 a 1,5 h) no fijarán más que la radiación inducida vinculada a los isótopos de larga vida: Cu^{64} , Mn^{56} , Na^{24} y Al^{28} ; la intensidad de dicha radiación es función del contenido de dichos isótopos en la mena. Utilizando las curvas de graduación previamente construidas se puede determinar no solo el contenido de cobre, sino también el de hierro y azufre. Además, a partir de los contenidos de sodio y aluminio es posible distinguir las menas masivas de las diseminadas. El método de la radiactividad artificial también es aplicable para estudiar la calidad de las menas de manganeso y bauxitas. Hasta el presente existe una sola modificación en el equipamiento que asegura su ejecución en los pozos de perforación.

El método de muestreo gamma-gamma tiene como base el efecto de absorción de los rayos gamma "suaves" (sus fuentes son Cs^{137} o Se^{75}) por átomos de los elementos pesados (antimonio, plomo, wolframio, mercurio, hierro, bario) y la creación de la radiación gamma inducida de carácter disperso, cuya intensidad se encuentra en proporción directa con los contenidos de dichos elementos o la densidad de la roca. Este método se aplica en los pozos de perforación y de buenos resultados durante el muestreo de las menas monominerales; el error relativo en la determinación del contenido del elemento correspondiente no sobrepasa de 10 a 15%.

En las menas polimineraleas, la influencia de los elementos secundarios pesados disminuye bruscamente la precisión del método en cuestión. Hay que añadir que su desventaja mayor consiste en el hecho de que se determina solo el contenido total del elemento, cualquiera que sea su forma mineral de existencia, y por consiguiente la revelación de tipos naturales de mena es imposible.

Una variedad de dicho método destinada al estudio de la composición química de la mena se conoce como carotage gamma-gamma selectivo (GGC-S) y otra que tiene como objetivo la determinación de la masa volumétrica de la mena o roca se llama carotage gamma-gamma de densidad (GGC-D).

El método de muestreo gamma-neutrónico (fotoneutrónico) se utiliza para determinar el contenido de berilio en la mena tanto *in situ* (en las excavaciones mineras o pozos de perforación) como en la mena derrumbada. Bajo la acción de la radiación gamma "dura" (Sb^{124}) los núcleos de berilio pasan al estado excitado y empiezan a emitir neutrones; la intensidad de su flujo es proporcional al contenido de este elemento en la mena. En los pozos de perforación se utilizan equipos apropiados de carotage fotoneutrónico y en las excavaciones mineras y afloramientos naturales aparatos del tipo Berilo-3 con una sensibilidad igual a 0,004% y un error relativo en la determinación del contenido de berilio inferior a 10%. Cualquiera que sea la modificación del método en cuestión antes de empezar el muestreo hay que establecer el gráfico de calibración del aparato sobre la base del estudio de unas decenas de muestras químicas.

El método de muestreo roentgenoradiométrico es uno de los más prometedores entre todos los métodos físicos nucleares. Su esencia consiste en el surgimiento de rayos X característicos bajo la acción de la radiación gamma "suave" (Se^{75} , Cd^{109} , Co^{57} , Tl^{208}) sobre los átomos de los elementos. La energía de tal radiación roentgen para cada elemento es constante y su densidad es función del contenido de este en la mena. Los isótopos que sirven como fuentes de la radiación gamma se escogen según las propiedades del elemento a determinar y son diferentes según los casos. Los rayos X inducidos se seleccionan mediante filtros especiales y en los aparatos receptores se utilizan analizadores con muchos canales, lo que per-

mite determinar simultáneamente los contenidos de dos o tres elementos (por ejemplo, plomo, cinc y hierro; antimonio, mercurio y bario, etc.) Existen tanto las modificaciones de carotage de dicho método como los equipos para el muestreo roentgenoradiométrico en las excavaciones mineras y afloramientos naturales (Gagara, Mineral-4), los cuales garantizan la determinación del contenido de elementos tales como wolframio, estaño, molibdeno, cobre, plomo, cinc, antimonio, mercurio, manganeso, bario y otros, con error relativo inferior a 10 a 25%. El método roentgenoradiométrico es rápido y eficiente, pero debe controlarse sistemáticamente por medio de la toma y análisis de muestras químicas.

