

地質調査研究の応用面に結びつく現代鉱物学の基本問題*

A. I. GINZBURG*

岸本 文男*訳

鉱物学は、その歴史全体を通じ、実際の鉱業及び地質調査事業の要求と密接に結びついて発展してきた。ソ連での生産力の発展に関する膨大な課題は、あらゆる有用元素を最大限に回収できる、鉱床のより完全な総合開発、新種の鉱物資源の産業化、地質調査事業の効率の向上という特に大きな要求を鉱物学的研究分野に対して提起している。これらの課題は、嵐のように発展しつつある隣接科学領域（固体物理学、結晶化学、物理化学など）の影響のもとに奥深く変化しながら、鉱物学自体が発展する道を指し示すものでもある。最新の研究法（電子顕微鏡法とエレクトロノグラフ法、電子マイクロ分析法、赤外線吸収スペクトル法、ディフラクトメータ法、静電法、静磁法、ルミネッセンス法、ラジオフリーケンシー法その他の多くの方法）を広く導入することは、各種の生成タイプの鉱床から産出する鉱物の多くの特徴を明らかにするのに役立つ。さまざまな物理化学的条件下で生じたある鉱物の特徴はそれ自体の微異方性、微量元素・気液包有物・固体包有物・格子欠陥・転位の差異、特定の構造ディスオーダー性の出現、多形現象・多型現象の発達などに現われる。このような近代的な研究法によれば、鉱物の組成、構造、性質の微小な差が明らかにでき、鉱物学者たちにきわめて広い展望を開いてくれ、全く新しい課題の解決を可能にしてくれる。なかでも、鉱物学的研究は、鉱業の集約化における同じように、ソ連での地質調査事業の実施効率の向上に大きな影響を与えるだろう。

以下、地質調査事業での実際の課題の解決をめざした鉱物学のいくつかの問題について述べる。

*A. И. Гинзбург (1976): Основные проблемы современной минералогии, связанные с практикой геологоразведочных работ: Записки Всесоюзного Минералогического Общества, ч. CX, вып. 5, стр. 513-528

(A. I. Ginzburg (1976): Fundamental problems of the modern mineralogy, related to a practical geological survey: Zapiski of All-Union mineralogical Society: part CX, issue 5, p. 513-528)

**鉱床部

1. 新鉱物資源の把握と産業使用鉱物数の増大

周知のように、現在のところ、鉱物種の総数の15%たらずが利用され、産業に使用されているにすぎない。同時に、新たに鉱物を有効利用することは、大型新鉱床の発見に優るとも劣らない国民経済への大きな貢献となるだろう。たとえば、ベリリウムの主な鉱石鉱物として、緑柱石とともにフェナサイトとベルトランダイトが使われ始めたが、そのことは鉱石中のベリリウム酸化物の含有品位をほとんど1オーダーぐらい高め、ベリリウムの資源問題を全く新たに解決することとなったのである。

1971年から1975年にいたるわずか5年間にウォッジナイト、ハッチェットライト、含稀土類プランボパイロクロア、セシウム黒雲母、クルチャトバイト、サハアイト、ドウソナイト、カナサイトなどを含め、15種以上の鉱物の実用価値が明らかにされている。

これらすべての新種の鉱物資源の発見史をひもとくと、その有効利用に対し、次のような事情が影響するものと思われる。

1) 自然界における鉱物の空間的拡がりについての我々の考え方の変化

鉱物の存在濃度についてでなく、鉱物が存在することのできる物理化学的条件の幅について語らなくてはならないだろう。ある鉱物はきわめて幅広い物理化学的条件範囲内で安定であって、さまざまなタイプの鉱床中に産出し、広く分布する。別の鉱物は我々がきわめてまれと考えるような、ごく特殊な条件の中だけで生成するが、そのような条件が生じる場合には、稀産でなく、実用上の関心がもたれることになる。例えば、ベリリウムを花崗岩（ペグマタイト、グライゼン）と関係ある高温生成物とみる限り、フェナサイトとベルトランダイトはごくまれな鉱物としなくてはならない。しかし、亜アルカリ花崗岩類及びアルカリ花崗岩類と関係ある熱水作用の研究が行われるようになってから、フェナサイトとベルトランダイトは主要鉱石鉱物の役割を果たすようになった。

このわずか数年前には、ドウソナイトがどれほど重要な鉱物か知らない鉱物学者が多かった。ドウソナイトはいちじるしい稀産鉱物とされていたが、その存在条件(アルミナ珪酸塩岩、とくに噴出岩の含水炭酸塩-ナトリウム質水の影響下での風化殻生成物の後生変質)が明らかになって以来、多くの地域で発見されるようになった。当該岩石中のドウソナイト含有率は70%に達し、そのためドウソナイトはアルミナ製造原料とみることができるのである。このような例はかなり多い。おそらく、鉱物の分布(空間的拡がり)は昔から伝統的に受け入れられてきた規準とは別のものによって評価されなくてはならないだろう。岩石中の鉱物平均含有率を計算することによって鉱物の分布状況を定量的に評価しようとする試み(Lyakhovich, 1967)は、注目に値する。各種のタイプの岩石に鉱物の「クラーク数」系を組み立てることは、いちじるしく目的にかなったことである。

2) 鉱物の物理的性質と物理化学的性質の全面的研究

ある鉱物の新しい性質の発見は、当然、その用途が拡がることになる。例えば、イオン交換性の研究が沸石の大群の実用価値を確かめることとなったし、層間空間に水溶液や顔料を吸収するという雲母の性質の研究結果は微鱗状白雲母の新しい用途をもたらした。鉱物の放射線耐性の研究によって原子炉の建設の際のコンクリート用に適した添加鉱物が選定できるようになった。半導性、圧電気性、レーザー性などの性質の研究が近代エレクトロニクスなど(量子発電機、半導体、各種の送信機など)への多くの鉱物結晶の利用の道を開いた、多くの例もあげられる。自然界に存在する結晶が不完全なため、必ずしもうまく産業界で使用できるとは限らず、その場合には当該鉱物を人工合成することになるが、そのような新物質を作る基礎となるのは天然化合物の性質を研究することである。

鉱物の性質の定向変化の可能性を研究することは、非常に有望である。鉱物が特定の作用を受けると、特殊な性質を備えた新しい物質になることがある。例えば、いくつかの鉱物を特定の条件下で加熱するか光を当てると、色が変わる場合がある。この性質はすでに以前から実用に供されているが、更に新しい用途、すなわち宝石の品質向上にも利用されつつある。

3) 既知鉱物中の有用微量元素の発見

鉱物として実用価値がないものでも、その中に含有率の高い微量元素(混在元素)が発見されたために鉱石となった例は、かなり多い。例えば、40年以上も前にF. Hessが米国のノースカロライナ州でリシア輝石ペグマタイトの外接触帯から3%のセシウム酸化物を含有した黒雲母

