

ZNACZENIE I METODY GEOTERMOMETRII I GEOBAROMETRII W BADANIACH ŻŁÓŻ ENDOGENICZNYCH

UKD 553.062/067(438):549.1:53+54:548

Jednym z głównych zadań w badaniu genezy złóż endogenicznych jest określenie podstawowych parametrów fizyczno-chemicznych (procesów mineralizacyjnych, takich jak: ciśnienie, temperatura oraz chemizm działających roztworów. Szczególnie duże postępy osiągnięto w geotermometrii.

Zainteresowanie problemami geotermometrii przejawiało się już w pierwszej połowie XIX wieku (11). Badania rozwijały się w trzech podstawowych kierunkach:

1. Bezpośrednie pomiary temperatury lawy, gazów w fumarolach oraz roztworów w źródłach termalnych. Pośrednie wnioskowanie o temperaturze działających czynników termalnych według stopnia obtopienia ksenolitów w skałach głębinowych i zmetamorfizowania węgla na kontakcie ze skałami intruzywnymi.

2. Wykorzystanie cech morfologicznych, struktur oraz właściwości fizyczno-chemicznych minerałów oraz ich paragenez. Eksperymentalne otrzymywanie kryształów syntetycznych w określonych warunkach temperatury i ciśnienia.

3. Pomiary temperatury powstawania oraz składu chemicznego roztworów z wykorzystaniem wrostków zamkniętych w minerałach.

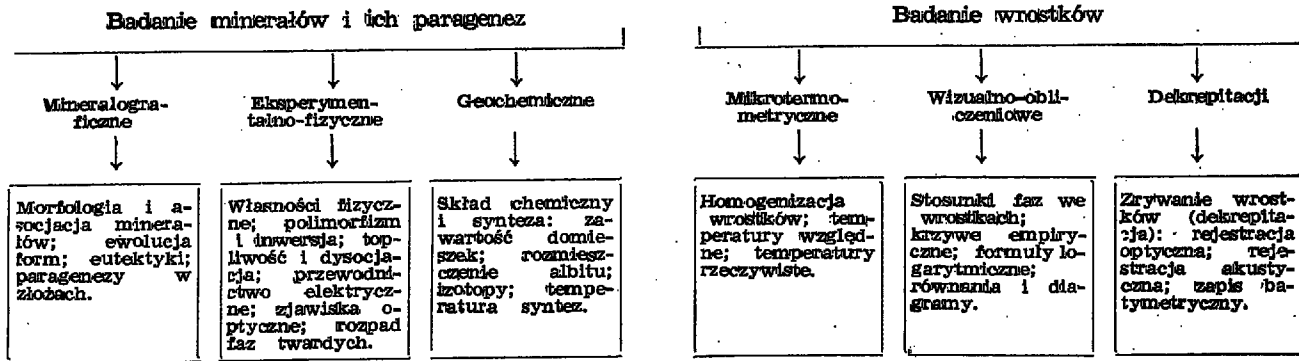
Pierwszy kierunek, jakkolwiek bezpośredni, daje temperatury w warunkach powierzchniowych, przy

gwałtownie obniżonym ciśnieniu, przez co nie może być w pełni miarodajny do określenia środowiska krystalizacji większości skał głębinowych. W geologicznych warunkach Polski nie może być on stosowany. Kierunek tych badań nazywa N. P. Jernakow (4) termometrią geologiczną w przeciwieństwie do dwóch pozostałych kierunków, które łączy wspólną nazwą — termometrii mineralogicznej.

Obydwa te kierunki są szeroko stosowane w wielu krajach, a szczególnie daleko na przód została posunięta technika oparta na badaniach wrostków. Za ojca termometrii wrostków uważa się geologa angielskiego H. C. Sorby (12), który jeszcze w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia sformułował podstawowe zasady zastosowania ich do określania warunków krystalizacji, jakie ustalił doświadczalnie. Głównie dzięki badaniom wrostków rozwija się w ostatnich latach nauka o warunkach ciśnienia naturalnego, panującego w procesach krystalizacji skał, zwana barometrią mineralogiczną lub geobarometrią.

