

Geolooja Instituut

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

H. Viiding

MINERAALIDE KRISTALLOOPTILINE
UURIMISMEETOD

Tartu Riiklik Ülikool

Geoloogia kateeder

H. Viiding

MINERAALIDE KRISTALLOOPTILINE

UURIMISMEETOD

Tartu 1971

SISSEJUHATUS

Petrograafilises uurimistöös on juba alates möödunud sajandi teisest poolest juhtival kohal kristallooptiline uurimismeetod, mis tugineb mineraalide mikroskoopilisele määramisele optiliste konstantide kaudu. Tänapäeval võib kristallooptilistes uurimistes esile tõsta 3 tähtsat suunda:

1. kivimiõhikute uurimine polarisatsioonimikroskoobiga ühel tasapinnal. Selle, nn. mikroskoopilise meetodi puhul eristatakse ortoskoopilist ja konoskoopilist vaatlust.

2. mineraalide määramine murdumisnäitajate järgi immersionsivedelikes või -sulamites - immersionsimeetod.

3. kivimiõhikute uurimine Fjodorovi laual, mis võimaldab objekti asendit muuta ruumis - Fjodorovi meetod.

Selleks, et rakendada neid kaasaegses uurimises möödapääsematuid meetodeid, ei piisa teatud töövõtete mehhaanilisest äraõppimisest, vaid on vaja tunda õppida mineraalide optilisi omadusi ja mõista kristallooptiliste nähtuste põhjusti.

Käesolev kristallooptilise uurimismeetodi lühikursus eeldab geomeetrilise kristallograafia ja füüsikalise optika põhitõdede tundmist. Kordamiseks peatatakse lühidalt vaid nendel optika nähtustel või põhimõistetel, mis on kristallooptika uurimismeetodi aluseks või millega puutume paratamatult kokku selle meetodi rakendamisel. Kursuse 1. osas asetatakse pearõhk kristallooptika teoreetilistele küsimustele, 2. - 4. osa on pühendatud aga uurimismeetoditele.

Käesolev õpik on magmaliste ja metamorfsete kivimite petrograafia loengute üheks osaks. Vastava kursuse kümneaastase õpetamise kogemused sundisid autorit loobuma olemas-

olevate kristallooptika õpikute jäljendamisest, teostama esitatava materjali ökonoomsemat valikut ja otsima selle rangemat loogilist järgnevust. Ühtlasi tuli kursus kohandada mahult geoloogide õppeprogrammile. Seetõttu ei suuda esitatav täiel määral rahuldada petrograafia erialal spetsialiseerujatele esitatavaid nõudeid. Neile, kel on huvi või vajadus süveneda kristallooptilisse meetodisse põhjalikumalt, võib soovitada järgmisi töid:

1. В.Н. Лодочников. Основы кристаллооптики. Госгеол-издат, 1947.
2. В.Б. Татарский. Кристаллооптика и иммерсионный метод. Издательство "Недра", 1965.
3. Н.А. Елисеев. Методы петрографических исследований. Изд. ЛГУ. 1956.
4. Г.М. Саранчина. Федоровский метод. Изд. ЛГУ. 1954.

I Kristallooptika alused

1. Valguse olemus.

Valguse olemuse selgitamiseks esitati juba 18. sajandi teisel poolel kaks hüpoteesi:

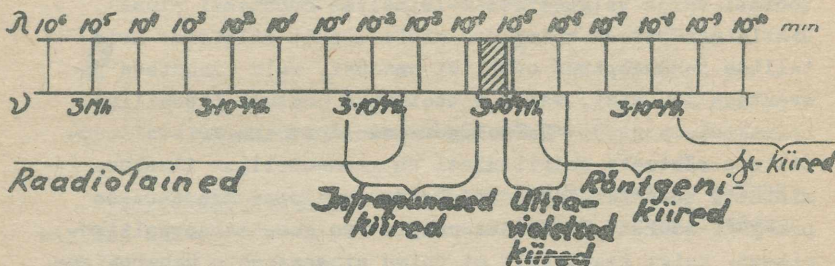
Korpuskulaarse ehk emissioonihüpoteesi (välja töötatud I. Newtoni poolt) kohaselt koosneb valgus üliväikestest materiasakestest - korpuskulitest, mis kiirguvad helendavast kehast igasse külge.

Lainehüpoteesi järgi kujutab valgus endast lainetust (Huygens, 1690 - pikilainetust; Fresnell, 1819 - ristilainetust), mille edasikandjaks on eeter - maailmaruumis esinev hüpoteetiline mehhaaniline keskkond (mis täidab ka aine molekulide ja aatomite vahelist ruumi).

Lainehüpoteesi arendas edasi 19. sajandi teisel poolel elektromagnetismi teooria looja J. Maxwell, kes püstitas valguse elektromagnetilise teooria.

Valgus haarab elektromagnetiliste lainete spektri-

osa lainepikkusega $1 \text{ m}\mu - 500\mu$. Sellest umbes vahemik $380 - 760 \text{ m}\mu$ on tajutav silmaga - nähtav valgus. Suurema lainepikkusega valgust tuntakse infrapunase, väiksema lainepikkusega - ultravioletse valgusena. Esimene läheb lainepikkuse suurenemisel üle raadiolaineteks, teine - lainepikkuse vähenemisel röntgenikiirteks (joon. 1).



Joon. 1. Elektromagnetiliste lainete skaala.

λ - lainepikkus $\text{m}\mu$, ν - vönkesagedus megahertsides ($1 \text{ Mh} = 10^6$ vönget sekundis).

Valge valgus on mitmesuguse lainepikkusega nähtava valguse lainete segu. Ainult ühe kindla lainepikkusega valgust nimetatakse lihtsaks ehk monokromaatiliseks (Na-leegi kollane valgus lainepikkusega $589 \text{ m}\mu$, K-leegi punane valgus lainepikkusega $767 \text{ m}\mu$ jne.). Sageli ei ole aga värviline valgus veel monokromaatiline, vaid temas on teatud spektriosa lained kas tugevdatud või nõrgendatud.

Kaasajal vaadeldakse valgust elektromagnetilise kiirgusenergia ühe vormina, mis levib helenduvast või kiirguvast kehast igas suunas lainete kujul. Valguse lainetus ehk vönkumine on perioodiline ja toimub risti levikusuunale. Valguse elektromagnetilise teooria alusel on võimalik seletada valguse levimist õhutühjas ruumis ja ta vönkumist risti levikusuunale.

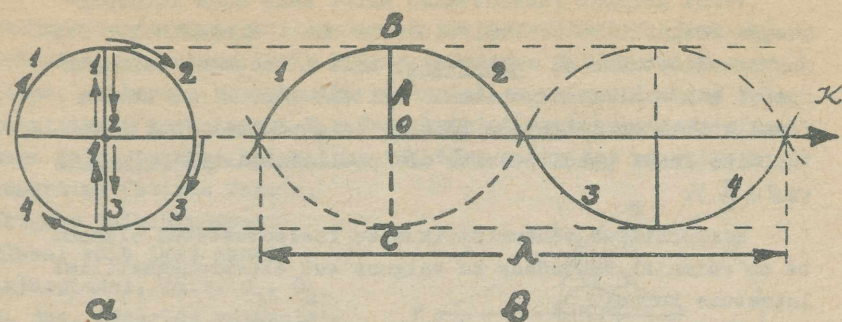
Kuigi valguse levimine allub harmoonilise ristivõnkumisliikumise seadustele, ei ole võimalik kõiki optilisi nähtusi selgitada võnkumisliikumistega. Näiteks selgitatakse fotoefekti, luminesentsnähtusi jt. valgusenergia - footonite kiirguse, s.o. korpuskulaarse hüpoteesi seisukohalt. Seetõttu on vaja valguse olemust käsitleda dualistlikult.

Tuleb märkida, et kõik kristallooptilised meetodid töötati välja valguse eeter-lainelise hüpoteesi alusel. Ristlainehüpotees võimaldas mitte ainult selgitada kristallide tundmaõpitud optilisi omadusi, vaid ennustada ja avastada ka uusi, varem mittetuntud nähtusi (kooniline refraktsioon jt.). Lainehüpoteesi vooruseks kristallooptiliste nähtuste selgitamisel on geomeetriline ilmeks, mistõttu tema termineid või konstruktsioone kasutatakse praegugi edukalt. Näiteks räägime valguse lainetusliikumisest, kuigi tegelikult ei toimu aineosakeste ümberpaigutamist, vaid elektri- ja magnetvälja pingete vektoriaalsed muutused. Kuivõrd elektri-, magneti- ja gravitatsioonivälju vaadeldakse materia eriliste vormidena, langeb ära hüpoteetilise eetri vajadus.

2. Harmoonilise võnkumisliikumise elemente.

Harmoonilise võnkumisena mõistame lihtsat perioodilist liikumist, mis vastab ühtlaselt ringjoont mööda liikuva punkti projektsiooni liikumisele (võnkumisele) ringi diameetril (joon. 2, a). Kui punkt samaaegselt aga liigub kiire K suunas, saame ta võnkumise kujutamisel joonise tasapinnas lainelise sinusoidaalse kõvera (joon. 2, b).

Harmoonilise ristlainetuse puhul eeldatakse, et võnkuvad punktid on omavahel elastselt seotud ja võnkumist ruumis pidurdav hõõrdumistung puudub. Seetõttu kiire K teatud punkt O, mis on saanud mingil algtõukel võnkumisamplituudi A, võngub sama amplituudiga edasi, pannes teatud hilinemisega võnkuma sama amplituudiga ka kõrvalosakesed.



Joon. 2. Harmooniline võnkumine.

Võnkeamplituudiks A nimetatakse maksimaalset kaugust, milleni ulatub võnkuv osake oma esialgsest tasakaaluasendist.

Võnkeperioodiks T loetakse ajavahemikku, mille vältel teatud osake teeb täisvõnke 4 A , s.o. $O-B$, $B-O$, $O-C$ ja $C-O$.

Võnkesagedus ν vastab täisvõngete arvule sekundis

$$\nu = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{\nu}$$

Lainepikkus λ on vahemaa, kus võnkumine levib ühe perioodi vältel

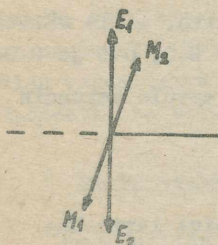
$$\lambda = \nu \cdot T = \frac{\nu}{\nu}$$

Faasiks φ loetakse võnkumise olukorda teatud ajamomendil kiire antud punktis. Võnkuvad punktid, mis asetsevad võrdsetel kaugustel ja samal pool tasakaaluasendist (kiirest) ning võnguvad samas suunas, võnguvad ühtivas faasis. Vastupidises faasis on punktid, mis asetsevad tasakaalupunktist eri suunas võrdsetel kaugustel ja liiguvad vastupidises suunas. Teistel juhtudel räägitakse erinevast faasist.

Faasi mõistet rakendatakse eriti kahe sama lainepikkusega valguskiire võnkumisolukorra suhte hindamisel. Seejuures näidatakse nn. käiguvahe, mida hinnatakse lainepikkuse λ kaudu millimikronites. Näiteks kahe kiire ühtiva faasi korral on käiguvahe täisarv lainepikkusi ($n\lambda$), vastupidise faasi puhul paaritu arv poollainepikkusi ($n\lambda + \frac{\lambda}{2}$).

Harmoonilise võnkumisliikumise iseloomustatud elemente on võimalik rakendada ka valguse kui elektromagnetilise lainetuse korral.

Vastavalt elektromagnetilise lainetuse teooriale tekib valgusenergia levikul isotroopses keskkonnas kaks välja - elektriline ja magnetiline. Mõlemad väljad iseloomustuvad muutuvate pingetega, mis on risti nii omavahel kui ka valguse levikusuunale. Märkime elektrivälja pinge muutused suunale E_1, E_2 , magnetvälja pinge muutused suunale M_1, M_2 (joon. 3). Mõlema välja pinge muutused toimuvad samaaegselt. Pingete kõikumine ilmneb võnkumistena nullist äärmisse seisuga ja sealt tagasi läbi nullpunkti vastassuunalisse äärmisse seisuga jne.



Joon. 3. Elektri- ja magnetvälja pinge muutused valguse levikul.

Nähtava valguse puhul on elektri- ja magnetvälja pingete võnkesagedus umbes 10^9 megahertsi ehk 10^{15} võnget sekundis (joon. 1).