を発見したが、F. Hess自身も、そのほかの誰もが、この発見物がどれほど実用価値をもっているものか考えもしなかった。しかし、数年前に、リシア輝石ペグマタイトが塩基性岩中に賦存する多くの地区で、そのペグマタイトをとりまいて厚い黒雲母化帯が発達し、その主要構成鉱物となっているのはセシウム酸化物を最高6%も含有した含セシウム黒雲母であることが明らかにされた(Ginzburg et al., 1972)。この黒雲母からセシウムが簡単に抽出できるとすれば、一定の条件のもとで黒雲母はセシウム鉱石となる。O. D. Stavrov と A. M. Portnov (1966)が1アルカリ山塊のフェナイト化帯の星葉石中に最高2%のセシウム酸化物が含まれることを明らかにしたのは、まさにその例である。造岩鉱物となっている場合の類似含セシウム星葉石も新しいセシウム資源となり得るし、いわんや最近このグループの鉱物中で最高10%のセシウム酸化物が確認された例はおさらである。

鉱石鉱物からその中に含有されているすべての有用な微量元素(混在成分)を抽出し、鉱物資源を総合利用することは、もっとも重要な国民経済上の課題である。この課題を解決するためには、詳しい鉱物地球化学的及び選鉱冶金工学的な研究が不可欠である。例えば、現在のところ燐灰石は、アルカリ岩山塊産の燐灰石中に多量の稀土類元素とストロンチウムが含まれているにもかかわらず、燐酸資源としてしか考えられていない。また、被変成堆積-噴気鉱床の磁鉄鉱中にゲルマニウムが発見され、鉄鉱製錬の際のスラグからそのゲルマニウムを抽出する技術が開発されたことは、ゲルマニウム原料産地の状態を根本的に変えることとなった。それと全く同じように、含銅砂岩の、主として微細な包有物の形でジェスカズガナイトを随伴した黄銅鉱と斑銅鉱中でレニウムが認められることは、レニウム原料資源についての既存の考え方を一変させている。鉱物の化学的性質の研究がソ連の鉱物資源産地の拡大にどのように大きな影響を与え、鉱物の組成の全体的な研究や鉱物中における微量元素(混在成分)の存在形態の解明がどのような役割を果たしているかについては、まだ数例しかない。

2. 「探査鉱物学」の発展、鉱物学的探査法の開発、鉱床の評価

転石-砕屑法及び腕かけ法と同様に、鉱物学的探査規準は、昔から鉱床探査に用いられてきた。すでに古代では、酸化帯の鉱物によって深部に鉱体が存在するかどうかを判定し、また、永年にわたって随伴鉱物による探査が行われている(キンパーライト岩筒探査の際にパイロープ分布図を使用)。鉱物学的探査法を広範に導入し、そ

れを地球化学的探査法と組み合わせることの必要性は、以前から A. Ye. Fersman (1940) によって主張されていた。しかしながら、地球化学的探査法の実施が簡単で大量処理が可能なこと及び鉱物学的探査法の内容として詳しい室内研究が必要となったことによって、近来、鉱物学的探査法はるか後に追いやられ、忘れ去られるという結果を招いている。しかし、鉱物学的探査法分野でも、その間に、鉱物のタイポモρφイズム、鉱床生成作用の指標鉱物、鉱物の共生関係に関する知識の著しい発展、更に、新たに開発された、野外でも簡単に使える迅速研究法は、探査の段階でも、特に概査や発見異常・発見露頭の評価の段階でも鉱物学的方法を広く適用する必要があるという問題を提起している。鉱床探査法の開発と鉱床評価をめざした鉱物学的研究の総体を、著者らは一つの学問分野、すなわち「探査鉱物学」に区分するよう提案したい。以下、この分野のもっとも重要な課題を簡単に述べる。

1) 淘汰精鉱・粉碎試料の鉱物学的分析情報確度の向上

現在では、鉱物のタイポモρφイズムと共生関係についての新しい資料が多量に蓄積され、淘汰精鉱と粉碎試料の鉱物学的な分析の中でそのような新しい資料を活用することは、情報確度を急上昇させ、したがってこの種の研究の効果を急上昇させる。試料を調べれば、その鉱物組成に関する定性的及び定量的なデータが得られるだけでなく、次のような探査課題を解決することもできる。

— 鉱物のタイポモρφ特性から鉱床がどこからもたらされたかという鉱床の生成タイプを決定すること、したがって当該鉱床の有望性を決定すること。

— 随伴鉱物とその共生関係によって有望タイプの鉱床の存在（例えば、淘汰精鉱中にジルケライトと共生してパデライトが存在することはその地区にカーボナタイトが存在することを意味する、など）を予測すること。

— 指標鉱物のタイポモρφ特性からあるタイプの鉱床の存在を予測すること（例えば、Sn をかなり含んだ淘汰精鉱中に黒色針状電気石が存在することは、珪酸塩-錫石鉱石フォーメーション型錫鉱床の存在を示唆し、Nb よりも Ta の多い、Ta に富んだ黒色の錫石の存在は、その地区に含 Ta ベグマタイトが存在する指標となる、など）。

— 貫入岩の粉碎試料の副成鉱物と暗色鉱物からその鉱床胚胎性を評価すること（例えば、花崗岩の粉碎試料中に多量のスフェーンと褐簾石がみられることは、その花崗岩が不毛であることを示唆し、非変質花崗岩の黒雲

母中に比較的多量の F・Li・Sn・Ta が含まれていることは、その花崗岩に關係してタンタル鉱床が存在するかも知れないという指標になる）。

アルカリ花崗岩の場合の指標鉱物の役割を果たすのは角閃石で、曹閃石-ソーダ角閃石同像系の鉱物の存在がタンタル-ニオブ鉱床とジルコニウム鉱床などの存在可能性を示す指標になる。