Wyniki badań geotermometrycznych i geobarometrycznych są obecnie szeroko opisywane w zagranicznej literaturze fachowej. Wiele problemów znajduje się jeszcze ciągle w stadium dyskusji, ulepsza się i wprowadza nową aparaturę badawczą. W Pol-

METODY TERMOMETRII MINERALOGICZNEJ (WEDŁUG N. P. JERMAKOWA)



sce badania te nie były dotychczas stosowane na szerszą skalę. Artykuł niniejszy ma za zadanie zapoznać czytelników polskich z głównymi problemami i osiągnięciami badaczy zagranicznych w tej dziedzinie i być może będzie bodźcem do podjęcia tych badań w naszym kraju.

METODY BADAŃ

Przeglądowy podział metod stosowanych w termometrii mineralogicznej przedstawił w 1965 r. N. P. Jermałow (tab.). Z metod mineralogicznych najbardziej dokładne dane uzyskuje się w badaniach minerałów eutektycznych. Przerosty eutektyczne w przyrodzie tworzą minerały grupy metali, siarczków, glinokrzemianów itp. Metoda pomiaru polega na określeniu procentowej zawartości poszczególnych faz krystalicznych. Oznaczenie to nie daje jednak rzeczywistej temperatury bo jeśli się nawet udowodni, że wzajemne przerosty nie powstały w wyniku późniejszych przemian metasomatycznych czy przekryształizowania, to zawsze jeszcze pozostają nieznane także parametry jak stopień stężenia składników w roztworze lub ciśnienie. Metoda ta pozwala określić najwyższą temperaturę powstania całej asocjacji mineralnej.

Szerzej dają się stosować metody ekperymentalno-fizyczne. Najbardziej ze znanych zjawisk, wykorzystywanych dla celów geotermometrii jest zjawisko polimorfizmu i inwersji. Udowodniono, że w przyrodzie niektóre minerały mają dwie lub więcej modyfikacje. Kiedy przemiana jednego minerału w drugi jest nieodwrotna (przemiana monotropowa) to pierwszy z minerałów nie może istnieć powyżej temperatury przemian (przy określonym ciśnieniu) i w określonym środowisku chemicznym). Przemiana ta jest na tyle szybka, że można określić przedział temperatury. Jest on jednak zawsze wyższy od maksymalnej temperatury rzeczywistej powstawania minerału, dlatego też dla bezpośrednich pomiarów ważniejsze są tak zwane punkty inwersji (temperatura przemian odwracalnych — enantiotropia). Temperatura inwersji jest najczęściej równa lub niższa od rzeczywistej. Szczególnie cenne są te substancje mineralne, które mają dwa lub więcej punktów inwersji.

Stosunkowo prosto i łatwo można określić punkt topliwości minerału dzięki dość rozpowszechnionym w laboratoriach — mikroskopom wysokotemperaturowym. Niestety punkt topliwości ma niewielkie znaczenie dla odtworzenia temperatury powstawania, ponieważ na wynik oznaczenia wpływa środowisko chemiczne oraz ciśnienie, które jest zazwyczaj nieznane. Na przykład minerały powstające z roztworów hydrotermalnych mają zazwyczaj punkt topliwości wyższy od temperatury powstawania o 500 do 1500°C. Metoda ta może być pożyteczna w badaniu temperatury powstawania całej asocjacji mineralnej. Najniższy punkt topliwości jakiegos minerału z całej paragenезы wskazuje na jej maksymalną temperaturę powstania.

Podobnie też temperatura dysocjacji i rozkładu jest w dużym stopniu zależna od nieznanej zazwyczaj ciśnienia. Natomiast obecność w skale zhomogenizowanej fazy mineralnej wskazuje, że temperatura powstawania minerału była wyższa od oznaczonej temperatury homogenizacji i na odwrót — rozkład faz wskazuje na temperaturę niższą.

F. G. Smith (10) zaproponował wykorzystanie przewodnictwa elektrycznego pirytu do badań geotermometrycznych. Sposób ten nie jest dotychczas szerzej rozpowszechniany, ponieważ przewodnictwo elektryczne minerałów jest zależne od doskonałości wykształcenia sieci krystalicznej. Okazało się także, że piryty z różnych złóż wykazują różne przewodnictwo.

Interesująca jest metoda tak zwanej „fotospreżystości” minerałów (anomalna dwójtemność wokół wrostków) zaproponowana przez J. L. Rosenfelda i A. M. Chase (8). Stwierdzono, że zjawisko to wywołane jest różnicą rozszerzalności cieplnej i naprężen, jakie powstają pod wpływem temperatury i ciśnienia w mineralach macierzystym i we wrostkach. Metoda ta jest niezwykle cenna z uwagi na możliwość jednoczesnego pomiaru temperatury i ciśnienia. Dobre rezultaty daje ona w mineralach wysokotemperaturowych (efekt różnicy naprężen jest wyraźniejszy). Naukowcy wiążą z nią duże nadzieje, a dalszy rozwój tej metody sprzyjać będzie zapewne jej rozpowszechnieniu.

