

T. WIESER

О УПРОСЧЗОНЕЈ, ИММЕРСЫЈНЕЈ МЕТОДЗІЕ ОКРЕՂЛАНІА ВСПՂЧЗЫННІКՂВ ЗАЉАМАНІА ՂВІАТЉА МІНЕРАЉՂВ І СІЕЧЗЫ, ПРЗЫ УՂЫЦІУ МІКРОСКОПУ ПОЛЯРЫЗАЦЫЈНЕГО

(3 rys.)

О ускоренном иммерсионном методе определения показателя
преломления света минералов и жидкости при употреблении
поляризационного микроскопа

(3 рис.)

*Simplified immersion method for determining the refractive
indices of minerals and liquids by means of a polarization
microscope*

(3 fig.)

Streszczenie. Celem opracowanej, immersyjnej metody okreՂlania wspՂczynnikՂw załamania łwiatła jest uproszczenie normalnego postępowania przy oznaczaniu tej cechy minerałՂw przez wyeliminowanie refraktometru i kłopotliwego przenoszenia cieczy wzgl. ich mieszanin z pod mikroskopu na refraktometr. Sam pomiar polega na ustaleniu kąta jednakowego rozjaśnienia podwójnej smugi Becke'go w minerałе-indykatorze zanurzonym wspՂł z minerałем badanym w tej samej kropli cieczy. Jako minerały-indykatory obrane tu zostały z uwagi na dużą rozpiętość wspՂczynnikՂw zał. łw. aragonit i inne pospolite minerały węglanowe, pozwalające okreՂlić n minerału badanego w granicach od 1,530 do 1,875.

1. W s t ę p

Przy opracowywaniu mikroskopowych metod badań petrograficznych, juՂ od zarania powstania mikroskopu polaryzacyjnego, czynionych było wiele prób ilościowego oznaczania wspՂczynnika załamania łwiatła. Ta tak specyficzna cecha minerału, jaką jest wspՂczynnik załamania łwiatła, nastęrczyła najwięcej trudnoścй przy ilościowym jej okreՂleniu. Dopiero zastosowanie tzw. smugi Becke'go i diafragmowania pozwoliło na początkowo mało ściśle, następnie zaś, przez uՂycie ośrodkՂw immersyjnych, refraktometrՂw itp. instrumentՂw pomocniczych, na dokładne okreՂlanie wspՂcz. zał. łw. w normalnym mikroskopie polaryzacyjnym. Ostatnio wspomniana metoda, tzw. immersyjna, posiada największe rozpowszechnienie z uwagi na łatwość w jej posłугiwaniu się i małe zuՂycie materiałՂw (próbki minerałՂw o wielkoścй drobnych okruchՂw i krople cieczy immersyjnych). Jedną, jednakowoՂ, z nielicznych wad tej me-

tody jest m. i. zmienność współczynnika zał. św. cieczy, pod wpływem wahań temperatury, światła lub wtórnych, chemicznych procesów rozkładowych. Czynniki te, powodują konieczność ciągłej kontroli współczynników zał. św. przy pomocy refraktometrów. Inną znowuż bolączką jest, obok ewentualnego braku refraktometru lub pełnego kompletu cieczy immersyjnych, konieczność przenoszenia dostatecznej ilości mieszanki cieczy na refraktometr, co w wyniku wywołuje niepotrzebne straty cieczy, która jednocześnie mogłaby być użyta do kilku oznaczeń.

Niżej omówiona metoda opracowana została w celu określenia, w granicach pewnej, wymaganej dokładności, współczynników zał. św. pod mikroskopem polaryzacyjnym, bez urządzeń pomocniczych i przy użyciu zaledwie kilku mieszających się ośrodków immersyjnych i minerałów-indykatorów.

Metoda ta była w przeszłości opracowywana, pod różnymi aspektami, przez kilku badaczy. I tak, A. P a u l y (1905; vide Johannsen, 1914) stosował płytkę kalcytu, wyciętą równolegle do osi optycznej, do określenia współczynników zał. św. cieczy, których krople umieszczał na kalcytcie, przykrywał szkiełkiem nakrywkowym i obracał stolikiem mikroskopu aż do zaniku nierówności powierzchni i ograniczeń kropli. Pomiar kąta między kierunkiem znikania i kierunkiem osi optycznej (ε) odbywał się oczywiście przy czynnym jedynie polaryzatorze i częściowo zamkniętej diafragmie. Wartości tego kąta (φ) naniesione na odpowiedni diagram lub podstawione we wzór:

$$\varepsilon' (= n \text{ cieczy}) = \frac{\omega\varepsilon}{\sqrt{\omega^2 \cdot \sin^2 \varphi + \varepsilon^2 \cdot \cos^2 \varphi}}$$

dawały bezpośrednio wyniki w postaci współczynnika zał. św. cieczy (n). Wg J o h a n n s e n a, metodą P a u l y' e g o, współczynniki zał. św. cieczy mogą być obliczane z dokładnością co 3 jedn. na drugim miejscu po przecinku dziesiętnym. Ujemną jej stroną jest ponadto stosowanie trudnych do otrzymania orientowanych płytek kalcytu oraz mały zakres wahań współczynników ($n = \text{ok. } 1,48\text{—}1,66$). Metoda P a u l y' e g o oparta była na modyfikacji metody H. A m b r o n n' a (1893; vide Johannsen, 1914). Ten ostatni określał współczynniki załam. św. w minerale (ω, ε) dobierając dwie cieczy o współcz. zał. św. (n) zawartych w granicach ε i ω i obliczał kąt między zniknięciem granic minerału a kierunkiem osi optycznej. Stosował on przy tym 2 wzory:

$$\omega_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2} \quad \text{i} \quad \varepsilon_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}$$

gdzie n_1 i n_2 — współcz. zał. św. 2-ch cieczy, φ_1 i φ_2 — odp. kąty znikania. Metoda ta mogła być stosowana jedynie do b. cienkich płytek minerałów. Dokładność, wg A m b r o n n' a, wahała się w granicach drugiego miejsca po przecinku dziesiętnym. Przyczyna tego leży w nieściśłości wzorów oraz w fokusowaniu na wewnątrz minerału, a zatem w niewykorzystaniu podwójnych smug Becke'go przy ustaleniu kąta φ .

Inny znowuż sposób określenia współczynników zał. św. cieczy i minerału opracował C. V i o l a (1895), który oparł swój pomiar na ustaleniu szerokości smugi Becke'go, wykorzystując zależność szerokości od róż-

nicy współczynników załam. św. dwóch stykających się ośrodków oraz od grubości płytek. Metoda ta nie przyjęła się jednak zupełnie z uwagi na niedokładność pomiarów mikrometrycznych i konieczność uwzględnienia szeregu poprawek, jak np. kąta padania pęku oświetlającego promieni na płytkę i kąta łamiącego ścianek wchodzących w boczne ograniczenia płytek (por. Rys. 1, przykłady G i H).

Duży krok naprzód w rozwoju odpowiedniej metody uczyniony został dzięki pracy K. Spangenberg'a (1920), który we właściwy sposób zajął się matematyczną interpretacją zjawisk odkrytych przez Ambron'a, modyfikując wzór wyprowadzony przez tego badacza do postaci:

$$\gamma' = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}, \quad \alpha' = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_2 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

Słuszność teoretycznego rozumowania potwierdzona została w pomiarach doświadczalnych wykonanych przez Spangenberg'a na odłupkach anhydrytu ($\gamma = 1,614$, $\beta = 1,576$) i przez autora na odłupkach aragonitu, kalcytu i anhydrytu.