2) 精密探査上有望な地区の把握

鉱床田地区内には、通常、ある特定の鉱物生成作用（微斜長石化作用、黒雲母化作用、曹長石化作用、絹雲母化作用、黄鉄鉱化作用など）が発達するが、その鉱物生成作用はいくつかのそれぞれの特徴（カリ長石のトリクリニシティの程度、雲母と角閃石中の F とアルカリ稀元素の含有率、Co : Ni 比、熱・電気伝導率の特徴、黄鉄鉱の熱起電力値など）から広域にわたって発達する類似鉱物生成作用と区別できる。造岩鉱物のタイポモρφイズムを利用すれば、精密探査に期待できる地区を識別し、その範囲を画くこと、また、深部潜頭鉱体の存在を予測することが可能になる。例えば、しばしば塩基性岩岩体に胚胎される稀金属ペグマタイト鉱床発達地区には、紫青色という点で他の角閃石とは異なるホルムクイスタイトが広く発達するが、その存在は Na-Li 型ペグマタイトの存在を示唆する直接的な指標となる。多くの熱水鉱床（多金属鉱床、金鉱床など）における絹雲母化帯は、Li 含有率、ときには Cs 含有率が高いことを特徴とし、その絹雲母化帯産の黄鉄鉱は特定の微量元素含有率（なかでも Co : Ni 比）に特徴がある。特に重要な探査指標となるのは、ある種の含弗素鉱物、すなわち黄玉、螢石の存在、マグネシアに富む岩石ではセラアイト、アルカリ交代帯における氷晶石、ウェーベライト、ガガーリナイト、フリュオセライトとかなりのアルミナ弗化物の存在、雲母・角閃石などの鉱物の弗素含有量の高いことである。

最近、鉱体の鉱画を描き、深部に存在する潜頭鉱体を把握できる純鉱物学的方法が開発された。N.P. Yermakov (1968) が提起した、岩石構成鉱物中の気液包有物の強い発達域を把握することを基本としたデクレピテーション探査法及び淘汰精鉱破裂探査法がそうである。この方法は、試料を加熱し、特殊な装置（デクレプトグラフ）で自動的に記録するものである。この方法を石英に富んだ淘汰軽分離物の研究に適用することは、ルーズな物質におおわれた鉱脈を発見するのに役立つ。そのために、彼は加熱変化状況の区分別分布範囲を定め、包有物の等破裂温度線によって潜頭鉱体を発見することが可能な、特殊なデクレプト熱測定図の組み立てを提起している。こ

の方法を多くの含水晶脈、ペグマタイト、潜頭多金属鉱体の探査に適用することによって良い結果がすでに得られている。同様な目的に母岩の熱シンチレーション法を用いることも、また有望である。放射性鉱物資源の探査には、石英中の放射欠陥の解明にもとづいた電子常磁性共鳴法がうまく適用できる。この方法は、放射性鉱物と接触した石英から得られる自然曝射線量を測定することができるもので、ルーズな地層から採取した石英粒ないし石英碎屑を用いて鉱体の存在を予測することが可能である。

3) 発見鉱徴の評価

探査によって発見された鉱徴の評価には、多くの手段と時間を要するが、指標鉱物を利用すれば、その評価作業を著しく早めることができる。例えば、セシウム鉱体の探査の際の重要課題となるのはすぐれた稀金属ペグマタイトの選別である。主なセシウム鉱物であるポルサイトがペグマタイト中に極端に不均一に分布する上、それを明らかにするには多数の試料を分析しなくてはならないのである。著者がかつて指摘したように (Ginzburg, 1954), この課題は、ポルサイトを含有した鉱体中に随伴されているリシア雲母がセシウムを高品位に含み、しかも一般にルビジウムよりもはるかに多いので、解決しやすい。V. V. Gordienko と B. M. Shmakina の研究によって、ポルサイト含有ペグマタイトの雲母中におけるセシウム濃集作用に規則性が認められることが全体として証明され、V. V. Gordienko はこの課題が微斜長石中のセシウム含有率を測定することによっても解決できるとしている。核物理的セシウム・ルビジウム野外迅速分析法を適用すれば、短時間で数百のペグマタイトを評価することができ、ポルサイトを含有する、いくつかの稼行価値のあるペグマタイトを識別することができる。野外で核物理的方法によって熱水鉱床の電気石中の錫含有率を分析すれば、電気石化帯を分類し、錫鉱床として関心がもてる部分を識別することが可能である。

鉱徴の評価で特に重要な役割を果たすのは、発見鉱徴が肉眼的には見えないことが多い、微細な金属鉱物鉱染体の特徴とするマグマ分化鉱体もしくは交代鉱体の場合(長石質交代岩帯、フェナイト化帯、曹長石化帯、炭酸塩化帯、螢石化帯、黒雲母化帯、絹雲母化帯など)である。この場合、試料の化学分析は必ずしも鉱徴の評価に役立つとは限らず、そのため、何よりも先に金属元素が存在する鉱物形態を知る必要があるわけである。

4) 鉱体の削剝程度、深部鉱体胚胎深度、鉱体の有望性の評価

現在、相互にはあまり関係のない、標記の課題がうま

く解決できる方法論がいくつかすでに出されている。その方法論は、すべて、深さと鉱物のタイポモーフ特性の変化及び鉱物共生関係の変化にもとづくものである。そのうちのいくつかについて、述べることにする。

(1) 深部における鉱床の変化は、当該タイプの鉱床に特有の、鉱物共生関係の深さによる変化の法則性に照らした、垂直累帯配列の分析を基礎にして予測することができる。この問題については、すでに詳しく述べられた文献(Problems of scientific research..., 1963; Zoning..., 1974)があり、その文献は1958年と1973年の2回の全ソ会議の内容を取りあつかったものである。ここで重ねて詳しく述べる必要はないだろう。

(2) 多くの場合、結晶形態の分析に基づけば、鉱体の削剝深度を決定することは可能である。この方法は、ある鉱物の晶相が深さとともに規則的に変化する現象を基礎にしている。もっとも多く発達する晶相とその結晶の累帯構造の研究結果に基づいて垂直断面中における鉱化作用が評価できる可能性については、コムソモリスク鉱床域の錫鉱床の錫石を例に、N. Z. Yevzikova (1972) によってすばらしい絵解きがなされている。彼が指摘するところによれば、鉱体の頂部から根の部分に移行するにしたがって錫石結晶のもっとも多く発達する形態は変化し、その錫石粒の累帯構造も規則的に変化している。そのため、錫石の結晶の形態、累帯構造が認められる錫石の碎屑や鉱粒によって、どのような鉱体胚胎深度からその錫石を採取したことになるか決定することができるのである。この方法は、初成鉱体の削剝程度を見積ることができるだけでなく、淘汰精鉱中の錫石粒によって、それが運ばれてきた源泉の初成鉱床の有望性も決定することができる。結晶の形態が深さとともに規則的に変化することは、2・3の辰砂鉱床でも明らかにされている(Zubov, 1972)。おそらく、この現象は自然界に広く発達し、したがって結晶形態の研究は、多くの場合、実用面に大きく貢献できるだろう。

(3) 鉱物中の微量元素組成も深さとともに規則的に変化し、その含有率がある微量元素では減少し、別の微量元素では増大する。この場合、鉱物中の深さとともに減少する元素と増大する元素との比が鉱体の削剝深度を示す、特徴ある指標として利用できるはずである。例えば、N. N. Nikulin (1967) は錫石を例にとり、深くなるにしたがって、すなわち錫石の生成温度が上昇するにしたがって In 含有率が減少し、Nb 含有率が増大すること、したがって、錫石中の In : Nb 比によれば、鉱体の削剝深度が判定できることを明らかにした。同様に、ソビエト沿海州の一連の多金属鉱床の場合にも、深くなる