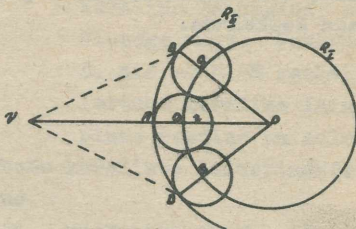
3. Valguse levimine. Huygeni printsiip.

Eelmises peatükis vaatlesime harmoonilise võnkumisliikumise levikut ühes suunas. Et valgus levib kiirgavast kehast igas suunas, tuleb valguse levimist vaadelda kõikide valgusallikast lähtunud kiirte koguna. Vaatleme

valguse levimist punktikujulisest valgusallikast O (joon. 4). Eeldades, et valgus levib kõigis suundades ühtlase kiirusega, näeme, et teatud ajavahemiku t_1 kestel on valgus levinud valgusallikast kerapinnani R_I . Seda kujuteldavat kerapinda nimetame lainepinnaks. Lainepinna kõikides punktides on valguse võnkumine ühtivas faasis.

Valguse lainehüpoteesi alusel võib igat punkti lainepinnal, näit. O_1, O_2, O_3 jne. vaadelda valguslainete uue iseseisva võnkumise keskuseks. Teatud ajalõigu t_2 järgi peab tekkima järjekordult iga sellise punkti ümber elementaarne lainekeera, raadiusega r . Samal ajal

uus lainepind on elementaarsete kerakeste ühine puutujapind, mis on samuti kerapind, raadiusega $R_{II} = R_I + r$.



Joon. 4. Lainepinna kujutamise punktikujulise valgusallika korral.

Ülalesitatust tekib küsimus, miks vaatleja, asudes näiteks punktis V , näeb valgust ainult suunas VO , mitte aga suunas VB ja VD , s.o. ei näe ühtlaselt valgustatud vaatevälja. Vastates sellele küsimusele tõestasid Huygens ja Fresnell, et valgus levib punktist O_1 vaid punkti B , punktist O_2 vaid punkti A suunas jne. Kõikides teistes suundades lainepinnalt R_I levivad valguskiired moodustavad vastastikku vastupidises faasis olevaid paare ja kustutavad üksteist (interfereeruvad). Sellest järeldub, et ühtlases keskkonnas levivad valguskiired on sirgjoonelised ja risti lainepinnale.

Analoogiliselt esitatule saame valguse levikut selgitada paralleelsete valguskiirte korral, s.o. juhul, kui valgusallikas on meist lõpmata kaugel (joon. 5). Praktiliselt võime siis kerajat lainepinda lugeda tasapinnaks, mis on valguskiirte suhtes perpendikulaarne.

Selline valguse leviku tõlgendus on tuntud Huygeni

printsibiina. See võimaldab selgitada difraktsiooninähtusi, säilitades samal ajal valguse sirgjoonelise leviku põhimõtte. Teiseks tuleneb sellest vahetult valguskiirte peegeldumise ja murdumise mõiste valguse üleminekul erineva optilise tihedusega keskkonda.



Joon. 5. Lainepind paralleelse valguskiirte korral.

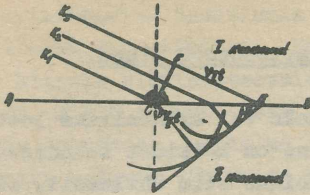
4. Valguskiirte murdmaine. Murdumisnäitaja.

Täielik sisepeegeldus.

Valguse levikukiirus v ühes või teises keskkonnas on sõltuv keskkonna optilisest tihedusest. Õhutühjas ruumis $v \approx 300\ 000$ km/sek, praktiliselt on sellele lähedane valguse kiirus ka õhus. Teistes keskkondades on see aga väiksem. Näiteks vees on $v = 225\ 000$ km/sek, teemandis $v = 124\ 000$ km/sek jne.

Valguskiirte üleminekul ühest keskkonnast teise (õhk-vesi, õhk-kristall) toimub keskkondade piiril teatavasti valguskiirte levikusuuna muutus ehk murdmine. Lähtudes Huygensi printsibiibist on võimalik seda nähtust lihtsalt selgitada.

Kujutame ette, et valguslaine langeb pinnale AB, mis on kahe keskkonna piiripinnaks, nurga all (joon. 6). Olgu valguse levikukiirus neis keskkondades vastavalt v_I ja v_{II} . Langev valgus moodustab pinnal AB vastavalt Huygensi printsibiibile elementaarseid lainetuskeskusi erinevatel ajamomentidel. Nii jõuab kiir K_1 keskkondade piiripinnale (punkti C) momendil, kui kiirel K_2 jääb läbida veel I keskkonnas



Joon. 6. Valguskiirte murdumine.

vahemik FE. Tähistame aja, mille vältel kiir K_3 jõuab punktist F piiripinnani t-ga. Aja t vältel on punktist C levinud juba II keskkonnas keraline lainepind, raadiusega v_{II} t. Punktist D, mis asub CE keskel, levinud keralise lainepinna raadius on eelmi-

sest kahekordselt väiksem. Nende keraliste lainepindade puutuja ongi murdunud lainepind.

Tähistades langemisnurga α , murdumisnurga β , saame

$$\frac{v_I}{v_{II}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Märgitud suhe, mis on vastavate keskkondade kohta püsiv suurus ja ei sõltu valguskiirte langemisnurgast, iseloomustab II keskkonna murdumisnäitajat I keskkonna suhtes.

Mingi keskkonna murdumisnäitaja õhutühja ruumi suhtes on tuntud absoluutse murdumisnäitajana. Praktiliselt määratakse murdumisnäitaja õhu suhtes, sest valguse kiirus õhus ja õhutühjas ruumis ei erine oluliselt. Seega murdumisnäitaja $N = \frac{v \text{ õhus}}{v \text{ keskkonnas}}$. Sellest näeme, et murdumisnäitaja suurus on pöördvõrdeline valguse levikukiirusega antud keskkonnas.

Kui valgus langeb suurema murdumisnäitajaga keskkonnast väiksema murdumisnäitajaga keskkonda, võib esineda juhus, et langevad kiired peegelduvad keskkondade piiril tagasi samasse keskkonda. Seda nähtust tuntakse täieliku sisepeegeldusena. Väikseimat langemisnurka, millest alates ilmneb juba täielik sisepeegeldus, nimetatakse täieliku sisepeegelduse piirnurgaks (φ).

Täieliku sisepeegelduse nähtusele tugineb mitmete optiliste seadiste (niikolid, refraktomeeter) kasutamine.

5. Isotroopsed ja anisotroopsed ained.

Optiliseks isotroopseks aineks või kristalliks loetakse keskkonda, kus valguse levimine on kõikides suundades ühtlane. Ka valguse võnkumine toimub siin ühtlaselt, sõltumata valguse levikusuunast. Valguse tungimisel õhust isotroopseks kristalli muutub vaid ta levikukiirus, keskkondade eralduspiiri suhtes kallutatud kiirtel ka levikusuund. Võnkumised jätkuvad samades suundades kui õhus.

Optiliselt isotroopsed on kõik vedelikud ja amorfised ained. Kristallidest kuuluvad optiliselt isotroopsete hulka kõik kuubilise süngoonia kristallid.

Optiliselt isotroopseid aineid saab iseloomustada ühe murdumisnäitajaga.

Enamik mineraale - kõik keskmise ja madala süngoonia kristallid - on optiliselt anisotroopsed. Viimastes sõltub valguse levimiskiirus valguse levikusuunast. Valguskiir jaguneb neis kaheks kiireks, millel on erinev levikukiirus. Murdumisnäitaja ei ole püsiv, vaid sõltub suunast.

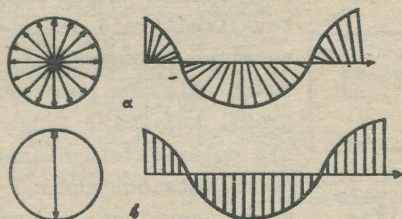
Optiliselt anisotroopseid aineid iseloomustab kaksikmurdumine (vt. punkt 6), mis polarisatsioonimikroskoobis avaldub interferentsvärvustena (vt. punkt 14).

6. Loomulik ja polariseeritud valgus.

Valguse võnkumislükumises eristatakse võnkumissuunda⁺⁾ ja võnkumise levikusuunda. Mõlemat suunda läbivat pinda nimetatakse võnkumispinnaks. Võnkumise levikusuunda nimetatakse tavaliselt kiireks, kusjuures võnkumisi loetakse kiire suhtes perpendikulaarseteks. Selline ettekujutus, nagu näeme hiljem, on õige vaid valguse leviku korral optiliselt isotroopses keskkonnas.

^{+) Valguse võnkumissuunast rääkides peetakse silmas elektrivälja pinge vektorit.}

Loomuliku valguse (näit. päikesevalgus, helendava keha valgus) korral valguse võnkumissuund ei jää kiirele ristiasetsevas tasapinnas paigale, vaid muudab pidevalt ja kiiresti oma asimuuti. Kui valguskiire teatud punktis kanda kiirele ristiasetsevale pinnale võnkumissuunad vektoritena, mille suurus oleks võrdeline võnkumise amplituudiga neis suundades, saaksime ringi. Tegelikult moodustab loomuliku valguse võnkumine kiire suunas spiraali (joon. 7, a).



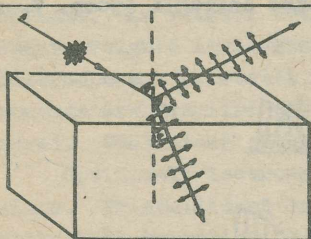
Joon. 7. Loomuliku ja pindpolariseeritud valguse võnkumine.

Polariseeritud valguse korral võnkumiste amplituud eri võnkumissuundades on erinev. Võnkumine võib toimuda siin kas ainult ühes suunas, kõikides teistes suundades on amplituud null - pindpolariseeritud valgus; elliptilisel pinnal, kui valguse võnkumise amplituudid annavad laine-pinnal ellipsikujulise kujundi - elliptiline polarisatsioon; või kahes ristiasetsevas suunas võrdse amplituudiga - ringpolarisatsioon. Peale selle võib valgus olla veel osaliselt ehk ebaühtlaselt polariseeritud, s.o. eri võnkumissuundades on amplituudid erinevad.

Polariseeritud valguse liikidest pakub meile suurimat huvi pindpolariseeritud valgus (joon. 7, b). Edaspidises käsitluses polariseeritud valgusest kõneldes mõistamegi selle all viimast.

Polariseeritud valguse puhul eristatakse võnkumispinda polarisatsioonipinnast, mis on esimesele risti.

Lihtsamal viisil saame polariseeritud valguse selle peegeldumisel või murdumisel keskkondade (õhk-klaas, õhk-vee jne.) piiripinnal. Isotroopse keskkonna puhul võngub murdunud kiir langemispinnal, peegeldunud kiir aga sellele risti, s.o. paralleelselt peegelduspinnale (joon.



8). Tuleb aga märkida, et isotroopse keskkonna korral on nii peegeldunud kui ka murdunud kiir tavaliselt vaid osaliselt polariseeritud. Peegeldunud kiir saavutab täieliku polarisatsiooni juhul, kui kiire langemisnurk vastab polarisatsiooninurgale P. Polarisatsiooninurga korral moodustavad peegeldunud ja murdunud kiir täisnurka.

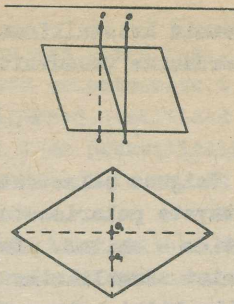
Joon. 8. Valguse polarisatsioon peegeldumisel ja murdumisel.

$n = \tan P = \frac{\sin P}{\cos P} = \frac{\sin P}{\sin r}$; siit $\cos P = \sin r$; see tähendab $P + r = 90^\circ$. Murdunud kiir ei saavuta isotroopset ainet kunagi täielikku polarisatsiooni.