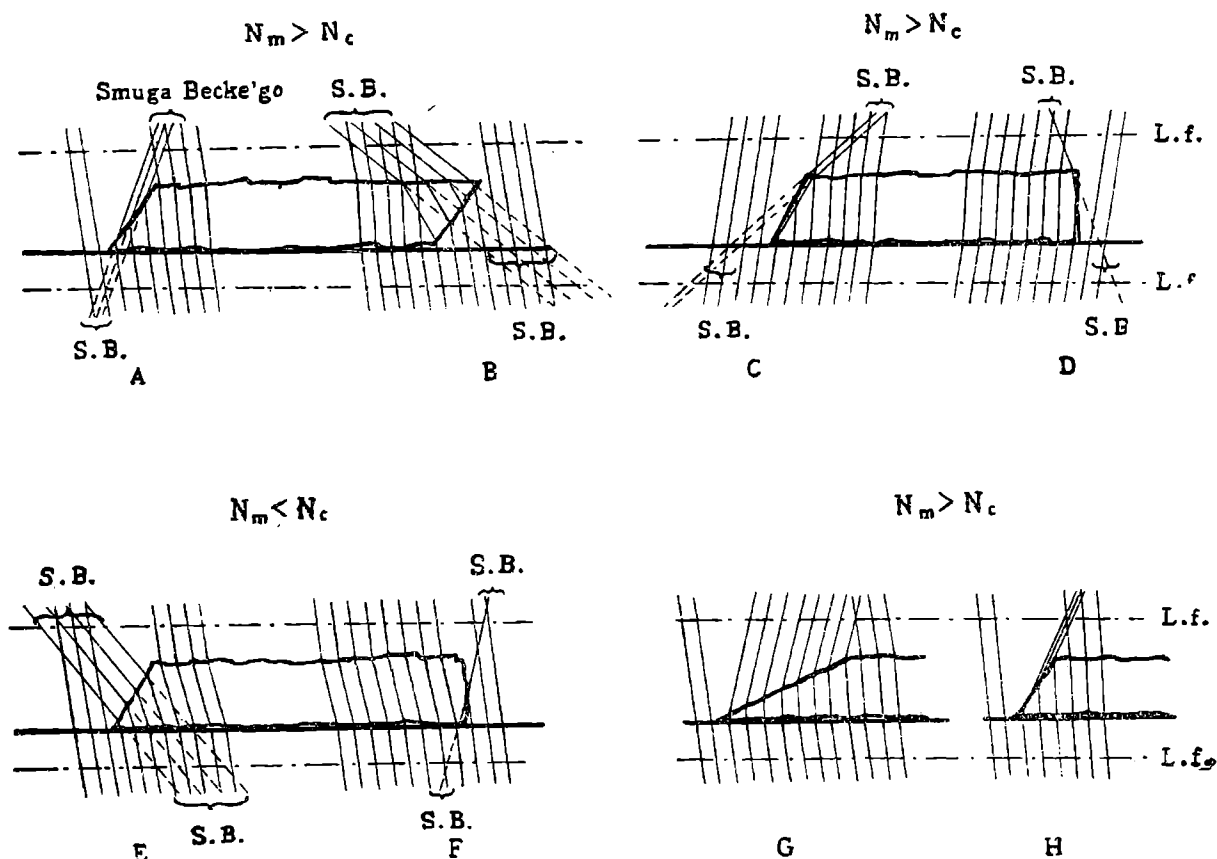
Przytoczone dociekania nad zachowaniem się płytki minerału anizotropowego względem ośrodków immersyjnych, przy czynnym jedynie polaryzatorze, znalazły zastosowanie praktyczne również w postaci mikroskopowego odróżniania minerałów grupy węglanów. H. Schumann (1948; ref. Min. Abstract), stosując balsam kanadyjski jako środek immersyjny, określił kąty zrównania jasności podwójnych smug Becke'go („Gleichheitswinkeln“) w odłupkach najważniejszych minerałów węglanowych, jak kalcyt, breuneryt, stroncjanit, aragonit, dla ułatwienia szybkiej identyfikacji tych minerałów pod mikroskopem polaryzacyjnym. Ten sposób rozpoznawania węglanów z uwagi jednak na zmienną wartość współczynnika zał. św. balsamu oraz na funkcjonalną zależność własności optycznych od składu chemicznego w takich minerałach jak np. breuneryt, może dać tylko przybliżone wyniki.

2. Opis i sposób posługiwania się omawianą metodą

Ogólną zasadą, na której opiera się tu obliczenie współczynnika zał. św. minerału i cieczy jest pomiar kąta, przy którym następuje zrównanie się jasności podwójnych smug Becke'go na granicy minerału i cieczy. Aby otrzymać tego rodzaju smugę muszą być uwzględnione następujące 3 główne warunki: 1) światło jakie w tym przypadku stosujemy musi być spolaryzowane przez nikol, 2) współczynniki zał. św. cieczy winne posiadać wartości pośrednie między maksymalnymi i minimalnymi współczynnikami w danym przekroju minerału, zanurzonego w cieczy (np. $\gamma' > n > \alpha'$), 3) ogniskowa obiektywu powinna być tak nastawiona, aby wyrazistość obrazu obejmowała miejsce położone nieco wyżej lub niżej odłupka minerału (p. Rys. 1. L. f. = linia fokusowania).

Przy zachowaniu tych warunków, światło wychodzące z polaryzatora ulegnie wchodząc do minerału anizotropowego załamaniu (zwłaszcza przy nie prostopadłym padaniu, tj. przy umieszczeniu okruczu w peryferii osi mikroskopu) i rozdziłowi na dwa drgania, o azymutach wzajemnie prostopadłych (np. γ' i α'). Wchodząc zaś do cieczy zmianie ulegnie

jedynie kierunek posuwającej się fali świetlnej. Dzięki temu, przy diagonalnym położeniu kierunków optycznych w kryształ względem kierunku drgań światła spolaryzowanego i przez nastawienie na ostrość miejsca powyżej okruchu, uzyskujemy po obu stronach granicy ośrodków optycznych podwójną smugę powstałą przez nałożenie się promieni o współczynnikach zał. św. odpowiadających np. γ' i n cieczy wzgl. α' i n cieczy*. Graficznie, zjawisko to łatwo można zobrazować przez nałóże-



Rys. 1. Przebieg promieni świetlnych w odłupkach minerału i w cieczy, przy różnych wzajemnych stosunkach współczynników zał. św.; L. f. = linia fokusowania; S. B. = smuga Becke'go; N_m = współczynnik zał. św. minerału; N_c = współczynnik zał. św. w cieczy

nie dwóch konstrukcji (Rys. 1., przykłady A i E), objaśniających przebieg promieni świetlnych w przypadku gdy N minerału (np. γ') jest wyższy od N cieczy (N_c) i gdy N_c jest wyższy od N_m (np. α'). Przy równoległym położeniu kierunku drgań wychodzących z polaryzatora, w stosunku do jednego z kierunków optycznych kryształu (np. γ' , wzgl. α'), pojawi się jedna jasna smuga, leżąca po stronie minerału ($N_m = N\gamma' > N_c$) lub po stronie cieczy ($N_m = N\alpha' < N_c$). W obu ostatnich przypadkach możemy powiedzieć, że na przemian amplituda (A) drgań α' ($A\alpha'$) i drgań γ' ($A\gamma'$) równa się zero, co wywołuje zniknięcie obrazu dla α' lub dla γ' . Przy po-

* Na styku dwóch ośrodków krystalicznych, anizotropowych podwójna smuga Becke'go będzie obrazem sumarycznym promieni, np. $\gamma_1'a'_2$ i $\gamma_2'a'_1$

łożeniu diagonalnym amplituda $A\gamma'$ będzie proporcjonalna od $\cos \varphi$, zaś $A\alpha'$ do $\sin \varphi$, gdzie φ jest kątem zawartym między kierunkiem γ' i kierunkiem drgań wychodzących z polaryzatora w momencie wyrównania jasności smug (p. Rys. 2.). Odpowiednie intensywności, $I\gamma'$ i $I\alpha'$ tych drgań będą proporcjonalne do kwadratów z ich amplitudy. Ponieważ, równocześnie kąt φ zależy od różnicy $\gamma' - n$ i $n - \alpha'$, stąd też w momencie wyrównania jasności smug, wszystkie te zależności możemy przedstawić w postaci proporcji:

$$\frac{I\gamma'}{I\alpha'} = \frac{(\gamma' - n) \cdot \cos^2 \varphi}{(n - \alpha') \cdot \sin^2 \varphi} \quad (1)$$

Przekształcając proporcję tą w następujące, wygodniejsze w użyciu równania (2) i (3),

$$\gamma' \cdot \cos^2 \varphi + \alpha' \cdot \sin^2 \varphi = n \quad (2)$$

$$\text{lub} \quad \cos^2 \varphi = \frac{n - \alpha'}{\gamma' - \alpha'} \quad (3)$$