につれて方鉛鉱中の Sb 含有率が減少し、Bi 含有率が上昇すること、その Sb : Bi の比を指標とすることができること、沿海州の数地区の多金属鉱床では、Ag : Au 比も指標になることが明らかになっている。カリ長石を含有するすべての鉱床 (ペグマタイト鉱床、稀少金属花崗岩、長石質交代岩など) の場合には、B. M. Shmakin が明らかにしたように、そのような比となるのが Rb : Ba、稀少金属花崗岩の黒雲母では Li : Sc 比である。深くなるにしたがってある鉱物中の 1 種でなく、数種の元素の含有率が低下し、別の数種の元素の含有率が增大するとすれば、効果を強めるためには S. V. Grigoryan の方法を適用し、元素の相加比ないし相乗比を吟味するとよい。例えば、稀少金属花崗岩の黒雲母中では深さとともに含有率が下がるのは Li だけでなく、Rb と Cs もそうであり、増大するのは Sc と Zn である。したがって、指標の比として、 $(Li+Rb+Cs) : (Sc+Zn)$ もしくは $(Li \times Rb \times Cs) : (Sc \times Zn)$ を検討すればよい。実際上ほとんどすべての鉱物で、このような比が成立し、その比を削剝深度の見積りと鉱体の有望性の評価に用いることができる。

(4) 普通の分光分析法では決定困難だが、特殊な方法、特に電子常磁性共鳴法によれば簡単に分析できるような元素の含有率も深さとともに変化することがある。例えば、石英中の Si^{4+} はごくわずかながら Al^{3+} に置換され、その場合にも置換は石英の物理化学的生成条件に規制され、当然、わずかな変動ではあるが、垂直方向に変化する。そのため、石英中の Al 含有率は深くなるにつれてわずかに増大し、 Si^{4+} の Al^{3+} による置換によって生じた電荷欠損の量の増大をもたらす。 Al^{3+} は、 γ 線源で石英を照射してから電子常磁性共鳴法で分析すれば、簡単にその存在を知ることができ、オッシログラフのスクリーンにスペクトルを映し、それによって石英中の累質同像置換元素 Al の含有量に直接規制される電荷欠損 $O^- - Al^{3+}$ 含有率を定量的に決定することができる。この原理に基づいて、脈石英中の放射励起電荷欠損の元素含有率による鉱脈削剝深度の決定が可能で、クチーチベルグ鉱床を例に A. V. Speranskii ら (1975) が解説している通りである。電子常磁性共鳴法は、反磁性マトリックス中の $n \times 10^{-7}\%$ 以下の常磁性イオン含有率を把握できる方法で、探査・評価を目的としたその利用にはきわめて広い展望が開けている。例えば、N. N. Vasil'kova によって、稀少金属花崗岩の蛍石やその他一連の鉱床の蛍石では、 Mn^{2+} 含有率が深いところのものほど高くなるということが確かめられたが、その Mn 含有率は電子常磁性共鳴法によって決定され、その含有率によって鉱床の削剝

深度を決定することができることも確認されている。

(5) 鉱床の垂直断面で、揮発成分、特に岩体頂部に集中する傾向が強い F, S, As の含有率が急変することは当然である。各元素の傾向に応じて分圧が変化し、その結果、賦存深度を異にする鉱物中の揮発成分含有率も異なってくるのである。したがって、そのような元素の含有率、例えば雲母中の F 含有率によって、稀少金属花崗岩の削剝深度を見積ることは可能である。S の分圧の差は硫化物中におけるカチオンとアニオン S^{2-} との間の化学量論的關係をいづらか乱し、2・3の物理的性質、特に熱起電力の値と熱・電気伝導率の特徴にはっきりと反映する電荷欠陥を生じることになる。V. I. Krasnikov, R. S. Seifullin, G. A. Gorbatov, P. M. Anosov, G. N. Knyazev, V. A. Favorov, V. N. Nikulin, D. V. Arevadze らによる多くの論文は、黄鉄鉱、硫砒鉄鉱、方鉛鉱、黄銅鉱の熱電的性質が産出深度にしたがって変化し、加えて、熱水鉱床上部レベルの黄鉄鉱と方鉛鉱の場合はトンネル伝導性、同じく下部レベルの場合は電子伝導性であるが、硫砒鉄鉱の場合はそれと全く逆であるということ指摘している。これらの資料は、熱水鉱床の削剝深度の解明に利用できる。熱起電力の値に多くの要素が影響していることは、いうまでもない。それは、この種の研究を進めるに当って十分配慮する必要がある。

(6) 全体として多くの場合、貫入体上位部分に分布する熱水生成体の鉱物を用いれば、深部における貫入岩中の鉱床の存在を予測することができる。例えば、I. I. Chetyrbotskaya (1972), L. Z. Bykhovskii ら (1972), G. F. Ivanova (1974) が石英脈産の錫石と鉄マンガン重石中の Ta・Nb 含有率から深部の母岩貫入岩体中にタンタル鉱床が存在することを予測し、その石英脈からどれくらい離れたところでタンタル鉱床が発見されるはずかさえ見事に言いあてたのである。

筆者らは、鉱物のタイポモフィズムの適用を根拠にして鉱体削剝深度の決定及び鉱体下限の推定という課題の解決にある程度アプローチできることを明らかにした。鉱物中の気液包有物の研究の際にも、垂直地質断面でのその気液包有物の均一化温度の変化の研究によっても、鉱体周縁の母岩の変質過程の研究によっても、興味ある資料が得られる。もちろん、これらの方法は広く応用される前に、複雑な諸要素を更に検討し、明らかにする必要があるが、鉱床評価への鉱物学的なアプローチが地質調査に対してきわめて効果的であることは間違いない。鉱物学的方法が実際の鉱床調査と鉱床評価に直接影響を与えるようにするためには、次のようなことが必要である。

- 鉱物学的探査法の手引きを編集すること、
- 研究対象に最大限近づけて、この方法を実施すること、そのために近代の実験選鉱装置と同じく核物理装置を装備した野外移動式鉱物実験室を生産すること、このような実験室のモデルはすでに完成している (Matias et al., 1973).
- 鉱物学的方法と地球化学的方法とを合理的に組み合わせること。