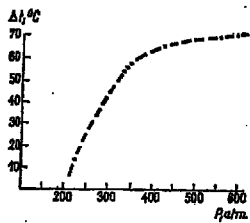
Metoda „fotospreżystości” zastosowana była do badań kwarcu, skaleni, szkła oraz minerałów skarnowych (9). Tak na przykład badania przeprowadzone na wrostkach oligoklazu i granatu w diopsydzie pozwoliły ustalić, że skarny powstawały na głębokości około 3 km, w temperaturze 700°C.

W grupie metod geochemicznych ważną i najczęściej stosowaną metodą jest określanie składu chemicznego niektórych minerałów mieszanych. Stwierdzono np., że w systemie FeS-ZnS ilość FeS w niskotemperaturowych sfalerytach jest funkcją temperatury (5). Znane są również systemy równowagi dla pirotynu i pirytu, układu Fe₂O₃-MnO₂ i innych związków. Metoda ta nie jest jeszcze dokładnie rozpracowana i budzi szereg zastrzeżeń.

Interesujący przykład zastosowania tej metody podaje I. P. Szczerba (13). Stwierdzono, że skały kwarcowo-dolomitowe i kwarcowo-magnetytowe powstały w warunkach stosunkowo niskich ciśnień i w niskich temperaturach. Np. górną granicą trwałości skał kwarcowo-magnezowych jest temperatura 200—225°C. Powyżej tej temperatury skała przechodzi w serpentynity.

Stosunkowo dokładna jest metoda T. F. Bartha (1) oparta na określeniu składu skaleni. Autor wykazał, że udział albitu w skaleniach alkalicznych i plagioklazach ma związek z temperaturą i ciśnieniem. Ustalając procentowy udział albitu można za pomocą różniczeń termometrycznych ustalić minimalną temperaturę powstania skał głębinowych i metamorficznych.

Metodą Bartha badane były pegmatyty i granity Kazachstanu, Północnej Karelii, Północnej Karoliny,

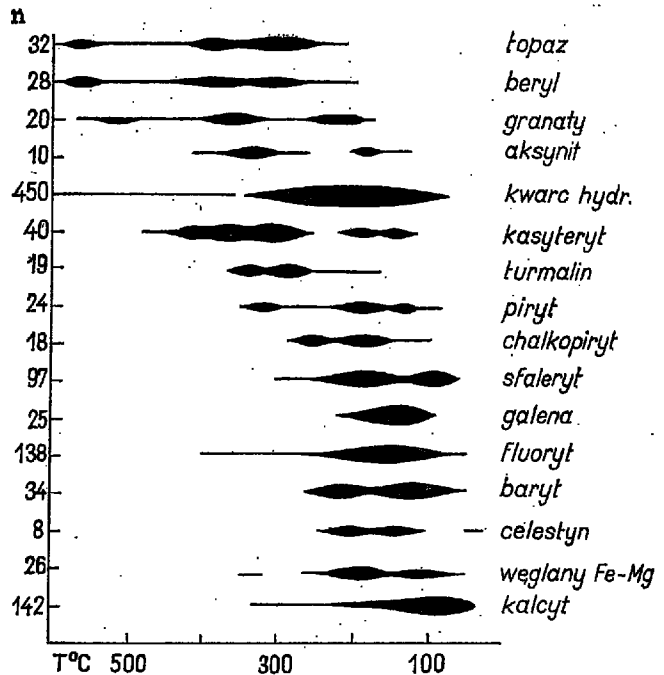


Ryc. 1. Krzywa poprawek (Δt w $^{\circ}\text{C}$) na ciśnienie do oznaczonych temperatur homogenizacji wrostków ciekłych wg N. P. Jermakowa (3). Kwarc syntetyczny z roztworów o koncentracji 12–15%.

Fig. 1. Curve of corrections (Δt at $^{\circ}\text{C}$) for pressure at determined temperatures of homogenization of liquid ingrowths according to N. P. Jermakov (3). Synthetic quartz from solutions characterized by 12–15% concentration.