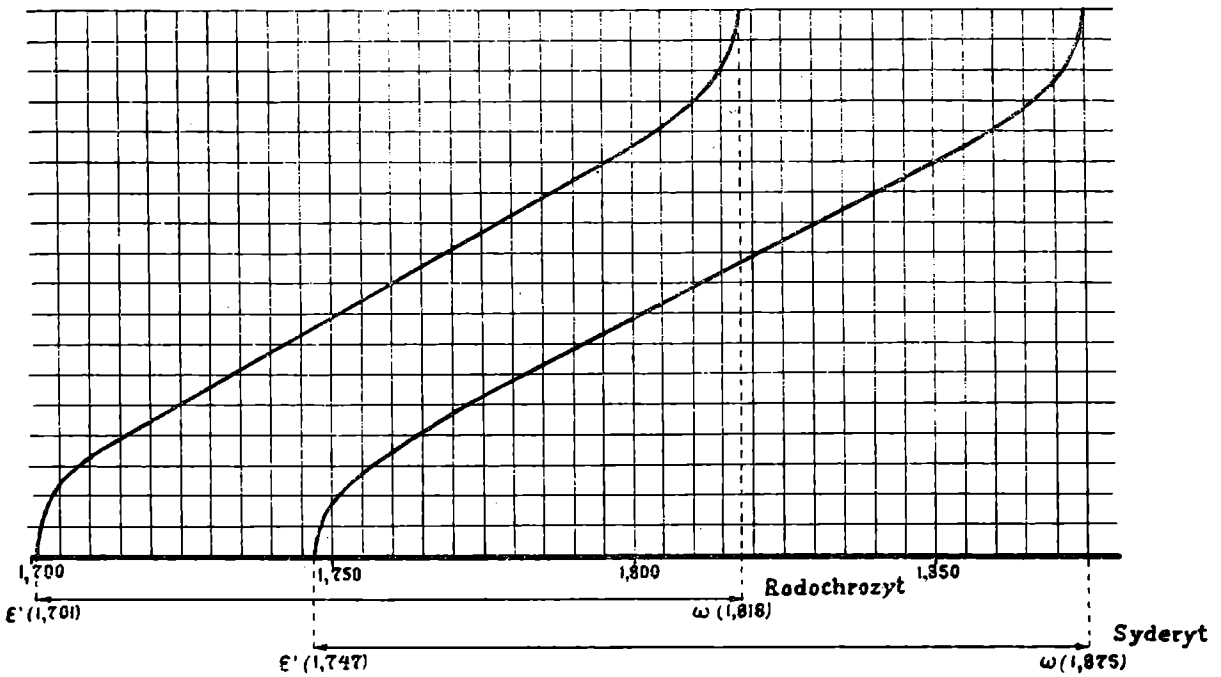
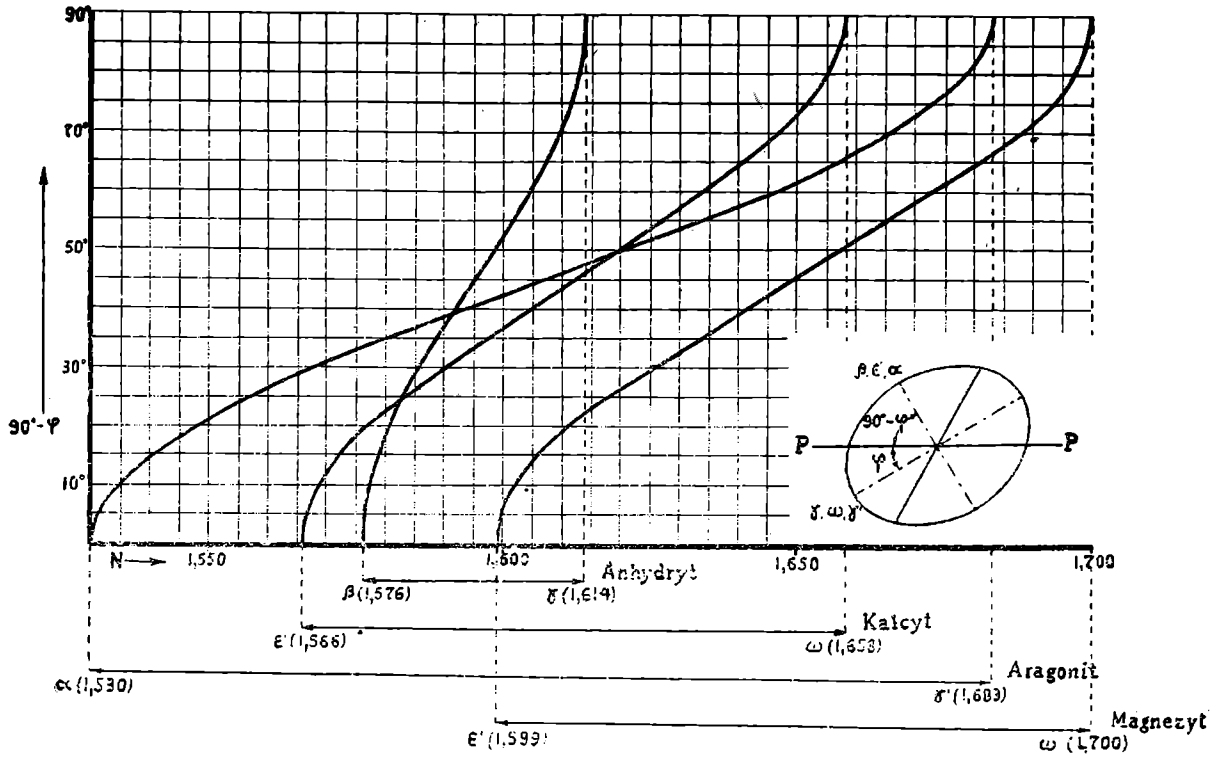
możemy obliczać dowolnie bądź współczynnik zał. św. cieczy (n) przy znanych współczynnikach zał. św. w danym przekroju minerału (γ' i α') i pomierzonym kącie φ , bądź też kąty φ ze znanych wartości dla współczynników zał. św. cieczy i minerału. Otrzymane w ten sposób zestawienie kątów może posłużyć do wykreślenia diagramów, z których bezpośrednio można odczytać współczynniki zał. św. badanych cieczy ($n_1, n_2 \dots$), które z kolei wraz z kątami $\varphi_1, \varphi_2 \dots$ służyć mogą do wyliczenia współczynników zał. św. w badanym mineralu (np. γ' i α' lub ε' i ω), wg wzoru wyprowadzonego przez S p a n g e n b e r g'a,

$$\gamma' = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2} \quad (4)$$

$$\alpha' = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_2 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

Wykreślone przez autora niniejszej pracy krzywe zmienności współczynników zał. św. przy różnych kątach φ , otrzymanych doświadczalnie w minerałach: anhydrycie, kalcycie i aragonicie (p. załączony diagram, Rys. 2.), pokrywają się w zupełności z odpowiednimi krzywymi, otrzymanymi przez wyliczenie kąta ze wzoru (3). Załączone również krzywe dla minerałów: magnezytu, rodochrozytu i syderytu, skonstruowane zostały na tej właśnie drodze.