3. 応用鉱物学の発展

最近、鉱物資源工学と鉱物学の境界領域として、新しい科学研究分野、すなわち応用鉱物学が発展しているが、これは鉱物資源の完全利用・综合利用と有用成分の回収率の向上をめざした、あらゆる鉱物研究部門を統合するものである (Ginzburg, Aleksandrova, 1974)。この領域の研究の発展は、自然保護と地下資源の综合利用に関するソ連政府の決議に照して、特に急がれている。応用鉱物学は、鉱石、選鉱生成物、精鉱の鉱物組成の研究に限るだけではない。応用鉱物学は、鉱床そのものの鉱物組成の特徴を詳しく研究し、各種の鉱石鉱物の空間的分布の法則性を明らかにすることから始まり、製錬滓、製錬生成物の鉱物学的研究で終るのである。かくして、応用鉱物学は次のような多くの問題をかかえている。

1) 鉱床中のあらゆる有用成分の把握とその空間的分布法則の確認 ほとんどすべての鉱床で鉱石の鉱物組成が厳密には一定せず、造岩鉱物と鉱石鉱物の比率が鉱床の部分部分によって変わり、それにしたがって同一金属元素のさまざまな鉱物形態間の比率も変化し、随伴鉱物の組成も、微量元素の組成も変化して、ほとんどの場合に鉱物組成の変化に特定の垂直累帯分布と水平累帯分布がみられる。

精密探査に際しては、あらゆる有用成分の平均に近い含有率を示すような、いくつかの代表的な試料を工学的に研究する。しかし、鉱量の確認や採鉱選鉱コンビナートの建設への基礎となる平均試料は、決して鉱山企業の通常業務の中で得られるものではない。組成が平均試料とはいくらか異なる鉱石を供給されたときに採鉱-選鉱コンビナートがどれほど困難を経験するかを示す例は、枚挙にいとまがないほど多いのである。多くの場合、鉱石を特定の工学的等級に区分し、その区分にしたがって鉱石の選鉱処理が行われる。あらゆる有用成分は完全に回収されなくてはならないという必然性が、この鉱石処理の課題を複雑なものにしている。そのため、A. G. Kotz と Ye. G. Razumnaya (1970) が提起し、かつ野外で MOLM 型選鉱機と微量選鉱法を用いた、少量試料の鉱物組成と

選鉱性の研究成果にもとづく方法によって、鉱物選鉱性図 (mineral-technical map) を組み立てることがきわめて重要になってきている。正しい地質学的な基礎にたつて編纂された鉱物選鉱性図がある場合にだけ、多成分鉱石を総合処理しなくてはならない工場は安定した結果が保証できるのである。精密な鉱物選鉱性図の編纂は莫大な労力を要する作業で、その作業は個々の試料中の鉱物組成を迅速に定量測定できる特殊な方法 (何よりも第1に鉱石の相解析法) の確立を要求する。ある場合には、主要鉱石鉱物だけでなく、鉱石の選鉱性に対しても精鉱製錬工程に対しても大きな影響を与える随伴脈石鉱物の分布も研究しなくてはならない。

2) 鉱石構成鉱物別の有用成分分布バランスの把握と理論上可能な抽出物の判定 鉱石成分は、一般的にはさまざまな鉱物の形で存在し、部分的には造岩鉱物中に分散するが、造岩鉱物からその鉱石成分を選鉱によってとり出すことは全く不可能である。その処理技術の開発は、どのような鉱物中にどれだけの金属元素が含まれているかを知らなければ無理である。例えば、ある熱水性鉛・稀土類鉱床では、稀土類元素が弗素炭酸塩鉱物 (イットロシンキサイト、バストネサイト)、磷酸塩鉱物 (モナズ石、磷酸イットリウム鉱)、弗化物鉱物 (弗化セリウム石、イットロ螢石、螢石)、珪酸塩鉱物 (マラコン、シルトライト、フェリト-ライト) 中に含有され、重力選鉱、浮遊選鉱にかけ、そして異なる方式によって得られた精鉱の湿式冶金によって抽出される。鉱物別及び選鉱産物 (中間精鉱、最終精鉱、尾鉱) 別の各稀土類元素の分布バランスを把握しないことには、これらの鉱石に対する選鉱・冶金方式の開発は不可能である。鉱物別のあらゆる有用成分の分布バランスを把握することは理論上可能な抽出成分の判定に役立ち、選鉱産物別の当該元素の分布バランスを解明することはどのような技術的操作部門で金属元素が逸失されるかを明らかにできる。鉱物学専門家は工学専門家と共同して上記の資料を解析し、鉱床を構成するあらゆる鉱物の性質を研究し、有用成分抽出の質・量向上の方法を確立しなくてはならない。

3) 鉱物の組成・構造と工学的性質との相関関係の解明 周知のように、同じタイプの鉱床でも新しい鉱石に対する選鉱方式の検討には、その鉱石がよく研究されていると思われる場合でも、鉱山工学の専門家たちは毎回大きな困難に突き当たっている。その困難は、鉱石の多様な粒度組成、鉱石構成鉱物の結晶完全の程度、鉱物中の微量成分の変動、鉱石の酸化の度合など多くの要素に原因するもので、主要鉱石鉱物及びそれとしばしば共存する脈石鉱物の工学的性質 (磁氣的性質、電氣的性質、表

面の性質、比重など)と当該鉱物の化学組成・結晶構造との相関関係を研究すれば、前もって判断できるはずである。例えば、コロムバイトータンタライト族の鉱物の磁気的性質は当該鉱物中の $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+}$ 比に主として規制され、電気的性質は同じく $\text{Fe} : \text{Mn}$ 比とその結晶構造型式に主として規制されることが明らかになっている。これに関連して、中間型の主要鉱石鉱物の場合には、化学組成—工学的性質と結晶完整の程度—工学的性質の関係を研究する必要がある。自然界では、ある系の構成に必要な特定の組成の鉱物が常に存在するとは限らないので、多くの場合、当該組成の鉱物の合成に頼り、その純粋な合成鉱物によって工学的な性質を研究せざるをえない。このようなアプローチの方法は、天然の鉱物と合成鉱物を比較して、工学的な性質に対する微量元素の影響を考へることも可能にしてくれる。

4) 選鉱過程における鉱物の挙動の解明 このきわめて重要な、鉱物学専門家が鉱山工学専門家と共同して解決すべき課題は、各種の試薬による鉱物の浮遊性、幅広い温度・圧力範囲内での酸・アルカリ・有機化合物に対する鉱物の溶解度、焙焼時及び各種の熔剤を加えた焼結時における鉱物の挙動などの諸問題を研究することである。これらの知識がなければ、選鉱・冶金方式の検討はやみくもになり、しばしば実際に生じているような完全に経験主義におち入ってしまう。