El método de resonancia nuclear gamma se basa en el efecto de la resonancia nuclear Mossbauer y solo se aplica actualmente para determinar el contenido de estaño en forma de casiterita. El aparato MAC-1 destinado al muestreo de las excavaciones mineras y afloramientos naturales utiliza como fuente de la radiación gamma el isótopo Sn^{119} .

Los métodos basados en las regularidades geoquímicas se utilizan ampliamente para determinar los contenidos de los componentes secundarios a partir del contenido del principal. Con este objetivo, al inicio del trabajo, sobre la base de los análisis de las muestras agrupadas, se establecen las regularidades correlativas que vinculan entre sí los contenidos de componentes principales (x) y secundarios (y) y se deducen las ecuaciones de regresión correspondientes las cuales en el caso más sencillo tienen el siguiente aspecto:

$$y = ax + b + t\delta \quad (119)$$

donde:

- a, b - coeficientes constantes característicos para cada relación correlativa;
- δ - error cuadrático medio de cálculo según la ecuación propuesta;
- t - coeficiente que corresponde a la probabilidad de confianza adoptada.

Los procedimientos a utilizar para revelar tales relaciones correlativas y la metodología para la confección de las ecuaciones de regresión han sido tratadas con bastante detalle en el capítulo 2.

Para determinar el contenido del componente secundario en cualquier muestra ordinaria, sin analizarla, basta sustituir en la ecuación de regresión la variable aleatoria X por su valor real en esta muestra y ejecutar el cálculo. En cada caso concreto la posibilidad de aplicación del método geoquímico depende de la claridad con que se manifiesta la relación correlativa entre los componentes, lo cual se refleja en la magnitud del error probable del cálculo del contenido de componente secundario ($t\delta$).

Con frecuencia las regularidades y los cálculos realizados sobre esta base son tan confiables que hacen posible el cálculo de reservas de componentes secundarios y su aprobación sin analizar la gran mayoría de las muestras químicas. Como ejemplos de tales relaciones correlativas prácticamente aplicables se pueden mencionar las de plomo y plata, cinc y cadmio, cinc y germanio, molibdeno y renio, hierro y cobalto, azufre y selenio, etcétera.

4.12 Control del muestreo

Durante la toma, tratamiento y ensayos de muestras, inevitablemente surgen diferentes errores vinculados a la metodología adoptada y a los procedimientos concretos de realización de dichas operaciones. Conforme al carácter de su ma-

nifestación y a las causas de tales errores, estos se dividen en casuales, sistemáticos y equivocaciones graves.

Los errores casuales surgen por numerosas razones y según su naturaleza no se pueden eliminar. Se caracterizan por signos diferentes en las desviaciones del contenido de algún componente en la muestra con respecto a su contenido real disminuyendo el valor absoluto del error casual en el resultado promedio, al aumentar el número de observaciones (número de muestras analizadas) bajo el efecto de compensación mutua de los errores de signos opuestos. Por tal razón los errores de este grupo influyen poco sobre la exactitud del cálculo de reservas dentro de grandes bloques, pero pueden alterar considerablemente el contorno del cuerpo mineral al caracterizar las muestras independientes utilizadas para delimitar este último por una gran magnitud en las desviaciones casuales. Los errores casuales se revelan y evalúan mediante una serie de observaciones de exactitud equivalentes, unas principales y otras de control.

Los errores sistemáticos son del mismo signo o manifiestan el predominio bien marcado de las desviaciones del mismo signo, por lo cual los valores promedio de los parámetros siempre serán mayores (o menores) en comparación con su valor real, cualquiera que sea el número de observaciones. Aquí reside el peligro principal relacionado con los errores de este grupo, ya que estos falsean los resultados del cálculo de reservas e implican dificultades complementarias en cuanto a la elección del esquema racional de tratamiento industrial de la materia prima mineral. Como el surgimiento de los errores sistemáticos está condicionado por alguna razón concreta, se pueden revelar y eliminar. Sin embargo, a veces tales razones son inevitables o su eliminación requiere gastos complementarios muy grandes (por ejemplo, los errores vinculados al desgaste selectivo del testigo, pérdidas de minerales pesados durante el muestreo de los pozos de perforación en los placeres, reactivos de poca calidad utilizados por el laboratorio químico, etc.) Pero, hasta en estos casos, la influencia dañina de los errores sistemáticos revelados se puede excluir con ayuda de los coeficientes de corrección correspondientes. Para descubrir los errores de este género las observaciones de control deben realizarse mediante métodos más exactos durante las observaciones principales.