Dokładność wyników w omawianej metodzie uzależniona jest od dokładności z jaką wykonany został pomiar kąta φ . Pomiar ten uwarunkowany jest z kolei intensywnością smugi Becke'go. Intensywność smugi Becke'go rośnie bowiem ze zwiększeniem się różnic współczynników zał. św. stykających się ośrodków i maleje ze zmniejszaniem się tych różnic. Duży wpływ posiada również kształt zanurzonych okruchów minerału, apertura pęku oświetlającego i apertura obiektywu. Małe kąty łamiące ścianek krystalograficznych lub łupliwości, stanowiących boczne ograniczenia ziarn, wywołują powstanie szerokiej, rozplywającej się smugi Bec-



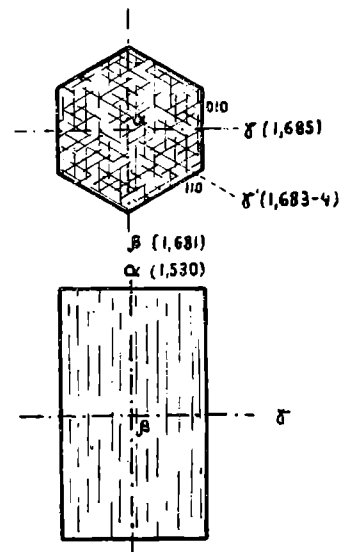
Rys. 2. Diagram ilustrujący zależność między współczynnikiem załamania światła (N) i kątem φ (kątem zawartym między kierunkiem maksymalnego N w kryształach i położeniem zrównania jasności smug Becke'go)

ke'go (por. przykład G, Rys. 1.). Zbyt mała zaś apertura pęku oświetlającego powoduje pojawienie się smug dyfrakcyjnych. W przypadku stosowania światła mieszanego, np. dziennego, przy zrównaniu się intensywności smug może pojawić się w nich dwubarwność, wywołana różnicą dyspersji współczynników zał. św. minerału i ośrodka immersyjnego. Wszystkie te czynniki pojedynczo lub sumarycznie wpływają w pewnym stopniu na dokładność odczytów kąta jednakowego rozjaśnienia smug. Błąd powstały przy odczycie kąta φ nie powinien przekraczać 2—3°, co odpowiada dokładności w określeniu współczynnika zał. św. w granicach 5-ciu jednostek na 3-cim miejscu po przecinku dziesiętnym.

Dla jak najbardziej racjonalnego wykorzystania zalet omawianej metody i zwiększenia jej dokładności winno się przede wszystkim zwrócić uwagę na rozmiary i kształt ziarn, w szczególności minerałów-indykatorów, służących do określenia współcz. zał. św. cieczy, które z kolei użyte być mogą do oznaczenia N badanego minerału. Optymalna wielkość ziarn powinna się wahać w granicach od 0,005 do 0,02 mm. Najdogodniejszym pokrojem okruszków jest płytkowy lub płaskosłupkowy. Ograniczenia ziarn winne być złożone z gładkich ścianek, o dość znacznym kącie łamiącym (kąt między podstawą a bocznymi ściankami ziarna). Takie gładkie ograniczenia otrzymamy przez delikatne wyłupywanie odłupków, za wykorzystaniem co najmniej 2-ch systemów płaszczyn łupliwości doskonałej, jaką musi posiadać minerał-indykator.

Duża rozpiętość współczynników zał. św. (dwójłomność przekroju) w mineralu wskaźnikowym zwiększa co prawda możliwość szybszego doboru cieczy o pośrednim N, połączone jest to jednak ze zmniejszaniem się dokładności odczytu kąta φ (p. załączony diagram). Inne cechy, jak przezroczystość, mała dyspersja współczynników zał. św., trwałość wobec cieczy i łatwa dostępność materiału posiadają również znaczenie przy doborze minerałów, mających służyć za indykatory.

Większości podanych wymagań odpowiadają minerały z grupy romboedrycznych węglanów, jak: kalcyt, dolomit, magnezyt, rodochrozyt, syderyt, cechujące się doskonałą łupliwością w 3-ch płaszczynach, b. wysoką dwójłomnością ($\epsilon' - \omega = 0,092 - 0,128$) łatwych do otrzymania odłupków. W przypadku rodochrozytu i syderytu stosować należy odmiany chemicznie możliwie najczystsze, bądź też kryształy mieszane, o określonych na odłupkach wartościach dla ϵ' i ω . Bardzo dogodnym w pomiarach kąta φ jest również aragonit, w szczególności o ile posiada wykształcony pokrój włóknisty (p. Rys. 3). Wyjątkowo duża rozpiętość N w łatwych do orientacji przekrojach, zgodnych z wydłużeniem ($\alpha = 1,530$, β lub $\gamma' = 1,681 - 1,683-4$), gładkie ograniczenia (na skutek łupliwości wg (110) i (010), włókien o odpowiednich kątach łamiących bocznych ścianek, w sumie czynią aragonit niezastąpionym minerałem-indykatozem. Anhydryt jest minerałem mniej przydatnym do tego celu ze względu na niską dwój-



Rys. 3. Orientacja optyczna aragonitu

łomność, konieczność orientacji optycznej odłupka i wzajemną prostopadłość ścianek łupliwości.

Odnosnie środków immersyjnych należy stwierdzić, że najdogodniejszymi w użyciu są olejki roślinne. Dwa lub trzy olejki, α -monobromnafalen i jodek metylenu, jako dość trwałe, chemicznie passywne i mieszające się w dowolnych proporcjach ośrodki, wyczerpują niemal cały komplet potrzebnych cieczy.

Przechodząc do omówienia sposobu posługiwania się opisaną metodą zaznaczę, że podobnie jak w przypadku innych metod immersyjnych, dla zwiększenia dokładności, wskazane jest stosowanie światła monochromatycznego, diafragmowania i odpowiedniej apertury obiektywu. Ten ostatni winien być o średniej wielkości powiększającej (średniej odległości ogniskowej). Przy braku diafragmy irysowej należy odpowiednio nisko obniżyć aparat oświetlający (kondensator). Poza tym, dla zwiększenia apertury pęku oświetlającego używana być może tylko wklęsła strona lusterka. Obserwacji smugi Becke'go dokonuje się przy czynnym i wyłączonym dolnym nikolu. Badany minerał, którego średni współczynnik ma być wyliczony, zanurza się w kropli cieczy zawierającej odłupki minerału wskaźnikowego. Dodając następnie, drobnymi porcjami ciecz o odmiennym N , z kropli umieszczonej w pobliżu, możemy dowolnie zmieniać współczynnik zał. św. ośrodka immersyjnego, aż do wyrównania się współczynników zał. św. minerału badanego i cieczy (zniknięcia konturów). Przez włączenie polaryzatora i prosty pomiar kąta jednakowego rozjaśnienia smugi Becke'go, na zanurzonej w tej samej kropli minerale-indykatorze, określony zostanie równocześnie współczynnik zał. św. cieczy i minerału badanego. Gdy minerał badany posiada, jednak, dość znaczną dwójłomność (powyżej 0,005), celowym jest obliczenie współczynników zał. św. maksymalnego i minimalnego, w danym przekroju (odłupku). W takim przypadku należy kolejno nastawiać oba kierunki optyczne minerału badanego, równoległe do drgań wychodzących z przez cały czas czynnego polaryzatora i mieszać ośrodek immersyjny aż do zniknięcia smugi Becke'go tj. wyrównania się współczynników zał. św. cieczy ($n_1 + n_2$) i minerału badanego (np. γ' i α'). Mierzony, po każdej takiej czynności, kąt jednakowego rozjaśnienia (φ_1, φ_2) względem kierunku maksymalnego współcz. zał. św. w minerale-indykatorze, pozwoli na bezpośrednie określenie z diagramu szukanych współczynników zał. św. Te same lub lepsze rezultaty otrzymamy stosując dwa lub trzy różne minerały wskaźnikowe, zanurzone równocześnie w tej samej kropli cieczy. Konieczne jest to zwłaszcza w przypadku dużej dwójłomności przekroju minerału badanego, z uwagi na możliwość występowania w nim wyższych, maksymalnych lub niższych, minimalnych, współczynników zał. św. aniżeli w minerale-indykatorze. Pomiar kąta do jednakowego rozjaśnienia smugi Becke'go przeprowadza się podobnie jak pomiar kąta znikania przy nikolach skrzyżowanych, tzn., bierzemy średnią arytmetyczną odczytów z obustronnych wahnien (w granicach 5—10°) od położenia jednakowego rozjaśnienia smugi.

3. Ogólne wnioski

Omówiona metoda powinna być pomocną w trudniejszych warunkach pracy, przy braku np. refraktometru lub kompletu cieczy immersyjnych.

Zaletami jej są, poza wyżej wspomnianą, oszczędność w zużyciu ośrodków immersyjnych i szybkość z jaką wykonujemy pomiar. Odpada bowiem konieczność przenoszenia wystarczająco dużej ilości cieczy na refraktometr, w celu określenia jej współczynnika załamania światła.