7. Kaksikmurdumine.

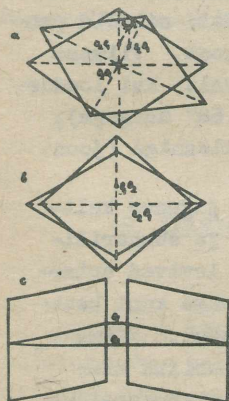
Kaksikmurdumise nähtuse avastas juba 1669.a. taanlane E. Bartholin läbipaistva kaltsiidikristalli juures, kus kaksikmurdumine on suhteliselt suur. Kaltsiidikristalli läbiv valgusekiir jaguneb murdumisel kaheks kiireks, mis moodustavad omavahel umbes $6 \frac{1}{2}^\circ$ nurga. Seetõttu näeme läbi küllaldaselt paksu kaltsiidikristalli väikesi esemeid kahekordselt. Liigutades kaltsiidikristalli eseme kohal, selgub, et üks kujutis püsib paigal, kuna teine tiirleb, vastavalt kaltsiidikristalli pööramisele, esimese ümber (joon. 9). Mõlemad valguskiired on polariseeritud

vastastikku ristiasetsevates pindades. Nimetame toodud näite puhul sirgjooneliselt kaltsiidikristalli läbinud valguskiire harilikuks (o), murdunud kiire aga ebaharilikuks kiireks (e). Märgitud kiirte võnkumissuunad kristallis on kristalli siseehitusega ette määratud: harilik kiir võngub kaltsiidi romboeedri pikema diagonaali suunas, s.o. risti kristallograafilisele c-teljele, ebaharilik kiir võngub lühema diagonaali suunas. Nagu selgub vaatlusest kahe üksteisele asetatud kaltsiidikristalliga, võib harilik ja ebaharilik



Joon. 9. Valguskiire jagunemine kaltsiidikristallis.

kiir omakorda teises kaltsiidikristallis jaguneda. See ilmneb kõige selgelt asendis, kus üks kristall on teise suhtes pööratud umbes 45° võrra. Näeme 4 kujutist - teises kristallis on jagunenud harilik ja ebaharilik kiir uuesti harilikuks ja ebaharilikuks (joon. 10, a). 90° nurga puhul on jälgitavad vaid kaks kujutist (joon. 10, b). Võrdse paksusega kaltsiidikristalle teineteise suhtes 180° võrra pöörates näeme vaid ühte kujutist (joon. 10, c).



Joon. 10. Valguskiire käik läbi kahe erinevas asendis oleva kaltsiidikristalli.

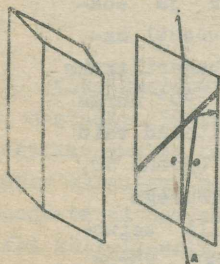
Ülalkirjeldatud valguse kaksikmurdumine ja polarisatsioon esinevad kõigis anisotroopsetes, s.o. keskmise ja madalama

süngoonia kristallides, kuigi enamikul mineraalidel on kak-
silmurdumine tunduvalt väiksem kui kaltsiidil.

8. Polarisaatorid.

Valguse polarisatsioonil põhineb kristallooptikas ka-
sutatavate polarisaatorite - valgust pindpolariseerivate
plaatide - ehitus. Esimeste polarisaatoritena leidsid ka-
sutamist turmaliinikristallid. Turmaliinil on omadus ha-
rilikke kiiri tugevasti neelata, kuna ebataavalisi laseb ta
läbi vabalt. C-teljele paralleelselt lõigatud turmaliini-
plaadike annabki c-telje suunas (ebahariliku kiire võnku-
missuund) polariseeritud valguse. Turmaliinist polarisaa-
torite puuduseks on nende suhteliselt tugev värvus (roheli-
ne, sinine).

Polarisatsioonimikroskoobis kasutatavaid polarisaa-
torid nimetatakse nikoliteks. Varem valmistati nikolid puh-
tast läbipaistvast kaltsiidist - islandi paest. Viimase
prismalised kristallid lihviti veidi erinevalt, kui loodus-
liku kaltsiidi lõhenevuspinnad (71° asemel 68° nurgaga),
lõigati pooleks ja kleebiti kokku Kanada palsamiga (joon.
11).



Joon. 11. Valgus-
kiire käik niko-
lis.

Valguskiir A jaguneb kalt-
siidis harilikuks ja ebaharili-
kuks kiireks, mis levivad erine-
va kiiruse ja suunaga kuni kana-
da palsami kihikeseni. Viimase
piiripinnal teeb harilik kiir
(O) läbi täieliku sisepeegelduse
ja kustub nikolit ümbritsevas
mustas kattes. Kiir e aga läbib
prisma ja annab polariseeritud
valguse.

Kaltsiidist nikolite puudu-
seks on vaatevälja piiratud nurk
(29°). Seetõttu on kaasaegsetes

polarisatsioonimikroskoopides võetud kasutusele kaltsiidi asemel nn. polaroidid. Need kujutavad endast plaadikesi, kus õhukeses želatiinikihikeses asetsevad orienteeritult joodi ja hiniinsulfaadi ühendi kristallikesed. Sellised polaroidid, samuti nagu turmalingi, ei lase praktiliselt läbi harilikke kiiri, kuid ebaharilikele kiirtele on nad täiesti läbipaistvad.

Polarisatsioonimikroskoobis on 2 nikolit, millest üks asetseb mikroskoobilaua all, teine mikroskoobi tuubuses. Viimane on laekana sisse- ja väljalükatav. Kui alumist nikolit nimetatakse lihtsalt polarisaatoriks, siis ülemist tuntakse analüsaatorina, selle abil kontrollime valguse polariseeritust.

Kui nikolid asetsevad mikroskoobi optilises süsteemis nii, et nende polarisatsioonipinnad on teineteise suhtes risti, räägime ristnikoli asendist. Polarisatsioonipindade paralleelsuse korral kõneleme paralleelsetest nikoltest.

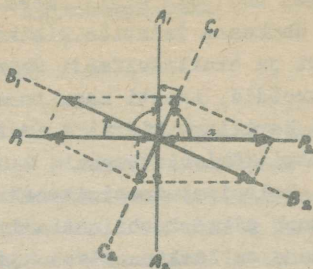
9. Kristall polarisatsioonimikroskoobis.

Kustumine.

Kivimite või mineraalide mikroskoopiliseks uurimiseks valmistatakse neist õhukesed (0,02 mm) preparaadiklaasile liimitud liistakud - õhikud. Väga väikese paksuse puhul on ka kõige tumedamad kivimit moodustavad mineraalid tavaliselt läbipaistvad ning nende optiliste omaduste uurimine suhteliselt kerge. Anisotroopsete mineraalide uurimisel ei tohi unustada, et nende optilised omadused sõltuvad suunast, s.o. mineraali lõikest. Polarisatsioonimikroskoobiga saame objekti asendit muuta ühel tasapinnal.

Vaatleme järgnevalt optiliselt anisotroopse kristalli lõiget polarisatsioonimikroskoobi ristnikolite asendis.

Olgu õhiku teatud asendi korral kristalli siseehituse poolt dikteeritud võnkumissuunad B_1B_2 ja C_1C_2 (joon. 12). Polarisaatori läbinud valgus, võnkudes suunas P_1-P_2 amplituudiga a jaguneb kaheks kiireks, mille võnkumissuunad on määratud kristalli poolt, amplituudid aga parallelogrammi seaduse järgi.



Joon. 12. Polariseeritud valguse võnkumine anisotroopses kristallis.

Analüsaatoris jagunevad mõlemad kiired uuesti parallelogrammi seaduse järgi kaheks. Saadud neljast kiirest toimub nüüd kahe võnkumine polarisaatori võnkumistasapinnas, mistõttu need kiired edasi ei pääse. Analüsaatori läbivad kiired, mille võnkumine kandus analüsaatori võnkepinna. Kristall näib meile heledana, valgustatuna, kuna vaateväli väljaspool kristalli on tume.

Ristnikolis on anisotroopsed kristallid sageli värvilised - punased, kollased, rohelised jne. Selline kristallide nn. interferentsvärvus tekib tavalise valguse interferentsi tõttu analüsaatori võnkepinna, kus saime kaks valguskiirt erinevate amplituudidega ja erinevates faasides (vt. p. 2). Interferentsvärvus võimaldab mikroskoobis hõlpsasti eraldada anisotroopseid kristalle optiliselt isotroopsetest. Viimased ei muuda valguskiirte võnkumissuunda, mistõttu vaateväli nende kohal jääb alati tumedaks. Erijuhul osutub tumedaks ka anisotroopse kristalli lõik. Nimelt mikroskoobi lauda anisotroopse kristalliga täisringi võrra pöörates ilmneb vaatevälja täielik tumenemine 4 korral. Nendel momentidel langevad võnkumissuunad kristallis kokku võnkumissuundadega nikolites. Polari-

saatori läbinud valgus ei jagune siis kristallis kaheks kiireks, vaid jätkab võnkumist samas suunas. Sellest võnkumispinnast aga valgus analüsaatorisse ei pääse. (Täpsemalt - valgus kristallis jaguneb küll kaheks kiireks, kuid ühe kiire amplituud vastavalt parallelogrammi seadusele on võrdne 0-ga.)

Kui nikolite võnkesuund on teada, siis on lihtne määrata võnkesuundi uuritavas kristallis: mõlemad nimetatud võnkesuunad langevad kokku kristalli kustumismomendil. Polarisaatsioonimikroskoopides on nikolid asetatud selliselt, et võnkesuunad ühtuvad okulaari niitristi suundadega. Mikroskoobiga töötades on aga oluline eraldada, millises suunas võngub polarisaatorit läbinud valgus. Seda tehakse kindlaks turmaliniplaadikesega või spetsiaalse okulaarnikoliga, milles võnkumispind on teada.

Kui kristalli kustumisasendis ta kristallograafilised piirjooned on paralleelsed ühe ristniidiga, nimetatakse kustumist otseseks. Vastasel juhul räägitakse viltukustumisest. Kustumise iseloom on üheks mineraalide diagnostiliseks tunnuseks, mis võimaldab kristalli süngoonia üle otsustada. Otsukustumise korral kristalli kristallograafilised teljed langevad kokku võnkumissuundadega, s.o. indikaatriksi telgedega.

Indikaatriksi mõiste selgitamiseks on eelnevalt vajalik tutvuda murdumisnäitaja pindadega ja valguslaine levikuga anisotroopsetes kristallides.

10. Refraktomeeter. Murdumisnäitaja pinnad.

Nii vedelike kui ka tahkete ainete murdumisnäitaja määramise üheks lihtsamaks vahendiks on refraktomeeter. Murdumisnäitaja refraktomeetriline määramine põhineb täieliku sisepeegelduse nähtusel valguse levimisel suurema murdumisnäitajaga keskkonnast väiksema murdumisnäitajaga keskkonda. Refraktomeetri olulisemaks osaks on võimalik

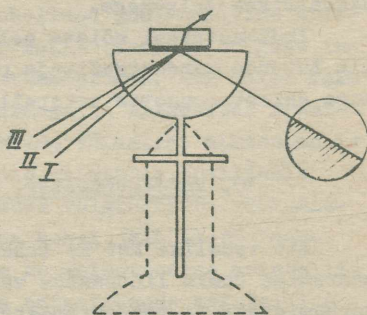
kult kõrge murdumisnäitajaga (tavaliselt $N = 1,8-1,9$) klaasist poolkerad.

Anisotroopsete kristallide murdumisnäitaja määramiseks erinevates suundades valmistatakse neist lihvitud pindadega kuubikukesed või ristkülikud. Uuritav kristallike asetatakse klaaspoolkera ülemisele tasasele pinnale (joon. 13). Kristallikuubiku alla asetatakse tilgake vedelikku, et kõrvaldada piiripinnalt õhk. Vedeliku murdumisnäitaja peab olema veidi madalam, kui klaaspoolkeral. Valgus suunatakse läbi klaasist poolkera uuritavatele kristallikestele, kust peegeldudes ta fikseeritakse vaatetorus. Vaatetoru on liigutatav, nurk vertikaalse telja suhtes täpselt mõõdetav. Klaaspoolkera on võimalik pöörata vertikaalse telje ümber.

Valgustamisel on võimalik 3 juhtumit:

1. Kiired langevad väiksema nurgaga, kui täieliku sisepeegelduse piirdenurk. Kiired läbivad kristalli ja kogu vaateväli vaatetoru okulaaris on tume.
2. Kiired langevad suurema nurgaga kui φ . Kõik kiired peegelduvad kristallipinnalt vaatetoru suunas. Kogu vaateväli on valgustatud.
3. Osa valguskiiri peegeldub, osa murdub. Vastavalt sellele on vaateväljast valgustatud vaid osa. Piir valgustatud ja tumeda välja vahel vastab nurga φ all langenud kiirtele. See piir fikseeritakse täpselt okulaari niitristiga, nurk φ loetakse vaatetoru limbit.

Nagu selgub, on murdumisnäitaja määramine võimalik kolmandal juhul. Murdumisnäitaja arvutatakse lihtsa valemi $N = N_1 \sin \varphi$ alusel, kus N_1 - klaaspoolkera murdumisnäitaja.