Ryc. 2. Zbiorczy wykres temperatur homogenizacji i dekrepitacji wrostków gazowo-ciekłych w niektórych minerałach. Wg W. B. Naumowa i I. L. Chodakowskiego (7), n — ilość badanych złóż.

Fig. 2. Diagram of homogenization and decrepitation temperatures of gas-liquid ingrowths in some minerals. According to W. B. Naumov and I. L. Chodakowski (7); n — number of the deposits examined.



sjenity Uralu i inne skały (2). W rezultacie badań udowodniono, że pegmatyty środkowego Kazachstanu powstały w temperaturach 700–750 $^{\circ}\text{C}$ i mieszczą się w przedziale określonym dla macierzystych granitów (680–780 $^{\circ}\text{C}$). Miłkonośne pegmatyty Północnej Karelii i Północnej Karoliny powstały w temperaturach 480–525 $^{\circ}$ oraz 480–540 $^{\circ}\text{C}$. Przedział temperatury powstawania sjenitów Uralu określono na 700–750 $^{\circ}\text{C}$. Potwierdzono wysokotemperaturowy reżim powstawania granitów i związanych z nimi pegmatytów oraz niższe temperatury powstawania pegmatytów miłkonośnych.

Metoda frakcyjnej analizy izotopów nie jest jeszcze dokładnie opracowana, jednakże naukowcy wiążą z nią duże nadzieje. W geotermometri wykorzystywane są najczęściej izotopy $\text{O}^{18}/\text{O}^{16}$, $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$, oraz $\text{S}^{32}/\text{S}^{34}$. Szczególnie duże zasługi w rozwoju tych metod mają badacze krajów zachodnich (3). Metoda frakcyjnej analizy izotopów jest stosowana głównie do badania złóż hydrotermalnych oraz niektórych skał głębimowych. Metody oparte na syntezie minerałów mają znaczenie jedynie do badania prostych układów. Trudno jest bowiem dobrać w procesie syntezy odpowiednią temperaturę, ciśnienie i koncentrację składników.

Przykładem kompleksowego zastosowania metod eksperymentalno-fizycznych oraz geochemicznych, są badania polimetaliczne złoża w rejonie Gilman w Kolorado (6). Prócz siarczków (piryt, sfaleryt, chalkopiryt, bornit, galena) w złożu występuje ponadto baryt, dolomit, kwarc oraz minerały strefy cementacji i utlenienia, a także rodzime złoto. W badaniach określono temperaturę, dysocjacji i rozkładu, skład chemiczny minerałów mieszanych (FeS-ZnS), termoelektryczne potencjały pirytu, temperaturę homogenizacji wrostków, a nawet zjawisko świecenia uzyskane w badaniach termoluminescencji minerałów. Wyniki badań różnych minerałów i różnymi metodami były na ogół zgodne i pozwoliły określić temperaturę powstawania głównej paragenety siarczkowej na 200–300 $^{\circ}\text{C}$, co odpowiada grupie mezotermalnych złóż według klasyfikacji W. Lindgrena.

W Związku Radzieckim największe znaczenie mają metody oparte na badaniach wrostków. Na podstawie ogólnych zasad sformułowanych przez H. C. Sonbyego (12) i późniejszych badań N. P. Jermakowa (4) oraz innych badaczy uważa się, że roztwory zawarte we wrostkach są relikatami natural-

nych roztworów z okresu powstawania minerałów. Wrostki występują w dużej ilości minerałów, stąd też istnieje potencjalnie większa możliwość badań za pomocą tych metod. Ze względu na pochodzenie wrostki dzieli się na trzy grupy: pierwotne, pierwotno-wtórne i wtórne. Tyłko dwie pierwsze grupy wrostków mają znaczenie analityczne. Wrostki pierwotne charakteryzują naturalne środowisko krystalizacji natomiast pierwotno-wtórne rejestrują późniejsze przemiany metasomatyczne, czy metamorficzne. Ze względu na treść wrostków dzieli się je na jednofazowe (np. ciekłe) dwufazowe (ciecz-gaz) i wielofazowe (ciecz-gaz-faza stała). Największe znaczenie dla badań termometrycznych i barometrycznych mają wrostki dwu- i wielofazowe. W badaniach stosowane są głównie dwie metody: homogenizacji i dekrepitacji.