Las equivocaciones graves son consecuencia del descuido, la negligencia o la falta de atención durante la ejecución del trabajo (errores en la numeración de las muestras, confusión de estas al tratarlas o analizarlas, infracción grave del esquema establecido de tratamiento de las muestras, cálculos incorrectos sobre la base de los resultados de los ensayos, inscripciones erróneas en los registros del muestreo, etc.). Dichos errores deben ser revelados obligatoriamente y excluidos y realizar una vez más el tratamiento y los ensayos de las muestras dudosas a partir de sus duplicados y a veces hasta tomando las muestras reiterativamente.

Los errores tanto casuales como sistemáticos se manifiestan simultáneamente durante cada operación de muestreo, pero tienen diferente naturaleza y se revelan mediante métodos de control distintos. Un control bien organizado también debe asegurar la evaluación del error total del muestreo, con el cual serán calculados los valores promedio de ciertos índices de la calidad del mineral útil por una serie de muestras. En el caso del error sistemático, propio de cada operación del muestreo, el error total se calcula por la siguiente fórmula:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (120)$$

donde:

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ - errores relativos de la toma, tratamiento y ensayos de muestras correspondientes (teniendo en cuenta sus signos).

Al caracterizarse cada operación solo por los errores casuales, el error total se determina mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}{\bar{C}} \cdot 100 \quad (121)$$

donde:

σ_1 , σ_2 y σ_3 - dispersiones de los errores de la toma, tratamiento y ensayos de muestras correspondientes;
 \bar{C} - valor promedio del índice de calidad en cuestión.

Control de la toma de muestras

Para revelar los errores casuales que surgen durante esta operación hay que tomar otra muestra en el mismo lugar de la principal y aplicar el mismo método de toma: utilización de la segunda mitad del testigo o su fresado reiterativo, realización del segundo surco de la misma sección transversal junto al surco de la muestra principal, toma de muestras parciales después de cambiar la posición de la red de toma, etc. Con posterioridad, ambas muestras (principal y de control) deben tratarse según el mismo esquema y analizarlas por los mismos métodos y si es posible hasta por el mismo trabajador. En este caso se trata de revelar el error casual de todo el complejo de operaciones del muestreo y no de la toma de muestras por sí sola y por tal motivo este tipo de control se utiliza raramente.

Los errores sistemáticos se descubren al aplicarse el método de toma de muestras más exacto y representativo: la toma de todo el testigo previamente fresado, utilización de los surcos de mayor sección o huecos para controlar las muestras de surco ordinarios, toma de muestras por hueco en lugar de por puntos, muestras de surco o volumétricas para controlar las de testigo, surco de sección transversal regular en lugar del punteado, etc. En este caso, el tratamiento y los ensayos de muestras de control según la metodología corriente y la confrontación de los resultados con los del estudio de las muestras principales correspondientes permite revelar el error, que se compone de dos partes: el error casual de todas las operaciones del muestreo que se puede calcular por la fórmula (121) y luego excluir el resultado total, y el error sistemático de la toma de muestras.

Al escoger el método de toma de muestras con vistas a controlar esta operación, es necesario tener en cuenta las particularidades de la estructura interna del cuerpo mineral en dicho crucero de prospección, ya que a veces los métodos más exactos pueden resultar menos representativos. Por ejemplo, en el caso representado en la figura 4.13, a la muestra de surco no se le puede controlar con la volumétrica y al utilizar con este objetivo la muestra de hueco, esta debe asegurar la misma proporción de los tipos de mena que la muestra de surco a controlar.

En todos los casos, la toma, el tratamiento y los ensayos de las muestras principales y las de control tienen que efectuarse simultáneamente para evitar la alteración posible en la calidad del mineral útil debido a su oxidación, hidratación u otros procesos exógenos. Además, es insensato llegar a cualquier conclusión de una sola pareja de muestras (la principal y la de control), por cuanto ellas representan diferentes volúmenes de mineral útil en el subsuelo y las variaciones comprobados en su calidad se pueden vincular al efecto de su variabilidad local. Por

esta razón, la serie de control debe formarse al menos de 20 o 30 parejas de muestras.