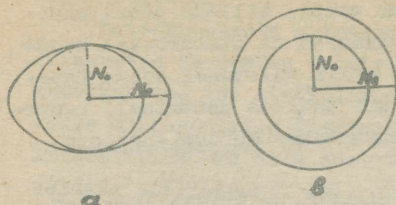


Joon. 13. Murdumisnäitaja määramine refraktomeetril.

Anisotroopsete kristallide murdumisnäitaja määratakse kristalli mitmesuguste suundade puhul, milleks pööratakse klaaspoolkera. Saadud mõõtmistulemused on otstarbekas kanda valguslaine leviku suundadele, mille tulemusel saame tasapindse kujundi või (kristalli eri tahkude mõõtmisel) ruumilise mudeli. Sellist pinda nimetatakse murdumisnäitaja pinnaks.

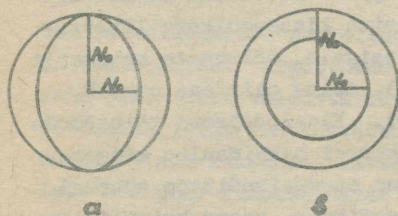
Optiliselt isotroopsetel ainetel ja kristallidel on murdumisnäitaja kõigis suundades sama. Piir valgustatud ja tumeda välja vahel on püsiv. Nende murdumisnäitaja pind on kera.

Keskmise süngoonia kristallide murdumisnäitaja pind on kerast erinev. Vaatleme näiteks kvartsist valmistatud kuubikut refraktomeetris. Siin näeme, et terav piir valgustatud ja tumeda osa vahel puudub. Õieti esineb kaks piiri, mille vahele jääb pooltume väli. Märgitud kahele piirjoonele vastavad kahe eri kiire - hariliku ja ebahariliku - murdumisnäitajad. Et mõlemad peegeldunud kiired on polariiseeritud vastastikku ristiasetsevates pindades, saame vaateorus esineva nikoli abil ühe piiri kustutada ja mõõtmisi teostada eraldi. Refraktomeetri klaaspoolkera liigutamisel selgub, et üks piir jääb paigale, sõltumata kristalli asendist valguskiire suhtes (N_o), teine piir aga muutub, sõltudes kristalli asendist (N_e). Klaaspoolkera täispöörde vältel saavutavad piirid kahel korral maksimaalse kauguse, kahel korral aga ühtuvad. Mõõtes murdumisnäitaja suurusi pidevalt ja kandes tulemused graafikule, saame kristallikuubiku murdumisnäitajana pinna lõike, mis vastab ühele tahule. See lõige kujutab ellipsit, mille sisse on joonistatud ellipsi väiksema raadiusega N_o ringjoon (joon. 14, a). Sellise lõike saame kvartsikristalli puhul, kui möödame murdumisnäitajaid c-teljega paralleelsel pinnal (s.o. ükskõik millisel prismapinnal). Vastavalt lõikelt selgub, et kaksmurdumist ei esine ainult ühes suunas. Seda optiliselt isotroopset suunda nimetatakse optiliseks teljeks.



Joon. 14. Optiliselt positiivse üheteljelise kristalli murdumisnäitajate pinnad lõikes $\parallel (001)$ ja $\perp (001)$.

ri poolkerale nii, et c-telg jääb vertikaalseks. Vaateväljas näeme samuti kahte piiri, kuid klaaspoolkera pööramisel need piirid oma asendit ei muuda. Murdumisnäitajate graafik kujutab endast kahte kontsentrilist ringjoont (joon. 14, b) raadiustega N_o ja N_e .



Joon. 15. Optiliselt negatiivsete üheteljeliste kristallide murdumisnäitajate pindade lõiked pinnal $\parallel (001)$ ja $\perp (001)$.

15). Ka siin esineb vaid üks optiline telg, mis on orienteeritud c-telje suunas.

Et eraldada erineva murdumisnäitajate pinnaga optili-

Kvartsil, samuti kui teistelgi keskmise süngoonia kristallidel on ainult üks optiline telg, mistõttu loeme neid optiliselt üheteljelisteks kristallideks.

Optilise telje suund langeb neil kristallidel kokku kõrgemat järku kristallograafilise teljega (c-teljega).

Asetame nüüd kvartsiist kuubiku refraktomeest-

Kombineerides mõlemad saadud graafikud ruumiliseks kujundiks (arvesse võttes, et kõik lõiked c-teljega paralleelses suunas annavad võrdse tulemuse), saame pöördellipsoidi, milles asub kerapind.

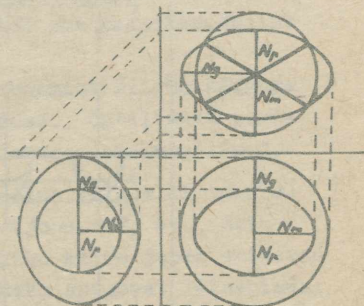
Kuid mitte kõikidel keskmise süngoonia kristallidel ei ole murdumisnäitajate pind analoogiline ülalkirjeldatule. Näiteks kaltsiidikristalli puhul me saame murdumisnäitajate pinna, kus kerapiinas esineb pöördellipsoid (joon.

selt üheteljelisi kristalle, räägime esimesel juhul optiliselt positiivsetest kristallidest, teisel juhul optiliselt negatiivsetest kristallidest. Väljendades seda murdumisnäitajate suuruste suhte alusel, võime öelda:

kui $n_o < n_e$, on kristall optiliselt positiivne,
 kui $n_o > n_e$, on kristall optiliselt negatiivne.

Madalama süngoonia kristallides on murdumisnäitajate pind madalama sümmeetria tõttu keerulisem. Murdumisnäitajate pinna koostamiseks ei piisa mõttest kahel ristasetseval kristallikuubiku tahul, nagu optiliselt üheteljeliste kristallide korral, vaid graafikud on vaja koostada iga tahu kohta eraldi.

Valguskiire murdumisel madalama süngooniaga kristallides ei jagune valguskiir harilikuks ja ebaharilikuks kiireks, vaid kaheks ebaharilikuks kiireks. Nende murdumisnäitajad annavad iga tahu kohta erineva graafiku (joon. 16). Analüüsisid neid lõikeid selgub, et igal graafikul on võimalik esile tõsta 3 kindlat murdumisnäitaja suurust (ringjoone raadius ja ellipsi raadiused).



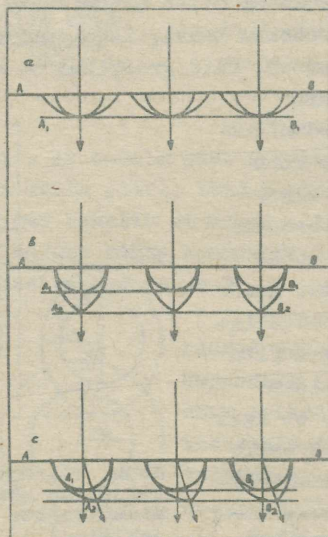
Joon. 16. Optiliselt kahteljelise kristalli murdumisnäitajate pindade projektsioon.

Suurimat murdumisnäitaja suurust tähistatakse n_g (pr. grand - suur), väikseimat n_p (pr. petit - väike), keskmist n_m (pr. moyen - keskmine). Optiliselt isotroopseid suundi on kaks, mistõttu neid kristalle nimetatakse optiliselt kahteljelisteks.

Saadud kolme lõike põhjal võime konstrueerida murdumisnäitajate ruumilise mudeli, mis on keeruline kahekordne pind.

11. Lainepinnad optiliselt anisotroopsetes kristal-
lides. Valguskiir ja normaal. Binormaal ja
biradiaal.

Lähtudes eeldusest, et murdmisnäitaja on pöördvörde-
line valguse levikukiirusega vastavas keskkonnas, võime



Joon. 17. Kaksikmurdmine ühetelje-
listes kristallides kristalli pin-
nale risti langeva valguse korral;
a - optiline telg on kristalli pin-
nale risti; b - optiline telg on
kristalli pinnaga paralleelne; c -
optiline telg on kristalli pinna
suhtes kallutatud.

murdmisnäitajate pinna alusel konstrueerida iga kristalli
kohta ka valguse kiirusepinnad ehk lainepinnad (vt. p. 3).

Optiliselt üheteljelistes kristallides kujutab lainepind endast pöördellipsoidi ja kera kombinatsiooni. Oletame esialgu, et valgus langeb kristalli pinnale risti. Isotroopsetes kristallides sellisel juhul valguskiir ei murdu. Anisotroopsetes kristallides aga võime ka risti langevate valguskiirte korral, sõltuvalt kristalli optilise telje asendist, konstateerida mõnel juhul nii murdumist kui ka kaksikmurdumist. Vaatleme järgmisi juhuseid:

1. Optilise telje suund on risti tahule, seega paralleelne valguse levikusuunale. Lõpmatust hulgast elementaarsest lainetest on näidatud (joon. 17, a) kolm. Nende puutuja annab lainepinna, mis on ühine nii harilikule kui ka ebaharilikule kiirele. Murdumist aga kaksikmurdumist ei esine (optilise telje suund!).

Joon. 17 toodud näidetes on tegemist kiirte käiguga optiliselt negatiivsetes kristallides. Optiliselt positiivsete kristallide korral on tulemused analoogilised.

2. Optilise telje suund on paralleelne kristalli tahule, seega risti valguse levikusuunale (joon. 17, b). Siin saame ehitada hariliku ja ebahariliku kiire jaoks erinevad elementaarlained, seega saame ka kaks erinevat lainepinda. Viimased levivad samas suunas, kuid erineva kiirusega. Murdumist ei toimu, küll aga ilmneb kaksikmurdumine.

3. Optiline telg on kristalli pinna suhtes nurga all (joon. 17, c). Ka siin saame nagu eelmiselgi juhul kaks erineva kiirusega samasuunalist lainepinda, kuid neile vastavate kiirte suund on erinev. Harilik kiir jätkab sirgjoonelist levikut aga murdu. Ebaharilik kiir aga murdub, levides ellipsi pikema raadiuse suunas. Nagu selgub, ei ole ebaharilik kiir antud juhul risti lainepinnale, s.o. risti laine levikusuunale. Sama nähtust võime konstateerida ka valguse langemisel kristalli pinnale $< 90^\circ$ nurga all. Sellest võime teha järelduse, et anisotroopsetes kristallides ei lange valguskiir üldjuhul kokku valguse, s.o. valguslaine levikusuunaga. Eriti on see kehtiv

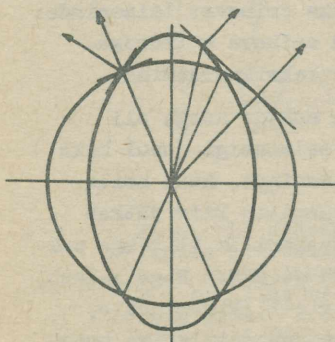
optiliselt kaheteljeliste kristallide korral, kus harilik kiir puudub, s.o. kumbki kiir ei lange kokku vastava laine levikusuunaga.

Valguslaine edasiliikumise suunda nimetatakse normaalsiks. Normaal on alati risti lainepinnale. Ebaharilik kiir on aga üldjuhul lainepinna suhtes veidi kallutatud.

Valguskiir on suund, mida mööda kandub edasi valgusenergia. Füsioloogilist mõju silmale avaldab valguskiir, mitte aga normaal. Viimase tõestuseks võib tuua näite Islandi paost, millest läbi vaadates näeme väikesi esemeid kahekordselt. Kiirte käiku selles illustreerib joonis 17, c. Kui nägemisaistingu põhjustaks normaal, ei näeks me eset kahekordselt, sest mõlemad normaaliid langevad kokku.

Normaaliga on seotud aga mitmed teised nähtused, mis on aluseks kristallooptilisele uurimismeetodile.

Nii on normaaliga seotud võnkumissuunad anisotroopses kristallis (võnkumised toimuvad lainepinnas, s.o. risti normaaliile), murdumisnäitaja (pöördvõrdeline laine leviku kiirusele, mida mõõdetakse normaali suunas) ja interfereerivate lainete käiguvähe (määratakse normaali suunas).



Joon. 18. Binormaalid (ON) ja biradiaalid (OR).

Kui tuletada murdumisnäitajate pinna alusel kaheteljeliste kristallide optilised teljed normaali jaoks, nn. binormaalid, selgub, et viimased ei lange kokku optiliste telgedega kiirte jaoks, nn. biradiaalidega (joon. 18). Kõneldes edaspidi optilistest telgedest, peamegi silmas ainult binormaaale.