Najważniejszymi jej akcesoriami są, poza kilkoma zaledwie ośrodkami immersyjnymi, minerały-indykatory, należące do pospolitych, łatwo dostępnych w zbiorach i w terenie odmian, cechujących się poza tym dużą dwójłomnością i łatwością rozpadania się w odłupki, ograniczone gładkimi ściankami łupliwości. Z minerałów tych poleca się przede wszystkim kalcyt, dolomit, magnezyt i aragonit.

Jedynymi ujemnymi stronami tej metody jest nieznacznie zmniejszona dokładność oznaczeń, w stosunku do konwencjonalnych metod immersyjnych określania współczynników załamania światła, opartych na użyciu pomocniczych instrumentów pomiarowych oraz nieco ograniczona, jakkolwiek nie definitywnie, rozpiętość współczynników zał. św. najbardziej przydatnych minerałów-indykatorów ($n = 1,530—1,875$).

Zakład Mineralogii i Petrografii U. J.

LITERATURA

1. A. Johansen: *Manual of Petrographic Methods*, New York, 1914. —
2. H. Schumann: *Unterscheidung von Mineralen der Karbonatgruppe*, *Heidelberger Beitr. Min. Petr.*, 1, Heidelberg, 1948; vide *Mineralogical Abstracts*, 210, London, 1950. —
3. K. Spangenberg: *Einige Anwendungen und Erweiterungen der Einbettungsmethode*, *Zentrablatt f. Min., Geol. u. Paläontologie*, Stuttgart, 1920. —
4. C. Viola: *Ueber eine neue Methode zur Bestimmung des Brechungsvermögens der Minerale in den Dünnschliffen*, *Tschermak's Min. u. Petr. Mitteilungen*, 14, Wien, 1895.

РЕЗЮМЕ

Ниже описанный метод разработки с целью определения, в границах требуемой точности, показатели преломления света под поляризационным микроскопом без вспомогательных приборов и при использовании лишь нескольких смешивающихся иммерсионных жидкостей и минералов индикаторов.

Этот метод в прошлом был перерабатываемым под различными аспектами несколькими исследователями. Итак А. Паули (1905) (A. Pauly) (см. Иогансен 1914, Johansen) применял пластинку кальцита, вырезанную параллельно к оптической оси для определения показателя преломления света жидкостей, которых капли помещал на кальците, прикрывая покровным стеклышком и вращая столиком микроскопа до исчезновения неровностей поверхности и ограничений капли. Измерение угла между направлением угасания и направлением оптической оси (β) происходило, разумеется, только при действующим поляризаторе и частично закрытой диафрагме. Величины этого угла (φ) нанесены на соответствующей диаграмме или-же подставлены в формулу:

$$\epsilon' (= n \text{ жидкости}) = \frac{\omega \epsilon}{\sqrt{\omega^2 \cdot \sin^2 \varphi + \epsilon^2 \cdot \cos^2 \varphi}}$$

давали непосредственно результат: показатель преломления света в жидкости (n). По Иогансену, методом Пауля (Pauly) показатели преломления света жидкости могут быть вычислены с точностью трех единиц на втором десятичном месте после запятой. Отрицательной её стороной есть применение ориентированных пластинок кальцита которых трудно получить а также малый предел колебаний показателей ($n = \text{ок. } 1,48 - 1,66$). Метод Пауля базировал на модификации метода Х. Амбронна (H. Ambrohn), (1893; см. Иогансен, 1914). Этот последний определял показатели преломления света в минерале (ω, ε), подбирая две жидкости с показателями преломления света (n) заключающихся в границах ε и ω и вычисляя угол между угасанием границ минерала и направлением оптической оси. При этом применял он две формулы:

$$\omega_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2}$$

$$\varepsilon_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}$$

где n_1 и n_2 — показатели прелом. св. двух жидкостей. φ_1 и φ_2 — соотв. углы угасания. Этот метод мог быть применен к очень тонким пластинкам минералов. Точность по Амбронну колебалась в границах второго десятичного места после запятой. Причина этого лежит в неточности формул а также в фьюковании на внутренность минерала, а затем в неиспользовании двойных линий Бекке при определении угла φ .

Большой шаг вперед в развитии соответствующего метода сделан благодаря работе К. Шпангенберга (K. Spangenberg) (1920) который надлежащим способом занялся математической интерпретацией явлений открытых Амбронном, модифицируя формулу введенную тем исследователем:

$$\gamma = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}; \quad \alpha = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

Правильность теоритического рассуждения подтверждена экспериментальными измерениями исполненными Шпангенбергом на отколотых кусочках ангидрита.

Приведенные исследования над реагированием пластинки анизотропного минерала в отношении иммерсионной среды при действующим только поляризаторе нашли практическое применение тоже в форме микроскопического распознавания минералов из группы карбонатов. Х. Шуман (H. Schumann 1948; *ref. Min Abstracts*), применяя канадский бальзам как иммерсионную среду, определил углы равенства ясности двойных полосок Бекка (Gleichheitswinkel) на кусочке важнейших карбонатных минералов как кальцит, бревнерит, стронцианит. арагонит для облегчения быстрой идентификации этих минералов под поляризационным микроскопом. Этот способ распознавания карбонатов, принимая во внимание однако непостоянную величину показателя преломления св. бальзама, а также функциональную зависимость оптических свойств от химического состава в таких минералах как палр. бревнерит, может дать только приближенные результаты.

Общим принципом на котором здесь основывается вычисление показателя прелом. св. минерала и жидкости, есть измерение угла, при котором следует равенство ясности двойных полосок Бекке на границе минерала и жид-

кости. Для того чтобы получить этого рода полоску, должны быть приняты во внимание следующие три главные условия: 1) применяемый в этом случае свет должен быть поляризован посредством призмы николя, 2) показатели преломления света жидкости должны иметь средние величины между максимальными и минимальными показателями в данном разрезе, погруженного в жидкости минерала, (напр. $\gamma' > n > \alpha'$), 3) фокус объектива должен быть так устроен, чтобы отчетливость образа обнимала место расположенное несколько выше или ниже обломка минерала (см. рис. 1., L. f. = линия фокусования).

При соблюдении этих условий, свет выходящий из поляризатора переломится, входя в анизотропный минерал (наиболее при не вертикальном падении, т. е. при установке облакам в периферии оси микроскопа) и разделится на два колебания взаимно перпендикулярных азимутов (напр. γ' и α'). Входя в жидкость изменится только направление передвигающейся световой волны. Благодаря этому, при диагональном положении оптических направлений в кристалле, по отношению направления колебаний поляризованного света при помощи установки на остроту картины выше зерна, получаем по обеим сторонам границы оптической среды, двойную полоску, которая образовалась посредством наложения лучей при соответствующих показателях преломл. св. напр. γ' и n жидкости или же α' и n жидкости*. Графически это явление можно легко представить посредством наложения двух конструкций (рис. 1 примеры А и Б), объясняющих ход световых лучей в том случае, когда N минерала (напр. γ') есть больше N жидкости ($N_{ж}$) и когда $N_{ж}$ больше N_m (напр. α'). При параллельном положении направления колебаний выходящих из поляризатора, по отношению к одному из оптических направлений кристалла (напр. γ' ; или же α'), появляется одна светлая полоска, лежащая по стороне минерала ($N_m = N_{\gamma'} > N_{ж}$) или по стороне жидкости ($N_m = N_{\alpha'} < N_{ж}$). В обоих последних случаях можем сказать что амплитуда (A) колебаний α' ($A_{\alpha'}$) и колебаний γ' ($A_{\gamma'}$) перемененно равняется нулю, что вызывает исчезновение изображения для α' или для γ' . При диагональном положении амплитуда $A_{\gamma'}$ будет пропорциональная к $\cos \varphi$, а $A_{\alpha'}$ к $\sin \varphi$, где φ — угол между направлением колебаний выходящих из поляризатора в момент выравнивания ясности полосок (рис. 2). Соответствующие интенсивности, $I_{\gamma'}$ и $I_{\alpha'}$ этих колебаний будут пропорциональны к квадратам их амплитуда. Так как одновременно угол φ зависит от отношения $\gamma' - n$ и $n - \alpha'$, отсюда же в момент выравнивания ясности полосок, все эти зависимости можем выразить в форме пропорции:

$$\frac{I_{\gamma'}}{I_{\alpha'}} = \frac{(\gamma' - n) \cdot \cos^2 \varphi}{(n - \alpha') \cdot \sin^2 \varphi} \quad (1)$$

Преобразовав эту пропорцию в более удобное следующее равенство:

$$\gamma' \cdot \cos^2 \varphi + \alpha' \cdot \sin^2 \varphi = n \quad (2)$$

$$\text{или } \cos^2 \varphi = \frac{n - \alpha'}{\gamma' - \alpha'} \quad (3)$$

можем высчитывать произвольно или показатель преломления света жидкости (n) при известных показателях преломл. св. в данном разрезе минерала (γ' и α') и измеренном угле φ , или же углы φ из известных величин для показателей

* на контакте двух кристаллических средоточий двойная линия Бекке будет суммарной картиной лучей, напр. $\gamma'_1 \alpha'_2$ и $\gamma'_2 \alpha'_1$.