5) 鉱物の単体分離と選鉱をめざした鉱物物性変化の把握 これは、新しい、きわめて有望な研究方向である。最近の固体物理学、核物理学、結晶化学、物理化学の進歩によって、鉱物に特定の作用を与えれば、その物理的性質が変えられるようになってきた。V. I. Revnitsev (1972) の非常にすばらしい論文が明らかにしているように、鉱物にさまざまな作用を与えることによって、結晶の格子欠陥の程度を変えることができ、そのことが当該鉱物の一連の物理的性質の変化をもたらす。この目的を達成するには、鉱物に対するさまざまな作用、すなわち、機械的作用(破碎と磨砕)、音波作用(超音波の作用)、熱作用(加熱—急冷もしくは加熱—徐冷)、化学作用(各種の試薬による腐食)、放射線作用(電子・陽子・中性子・高エネルギー光子などの照射)が利用される。ある鉱物に1ないし幾つかの作用を与えれば、ある限界までその鉱物の性質が変化し、その変化によって単体分離が可能になる。多くの場合、磨砕した鉱石にある放射線を照射し、鉱物の表面に電子欠陥を作ると、鉱物の浮遊選鉱性により影響が生じ、有用成分の抽出率を高めることができる。V. A. Mokrousov らが著しく進歩させた選鉱工学での特殊な方向として、鉱物の放射化分離法があ

る。これは、鉱物に誘導活性を与える方法である(ベリリウム鉱石、礫素鉱石、稀土類鉱石、セシウム鉱石などの選鉱)。

6) 選鉱尾鉱・湿式製錬鉱滓の有用成分の回収と有効利用 多くの採鉱—選鉱企業と採鉱—冶金企業では、長い年月にわたって巨大な量の各種の廃滓、すなわち選鉱場の尾鉱、湿式冶金工場の鉱滓(ケーキ、スラッグ、廃泥など)が蓄積され、多数の地域暖房温水・電力供給発電所*では有効利用されていない石炭殻が山をなしている。その大部分が稀少金属元素や有色金属元素を含有しているにもかかわらず、かつて鉱床の開発過程の中で一度も当然なすべし配慮がなされてこなかった。その廃滓中の稀少元素の含有率が現在稼行されている鉱床よりも高い例は、決して珍しくない。その廃滓の鉱物学的及び鉱物地球化学的研究は、応用鉱物学の重要課題の一つである。

以上のように、応用鉱物学領域に提起されている研究課題は、選鉱・冶金工程の基礎として鉱山工学専門家に対する大きな援助となるもので、最大限に有用成分を抽出するべく鉱石を完全かつ総合的に処理できる可能性を与えてくれるものなのである。このような鉱物学的研究の道は、結局のところ、比較的少量の有用産品を生産する能力が同一の場合に多額の基本投資を要しないで生産が進められるわけであるから、経済的にはきわめて効果的である。以前には選鉱不可能とされていた鉱石に対して新しい選鉱方式(もしくは選鉱法と化学的処理法の総合方式)が開発される場合と同じように、鉱石からの有用成分の回収率を向上させることは新鉱床の発見に匹敵するということを決して忘れてはならない。

4. 発生鉱物学の発展—鉱物そのものにかくされた成因情報の解読

鉱床の生成条件に関する我々の認識のもっとも重要な欠陥は、それが主観的であり、不鮮明なことである。発生鉱物学を精密科学にするためには、鉱物の生成条件に関する一般的認識からその生成条件を特徴づける定量的物理化学パラメータの把握に移行する必要がある。なぜなら、一般的認識だけでは発生鉱物学の発展の初段階にとどまってしまうからである。このような関係から近代的発生鉱物学のもっとも重要な課題となっているのが、鉱物そのものと鉱物共生関係の研究にもとづいた、鉱物生成条件に関する客観的な情報の把握である。その情報は鉱物生成過程の解明、鉱床の探査指標及び評価規準の確定に必要不可欠なものである。これらは、主として、

*いわゆる TETs, 住民・産業・公共建物に対して電力及び暖房用温水・スチームなどを供給する発電所

鉱物生成作用の熱力学的パラメータ、鉱物生成媒体の化学組成及び酸度—塩基度と酸化ポテンシャル、鉱物晶出順序、鉱物生成方式(自由晶出、再結晶作用、ゲルの結晶化、交代作用など)、生成過程の段階性、鉱物構成物質の起源、変成現象に関係のある鉱物生成後の変質過程、表成作用も含めた後生作用の重複に関する資料をその内容としている。当然のことながら、さまざまな条件のもとでのさまざまな反応の結果として鉱物が生成することを考えると、この課題が全体として完遂できるのか、あるいは、それぞれの鉱物別にその生成作用の特徴が解明できるのかといった疑問が生じてくる。鉱物が不純物を含まず、かつ理想結晶構造を備えた純粋な化合物であれば、この課題はその大部分がすでに解決しているだろう

(実際には、鉱物の大部分が不均質性を備え、相異なる生成過程をたどっている)。しかし、実際の鉱物は「理想鉱物」、化学的に純粋な化合物とは幾らか異なっており、しかもその鉱物自体に生成当時及びその後の変質・変成時の媒体や環境条件の「痕跡」をとどめている。厳密に限定された条件のもとで晶出した鉱物は、そのそれぞれが化学組成、結晶形態、物理的及び化学的性質、結晶構造、鉱物共生関係に細かな特徴を有し、その特徴は鉱物のタイポモρφイズムに関する学問として研究されている。その特徴の解明は発生鉱物学の大きな基礎となる。発生鉱物学の今後の発展は、近代鉱物学の基本課題の一つとなっている。

発生鉱物学は、鉱物のタイポモρφイズムに関する研究領域のほか、次のような、一連のきわめて有望な方向も含んでいる。

1) 鉱物温度計・圧力計の研究 これは、鉱物が生成する際の温度と圧力を定量的に評価できる、あらゆる方法を対象とした研究方向である。その基礎となるのは、主として次の3種の研究、すなわち、(i) 鉱物中の気液包有物及びメルト包有物の研究、(ii) 平衡共生2鉱物間における元素配分(中間型鉱物中の主要構成元素の配分についても、一般鉱物中の微量元素の配分についても)の研究及び、(iii) これら諸元素の分布係数と熱力学的条件との相関関係の解明、多形現象・多型現象・結晶パラメータ変化現象(結晶格子完整度)とPT条件との相関関係の研究の主として3種の研究である。そして、鉱物温度計・圧力計の研究の主な課題となるのは、さまざまな方法によって得たデータを関連づけながら、現在までに提起された多数の鉱物温度計と鉱物圧力計の正否を明らかにすることである。また、広い温度領域で機能する、包有物の均質化温度・デクレピテーション温度測定機器を改良することである。さらに、これらの自動化したものを設