Praktiliselt nurk binormaaali ja biradiaali vahel on enamasti alla 1° . Samuti ei ole suur kiire ja normaali vaheline nurk, mis on võrdeline

kaksikmurdmise suurusega. Näiteks on see kvartsil
($N_e - N_o = 0,009$) $20'$, kaltsiidil aga ($N_o - N_e = 0,172$)
umbes $6 \frac{1}{2}^\circ$.

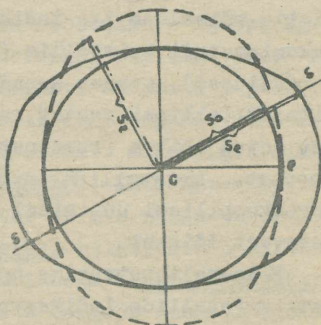
12. Optiline indikaatriks.

Murdumisnäitajate pind ei ole kristalli optilistest omadustest ettekujutuse loomiseks sobiv mitte ainult oma keerukuse vaid ka ülalesitatust tulenevate puuduste tõttu. Nimelt ei ole selles seotud murdmisnäitajad valguse võnkumissuuna, vaid valguskiire levikusuunaga. Lainepind, mis peegeldab laine leviku suunas valguse levikukiirust, on konstrueeritud punktikujulisest valgusallikast lähtudes ega peegelda tasapindsete lainete levikukiirust.

Kristallides on aga olulisim näidata seos valguse võnkumissuuna ja murdmisnäitaja (resp. levikukiiruse) vahel. Et siduda neid omadusi, ehitatakse pind, mis on tuntud optilise indikaatriksina. Indikaatriks on tuletatav murdmisnäitajate pinnast ja kujutab endast ordinaarset pinda, mille järgi saame määrata ükskõik missuguse kahekordse pinna elemendid.

Optiliseks indikaatriksiks nimetatakse kujuteldavat ellipsoidset pinda, kus iga raadiusvektori suurus näitab selle vektori suunas võnkuvate lainete murdmisnäitaja suurust kristallis.

Indikaatriks erinebki murdmisnäitajate pinnast selle poolest, et murdmisnäitajate suurus on kantud siin mitte laine leviku, vaid selle võnkesuunale,

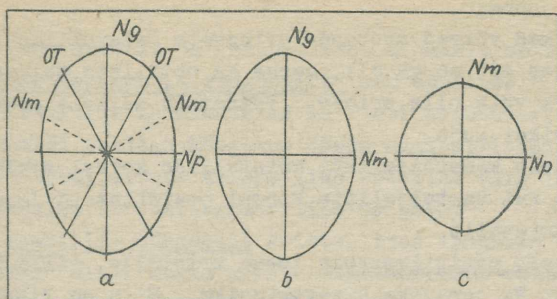


Joon. 19. Optiliselt üheteljelise positiivse kristalli indikaatriksi tuletamine.

mis on risti laine levikusuunale. Isotroopsete kristallide indikaatriks on samuti nagu murdumisnäitajate pindki, kerapind. Keskmise kategooria süngooniata kristallide indikaatriks kujutab endast pöördellipsoidi (vt. joon. 19). Vaatleme optiliselt üheteljelise positiivse kristalli indikaatriksi tuletamist murdumisnäitajate pinnast.

Teatavasti toimub hariliku valguskiire vönkumine üheteljelistes kristallides risti optilisele teljele (s.o. kristalli c-teljele) (p. 7). Vaadeldes valguslaine levikut vabalt valitud suundades läbi murdumisnäitajate pinna, saame hariliku kiire murdumisnäitajad kanda optilise telje suhtes ristiasetsevale pinnale, ebahariliku kiire murdumisnäitajad aga suundadele, mis on risti nii normaaliga kui ka hariliku kiire vönkepinnaga. Nii saame murdumisnäitajate kahekordse pinna asemel pöördeellipsoidi, mille pöördteljeks on optiline telg. Optilisele teljele risti on indikaatriksi ainus ringlõige. Selles suunas kaksikmurdumine puudub. Kaksikmurdumine on maksimaalne optilise telje pinnal. Vastavaid lõikeid nimetatakse indikaatriksi pealõigeteks. Pealõikeid on üheteljelise kristalli indikaatriksil lõpmatu arv. Indikaatriksi igas vahepealses lõikes on kaksikmurdumise suurus vahepealne. Niisiis võimaldab iga indikaatriksi lõige määrata valguse vönkumissuundi kristallis (indikaatriksi elliptilise lõike raadiused), nendes suundades vönkuva valguse murdumisnäitajat (ellipsi vastav raadius) ja kaksikmurdumise suurst antud lõikes (raadiuste vahe). Seetõttu seomegi anisotroopsete kristallide optilisi omadusi teatud lõikes mikroskoopilisel uurimisel ettekujutusega indikaatriksi vastavast lõikest.

Eelnevalt tutvusime optiliselt positiivsete üheteljeliste kristallide indikaatriksiga. Analoogiliselt esitule võime tuletada indikaatriksi ka optiliselt üheteljeliste negatiivsete kristallide puhul. Viimane on samuti pöördellipsoid, mille pöördteljeks on aga lühem telg.



Joon. 20. Optiliselt positiivse kaheteljelise kristalli indikaatriksi pealõiked: a - optiliste telgede pind; b - Ng-Nm pind; c - Nm-Np pind.

Optiliselt kaheteljeliste kristallide indikaatriksid kujutavad endast 3-teljelisi ellipsoide, mille pooltelgedeks on Ng, Nm ja Np (joon. 20).

Pindasid, mis läbivad kahte pooltelge - Ng-Np, Ng-Nm või Nm-Np - nimetatakse indikaatriksi pealõigeteks. 2-teljeliste kristallide indikaatriksil on seega 3 pealõiget. Optilised teljed jäävad pealõikele Ng-Np, mis on maksimaalse kaksikmurdumisega lõikeks. Seda pinda nimetatakse ka optiliste telgede pinnaks. Indikaatriksi telge, mis on optiliste telgede vahelise terava nurga poolitajaks, nimetatakse teravaks bisektrissiks, telge, mis poolitab optiliste telgede vahele jääva nürinurga - nüriks bisektrissiks. Telg Nm on alati optiliste telgede pinnale risti, mistõttu teda loetakse optiliseks normaaliks. Telg Nm on ühtlasi nende ringlõigete ühiseks raadiuseks, mis kujutavad endast ristlõike optilistele telgedele. Joonisel 20, a

on optiline normaal risti joonise pinnale, kuid oma suuruselt vastab ringlõike raadiusele, mistõttu see on näidatud katkendliku joonega.

Ringlõiked võivad asetseda erinevate kristallide indikaatriksites eri nurga all, seega ka optiliste telgede vaheline nurk võib olla erinev. Vastavalt sellele muutub ka indikaatriksi kuju.

Optiliselt kaheteljeliste kristallide korral eraldatakse samuti kui üheteljeliste korral positiivseid ja negatiivseid kristalle.

Optiliselt positiivseteks loeme kristalle, mille indikaatriksis on Ng teravaks bisektrissiks. Siin on ringlõiked väikese nurga all pealõikele Nm-Np. Teljed Nm ja Np erinevad teineteisest oma suuruselt vähe. Indikaatriks tuletab meelde oma kujult väljavenitatud pöördellipsoidi.

Optiliselt negatiivsete kristallide indikaatriksi teravaks bisektrissiks on telg Np. Ringlõiked moodustavad väikese nurga pealõikega Ng-Nm. Telg Nm läheneb oma pikkuselt teljele Ng. Indikaatriks läheneb kujult kokkusurutud pöördellipsoidile.

Ülalesitatatu võime väljendada ka murdumisnäitajate suuruste (indikaatriksi telgede pikkus) vastastikuse suhte alusel:

- Kui 1. $Ng-Nm > Nm-Np$ - kristall on optiliselt positiivne,
2. $Ng-Nm < Nm-Np$ - kristall on optiliselt negatiivne.

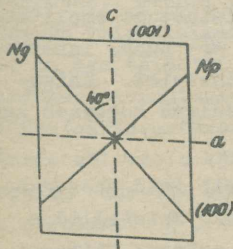
Kui optiliste telgede vaheline nurk $2V$ on 90° , on ringlõiked vastastikku risti ja võrdse nurga all pealõigetega Nm-Np ja Ng-Nm. Indikaatriksi telg Nm on oma pikkuselt võrdne Ng ja Np aritmeetilise keskmisega, s.o. $Ng-Nm = Nm-Np$. Sellisel praktikas harvaesineval juhul kõneleme optiliselt neutraalsest kristallist.

13. Indikaatriksi orienteeritus kristallides.

Indikaatriks on kristallides kindlalt orienteeritud. Keskmise kategooria süngooniade ehk optiliselt üheteljeliste kristallide indikaatriks on alati orienteeritud pöördellipsoidi teljega kõrgemat järku sümmeetriatelje suunas. Seega üheteljeliste kristallide optiline telg langeb kokku vertikaalse kristallograafilise teljega.

Rombilise süngoonia kristallides langevad indikaatriksi teljed alati kokku kristallograafiliste telgedega, kuid erinevate mineraalide puhul indikaatriksi teljed Ng, Nm ja Np võivad ühtuda erinevate kristallograafiliste telgedega $[00\bar{1}]$, $[01\bar{0}]$ või $[00\bar{1}]$. Nii võib optiliste telgede pind Ng-Np eri mineraalides langeda kokku kas esimese, teise või kolmanda pinakoidipinnaga.

Monokliinses süngoonias langeb vaid üks indikaatriksi telgedest, tavaliselt Nm, kokku kristallograafilise teljega, milleks on b-telg $[010]$. Indikaatriksi teljed Ng ja Np



Joon. 21. Indikaatriksi orientatsioon monokliinses augiidis.

asuvad teise pinakoidi pinnal $[010]$, moodustades teatud nurga kristallograafilise c- ja a-teljega. Joon. 21 on näidatud indikaatriksi orientatsioon monokliinses augiidis teisele pinakoidipinnale paralleelses lõikes. Kristallograafiline b-telg on orienteeritud joonise pinnale risti ja see langeb kokku indikaatriksi Nm-teljega.

Nurk Ng ja c-telje vahel on monokliinsetes kristallides väga tähtsaks diagnostiliseks tunnuseks. See on tuntud kustumisnurgana. Monokliinses augiidis on see 40° .

Trikliinses süngoonias indikaatriksi teljed ei lange kokku kristallograafiliste telgedega. Nurgad, mis moodustu-

vad indikaatriksi telgede ja kristallograafiliste telgede vahel (kustumisnurgad) pakuva huvi mineraalide määramisel, sest nad on erinevates mineraalides, samuti ka erinevates isomorfsetes segudes (plagioklassid) erineva suurusega.

14. Kristallide interferentsvärvus.

Anisotroopsete kristallilõikude jälgimisel polarisatsioonimikroskoobis ristnikolite asendis nägime (vt. p. 9), et kristall, pööratuna välja kustumisasendist, on valgustatud ja helendub teatud värvusega - interferentsvärvusega.

Interferentsvärvuse teket on esmalt lihtsam selgitada monokromaatilise valguse korral.

Valguse interferentsiks nimetatakse teatavasti nähtust, mis tekib kahe erineva tee läbinud valguslaine levimisel ühes suunas ja võnkumisel ühel pinnal, kusjuures summaarne võnkuv liikumine on kas suurema või väiksema amplituudiga kui ühe laine võnkumine, olenevalt sellest, milline on kahe laine käiguvahe (vt. p. 2). Eri juhul, kui lained on vastupidises faasis, võib summaarse lainetuse amplituud olla null. Seega käiguvahe $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2}$ puhul interfereeruvad lained hävitavalt täielikult teineteist. Käiguvahe $\Delta = n\lambda$ korral monokromaatiline valgus tugevneb aga maksimaalselt (joon. 22).

Olgu märgitud, et interfereeruda võib vaid ühesuguse lainepikkusega valgus. Käiguvahe Δ tekib kristallides lainete (hariliku ja ebahariliku kiire) erineva kiiruse tõttu. Käiguvahe Δ on võrdeline kristallilõike paksuse d ja kaksikaurdumise suurusega antud lõikes: $\Delta = d \cdot (N_{g_1} - N_{p_1})$.

Harilik ja ebaharilik kiir võnguvad kristallis teineteisele ristsisetevates suundades, mistõttu nad kristalli läbides levivad vastastikku interfereerumata. Interferents saab võimalikuks alles pärast nende võnkumiste viimist ühele pinnale analüsaatoris. Interferentsi tingimused paralleelsetes ja ristnikolites on aga erinevad.