Control del tratamiento de las muestras

Los errores casuales, surgen durante el tratamiento de las muestras químicas y se revelan recogiendo todos los desechos de la reducción de la muestra principal, tratándolos según el mismo esquema y analizándolos en el mismo laboratorio y si es posible por el mismo ejecutante. Aquí también se obtiene no solo el error de tratamiento sino también de análisis, por lo cual este método de control se utiliza con poca frecuencia.

A fin de descubrir el error sistemático, los desechos recogidos hay que tratarlos rigurosamente, es decir según el esquema confeccionado sobre la base del mayor coeficiente de heterogeneidad en la ecuación Richards-Chechett. Para la operación precedente, el control del tratamiento de muestras se considera como confiable y auténtico si fue estudiada una serie de al menos 20 a 30 parejas de muestras.

Control de los ensayos

Con frecuencia se organiza el control de los análisis químicos y espectrales, aunque de la misma manera se procede para revelar los errores en los ensayos de cualquier tipo. Tratándose de errores casuales hay que ejecutar los ensayos una vez más, utilizando los restos de la porción de laboratorio o el duplicado de la muestra. Dichos ensayos se hacen en el mismo laboratorio por la misma metodología, pero los números de las muestras tienen que ser cifrados. Las muestras de control, cuya cantidad es de 3 a 10% del número total de muestras principales (nunca menos de 20 a 30 muestras) se seleccionan con anticipación y llegan al laboratorio al mismo tiempo que las principales, lo que garantiza su análisis simultáneo y por consiguiente igual precisión en ambos análisis, así como el carácter sistemático del control. Este tipo de control se denomina interno.

Para descubrir los errores sistemáticos de los ensayos se aplica el control externo. Con este objetivo, los duplicados de las muestras principales (3 a 5%, pero no menos de 20 a 30 muestras) se envían a otro laboratorio que utiliza una metodología más perfecta y exacta para tales ensayos y por eso se asegura más alta precisión y autenticidad en los resultados. En este caso los duplicados tienen sus números reales y además para cada uno se comunican los límites aproximados del contenido del componente de interés o de los valores del índice de la calidad que se propone controlar. Esto es necesario para escoger la mejor metodología de los ensayos en el laboratorio de control.

Otro método utilizable para revelar los errores sistemáticos, sobre todo del análisis químico, consiste en la aplicación de las muestras patrones. Estas se preparan separadamente para cada tipo natural de mena, a partir de una muestra de laboratorio de masa importante, cuyas porciones representativas se envían a laboratorios que se caracterizan por la alta precisión en la ejecución de los análisis. En cada laboratorio la porción obtenida se analiza cuatro veces, lo que da en total unas decenas de resultados del análisis químico para la misma muestra patrón; sobre esta base se calcula el contenido promedio del componente en dicha muestra. Las porciones de esta muestra bajo números codificados se distribuyen

con posterioridad dentro de la serie de muestras principales a controlar, y con ello se logra la revelación fácil y rápida de los errores sistemáticos.

Métodos de evaluación de la magnitud del error y vías para la eliminación de su influencia

Dada la diferente naturaleza y el carácter de manifestación de los errores casuales y sistemáticos sus magnitudes tienen que determinarse de diferente manera.

La magnitud absoluta del error casual p_a se calcula por el método más sencillo, propuesto por el científico A.P. Prokofiev, el cual consiste en la sumatoria de las diferencias entre los ensayos principales y de control sin tener en cuenta sus signos:

$$p_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (122)$$

donde:

x_i - valor del índice de la calidad de la muestra principal;

y_i - valor del índice de la muestra de control;

n - número de parejas de muestras en la serie de control.

Otro método de cálculo de la magnitud absoluta del error casual, que alcanzó amplia utilización práctica, fue propuesto por N.V. Baryshev y se basa en los cuadrados de las diferencias de los resultados obtenidos durante el control:

$$p_a = \frac{(x_i - y_i)^2}{2n} \quad (123)$$

Conociendo la magnitud absoluta es fácil calcular el error casual relativo p_r , conforme a la siguiente fórmula:

$$p_r = \frac{2 p_a}{\bar{x} + \bar{y}} \cdot 100 \quad (124)$$

donde:

\bar{x} - valor promedio del índice en cuestión determinado sobre la base de las muestras principales;

\bar{y} - valor promedio del índice calculado a partir de los resultados de los ensayos de control.