計・製作すること、真の値にもっとも近い、意味の等しい定量的データが得られる研究の合理的な組合せを開拓し、精度を向上することである。

2) 鉱物の化学的性質 鉱物の組成そのものが同鉱物の物理化学的生成条件を解明するための非常にすぐれた情報となる。加えて、鉱物の完全分析値、微量成分分析値と微量成分比、原子価転移元素(Fe^{2+} と Fe^{3+} 、 Mn^{2+} と Mn^{3+} 、 U^{4+} と U^{6+} 、 Ge^{2+} と Ge^{4+} 、 Ti^{3+} と Ti^{4+} 、 Eu^{2+} と Eu^{3+} 、 Sm^{2+} と Sm^{3+} 、 Yb^{2+} と Yb^{3+} 、 Ce^{3+} と Ce^{4+} など)の研究、更に鉱物中の気液包有物の研究から重要な資料が得られる。鉱物の組成及びその中の気液包有物の組成から、造鉱溶液の組成と地球化学的進化、各成分の活性、鉱化過程における塩基度—酸度と酸化—還元ポテンシャル、鉱床と特定貫入岩との関係、気体条件その他の鉱床生成条件の解明にとって重要な問題を考察することができる。

3) 鉱物の同位体組成 こんにちでは、鉱物中の同位体存在比、たとえば、 O^{18} : O^{16} 、 C^{13} : C^{12} 、 S^{34} : S^{32} 、 Sr^{87} : Sr^{86} 、 D : H 、 Pb^{208} : Pb^{207} : Pb^{206} : Pb^{204} に関するかなり多くのデータが蓄積されている。この種の同位体存在比は、鉱物中の元素の同位体研究法によれば、当該鉱物が生成した当時の古海洋の古水温の決定、物質の起源(地殻か、マントルか、それともその混合か)の把握、造鉱溶液の初生起源か次生起源かの決定などのような課題が解決できる可能性を与えるものである。同位体置換、酸化、生物起源の要因その他の多くの要因の諸作用に関連した、得られた結果を解釈する際に多くの複雑な問題が生じるけれども、鉱物構成元素の同位体組成の今後の研究は(方法論的に条件が確立すれば)、造鉱物質の起源を解明するといった複雑な問題の解決への唯一の道となるかもしれない。

4) 鉱物の「個体発生」 これは、G.G.Lemlein, I.I.Shafranovskiiの研究、とくにD.P.Grigor'evの論文で提起され、鉱物の個体と集合の生成史を研究するという、発生鉱物学のもっとも重要な研究領域である。鉱物生成史の研究は鉱物生成機構、生成方式そのもの、その後の生成方式の変化を解明しうるものである。最近出版された、D.P.Grigor'evとA.G.Zhabin(1975)のすばらしいモノグラフには「個体発生」の基礎が述べられ、鉱物の個体と集合の構造の特徴を詳細に観察して、鉱物生成史—「発芽」・成長・変化の歴史をいかに読みとるかが多数の例をあげて明示されている。この領域の今後の発展は必要欠くべからざるものである。

発生鉱物学は、鉱物共生関係に関する研究、鉱物共生

解析, 鉱液の熱力学・運動力学・静力学的な問題の検討, 平衡系の実験研究, 個々の鉱物及び鉱物共生の安定領域の決定, 天然鉱物生成過程の実験モデル化も含んでいる。これらの問題の研究は, 現代発生鉱物学の理論的基礎の確立に必要不可欠である。更に, 鉱物生成過程に関する筆者らの考え方が最近著しく普及し, かつて当然の配慮も加えられなかった。場合によっては有用鉱物の可採濃集体を生成し, あるいは抹殺することもある当該鉱物生成過程を一層詳しく研究する必要が生じていることも指摘しておかねばならない。このように, 我々にとって「新しい」鉱物生成過程に入れなくてはならないのは、

- 宇宙現象の影響を受けて地表で生じる過程, 地球と宇宙の相互作用による「宇宙成」鉱物生成作用,
- 現在の海底で進行している過程 (現在すでに海底から鉱物資源の採掘が始まっていることを考えると, これは国民経済上巨大な価値を備えた問題である),
- 南カリフォルニア, 紅海中央部, チェレケン半島などでの含金属ブライン発見後に明らかになった, 現世熱水鉱液による鉱物生成過程 (この問題への関心を強めることが新しい発見をもたらすことは, まづ間違いないだろう),
- 現世の地上及び海底火山活動による鉱物生成過程,
- 上部マントルで進行する, キンバーライト及びその類似岩中の深部捕獲岩の詳細な研究にもとづけば, 更に海底試錐によればうまく判別できると思われる鉱物生成過程 (最近, 新しい鉱物学の新分野として上部マントル鉱物学が生れてきている),
- 生物活動による生物源及び有機成鉱物生成過程 (有機物・生物が生成に大きな役割を果たした鉱物が年を追って多く解明されつつあるが, そのような鉱物はまだ研究がきわめて不十分で, 有機鉱物族は現在でもまだ珍しがられていることを指摘せざるをえない),
- 人類の生活活動に関係した鉱工業起源の鉱物生成過程

などである。

5. 鉱物学的研究法の発展

現代鉱物学の上述のいずれの領域も, 既成の研究法の改良や新しい研究法の開発なしにうまく発展することはありえない。地質調査効率の向上には, あらゆる鉱物関係の研究室で大量に行われている, きわめて困難かつ長年月にわたる鉱物学的研究を改善することが何よりも必要である。その問題は, 研究そのものの効率を大きく向上させ, その研究をスピードアップして期間を短縮し, 測

定精度と信頼度を高めるという課題である (Ginzburg, 1971; Kuz'min, 1974)。この課題を解決するもっとも有効な道となるのは, 次のようなことであろう。

あらゆる鉱物学的分析の自動化 とくに光学的測定の自動化 (研磨片と薄片中の鉱物の量の計算, 反射分散曲線・複屈折曲線の自動記録など), X線回折による鉱物同定の自動化, 鉱石の定量X線分析の自動化, 鉱物分離過程・単体鉱物分離などの自動化。

鉱物の諸定数測定法精度・感度の向上 特に, 鉱物結晶の単位格子パラメータ, 屈折率, 比重, 誘電率などの測定法の精度と感度の向上。

微粒鉱物単体 (数mg) からその特性が正確に把握できる研究法の開発 これは何をさておいても, 鉱物の微量化学分析法の改善, 核物理的分析法の開発, 比重・熱的性質・ルミネッセンス特性の測定法の改善などである。

研磨片及び薄片を用いた鉱物粒の一局部における化学組成・構造・物理的性質の測定法の改善と開発 この目的のためには, レーザー分光分析, X線微粒分析, 電子微量分析の方法が今後更に発達する必要がある。