Joon. 22. Interferents;
1 ja 2 - interfereeruvad
võnkumised; 3 - sum-
maarne võnkumine;

a) : $\Delta < (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$

b) $\Delta = n\lambda$; c) $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2}$.

ja kustuvad. Pinnal A_1A_2
võnkuvate valguslainete
puhul on aga täidetud kõik
interferentsitingimused.

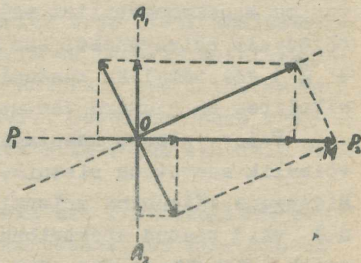
Analüüsid interferentsi
olukorda sõltuvalt käigu-
vahest on vaja aga arves-
tada parandust $\frac{\lambda}{2}$, s.t.
lained, mis said kristal-
lis käiguvahe $n\lambda + \frac{\lambda}{2}$ ei
kustuta teineteist, vaid
vastupidi, tugevdavad.

Kustutavad aga teineteist
lained käiguvahega $n\lambda$.

Selline parandus on
põhjustatud asjaolust, et
polariseeritud valguse jagunemisel ristnikolis üks laine

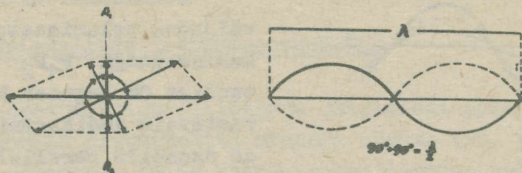
Vaatleme kõigepealt val-
guse interfereerumist anisot-
roopse kristallis ristnikoli
asendis.

Monokromaatiline valgus,
väljudes polarisaatorist vön-
kumissuunaga P_1P_2 ja ampli-
tuudiga OM jaguneb kristallis
vastavalt indikaatriksi telge-
de asendile parallelogrammi
seaduse kohaselt kaheks kii-
reks (joon. 23), mis võnguvad
vastastikku rististes suunda-
des. Analüsaatorini jõudes
toimub uus jagunemine paral-
lelogrammi seaduse järgi vön-
kumissuundadele A_1A_2 ja P_1P_2 .
Valguslained, mis võnguvad
pinnal P_1P_2 , edasi ei pääse



Joon. 23. Valguskiire vön-
kumissuunad süsteemis: po-
larisaator - anisotroopne
kristall - analüsaator
ristnikoli asendis.

pöördus teise suhtes 180° (võnkumissuunast P_1P_2 võnkumissuunda A_1A_2). Seetõttu ilmneks kustumine isegi kahe valguslaine ühtlase levikukiiruse korral (joon. 24).



Joon. 24. Võnkumise faasi muutumine ristnikoli asendis.

Paralleelsete nikolite asendis valguslained faasi ei muuda ja täislainepikkuste võrra erinevad lained tugevdavad teineteist. Sellest on mõistetav, et paralleelsetes nikolites saadud interferentsvärvus teatud kristallilõike puhul on täiendvärvuseks ristnikolites samades tingimustes saadud interferentsvärvusele. Meie näite puhul, kus kasutatakse monokromaatilist valgust, võime saada ristnikolis, sõltuvalt käiguvahest, kas kristalli helendumise ($\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2}$) või täieliku kustumise ($\Delta = n\lambda$). Paralleelsetes nikolites on olukord vastupidine.

Valge valguse kasutamisel ei ole interferentsi teel võimalik saavutada ristnikolis kunagi täielikku kustumist. Missugune käiguvahe kristallis ka ei tekiks, saab see olla $n\lambda$ vaid teatud spektriosa jaoks, mis siis kustub või nõrgeneb. Ülejäänud osa, kus käiguvahe on veidi suurem - $n\lambda + x$ (kus $x < \frac{\lambda}{2}$), värvus nõrgeneb vaid vähesel määral. Selle tulemusel näib anisotroopne kristall meile ristnikolis kromaatiliseks, omandades värvuse sõltuvalt käiguvahest. Et mõista interferentsvärvuse seost käiguvahega Δ , toome ühe näite. Olgu käiguvahe $\Delta = 530 \mu$. See vastab umbes

järgmistele spektri eri osade lainepikkustele: $2/3\lambda$ punase valguse puhul, λ roheline valguse puhul, $3/2\lambda$ violetse valguse puhul. Selle näite puhul hävib spektri roheline osa. Interferentsvärvus tugevneb spektri äärmistes osades. Et punaseid ja kollaseid kiiri tajub silm paremini kui violetseid, näib kristall meile punasena. Paralleelsetes nikolites näeme punase täiendvärvust - rohelist.

Seega kristallide interferentsvärvust on võimalik jälgida vaid mõlema nikoli puhul (kas ristnikoli või paralleelse nikoli asendis). Analüsaatori vajadus on mõistetav: ta viib lainete võnkumise ühele võnkumispinnale, mis on interferentsvärvuse tekke eeltingimuseks. Raskemini mõistetav on aga polarisaatori osa. Oletame, et polarisaator puudub. Kristalli tungib loomulik valgus, mis jaguneb kaheks vastastikku ristises suunas võnkuvaks polariseeritud laineks, mis läbivad kristalli eri kiirusega ja omandavad seetõttu teatud käiguvahe. Analüsaatoris viiakse need võnkumised ühele pinnale. Näiliselt on kõik interferentsitingimused täidetud, kuid interferentsvärvusi me siiski ei näe. Põhjus seisneb selles, et loomuliku valguse võnkumissuund muutub pidevalt: ühe sekundi vältel vaheldub võnkumine loendamatu hulk kordi paralleelselt ja risti analüsaatori võnkepinnale, muutes samaaegselt ka interferentsitingimusi (näiteks vahelduvad interferentsvärvused, mida saame rist- ja paralleelsetes nikolites). Seetõttu näeme keskmist summaarset valgusefekti, mida silm tajub lihtsalt valge valgusena.

Interferentsvärvuse jälgimisel nii ristnikolites kui ka paralleelsetes nikolites võime veenda, et mikroskoobi laua pööramisel ei muutu interferentsvärvuse toon, küll aga värvuse intensiivsus. Viimane sõltub kristalli ja nikolite võnkumissuundade vahelisest nurgast. Kui see nurk on null, näib kristall kustununa, kõige heledam on kristall 45° nurga puhul. Sellest selgub, et mikroskoobi laua kesse pööramisel muutub ainult võnkumise amplituud, mitte aga käiguvahe.

Käiguvahe Δ pideval kasvamisel interferentsvärvus muutub kindlas korras. Interferentsvärvuste järjekorra (nn. skaala) jälgimiseks vaatleme mikroskoobis väikese kaksikmurdumisega kristallist valmistatud kiilutaolist plaati - kvartskiilu. Sellest selgub, et käiguvahe aeglasel kasvamisel ilmuvad eelkõige tumehallid, hallid, siis valged, kollased, punased, violetsed, sinised ja rohelised toonid, millele järgnevad uuesti kollased, punased, violetsed, sinised jne. värvused. Seega üksikud värvused teatud vahemaa (käiguvahe Δ) järel hakkavad korduma. Erandi moodustab siin skaala algus, kus esinevad hiljem puuduvad hall ja valge värvus. Tuginedes interferentsvärvuste kordumisele jagatakse skaala järkudesse. Intensiivsemad on interferentsvärvused 1. ja 2. järgus. Kõrgemate järkude suunas nad muutuvad pleekunumaks ja alates 4.-5. järgust saame eristada järgu piires vaid 2 osa - hele-sinakasrohekast ja kahvaturroosat. Veelgi kõrgema järgu suunas ilmuvad omapärased pärlmutrilise sillerdusega toonid, mis valguvad lõpuks kokku nn. kõrgemat järku valgeks interferentsvärvuseks. Viimast saab eristada I järgu valgest paralleelsete nikolite asendis: I järgu valgele vastab täiendvärvusena oranž-punakas värvus, kõrgemat järku valge aga paralleelsetes nikolites ei muutu.

Interferentsvärvuste skaala ristnikolites ja vastavad täiendvärvused paralleelsete nikolite puhul on esitatud tabelis I.

Interferentsnähtuste jälgimine on kristallooptilisel uurimisel oluline kaksikmurdumise suuruse hindamisel, samuti ka õhiku paksuse ligikaudsel määramisel.

Teadaoleva paksusega kristalliõhikute kaksikmurdumise suuruse määramiseks kasutatakse sageli spetsiaalset interferentsvärvuste skaala nomogrammi, mis on tuntud Michel-Levy tabelina.

Tabel I

Käiguvahe m ₁₆	Interf. värvus ristnikolites	Interf. värvus parall. nikolites	Järk
0	must	valge	
	hall	kollakasvalge	
222		helepruun	
	valge	punakasoranž	
272		punane	I
		purpurpunane	
	kollane	tumevioletne	
		sinine	
489		sinakasroheline	
	punane	roheline	
516			
571	violetne	kollakasroheline	
	sinine	kollane	
		oranž	
705		punakasoranž	
	roheline	punane	II
828		purpurpunane	
	kollane	violetne	
936		sinine	
	punane	roheline	
1040			
	violetne	kollakasroheline	
1136		kollane	
	sinine	oranž	
1201		punakasoranž	
	roheline	punane	III
1379		purpurpunane	
	kollane	violetne	
1468		sinine	
	punane	roheline	
1591	violetne	jne.	IV

15. Kaksikmurdmise dispersioon.

Selgitades interferentsvärvuse teket anisotroopsetes kristallides eeldasime, et käiguvahe Δ , mis tekib kahe erineva kiirusega laine levimisel kristallilõiguses ja sõltub nii kristallilõigu paksusest kui ka kaksikmurdmise suurusest antud lõiguses, on ühtlane suurus kõigi lainepikkuste puhul. Tegelikult see nii ei ole. Mitmetes anisotroopsetes mineraalides on käiguvahe erinevate lainepikkuste korral selgelt erinev. Seetõttu me ei näe täpselt neid interferentsvärvusi, mis peaks teatud käiguvahe andma. Sellist nähtust nimetatakse kaksikmurdmise dispersiooniks. Enamiku mineraalide puhul on kaksikmurdmise dispersioon niivõrd väike, et interferentsvärvuse erinevused ei ole märgatavad. Näiteks kvartsil on kaksikmurdmise suurus lainepikkuse 396 m μ puhul 0,0096, 795 m μ puhul aga 0,0089, seega lainepikkuse suurenedes kvartsi murdmisnäitaja (ja seega ka käiguvahe) väheneb. Mõnedel teistel mineraalidel on murdmisnäitaja suurus lainepikkusest vastupidises sõltuvuses.

Selge ja silmapaistev kaksikmurdmise dispersioon ilmneb näiteks meliliidil, apofülliidil, tsoisiidil, kloriidil, vesuviaanil, epidoodil jt. Nende mineraalide interferentsvärvus erineb normaalsest interferentsvärvusest tummi indigosinise, rohelise, violetse, sirelivärvi vm. tooni tõttu. Selliseid interferentsvärvusi nimetatakse anomaalseteks. Olgu märgitud, et kõrge kaksikmurdmise korral on anomaalse interferentsvärvuse jälgimine raskeandatud (epidoot). Suhteliselt madala kaksikmurdmisega mineraalides (kloriit, tsoisiit) on anomaalsed interferentsvärvused kõige ilmekamad, olles ühtlasi väärtuslikuks diagnostiliseks tunnuseks.

Ühe või teise mineraali kaksikmurdmise dispersiooni iseloomu (sõltuvust lainepikkusest) ei saa määrata inter-

ferentsvärvuse anomaalia põhjal. Seda tehakse monokromaatilist valgust kasutades.

II Mineraalide mikroskoopiline uurimine.

A. Polarisatsioonimikroskoop.

Polarisatsioonimikroskoop on optiline riist, mis võimaldab määrata läbipaistvaid kristalseid aineid nende optiliste omaduste põhjal. Kaasaegseid polarisatsioonimikroskoobe iseloomustab universaalsus, optiline täiuslikkus ja lihtne ning mugav käsitatavus. Polarisatsioonimikroskoop leiab kasutamist mitte ainult geoloogide, vaid ka keemikute, mitmesuguste tööstusharude (keraamika-, tsemendi-, silikaltsiidi- jm. tööstuse) tehnoloogide jt. poolt, kes uurivad kristalseid aineid. Läbipaistmatute ainete - maakide ja metallide uurimiseks on kohandatud spetsiaalsed mineragraafilised mikroskoobid. Kuid polarisatsioonimikroskoopi võib rakendada küllaltki edukalt ka läbipaistmatute ehk opaaksete ainete uurimisel, milleks kasutatakse peegelduvat valgust või erilist lisaseadet - opaakilluminaatorit.