Hay que recordar que el error casual no se puede eliminar cualquiera que sea su magnitud revelada. Esta última se utiliza solo para compararla con los errores admisibles, los cuales se dan para cada tipo de mineral útil, incluso para diferentes índices de calidad en las normas estatales ramales e instrucciones correspondientes. Al ser el error casual relativo mayor que el admisible, los resultados de los ensayos se consideran falsos y se procede al análisis reiterativo de todas las muestras principales.

Para revelar el error sistemático, en primer lugar, se recomienda el método gráfico, que consiste en la representación de los resultados de los ensayos principales y de control bajo la forma de nube de puntos en un sistema de coordenadas rectangulares. Al hacerlo según un eje, se indican, por ejemplo, los contenidos de componentes en las muestras principales y según otro eje en las

muestras de control (fig. 4.23). Si el valor sistemático y el casual faltan ($x_i = y_i$), todos los puntos deben colocarse sobre la bisectriz del ángulo entre los ejes de coordenadas; al manifestarse solo el error casual dicha bisectriz divide la nube de puntos en dos partes simétricas, mientras que la existencia del error sistemático provoca el desplazamiento de la nube con respecto a esta línea. Los puntos que se encuentran lejos de la nube (puntos 1 y 2 de la figura 4.23) corresponden

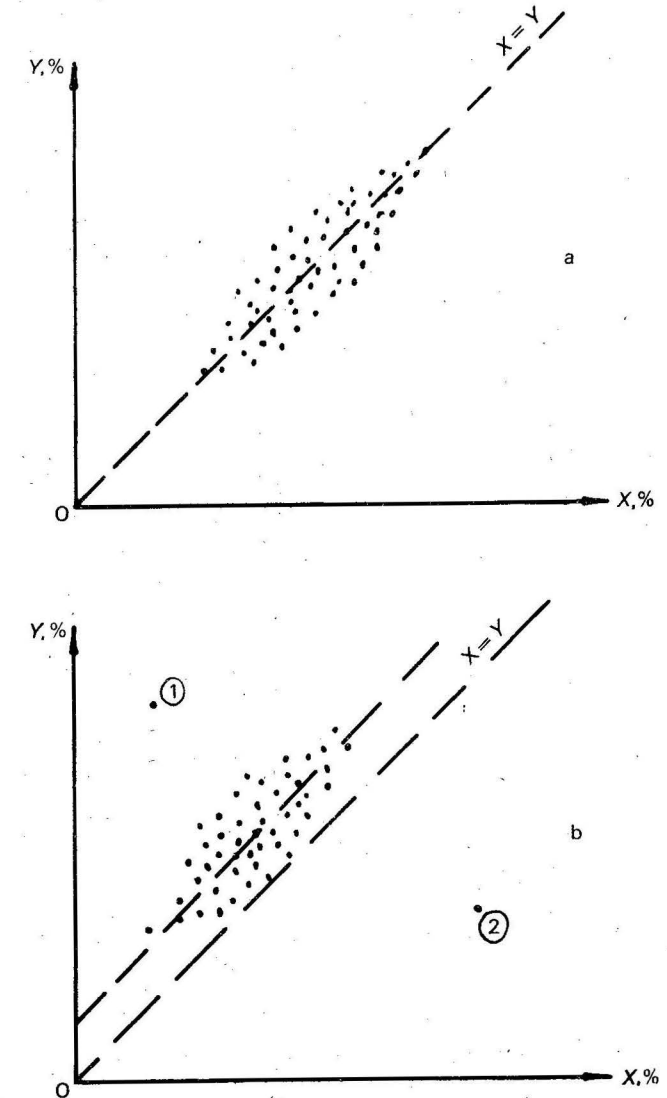


Fig. 4.23 Representación gráfica de los resultados del control externo del análisis químico en los casos: a) ausencia de error sistemático; b) existencia de error sistemático; X- contenido de Pb en las muestras básicas; Y- contenido Pb en las muestras de control; 1 y 2- errores graves en los análisis

a las equivocaciones graves cometidas durante el muestreo y no se pueden utilizar con posterioridad en la interpretación de los resultados de control. Para excluirlas no hay otro remedio que realizar una vez más el estudio de las muestras correspondientes o tomar estas nuevamente.