微粒分散鉱物の場合も含めた, 新しい高効率鉱物分離法の開発 この目的への電流水力碎屑作用と超音波, 磁気流体静力学的分離作用と磁気流体力学的分離作用, 加熱静電分離作用, 電気脈動, 色・色調による鉱物の自動分離, 核物理的分離法 (第1にX線放射化分離法) などの適用及び改善。

複雑多金属鉱石の物理的・物理化学的迅速相分析法の開発 薄片中の種別鉱物量計算への自動光学測定装置の利用, 発展した熱分析法の適用, X線回折法とメスバウアースペクトル測定法の活用, 放射能鉱物・カリ鉱物の含有量が測定できるγ線スペクトル分析法の使用, 対称心をもたない鉱物の場合のレーザー光線照射による第2高調波発生効果の利用, そしてこれら諸方法の組合せを基礎とした上記鉱石の相分析法の開発。

新しい鉱物物性研究法の開発・改善とポータブル測定機器の設計・製作 とくに, 静電的性質, 半導体性, 非線形光学性, 蛍光性, 熱蛍光性などの研究法と測定機器。

野外調査作業への鉱物学的研究の技術的導入 これは最新の装置を備えた移動実験室を組み立て, 現場にすえつける方式で行い, 試料の粉碎と鉱物の単体分離に始まり, 精密な鉱物学的研究と核物理的定量分析に終る全面的な鉱物研究が行えるようにする。

各種鉱物学的研究法と核物理学的研究法の総合化

前記諸課題の解決には, 現在だされている諸結果が異なる試料を用い, さまざまな方法で得られたものである

ために比較考査しえない以上,すべての研究室における鉱物学的研究の実施をまず整理する必要がある。そして,実施研究室に適した研究法組合せを組み立て,統一的な装備を行い,統一的な研究法を導入し,測定法・研究法に対する標準化を実施し,研究事業の外部調整を組織しなくてはならない。このためには,単一の組織だった中心が必要で,それがソ連地質省直属の鉱物学研究法科学協議会であろう。

筆者は,ソ連における鉱物資源基地の発展にとってその解決が必要不可欠な,現代鉱物学の2・3のもっとも重要な問題についてだけ述べた。筆者があえて望むのは,鉱物学の各分野の発展への関心を強めること,および,実際の地質調査事業にその成果を導入することである。

文 献

- Bykhovskii L. Z., V. P. Novikova, V. I. Sveshnikova (1972) Typomorphic characteristics of cassiterites and wolframites and their significance for prospecting and evaluation of ore deposits: in book "Typomorphism of minerals and its practical significance". Publishing [Nedra] (in russian)
- "Problems of study and methods of prospecting of blind ore deposits" (1963) Part 111. Problems of mineralization zoning in connection with prognosis evaluation of deep horizon of ore deposits and ore fields; [Gosgeoltekhizdat] (in russian)
- Ginzburg A. I. (1954) On the minerals—geochemical indicators and their significance for the prospecting of rare metal ores in pegmatites. Doklady of USSR Academy of Science, Vol. 98, No. 2 (in russian)
- Ginzburg A. I. (1971) Role of mineralogical studies in the resolution of practical tasks of geological survey. "Razvedka i Okhrana Nedr", No. 4 (in russian)
- Ginzburg A. I., I. T. Aleksandrova (1974) Technological mineralogy—new direction of mineralogical research. "Razvedka i Okhrana Nedr", No. 3 (in russian)
- Ginzburg A. I., G. P. Lugovskoi, B. Ye. Ryabenko (1972) Cesium micas—new type of ore mineralization. "Razvedka i Okhrana Nedr", No. 8 (in russian)
- Ginzburg A. I., V. V. Matias (1972) Usage of mineral typomorphism in prospecting purposes: in book "Typomorphism of minerals and its practical significance". Publishing [Nedra] (in russian)
- Grigor'ev D. P., A. G. Zhabin (1975) Ontogeny of minerals. Publishing [Nauka] (in russian)
- Yevzikova N. Z. (1972) Practical aspect of crystal-lomorphology of cassiterite. "Zapiski of All-Union Mineralogic Society", Part 101, issue 2 (in russian)
- Yermakov N. P. (1968) Problem of the development of physical-geochemical prospecting methods for outcropping and blind pneumatolitic-hydrothermal ore deposits: in book "Mineralogical thermometry and barometry", Vol. 1, Publishing [Nauka] (in russian)
- "Zonning of hydrothermal ore deposits (1974) Vol. I, II. Publishing [Nauka] (in russian)
- Zubov V. I. (1972) Characteristics of crystal forms of cinnabar in the mercury ore deposits of North-Western Caucasus: in book "Typomorphism of minerals and its practical significance". Publishing [Nedra] (in russian)
- Ivanova G. F. (1974) Geochemical characteristics of wolframite deposits in Mongol People's Republic. "Geology of Ore Deposits", No. 6 (in russian)
- Kots A. G., Ye. G. Razumnaya (1970) Usage of microenrich methods and instruments for mineralogical investigations of enrichment degree evaluation and technologic flow sheet in ore deposits. Publishing [Nedra] (in russian)
- Kuz'min V. I. (1974) Modern methods of mineralogical investigation of complex compositional ores. "Review", series X, Publishing VIEMS (in russian)
- Lebedev L. M. (1975) Recent ore-forming hydrotherms. Publishing [Nedra] (in russian)
- Lyakhovich V. V. (1967) Accessory minerals in

- granitoids of Soviet Union. Publishing [Nauka] (in russian)
- Matias V. V., K. S. Degtyar, G. L. Zhuravlev, V. F. Barabanov, M. N. Khrushchov (1973) Movable mineral-analytic laboratory. "Razvedka i Okhrana Nedr", No. 5 (in russian)
- Nikulin N. N. (1967) Distribution of indium, niobium, and scandium in the cassiterite of Khingan ore deposit. "Vestnik of Leningrad State University", No. 6 (in russian)
- Speranskii A. V., A. V. Ignatov, L. V. Bershov (1975) Vertical temperature zoning of Kti-Tiberda arsenic-tungsten ore deposit by the data of EPR. "Geology of Ore Deposits", No. 5 (in russian)
- Stavrov O. D., A. M. Portnov (1966) To the geochemistry of cesium in alkali rocks. "Geokhimiya", No. 3 (in russian)
- Fersman A. Ye. (1940) Geochemical and mineralogical methods of prospecting of mineral resources. Publishing USSR Academy of Science (in russian)
- Chetyrbotskaya I. I. (1972) Wolframite as a indicator and new source of tantalium resource. Publishing [Nedra] (in russian)
- Sidorenko A. V., y Ye. K. Lazarenko (1972) A state and problems of modern mineralogy. "Zapiski of All-Union Mineralogical Society", Part 101, issue 2 (in russian)