Kaasajal leiavad meil kasutamist enamasti kodumaised polarisatsioonimikroskoobid МП-2, МП-3, МП-6, МП-7, МИН-4, МИН-5, МИН-8 jt.

1. Polarisatsioonimikroskoobi ehitus.

Et polarisatsioonimikroskoopide eri tüübid on oma koostisioonidetailidelt erinevad, tutvume polarisatsioonimikroskoobi ehituse ja koostisosadega üldjoontes, aluseks võtmata konkreetset tüüpi.

Polarisatsioonimikroskoobi peamisteks koostisosadeks on nagu bioloogilisel mikroskoobilgi statiiv, aluslaud, tuubus ja valgustussüsteem (joon. 25). Olulisemateks erinevusteks

võrreldes bioloogilise mikroskoobiga on aga polarisatsioonimikroskoobil pööratav aluslaud ning nikolid ja täiendavad läätsed, mis võimaldavad saada polariseeritud valgust nii ortoskoopiliseks kui ka konoskoopiliseks vaatluseks.

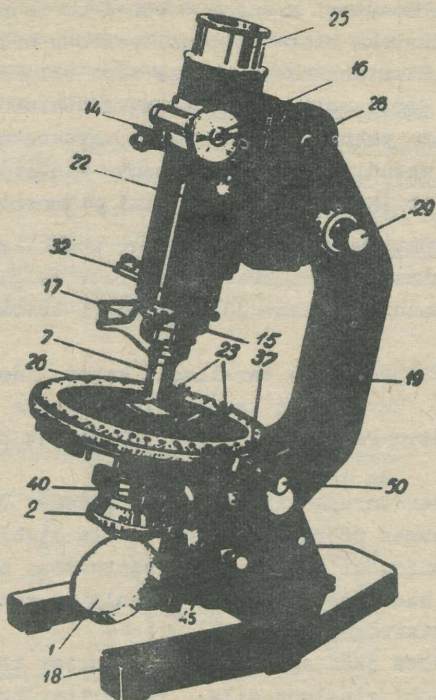
Mikroskoobi aluslaud ja tuubus on kinnitatud statiiville nii, et aluslaud on alati risti mikroskoobi optilisele (optiliste läätsede) teljele, vahemaa aga mikroskoobi laua ja objektiivi vahel muudetav kas tuubuse, aluslaua (МИН-8) või nende mõlema liigutamise. Nimetatud vahemaa muutmiseks on enamikul mikroskoopidel peale kremaljeenkruvi veel mikromeeterkruvi, mis võimaldab vahemaa eriti aeglast reguleerimist kui ka tema limbil olevate jaotuste järgi vahemaa muutmise mõõtmist.

Statiivi ülemist osa on võimalik koos aluslaua ja tuubusega kallutada (v.a. МИН-8, mille tuubuse ülemine osa on kallutatud, kuid aluslaud on alati horisontaalne), et anda mikroskoobile vaatlusteks kõige mugavam asend.

Pööratav aluslaud on varustatud limbi ja kahe nooniusega, mis võimaldavad mõõta pööramisnurka täpsusega kuni $0,1^\circ$. Laua vaba pöörlemise ärahoidmiseks saab teda kinnitada kinnituskruviga. Polarisatsioonimikroskoobi aluslauale on võimalik monteerida Fjodorovi lauakest. Sel puhul eraldatakse aluslauast ta keskmine, avaga ringikujuline plaat. Aluslauale on võimalik kinnitada ka preparaati hoidvaid klemme ja preparaadiliigutajat. Viimased võimaldavad liigutada preparaati aluslaua pinnal kahes ristises suunas ning fikseerida nooniusete abil objekti liikumist nendes suundades täpsusega kuni $0,1$ mm.

Preparaadiliigutajat kasutatakse õhikute (või preparaadi) süstemaatilisel läbivaatamisel mineraaliterakeste suuruse, kivimite mineraloogilise koostise, üksikute mineraalide suhtelise või arvulise hulga jne. määramisel.

Tuubus on torukujuline. Selle alumisele otsale kinnitatakse tavaliselt kinnituspitsate abil objektiiv, ülemise asetatakse okulaar. Nii objektiiv kui ka okulaar on vahetatavad.



Joon. 25. Polarisatsioonimikroskoop (MH-5).

Statiiv - 18, 19; tuubus - 22; kremaljeerkruvi - 28; mikromeeterkruvi - 29; aluslaud - 26; aluslaua noonius - 37; aluslaua kinnituskruvi - 50, preparaadi kinnitusklemmid - 23; peegel - 1; polarisaator - 2; Lasaulx läätse hoob - 40; objektiiv - 7; objektiivi kinnitusnõpitsad - 17; kompensatsiooniplaadike - 15; analüsaator - 32; Bertrand'i lääts - 14; Bertrand'i läätse kremaljeerkruvi - 16; okulaar - 25.

Vahetult objektiivil kohal on tuubuses diagonaalne (So-NW-suunaline) pilu, kuhu vajaduse korral saab lükata kompensatsiooniplaadikest. Sellest kõrgemal asub tuubuses laekana või siibrina sisselükatav analüsaator. Mõnedel mikro-
skoopidel on analüsaatori asend 90° võrra horisontaalsuunas muudetav (vaatlusteks rist- ja paralleelsete nikolite asendis). Tuubuse ülemises osas asetsevasse väljalõikesse on paigutatud nn. Bertrand'i lääts, mida kasutatakse konoskoopiliste vaatluste puhul. See lääts on varustatud diafragma ja tema asendit on võimalik muuta vastava kremaljeerkruvi abil ka vertikaalses suunas, piki mikroskoobi tuubust.

Valgustussüsteem koosneb peeglist, polarisaatorist, apertuurdiafragmast, apertuurkondensoriga, valgustkoondavast Lasaulx /Lazo/ läätsel ja kondensori töstemehhanismist.

Mikroskoobi peegel on tavaliselt kahepoolne - nõgusa ja tasase pinnaga. Tavaliselt kasutatakse lambiga valgustamisel nõguspeeglit. Peegli kallakust ja kõrgust on võimalik muuta.

Polarisaator on oma silindrilises pidemes tavaliselt pööratav, kusjuures pöördenurka võib mõõta limbilt.

Apertuurkondensori paigutatakse vastavasse pesasse valgustussüsteemi ülemises osas. Tavaliselt on apertuurkondensori all iirisdiafragma.

Lasaulx lääts jääb apertuurikondensoriga kõrgemale, vahetult mikroskoobi aluslauda alla. Ta lülitatakse valgustussüsteemi vastava hoovakese abil.

Kogu valgustussüsteemi ülemist osa on võimalik liigutada kondensori töstemehhanismi abil vastavast kruvikesest, mõnedel mikrokoopidel (MII-2, MII-3 jt.) aga alumise asendijuures lükata isegi kõrvale, mikroskoobi optilisest süsteemist välja.

2. Polarisatsioonimikroskoobi optiline iseloomustus.

Polarisatsioonimikroskoobi optilise süsteemi aluseks on lihtsa bioloogilise mikroskoobi optiline süsteem — objektiiiv-okulaar, millele on aga lisatud polarisaatorid ja mõned täiendavad kondensorid.

Objektiivid, mida kasutatakse polarisatsioonimikroskoobis on akromaatilised. Nende läätsed peavad olema tingimata isotroopsed, s.o. pingevaba optikaga. Kodumaiste mikroskoopide komplektis on tavaliselt järgmised objektiiivid, millele graveeritud arvud tähistavad vastavalt suurendust ja apertuuriarvu (tabel II).

T a b e l I I

Objektiiv	Suurendus	Fookuskau- gus mm	Töökau- gus mm	Apertuuri- arv
3 ^x 0,11	3 ^x	40	36	0,11
8 ^x 0,20	8 ^x	16,2	9,02	0,20
20 ^x 0,40	20 ^x	8,4	1,97	0,40
40 ^x 0,65	40 ^x	4,35	0,60	0,65
60 ^x 0,85	60 ^x	2,96	0,26	0,85

Suurenduse all mõistetakse lineaarset suurendust, apertuuri all aga nurka objektiiivi läbivate äärmiste kiirte vahel. See nurk on seda suurem, mida suurem on objektiiivi suurendus. Kui tähistada tsentraalse ja äärmise kiire vahelist nurka α , määratakse apertuuriarv valemi $A = N \cdot \sin \alpha$ järgi, kus N on selle keskkonna murdumisnäitaja, kust valgus objektiiivi tungis (õhk või immersiooniõli). Seega tavaliste vaatluste puhul, kus me ei kasuta immersiooniõli, $A < 1$. Suurte suurenduste korral (immersiooniobjektiivid), kus uuritava objekti ja objektiiivi vahel kasutatakse immersiooniõli, murdumisnäitajaga 1,515, on $A > 1$.

Okulaare on polarisatsioonimikroskoobi komplektis tavaliselt 3-4. Need on erineva fookuskauguse ja vastavalt ka erineva suurendusega. Okulaari suurendus on näidatud okulaaril (näit. 5^x , 8^x , 10^x jne.). Objektiiv ja okulaari suurenduse korrutis annab mikroskoobi suurenduse.

Mõned okulaarid on varustatud niitristiga (joontega klaasplaat), kus üks niitrist on orienteeritud mikroskoobi sümmeetriapinna suunas, teine sellele risti. Nende suundadega langevad kokku võnkumispinnad polarisaatoris või analüsaatoris.

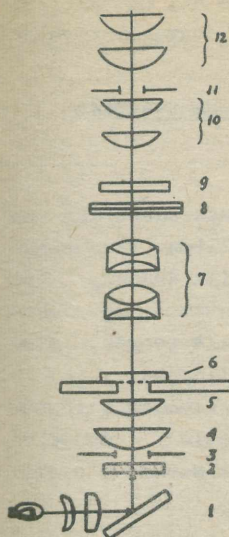
Ühele okulaaridest on niitristplaadikese asemel sisse asetatud okulaar-mikromeeterplaadike, millele on kantud mõõtskaala, (taval. 10 mm = 100 jaotust) või ruudukujuline (10 x 10 mm = 20 x 20 jaotust) mõõtvõrk. Okulaarmikromeeter võimaldab hõlpsasti määrata uuritavate terakeste mõõtmeid või pindala (p. II, F).

3. Kiirte käik polarisatsioonimikroskoobis.

Valgus, mis tuleb valgusallikast, peegeldatakse peeglit (joon. 26, 1) mikroskoobi optilisse süsteemi. Siin läbib valgus kõigepealt alumise nikoli-analüsaatori (2) ja selle kohal esineva kondensorlääts (4). Viimane on mikroskoopidel tavaliselt vahetatav. Kõige sagedamini kasutatakse väikse apertuuriga (0,3) kondensorit, mis muudab enam-vähem paralleelsete valguskiirte kimbu veidi koonduvaks (joon. 27, a), intensiivistades seega objekti valgustatust. Kondensori juures olev iirisdiaphragma (joon. 26, 3) võimaldab varieerida läbivate valguskiirte kallakusnurka.

Mikroskoobi aluslaua all paigutub veel teine, suure apertuuriga (0,9) kondensor, nn. Lasaulx lääts (5), mida kasutatakse ainult kas eriti suure suurenduse korral või kooskoopilisel vaatlusel koonduva kiirtevihu saamisel (joon. 27, b).

Märgitud kondensorid läbinud valguskiired tungivad

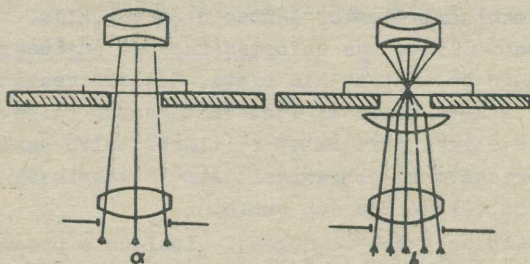


Joon. 26. Polariseerimis-
sioonimikroskoobi
optiline süsteem.

kus Bertrandi lääts puudub, teostatakse konoskoopilist vaatlust Lasaulx läätsuga ilma okulaarita. Konoskoopilistel vaatlustel kasutatakse suure suurendusega objektiivi.

järgnevalt läbi uuritava kristalli-
lõike (6) mikroskoobi objektiivi (7).
Objektiiv annab ülemisel fokaalpin-
nal objektist tõeselise, suurendatud
ja ümberpööratud kujutise. Viimast
vaadeldakse okulaariga (12), mis märke-
gitud kujutist omakorda suurendab
luubi põhimõttel.