преломл. св. жидкости и минерала. Полученные этим способом сопоставления углов могут служить к вычерчиванию диаграмм, из которых непосредственно можно устанавливать показатели преломл. св. исследуемых жидкостей (n_1, n_2, \dots) которые поочередно вместе с углами $\varphi_1, \varphi_2, \dots$ могут служить к вычислению показателя преломл. св. в исследуемом минерале (нпр. γ' и α' или ε' и ω), согласно формуле предложенной Шпангенбером

$$\gamma' = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2} \quad (4)$$

$$\alpha' = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_2 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

Вычерченные автором кривые непостоянства показателей преломл. света при разных углах φ , полученных экспериментально в минералах: ангидрите, кальците и арагоните (см. прил. диаграмму, рис. 2) покрываются целиком с соответствующими кривыми полученными посредством вычисления угла из формулы (3). Прилагаемые кривые для минералов магнезита и сидерита конструированы на том же самом пути.

Точность результатов в описываемом методе зависит от точности измерения угла φ . Измерение это обусловлено интенсивностью полоски Бекке. Интенсивность же полоски Бекке растет с увеличением разниц показателей преломления света соприкасающихся средоточий и уменьшается с уменьшением этих разниц. Большое влияние имеет также форма погруженных в жидкость зерн минерала, апертура освещающего пучка и апертура объектива. Малые углы кристаллографических стенок или спайности вызывают появление широкой расплывающейся полоски Бекке (сравн. пример G рис. 1). Чересчур же малая апертура освещающего пучка причиняет появление диффракционных полос. В случае применения смешанного света нпр. дневного при выравнивании интенсивности полос, может появиться в них двухцветность, вызванная разницей дисперсии показателей преломления света минерала и иммерсионной среды. Все эти факторы поодиночке или же суммарно влияют в некоторой степени на точность отсчетов угла одинакового, разъяснения полосок. Ошибка возникнувшая при отсчете угла φ не должна превышать 2—3°, что соответствует точности определения показателя преломл. св. в границах 5-ти единиц на 3-ем десятичном месте.

Для наиболее рационального использования достоинства описываемого метода и увеличения его точности, нужно прежде всего обратить внимание на величину и форму зерн, а в особенности минералов-индикаторов, служащих для определения показателей преломл. света жидкостей которые поочередно могут быть использованы для определения N исследуемого минерала. Оптимальная величина зерн должна колебаться в пределах от 0,005 до 0,02 мм. Самый выгодный покров осколков есть пластинчатый или плоскостолбчатый. Зерна должны быть огранены гладкими стенками со значительным углом преломления (угол между основанием и боковыми стенками зерн). Такие гладкие огранения получим осторожно отколачивая при использовании самое меньше двух систем плоскостей совершенной спайности, какую должен иметь минерал индикатор.

Большая разность показателей преломл. св. (двойное лучепреломление разреза) в минерале-показателе увеличивает возможность более скорого выбора жидкости с посредственным n , связано это однако с уменьшением точности

отчета угла φ (см. прилагаемую диаграмму). Другие признаки, как прозрачность, малая дисперсия показателей преломл. св., постоянность к отношению жидкости и легкая доступность материала имеют также значение при выборе минералов, имеющих служить в качестве индикаторов.

Большинству изложенных требований соответствуют минералы из группы ромбоэдрических карбонатов, как кальцит, доломит, магнезит, родохрозит, сидерит, которые характеризуются совершенной спайностью по трем плоскостям, очень высоким двойном лучепреломлением ($\epsilon' - \omega = 0,092 - 0,128$) легко одерживаемых осколков. В случае родохрозита и сидерита следует применять разновидности наиболее химически чистые или же мешанные кристаллы с определенными на осколках величинами для ϵ' и ω . Очень удобным при измерениях угла φ есть тоже арагонит в особенности поскольку имеет волокнистый покров (см. рис. 3). Исключительно большая разница n в легких по ориентировке разрезах, согласных с длинной ($\alpha = 1,530$, β или $\gamma' = 1,681 - 1,683 - 4$), гладкие огранения (вследствие спайности по (110) и (010) волокна с соответствующими углами ломления боковых стенок, в сумме делают арагонит незаменимым минералом-индикатором. Ангидрит — минерал менее пригодный к этой цели в отношении на низкое двойное лучепреломление, конечность оптической ориентации и взаимную перпендикулярность граней спайности.

Относительно иммерсионных жидкостей, служащих в определению показателей прел. св. исследуемых минералов, наиболее удобными к употреблению считаются растительные масла, α — монобромистый нафтаген и иодистый метилен, как довольно устойчивые, химически пассивные и смешивающиеся в произвольных пропорциях жидкости, исчерпывают почти целый комплекс нужных жидкостей.

Переходя к описанию способа пользования упомянутого метода отмечу, что подобным-же образом как и при других иммерсионных методах для увеличения точности, советуется употреблять монохроматический свет, диафрагмировать и пользоваться соответствующей апертурой объектива. Этот последний должен быть со средней способностью увеличения (среднего фокусного расстояния). При отсутствии ирисовой диафрагмы следует соответственно низко опустить осветительный аппарат (конденсор), кроме того для увеличения апертуры освещающего пучка следует пользоваться только вогнутой стороной зеркала. Наблюдение линии Бекке проводится при действующим и выключенным нижним никодем. Исследуемый минерал, которого средний показатель должен быть высчитан, погружают в капле жидкости содержащей осколок минерала индикатора. Добавляя затем малыми порциями жидкость с иным n , из капли помещенной вблизи, можем произвольно изменять показатель преломл. св. иммерсионной жидкости до выравнивания показателей преломл. св. исследуемого минерала и жидкости (исчезновение контуров). Посредством включения поляризатора и простого измерения угла при одиноковом разъяснении полоски Бекке, на погруженном в той-же самой капле минерале-индикаторе будет определен одновременно показатель преломления св. жидкости и исследуемого минерала. Если однако исследуемой минерал имеет значительное двойное лучепреломление (выше 0,005), целесообразно тогда вычислить показатели преломления св. максимальные и минимальные в данном разрезе (осколке). В таком случае следует поочередно наставлять оба оптические направления исследуемого минерала параллельно к колебаниям, выходящим из непрерывно действующего поляризатора и смешивать иммерсионную жидкость до исчезновения полоски Бекке т. е. выравнивания показателей преломления св. жидкости ($n_1 + n_2$) и исследу-

емого минерала (нпр. γ и' α'). После каждого такого действия измеряемый угол одинакового просветления (φ_1, φ_2) по отношению направления максимального показателя преломл. св. в минерале индикаторе, разрешит на непосредственное определение из диаграммы разыскиваемых показателей преломл. св. Эти самые результаты получили еще лучшие применяя два или три разных минерала-индикатора, одновременно погруженные в той же самой жидкости. Это необходимо главным образом в случае сильного двупреломления разреза исследуемого минерала, принимая во внимание возможность появления в нем высших максимальных или низших минимальных показателей прел. св. нежели в минерале-индикаторе. Измерение угла до одинаково просветления полоски Бекке проводится подобным образом как измерение угла угасания при скрещенных николях, т. е. берем среднее арифметическое отсчетов из двусторонних колебаний (в пределах $5-10^\circ$) от положения одинакового просветления линии.

Описанный метод должен быть пособляющим в самых трудных условиях работы, при недостатке нпр. рефрактометра или комплекта иммерсионных жидкостей.