Metoda homogenizacji polega na oznaczeniu temperatury, w której podczas powolnego ogrzewania kryształu nastąpi moment pełnego zaniku pęcherzyka gazowego lub roztopienie fazy stałej. Punkt homogenizacji fazy gazowo-ciekłej jest bardzo bliski temperaturze rzeczywistej jeśli wrostki tworzyły się w warunkach niewielkich ciśnień (np. w żyłowych minerałach hydrotermalnych), ale bardzo zaniżony w minerałach powstających w warunkach głębimowych. W celu wyrównania pomiarów do rzeczywistej temperatury powstania stosuje się poprawki na ciśnienie z empirycznie skonstruowanych wykresów, którego przykład jest podany na ryc. 1. Jeśli do badań użyto wrostków trójfazowych to temperatura rozpuszczenia fazy stałej jest bardzo bliska temperaturze naturalnej i nie wymaga poprawek.

Metoda dekrepitacji wrostków wykorzystuje również zjawisko rozszerzalności cieplnej cieczy, która pod wpływem rosnącej temperatury zwiększa tak dalece swoją objętość, że jest zdolna rozzerwać całe ziarno, w którym okuliowany jest wrostek. Następuje to zawsze po przekroczeniu punktu homogenizacji, a zatem pomiary są zwykle mniej lub bardziej zawyżone. Rozrywane ziarno jest magle wyrzucane z próbki, a sam efekt „zrywu” objawia się trzaskiem. Wykorzystując te zjawiska pomiary można prowadzić wizualnie lub z pomocą tzw. dekrepitometru, w którym odbywa się automatyczny zapis efektów akustycznych. W ostatnich latach skonstruowano w Związku Radzieckim dekrepitometr rejestrujący nie efekty akustyczne, ale przyrost ciśnienia gazów uwalnianych z wrostków przy rozrywaniu ziarna (zapis barometryczny).

W metodzie homogenizacji bada się minerały przejrzyste lub półprzejrzyste, natomiast przy zastosowaniu dekrepitometru można badać również i nieprzezroczyste. Głównym mankamentem tej metody jest znacznie niżej zawyżona temperatura oraz trudności w odróżnianiu wrostków pierwotnych od wtórnych. Problemy te znajdują się obecnie w centrum uwagi badaczy. Ma ona jednak szereg zalet oraz stwarza możliwość otrzymywania w krótkim czasie dużej ilości pomiarów dla obliczeń statystycznych.

Nie sposób tu podać wszystkich przykładów badań i rezultatów uzyskanych metodą homogenizacji i dekrepitacji wrostków jakie przedstawiono dotychczas w literaturze zagranicznej. Badania wrostków prowadzi się w Ameryce, Japonii, Indii, Francji, Szwajcarii, Grecji, Holandii, Rumunii, NRD, Bułgarii, Czechosłowacji i zapewne w innych krajach. Największy rozwój nauki te osiągnęły w Związku Radzieckim. Szczególny wzrost zainteresowania tymi badaniami obserwuje się w okresie ostatnich 20 lat. Największą ilość badań przeprowadzono dla takich minerałów jak kwarc, fluoryt, kalcyt, sfaleryt i baryt. Zbiornicze zestawienie średnich temperatur homogenizacji i dekrepitacji wrostków w licznych złożach światowych przedstawia ryc. 2.

ZAKOŃCZENIE

Skrótnie namy artykułu nie pozwalają na omówienie wszystkich problemów geotermometrii. Nie zostały w nim szerzej omówione zagadnienia barometrii i analizy składu chemicznego roztworów. Nauki te znajdują się jeszcze na etapie badań podstawowych. Tu jeszcze raz należy podkreślić, że metody mineralogiczne i eksperymentalno-fizyczne nie mają dotychczas większego znaczenia praktycznego, a jeśli są stosowane to przeważnie w kombinacji z innymi metodami. Dużą natomiast wagę przywiązuje się do metod geochemicznych i badania wrostków.

Rozwój metod i stałe ulepszanie aparatury pozwala już na obecnym etapie określić szereg praktycznych korzyści dla ogólnego rozwoju nauk geologicznych, a w szczególności:

1. Możliwość stosunkowo dokładnej analizy naturalnych warunków powstawania wielu skał, a przede wszystkim złóż, w zakresie całego systemu warunków ciśnienia, temperatury i składu chemicznego roztworów.

2. Geologiczno-genetyczna interpretacja wyników badań pozwala przewidzieć miejsce występowania niektórych cennych minerałów w paragenezach.