La línea recta que divide la nube de puntos en dos partes iguales es la representación gráfica del error sistemático (si este existe) y la ecuación de esta línea se puede utilizar para efectuar la corrección necesaria de los resultados en los ensayos principales. El método tratado es rápido y demostrativo, pero la solución gráfica de la tarea planteada tiene un carácter aproximado.

De revelarse gráficamente el error sistemático se puede evaluar con más precisión mediante el análisis de correlación con los resultados de los ensayos principales y los de control. Para lograr este objetivo, hay que aplicar la metodología apropiada (capítulo 2) y calcular los valores promedio del índice de calidad, sobre la base de las muestras principales (\bar{x}) y las de control (\bar{y}), dispersiones (σ_x^2 y σ_y^2) y desviaciones estándar (σ_x y σ_y) de estos valores y el coeficiente de correlación (ζ_{xy}). Luego se realiza la verificación de la suficiencia del número de parejas (n) en la serie de control mediante la desigualdad $|\zeta_{xy}\sqrt{n-1}| \geq 3$ y el cálculo del criterio t , que permite decidir definitivamente si existe o no el error sistemático. Este criterio se obtiene con ayuda de la siguiente fórmula:

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}| \cdot \sqrt{n}}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2 \zeta_{xy} \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}} \quad (125)$$

Al ser este criterio igual o superior a tres ($t \geq 3$) la existencia del error sistemático está probada y se procede a componer la ecuación de regresión, que servirá para recalcular los resultados de los ensayos principales teniendo en cuenta los datos de control realizados. Esta ecuación tiene el siguiente aspecto general:

$$y = \bar{y} + \zeta_{xy} \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (x_i - \bar{x})$$

Después de sustituir el coeficiente de correlación, las desviaciones estándar y los promedios, por sus valores reales anteriormente calculados, esta ecuación se reduce fácilmente a la fórmula general más sencilla:

$$y = ax + b$$

La ecuación de regresión se utiliza para la corrección de los datos obtenidos solo al no poderse eliminar las causas que provocan el surgimiento del error sistemático; de no ser así, la parte correspondiente de los resultados de los ensayos principales debe rechazarse por ser estos defectuosos y dichos ensayos tienen que realizarse una vez más hasta obtener datos seguros y precisos. Además, antes de ejecutar la corrección de los resultados de los ensayos principales (si ello es indispensable) hay que hacer los ensayos arbitrales de las muestras de control en los laboratorios especialmente aprobados, con vistas a confirmar la justeza de los resultados presentados por el laboratorio de control.

Con frecuencia, en lugar de la ecuación de regresión se utilizan los coeficientes de corrección, los cuales se calculan como la relación entre el valor promedio

del índice de calidad deducido sobre la base de las muestras de control y su valor obtenido por las muestras principales:

$$K = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$$

Sin embargo, este procedimiento carece de precisión y de resultados peores en comparación con los cálculos, según la ecuación de regresión, por lo cual su aplicación no se recomienda.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBOV, M.N. y A.M. BIBOCHKIN: *Rudníchnaia gueologuia*. Editorial Niedra, Moscú, 1973.
2. ARSKI, YU. M.: *Gueologo-ekonomicheskie osnovi otzenki miestorozhdenii redkij metalov na estadii poiskov*, LGI, Leningrado, 1979.
3. BOGATSKI, V.V.: *Matematicheskie analiz razvedozhnoi seti*. Gos-geolteizdat, Moscú, 1963.
4. BONDARENKO, V.N.: *Staticheskie reshenia niekatorij zadach gueologii*. Editorial Niedra, Moscú, 1970.
5. GOLEVA, G.A.: *Metodicheskie osnovi gidrojmicheskij poiskov rudnij miestorozhdenii i zadachi ij dalneishevo sovershenstvovania*. Sovjetskaia gueologuia No. 5, Moscú, 1978.
6. GORZHEVSKII D.I. y V.N. KOZERENKO: *Sviaz endogennovo rudoobrazovania s magmatizman i metamorfizmam*. Editorial Niedra, Moscú, 1965.
7. GRIGORIAN, S.V.: *Piervichnie gueojimicheskie oreoli rasseiania pri poiskaj i razvedke guidrotermalnij miestorozhdenii*. Sovjetskaia gueologuia No. 1, Moscú, 1973.
8. IVANOV, N.V.: *Novoe napravlenie v oprobovanii rudnij miestorozhdenii*. Gos-geolteizdat, Moscú, 1963.
9. JRUSHOV, N.A.: *Aktualnie problemi ekonomiki minaralnovo siria i gueolorazbedochnij rabot*. Razvedka i ojrana niedr No. 5, Moscú, 1969.
10. KALISTOV, P.L.: *Izménchivost orudenenia i plotnost nabliudeni pri razvedke i apróbovania*. Sovjetskaia gueologuia, Moscú, 1956.
11. KANTOROVICH, L.V. y A.V. GORSTKO: *Optmalnie reshenia v ekonomike*. Editorial Nauka, Moscú, 1972.
12. KAZAKOVSKII, D.A.: *Otzenka tochnosti rezultatov v svias s gueometrizatziei i podschiotom zapasov miestorozhdenii*. Ugleteizdat, Moscú, 1948.
13. KAZHDAN, A.B.; M.V. SHUMILIN y V.A. VIKENTIEV: *Metodicheskie osnovi kallchestvennoi otzenki razvedannosti zapasov tvierdij palieznij iskopaemij*. Sovjetskaia gueologuia No. II, Moscú, 1974.
14. KAZHDAN, A.B.: *Razvedka miestorozhdenii paliesnij iskopaemij*. Editorial Niedra, Moscú, 1977.
15. KAZHDAN, A.B.; O.I. GUSKOV y A.A. SHIMANSKI: *Matematicheskie modelirovanie v gueologui i razvedke palieznij iskopaemij*. Editorial Niedra, Moscú, 1979.
16. KIRIUJIN, V.A.: *Guidrojmicheskije metodi poiskov miestorozhdenii palieznij iskopaemij*. Izdatelstba LGI, Leningrado, 1977.
17. KONSTANTINOV, R.M.; V.A. ZHARIKOV y otros: *Izuchenie zakonomérnostei razmeshenia mineralizatzii pri metalogentcheskij isledovaniay rudnij raionov*. Editorial Niedra, Moscú, 1965.
18. KOROLIOV, A.V. y P.A. SHETJMAN: *Strukturnie uslovia razmieshenia posliemagmaticheskijrud*. Editorial Niedra, Moscú, 1965.
19. KORZHINKI, D.S.: *Teori metasomaticheskoi zonalnosti*. Editorial Nauka, Moscú, 1982.
20. KRASNIKOV, V.I.: *Osnovi ratzionalnoi metodiki poiskov rudnij miestorozhdenii*. Gosgeolteizdat, Moscú, 1959.
21. KREITER, V.M.: *Poiski i razvedka miestorozhdenii paliesnij iskopaemij*. Editorial Niedra, Moscú, 1969.
22. KUZMIN, V.I.: *Gueometrizatzia i podschiot zapasov miestorozhdenii tvierdij palieznij iskopaemij*. Editorial Niedra, Moscú, 1967.
23. KVIATJOVSKI, E.M.: *Gueojimicheskie metodi poiskov endogenij rudnij miestorozhdenii*. Editorial Niedra, Leningrado, 1977.
24. MAKSIMOV A.A., G.A. MILOSERDINA y N.I. ERIOMIN: *Kratki kurs gueologo-razvedochnovo diela*. Izd. MGU, Moscú, 1980.
25. MARGOLIN, A.M.: *Otzenka zapasov mineralnovo siria*. Matematicheskie metody. Editorial Niedra, Moscú, 1974.
26. MATERON, G.: *Osnovi prikladnoi gueostatistiki*. Editorial Mir, Moscú, 1968.
27. NALIMOV, V.V.: *Teoria eksperimenta*. Editorial Nauka, Moscú, 1971.
28. NIZGURETSKI, Z.D.: *Izpólzovanie elementov teorii sluchainij funkczii dlia otzenki tochnosti oprendelenia sodershania palieznij komponentov i moshnostiii zalezhei pri gueometrizatzii*. Trudi VNIMI No. 50, Moscú, 1963.
29. OGARKOV, V.S.: *Metódika razvedki ugolnij miestorozhdenii platformennovo tipa*. Gosgeolteizdat, Moscú, 1961.
30. POGRIEBITZKII, E.O.: *Poiski i razvedka miestorozhdenii palieznij iskopaemij*. Editorial Niedra, Moscú, 1977.
31. POLFEPOV, D.V.; S.I. SUSLOVA y S.A. ZHVARTZMAN: *Gueojimicheskie kriterii rudonósnostii osnovij ultrasosnovnij masivov (Metodicheskie rekomendatzii)*. VITR, Leningrado, 1968.
32. POPOV, E.I.: *K otzenke tochnosti izobrazhenia zaleshi palieznovo iskopaemov po dannim razvedki*. Zap. LGI, t. 34, Buipus 2, Moscú, 1959.
33. POROTOV, G.S.: *Matematicheskie metody pri poiskaj i razvedke miestorozhdenii palieznij iskopaemij*. Izd LGI, Leningrado, 1977.
34. PUTIKOV, O.F.: *Geoelektrojmicheskije metodi poiskov i razvedki*. (Uchebnoie pasobie) Rtp. LGI, Leningrado, 1980.
35. RODIONOV, D.A.: *Statisticheskie metody razgranichenia gueologuicheskij obiekto po kompleksu priznakov*. Editorial Niedra, Moscú, 1967.
36. ROZOVSKII, L.B.: *Vvedenie y teoriiu gueologulcheskovo padobia i modelirobania*. Editorial Niedra, Moscú, 1969.
37. SAFRONOV, N.I.: *Osnovi gueojimicheskij metodov poiskov rudnij miestorozhdenii*. Editorial Niedra, Leningrado, 1971.
38. SHARAPOV, I.P. *Ob opredelenii izménchivosti i videpzhannosti miestorozhdenii paliezmij*. Razvedka i ojrana Niedra, Moscú, 1952.
39. *Primenenie matematicheskoi statistiki v gueologui*. Editorial Niedra, Moscú, 1979.