Достоинством его вне выше упомянутого это сбережение в использовании иммерсионных жидкостей и быстрота с какой совершаем измерение. Так как отпадает необходимость перенесения довольно большого количества жидкости на рефрактометр, целью исследования её показателя преломл. света.

Самыми важными аксессуарами кроме нескольких иммерсионных жидкостей, минералы-индикаторы, принадлежащие к обыкновенным разновидностям легко допускаемым как в коллекциях, так и в поле, которые отличаются кроме того высоким двупреломлением и легкой способностью распадаться осколками ограниченные гладкими стенками спайности. Из этих минералов рекомендуются прежде всего кальцит, магнезит и арагонит.

Единственной отрицательной стороной этого метода есть незначительно уменьшенная точность определений по отношению к общепринятым иммерсионным методам определения показателей преломл. с. в., опирающихся на исследовании вспомогательных инструментов, служащих к измерению, а также несколько ограничена, хотя не окончательно, протяженность показателей прел. св. более всего приходных минералов-индикаторов ($n = 1,530 - 1,875$).

SUMMARY

The method discussed herein was elaborated for the purpose of determining, within the limits of a certain required accuracy, the refractive indices by means of a polarization-microscope, without any auxiliary devices and with the utilization of but a few intermixing immersion media and indicator-minerals.

In the past, this method was elaborated, under various aspects, by several investigators. Thus, A. P a u l y (1905; vide Johannsen 1914) made use of a calcite plate excised parallelly to the optical axis, for determining the refractive indices of liquids, drops of which were placed by him on the calcite, covered with a cover-glass, and the microscope-stage revolved until irregularities of the surface and borders of the drops disappeared. The measurement of the angle between the extinction direction and that of the optical axis (ϵ) was carried out, of course, only when the polarizer

was active and the diaphragm partly shut. A direct result in the form of the refractive index in liquid (n) was obtained from the values of the above-mentioned angle (φ), transferred on to a suitable diagram or substituted in the following formula:

$$\varepsilon' (= n \text{ of the liquid}) = \sqrt{\frac{\omega\varepsilon}{\omega^2 \cdot \sin^2 \varphi + \varepsilon^2 \cdot \cos^2 \varphi}}$$

According to J o h a n n s e n, it is possible by means of P a u l y's method to calculate the refractive indices of liquids with an accuracy of three units in the second place after the decimal point. A disadvantage of this method, moreover, is the utilization of oriented calcite plate that are hard to obtain, and the small range of oscillations of the indices ($n =$ circa 1.48—1.66). P a u l y's method was based on a modification of the method elaborated by H. A m b r o n n (1893; vide J o h a n n s e n 1914). The latter determined the refractive indices in a mineral (ω, ε) by selecting two liquids with refractive indices (n) within the limits ε and ω , and then calculating the angle between the disappearance of the mineral's borders and the direction of the optical axis. For this purpose he used two formulae:

$$\omega_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \cos^2 \varphi_2}{\cos^2 \varphi_1 - \cos^2 \varphi_2}$$

$$\varepsilon_1^2 = \frac{n_2^2 \cdot \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}$$

In these formulae, n_1 and n_2 are the refractive indices of the two liquids, while φ_1 and φ_2 are the respective extinction angles. This method could be applied only to very thin discs of minerals. The accuracy, according to A m b r o n n, oscillated within the limits of the second place after the decimal point. The reason therefore lies in the inaccuracy of the formulae and in focusing at the interior of the mineral, and hence, in the non-utilization of Becke's double streaks for determining the angle φ .

A great step forward in the development of a suitable method was due to the work of K. S p a n g e n b e r g (1920) who in the proper manner occupied himself with a mathematical interpretation of the phenomena discovered by A m b r o n n, modifying the formula introduced by the latter to the following form:

$$\gamma' = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2}, \quad \alpha' = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_2 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

The correctness of the theoretical reasoning was confirmed by experimental measurements carried out by S p a n g e n b e r g on flakes of anhydrite ($\gamma = 1.614, \beta = 1.576$), and by the present author on flakes of aragonite, calcite, and anhydrite.

The above-quoted investigations concerning the behaviour of a disc of an anisotropic mineral with regard to immersion media, with an active polarizer only, found their practical application also in the form of microscopic differentiation of minerals belonging to the group of carbonates. H. S c h u m a n n (1948; cf. Min. Abstracts), using Canada balsam

as an immersion medium, determined the angles of equalized brightness of Becke's double streaks („Gleichheitswinkeln“) in flakes of the most important carbonate minerals, such as calcite, breunnerite, strontianite, aragonite — for the purpose of facilitating rapid identification of the latter minerals by means of a polarization-microscope. This method, however, of distinguishing carbonates can give but approximate results in view of the variable value of the refractive index of Canada balsam, and on account of the functional dependence of optical properties upon the chemical composition in such minerals as, e. g., breunnerite.

The general principle, on which is based the present author's calculation of the refractive index of a mineral and a liquid, is the measurement of the angle at which there takes place an equalization of brightness of Becke's double streaks at the boundary-line between the mineral and the liquid. In order to obtain such a streak, the following three main conditions must be fulfilled: 1. the light utilized in this case must be polarized by means of a nicol; 2. the refractive indices of the liquid ought to have values that are intermediate between the maximal and minimal indices in the given cross-section of the mineral immersed in the liquid (e. g., $\gamma' > n > \alpha'$); 3. the focal length of the objective should be adjusted so as to cause the distinctness of the image to include a point lying slightly above or below the mineral flake (Fig. 1, L. f. = focusing line).

When the above-mentioned conditions are fulfilled, the light emerging from the polarizer, upon entering the anisotropic mineral, is refracted (esp. when it does not fall perpendicularly, i. e., when the fragment of mineral is placed in the periphery of the microscope axis) and separated into two vibrations, the azimuths of which are perpendicular to one another (e. g., γ' and α'). On the other hand, upon entering the liquid, subjected to alteration is only the direction of the advancing light-wave. Due to this, when the optical directions in the crystal are in a diagonal position in regard to the direction of the vibrations of polarized light, by adjusting the image so that it is in focus above the mineral fragment, we obtain at both sides of the boundary-line of the optical media a double streak produced by the superimposition of rays possessing refractive indices that correspond, e. g., to γ' and n of the liquid, or to α' and n of the liquid*. This phenomenon can be easily illustrated graphically by the superimposition of two constructions (Fig. 1, examples A and E), explaining the course of the light-rays in the case when N of the mineral (e. g., γ') is greater than N of the liquid (N_c), and when N_c is greater than N_m (e. g., α'). When the position of the direction of vibration emerging from the polarizer is parallel in relation to one of the optical directions of the crystal (e. g., γ' or α'), there appears one bright streak situated on the side of the mineral ($N_m = N\gamma' > N_c$), or on the side of the liquid ($N_m = N\alpha' < N_c$). In both of the latter cases it may be said that alternately the amplitude (A) of vibration α' ($A\alpha'$) and vibrations γ' ($A\gamma'$) are equal to zero; this causes a disappearance of the image for α' or for γ' . In a diagonal position, the amplitude $A\gamma'$ is proportional to $\cos \varphi$, while $A\alpha'$ is proportional to $\sin \varphi$; φ is the angle contained between the direc-

* At the contact of two anisotropic crystalline media, Becke's double streak will be the summarized image of the rays, e. g., $\gamma'_1 \alpha'_2$ and $\gamma'_2 \alpha'_1$.

tion γ' and the direction of vibrations emerging from the polarizer at the moment when the brightness of the streaks is equalized (Fig. 2). The corresponding intensities, $I\gamma'$ and $I\alpha'$ of these vibrations are proportional to the squares of their amplitudes. In view of the fact that simultaneously angle φ is dependent on the differences $\gamma' - n$ and $n - \alpha'$, at the moment when the brightness of the streaks is equalized all these dependences can be represented in the form of the following proportion:

$$\frac{I\gamma'}{I\alpha'} = \frac{(\gamma' - n) \cdot \cos^2 \varphi}{(n - \alpha') \cdot \sin^2 \varphi} \quad (1)$$