3. Możliwość zastosowania metody dekrepitacji do poszukiwań złóż endogenicznych i to zarówno powierzchniowych jak i pogrzebanych. Jest ona szczególnie cenna w poszukiwaniach pegmatytów bezkruszczowych, kryształu górskiego, berylu, muskowitu oraz innych minerałów metasomatycznych, pneumatolitycznych i hydrotermalnych, których poszukiwanie nie było dotychczas możliwe innymi metodami. Dekrepitometria zdobyła sobie w niektórych krajach także prawa jak i metody geochemiczne, geofizyczne, hydrochemiczne i inne.

SUMMARY

The article deals with the fundamental physico-chemical properties of minerals, of their parageneses, and of ingrowths used for determination of temperature, pressure and chemical composition of mineralizing solutions. Research methods are described in brief, and results used to explain both crystallization of minerals and origin of deposits are given. Moreover, preparatory works carried out in the Geological Institute to introduce similar methods into the research of endogenous deposits in Poland are discussed, too.

4. W wielu krajach czynione są próby klasyfikowania złóż w oparciu o dane cyfrowe uzyskiwane w zakresie badań systemów P-T-X.

Prace związane z wprowadzeniem niektórych metod geotermometrycznych do stałego programu badań są obecnie podjęte w Instytucie Geologicznym w Warszawie. W pierwszym etapie budowana jest aparatura do badania wrostków (udoskonalona kamera ogrzewcza do badań temperatury homogenizacji oraz dekrepitometr), ponadto przeprowadza się próby nad oznaczaniem składu chemicznego i gazowego roztworów okludowanych we wrostkach. W dalszej kolejności przewidziane są prace nad wprowadzeniem metody „fotosprężystości” oraz innych.

W Katedrze Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu MCS w Lublinie prowadzi się obecnie frakcyjną analizę izotopów. Katedra zajmuje się także rozdziałem izotopów siarki w barytach niektórych złóż polskich.

LITERATURA

1. Barth T. F. — The feldspar thermometers. Neues Jahrb. Mineral. Abh. Bd. 82, 1951.
2. Dawidenko I. W. — Drwupolewospatowij geotermometr Bartha i temperatury obrazowania granitnych pegmatytów. W: Mineral. termometrija i barometrija, 1968, t. II.
3. Ingerson E. — Metody i problemy geologicznej termometrii. W: Problemy rudnych miejscorożeń. Sborn. statiej. Izd. inostr. Lit. Moskwa, 1958.
4. Jermakow N. P. — Termometrija głębiny procesów rudobrazowania. W: Mineral. termometrija i barometrija. Moskwa, 1965.
5. Kullerud G. — The FeS-ZnS system a geological thermometer. Norsk. geol. tidsskr. (b. 32, 1953, No. 2-4.
6. Lovering T. G. — Temperature and depth of formation of sulfide ore deposits at Gillman, Colorado. Econ. Geol. 53, 1958.
7. Naumow W. B., Chodakowski I. L. — Temperatury obrazowania minerałów po danym ciśnieniu i wkluczeniu minerałobrazujących srod. W: Mineral. termometrija i barometrija. Moskwa, 1968, t. II.
8. Rosenfeld I. L., Chase A. M. — Pressure and temperature of crystallization from elastic effect solid inclusions in minerals. Amer. J. Sci. 1961, nr 7.
9. Rusinow W. L., Primenienije fotouprugogo efekta wokrug twierdych wkluczenij dla ocenki P-T usłowij obrazowania niekotorich mineralow. Ibidem, 1965, t. I.
10. Smith F. G. — The pyrite geothermometer. Econ. Geol. 1947, nr 6.
11. Smith F. G. — Geologičeskaja termometrija po wkluczenijam w mineralach. Izd. inostr. Lit. Moskwa, 1956.
12. Sorby H. C. — On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. J. Geol. Soc. Londyn 114, pt 1, 1858.
13. Szczerba I. P. — O temperaturach obrazowania kwarcowo-dolomitowych i kwarcowo-magnezjowych porod. W: Mineral. term. i barom. 1968. t. II.

РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрены основные физико-химические свойства минералов и их ассоциаций, а также содержащиеся в них включения, применяемые для определения температуры, давления и химического состава минерализующих растворов. Кратко описаны методы, а также даны примеры применения результатов исследований для определения условий кристаллизации минералов и образования месторождений.

Описаны также мероприятия принятые Геологическим институтом для внедрения и применения указанных методов в процессе изучения эндогенных месторождений Польши.