40. SMIRNOV, V.I.: *Gueologičeskii osnovi poiskov i razviedok rudnij miestorozhdenii*. Izd. MGU, Moscú, 1957.
41. STARJOV, N.M.: *Osnovi teorii litogeneza*. T. 1, Izg. AN-SSSP, Moscú, 1960.
42. TROFIMOV, A.A.: *Osnovi marksheidérskovo diela i gueometritzaii niedra*. Editorial Niedra, Moscú, 1970.
43. UZHAKOV, I.N.: *Gornaia gueometria*. Editorial Niedra, Moscú, 1979.
44. VOLFSO, F.I. y P.D. YAKOVLEB: *Strukturi rudnij palei i miestorozhdenii*. Editorial Niedra, Moscú, 1975.
45. *Biojemicheskie i geobotanicheskie isledovania. Metodicheskie ukazania*. Buipus II, Niedra, Leningrado, 1972.
46. *Disposición de los estadios de los trabajos de prospección geológica para los minerales útiles sólidos*. MINBAS, Ciudad de La Habana, 1982.
47. *Izuchenie zon okislenia sulfidnij miestorozhdenii. Metodicheskie ukazania*. Buipus 12, Niedra, Leningrado, 1969.
48. *Matematicheskie metodi v gueologii (Sbornik)*. Alma Atá, Izd, Kasaj-Gos-Univ., 1968.
49. *Metodicheskie ukazania o provedenii gueologorazviedochnij rabot po stadiam*. VIEMS, Moscú, 1975.
50. *Metodicheskie ukazania po chosnovaniu i raschetu conditzii dlia podschiota zapasov tverdiij palieznij iskopaemij*. GKZ-SSSR, Moscú, 1976.
51. *Metodi poiskov i otzenki skritij miestorozhdenii tzbetnij metalov*. SEV, Moscú, 1977.
52. *Trevovania k sodérzhaniu i rezultatam gueologorazbédochnij rabot po etapami stadiam. (Metodocheskie ukazania)*. Editorial Niedra, Moscú, 1967.

Este libro ha sido impreso
por el Combinado Poligráfico
«Evelio Rodríguez Curbelo»
Se terminó de imprimir en el
mes de enero de 1990
«Año 32 de la Revolución»