This proportion can be transformed into the following equations, (2) and (3), more convenient to handle:

$$\gamma' \cdot \cos^2 \varphi + \alpha' \cdot \sin^2 \varphi = n \quad (2)$$

$$\cos^2 \varphi = \frac{n - \alpha'}{\gamma' - \alpha'} \quad (3)$$

With these equations we can calculate at will either the refractive index for the liquid (n) when the refractive indices are known in the given cross-section of the mineral (γ' and α') and the angle φ is measured, or else the angles φ from the known values for the refractive indices of the liquid and the mineral. The thus obtained least angles can be utilized for drawing diagrams from which it is possible to read directly the refractive indices of the examined liquids (n_1, n_2 , etc.) which in turn, together with the angles φ_1, φ_2 , etc., can be used for calculating the refractive indices in the investigated mineral (e. g., γ' and α' , or ε' and ω), by means of the formula deduced by Spangenberg:

$$\gamma' = \frac{n_2 \cdot \sin^2 \varphi_1 - n_1 \cdot \sin^2 \varphi_2}{\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2} \quad (4)$$

$$\alpha' = \frac{n_1 \cdot \cos^2 \varphi_2 - n_2 \cdot \cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2 - \cos^2 \varphi_1}$$

The author of the present work prepared frequency curves of the refractive indices for various angles φ , obtained experimentally in the minerals: anhydrite, calcite, and aragonite (diagram, Fig. 2); they are completely the same as the corresponding curves obtained by calculating the angle by means of formula (3). Constructed precisely in the same manner are also the appended curves for the minerals: magnesite, rhodochrosite, and siderite.

The accuracy of the results arrived at by means of the discussed method is dependent on the accuracy with which is measured the angle φ . The latter measurement, in turn, depends on the intensity of Becke's streak. As a matter of fact, the intensity of Becke's streak becomes greater together with an increase of the differences between the refractive indices of the contacting media, and grows smaller as these differences decrease. A great influence is also exerted by the shape of the immersed mineral fragments, the aperture of the illuminating beam, and the aperture of the objective. Small refracting angles of crystal faces or cleavage

planes, constituting the lateral limitations of grains, produce a broad, diffuse Becke's streak (cf. example G, Fig. 1). On the other hand, an aperture of the illuminating beam which is too small causes the appearance of diffraction bands. In the case of utilizing mixed light (e. g., daylight), when the intensity of the streaks is equalized, two colours may appear in the streaks, produced by the difference in dispersion of the refractive indices of the mineral and the immersion medium. All these factors, separately or together, exert a certain influence on the accuracy with which is read the angle of equal lightening of the streaks. The error in reading the angle φ should not exceed $2-3^{\circ}$; this corresponds, in determining the refractive index, to an accuracy within the limits of five units in the third place after the decimal point.

In order to utilize most rationally the advantages of the discussed method and to increase its accuracy, attention should be particularly directed to the dimensions and shape of grains, especially in the indicator-minerals employed for determining the refractive indices of the liquids that in turn can be used for the determination of n in the mineral which is being examined. The optimal grain size ought to oscillate within the limits of 0.005—0.02 millimetres. The most convenient habit of the fragments is lamellar or planoprismatic. The limitations of the grains should be composed of smooth faces with a quite considerable angle of refraction (angle between the base and the lateral faces of the grain). Such smooth limitation are obtainable by means of delicate chipping-out of the flakes, advantage being taken at least two systems of perfect cleavage planes which must exist in an indicator-mineral.

A large range of the refractive indices (birefringence of the cross-section) in the indicator-mineral does indeed increase the possibility of a more rapid selection of a liquid with an intermediate n ; this, however, is associated with a reduction of accuracy in reading the angle φ (see appended diagram). Other properties that also have importance in selecting the minerals which are to be employed as indicators, are the following: transparency, small dispersion of the refractive indices, stability with regard to the liquid, and easy availability of the material.

Most of the above-mentioned requirements are fulfilled by minerals from the group of rhombohedral carbonates, such as calcite, dolomite, magnesite, rhodochrosite, siderite; they are characterized by perfect cleavage in three planes and very high birefringence ($\epsilon' - \omega = 0.092 - 0.128$) of the easily obtainable flakes. In the case of rhodochrosite and siderite, employed ought to be varieties that are chemically as pure as possible, or else mixed crystals with values for ϵ' and ω determined on the flakes. Very convenient for measurements of the angle φ is also aragonite, especially if it has a well-developed fibrous habit (Fig. 3). Aragonite is an unreplaceable indicator-mineral on account of the sum of its merits: exceptionally large range of n in easily understandable cross-sections conforming to the elongation ($\alpha = 1.530$, β or $\gamma' = 1.681 - 1.683-4$), and smooth limitation (due to cleavage according to (110) and (010)), of the fibres with suitable refraction angles of the lateral faces. Anhydrite is a less suitable mineral for the above-mentioned purpose, on account of its low birefringence the necessity of optical orientation of the flake, and the mutual perpendicularity of the cleavage planes.

As regards the immersion media, employed for determining the refractive indices of examined minerals, the most convenient are aetheric oils. An almost complete set of the required liquids is composed of two or three such oils, α -monobromnaphthalene and methylene iodide, which are quite stable and chemically passive; they mix in any proportion.

Passing now to a discussion of the way of utilizing the described method, it must be pointed out that, the same as in the case of other immersion methods, for the purpose of increasing the accuracy it is indicated to employ monochromatic light, diaphragming, and a suitable aperture of the objective. The latter ought to possess a moderate magnifying capacity (average focal length). In the lack of an iris-diaphragm one must suitably lower the illuminating apparatus (condenser). Moreover, for the purpose, of enlarging the aperture of the illuminating beam one may use only the concave side of the mirror. Becke's streak is observed with an active and eliminated lower nicol. The examined mineral, the mean refractive index of which is to be calculated, is immersed in a drop of the liquid containing a flake of the indicator-mineral. By next adding, in small portions, a liquid with a different n , from a drop placed close at hand, we can alter at will the refractive index of the immersion medium, until equalized are the refractive indices of the examined mineral and the liquid (disappearance of contours). By turning on the polarizer and a simple measurement of the angle of equal lightening of Becke's streak, on the indicator-mineral immersed in the same drop, a simultaneous determination is carried out of the refractive index of the liquid and of the examined mineral. However, when the examined mineral possesses a quite considerable degree of birefringence (more than 0.005), it is practical to calculate the maximal and minimal refractive indices in the given cross-section (flake). In such cases one should adjust in turn both optical directions of the examined mineral, parallel to the vibrations emerging from the continuously active polarizer, and mix the immersion medium until Becke's streak disappears, i. e., till there is an equalization of the refractive indices of the liquid (n_1, n_2) and the examined mineral (e. g., γ' and α'). The angle of equal lightening (φ_1, φ_2) with regard to the direction of the maximal refractive index in the indicator-mineral, measured after each such operation, makes possible a direct determination, from the diagram, of the required refractive indices. Identically better results are obtained by employing two or three different indicator-minerals, immersed simultaneously in the same drop of the liquid. This is requisite especially in cases of high birefringence in the cross-section of the examined mineral, in view of the possible occurrence therein of refractive indices that are higher (maximal) or lower (minimal) than in the indicator-mineral. The measurement of the angle of equal lightening of Becke's streak is carried out in a similar manner as that of the extinction angle with crossed nicols, i. e., by taking the arithmetic mean of the readings of the bilateral oscillations (within limits of 5—10°) from the position of equal lightening of the streak.

The discussed method ought to be helpful when working conditions are difficult, e. g., when there is no refractometer, nor a complete set of immersion liquids.

The advantages of this method, apart from the one mentioned above, are the economical use of immersion media and the rapidity with which the measurement is carried out. As a matter of fact, unnecessary becomes the transferring of a sufficiently large quantity of the liquid to a refractometer for the purpose of determining its refractive index.

The most important accessories, besides but several immersion media, are indicator-minerals belonging to varieties that are common, easily available in collections and in the field, characterized moreover by considerable birefringence and easy splitting into flakes which are limited by smooth cleavage planes. Of these minerals recommended, above all, are the following: calcite, dolomite, magnesite, and aragonite.

The only disadvantages of this method are a slightly reduced accuracy of the determinations, in relation to the conventional immersion methods for determining refractive indices by means of auxiliary measuring instruments, and a slightly restricted, although not definitely, range of refractive indices of the most convenient indicator-minerals ($n = 1.530 — 1.875$).