Vahetult objektiivi kohal tuu-
buses olevasse pilusse on võimalik
lükata kompensatsiooniplaadikest
(8). Viimase asendist kõrgemale
jääb analüsaator (9), mida võime
soovi korral mikroskoobi optilisest
süsteemist välja lükata. Väljalüka-
tav on samuti veelgi kõrgemale jääv
Bertrandi lääts (10) koos tema kohal
oleva tsentreeritava irisdiaphragma-
ga (11). Bertrandi lääts leiab rak-
endamist tavaliselt samaaegselt La-
saulx läätsuga konoskoopilistel vaat-
lustel. Vanematel mikroskoopidel,



Joon. 27. Valguskiirte käik kristalli ortoskoopilisel (a) ja konoskoopilisel (b) vaatlusel.

Ortoskoopilisel vaatlusel lülitatakse nii Lasaulx kui ka Bertrandi lääts mikroskoobi optilisest süsteemist välja.

4. Polarisatsioonimikroskoobi töökorda seadmine ja kontrollimine.

Asudes töötama võõra polarisatsioonimikroskoobiga on vaja kõigepealt selle korrasolekut kontrollida. Veendutakse, et ei vaju vabalt oma raskuse mõjul alla tuubus, et mikroskoobi aluslaua pöörlemine pole takistatud ega eks-tsentriline, et liiguks ja pöörduks sujuvalt peegel, sisse- ja väljalülitatavad kondensorid, nikolid jne.

Pärast sellist tutvunemist kinnitame tuubusele objektiivi (väike suurendus), anname mikroskoobile statiivi kallutamiseks töötamiseks mugava asendi ja seame peegli õigesse valgustusasendisse.

Peegli maksimaalse valgustusasendi leidmiseks avame diafragmad, lükkame välja analüsaatori ja Bertrandi lääts. Õige valgustuse kontrollimiseks võib sisse lükata Bertrandi lääts: peegli õige asendi puhul näeme valgustusallika (lambi) kujutist vaatevälja keskel. Nüüd võime optimaalse valgustuse saamiseks kasutada diafragmeerimist.

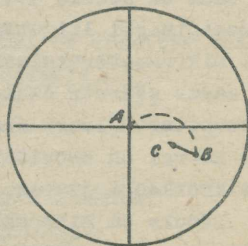
Järgnevalt kontrollime, kas on okulaaris olev niitrist selgelt nähtav. Niitristi teravustamiseks nihutame või pöörame okulaari ülemist lääts üles või alla.

Nüüd kontrollime, kas polarisaatori ja analüsaatori võnketasapinnad on vastastikku risti. Selleks veendume, kas analüsaatori sisselükkamisel vaateväli muutub täiesti tumedaks. Kui täielikku pimenemist ei ilmne, tuleb analüsaatori (või polarisaatori) pööramisel leida maksimaalne kustumismoment ja fikseerida see asend.

Järgnevalt asetame mikroskoobi aluslauale preparaadi ja fokuseerime mikroskoobi (s.o: asetame objektiivi objektist töökaugusele). Väikese suurendusega objektiivide korral (3^x või 8^x) liigutame tuubuse kremaljeerkruvi abil pre-

paraadist umbes 1 cm kauguseni, jälgides vastavat vahemaad kõrvalt. Kujutuse täpsem reguleerimine toimub juba mikroskoopi vaadates. Suuremate suurendustega objektiivide fokuseerimisel lastakse objektiiv ettevaatlikult peaaegu kuni kokkupuutumiseni preparaadiklaasiga, täpne fokuseerimine toimub kujutuse järgi ainult objektiivi tõstmisega.

Fokuseerimisele järgneb objektiivi tsentreerimine. Tsentreeritud objektiivi korral niitristi keskpunktiga kokkulangemisele viidud selgesti jälgitav punkt preparaadis jääb mikroskoobi aluslause pööramisele paigale, tsentreerimata objektiivi korral aga joonistab vaateväljal teatud ringi või kaob koguni vaateväljast. Enne objektiivi tsentreerimisele asumist on soovitatav veenduda, kas ekstsentrilisus ei ole tingitud objektiivi ebaõigest kinnitusest pesas. Tsentreerimiseks jälgime kõigepealt, millise poolringi moodustab niitristi keskele (A) asetatud punkti kujutus mikroskoobi aluslause pööramisele 180° võrra. Olgu näiteks punkt nüüd asukohas B (joon. 28). Kinnitame objektiivi tsentreerimiskruvikestele võtmed ja liigutame viimastest objektiivi asendit pesas selliselt, et punkt nihkuks asukohast B tema poolt läbikäidud ringjoone tsentrisse C (ehk pool teed asukohast B niitristi keskpunkti C). Nihutades preparaati asetame jälgitava punkti jälle niitristi keskele, kontrollime tsentreeritust ja kui vaja, kordame sama operatsiooni. Küllaldase vilumuse puhul õnnestub tsentreerimine tavaliselt ühe-kahe võttega.



Joon. 28.

Fokuseeritud ja tsentreeritud mikroskoobiga saame järgnevalt kontrollida, kas niitristi niidid on vastastikku ristses asendis. Selleks valime preparaadil mingi sirge lõike (katteklasi serv, sirge lõhenevusjoon mineraalis vm.) ja

viime selle kattumisele ühe niitristi niidiga. Märgime üles aluslaua limbi lugemi. Järgnevalt pöörates aluslaua viime selle sirglõigu kokkulangemisele teise niidiga ja võtame libilt uue lugemi. Niitristi niitide ristise asendi korral peab lugemite vahe olema 90° . Kui ilmneb erinevus, on vaja lasta töökojas viga kõrvaldada.

Väga oluline on ka kontrollida niitristi niitide kokkulangemist valguse võnkumissuundadega nikolites. Selleks valitakse optiliselt üheteljelise kristalli korrapärase piirjoontega lõik, millel on teatavasti otsakustumine. Viies kristallilõike piirjoone (tahu) kokkulangemisele niitristi ühe niidiga, kontrollime, kas see moment on ristnikoli asendis maksimaalse pimenemise momendiks. Kui ilmneb erinevus, on võimalik seda viga kõrvaldada, kui analüsaatori asend on mikroskoobis muudetav.

Järgnevalt gradueerime mikromeeterokulaari, s.o. määrame selle mõõteskaala jaotuse väärtuse ühe või teise objektiivi kasutamise korral. Selleks asetame mikroskoobi aluslauale objektmikromeetri plaadikese, mille tsentraalses osas on skaala - 1 mm jagatud 100 osaks. Mikroskoobi fokuseerimisel liigutame objektmikromeetri skaala kattumiseni mikromeeterokulaari skaalaga. Vastava võrdluse alusel saame määrata okulaari ühe jaotuse väärtuse mm-tes. Mikromeeterokulaari skaala jaotuse väärtused eri objektiivide korral on soovitav kanda tabelisse, mida säilitatakse mikroskoobi juures.

Lõpuks on mikroskoobiga töötamisel oluline teada, millises suunas võngub antud mikroskoobis polarisaatori läbinud valgus, s.o. kumma niidiga see langeb kokku. Seda teeme kindlaks turmaliiniplaadikese või okulaarile pandava polarisaatori abil, milles valguse võnkumissuund on teada.

Polarisaatori võnkumissuund on oluline sama mikroskoobi kasutamise puhul meeles pidada, sest sellest sõltuvad mõned mineraalide kristallooptilised omadused (pleokroismi skeem).

Polarisatsioonimikroskoobi kontrollimine ülal esitatud korras on vajalik juhul, kui asume töötama meile võõra mikroskoobiga. Sama mikroskoobiga pideval töötamisel ja selle korralikul hooldamisel ei teki tavaliselt kordavaks kontrollimiseks või parandusteks vajadust.

Polarisatsioonimikroskoobiga pikemaajaline töötamine mõjub silmadele väsitavalt. Seepärast on eriti oluline pidada silmas õiget töörežiimi ja harjutada end sellest kinni pidama juba meetodi õppimisel. Selleks tasub silmas pidada järgmisi juhendeid:

1. Mikroskoobiga töötamisel valida selline laua asend ja valgustus, mis tagab mugava istumis- ja vaatlusasendi ning ühtlase ja optimaalse vaatevälja valgustatuse.

2. Vaatlusi teha konkreetset juhul kõige sobivama suuredusega, vahetades vajaduse korral okulaari ja objektiivi.

3. Oluline on mikroskoobi õige fokuseerimine lõpmatusse, mis ei sunni pingutama ega väsita silma. Selleks on fokuseerimisel soovitatav vaadata mingile kaugemale esemele, et siis uuesti täpsustada mikromeeterkruviga fokuseeritust.

4. On vaja õppida vaatlema teist silma sulgemata. Vastasel korral kontsentreerub pinge ainult ühele silmale ja ilmneb kiiresti selle ülekoormamine.

5. Silmade ühtlase tundlikkuse korral on soovitatav vaadelda vahelduvalt kord ühe, kord teise silmaga.

5. Mineraalide optiliste omaduste uurimine polarisatsioonimikroskoobis.

Kivimite ja mineraalide mikroskoopiliseks uurimiseks valmistatakse neist tavaliselt õhikud, mis kleebitakse kanada palsamiga* alusklaasile (preparaadiklaasile), pealt aga

* Kanada palsam on väliselt kampsolitaoline eeterõlidevaba vaik, mis kuumutamisel kaotab vee ja kõvastub. Praegu kasutatakse sageli ka siberi nulu vaiku nn. nulupalsamit. Palsamite murdumisnäitaja on 1,53-1,54.

kaetakse sama palsamiga ja õhukese kattedklaasiga. Õhik asetatakse mikroskoobi aluslauale tingimata nii, et kattedklaas jääb ülespoole.

Petrograafiliste õhikute mikroskoopilisel uurimisel on soovitatav alati kinni pidada kindlast vaatluste järjekorrast. Sellega hoiame kokku aega ja vältime meetodi õppimise perioodil mõnede omaduste juhuslikku väljajätmist kirjeldusest.

Kirjeldamisele asumisel on oluline saada esmalt ülevaade kivimit moodustavate mineraalide mitmekesisusest ja nende suhtelisest hulgast. Selleks kasutame alguses väikese suurendusega objektiivi, mis võimaldab vaatevälja haarata korraga kui mitte kogu õhiku, siis vähemalt suure osa sellest. Kivimit moodustavate mineraalide esialgseks määramiseks vaatleme õhikut nii analüsaatorita kui ka ristnikolis.

Pärast üldise ettekujutuse saamist õhikust asume üksikute mineraalide detailsemale uurimisele järgmises järjekorras:

I Ortoskoopilised vaatlused (keskmise suurendusega).

A. Vaatlused analüsaatorita:

Mineraalide kuju, tahkude vahelised nurgad jne.
Mineraaliterakeste mōõtmed:
Värvus, pleokroism.
Murdumisnäitaja.
Lõhenevus, lõhenevusnurgad.
Suletised.
Õhiku ligikaudne paksus.
Opaaksete mineraalide vaatlused peegelduvas valguses.

B. Vaatlused ristnikolites:

Indikaatriksi telgede määramine kristallilõigis.
Mineraali pikenduse märgi määramine.
Kaksikmurdumise suuruse määramine.
Kustumisnurkade määramine.

Kaksikute uurimine.
Optilised anomaaliad.

II Konoskoopilised vaatlused (suure suurendusega).

Optiline teljelisus.

Mineraalide optiline märk.

Optiliste telgede vaheline nurk.

Optiliste telgede ja indikaatriksi telgede dispersioon.

Kristallilõike optiline orientatsioon (indikaatriksi asend kristallis).

Ülalesitatud vaatluste järjekorrast lähtume ka vastava uurimismetoodika järgnevas esituses.

B. Ortoskoopilised vaatlused analüsaatorita.

Mikroskoopilistel vaatlustel ilmnevad mineraalide mõned omadused vaid ühe nikoliga, s.o. analüsaatorit sisse lükkamata. Sellisel juhul kasutame küll polariseeritud valgust, kuid mineraalidel ei teki veel interferentsvärvusi. Mineraalid on jälgitavad loomulikus, neile optiliselt iseloomulikes värvides, nende pind kajastab murdumisnäitaja suhtelist suurust, lõhenevuslõhed ilmnevad selgelt jne.

Alljärgnevalt käsitlemegi eelkõige mineraalide neid tunnuseid, mida õpitakse tundma analüsaatorita.

6. Kristallide värvus. Pleokroism.

Mineraalide värvus läbivas valguses on üheks olulisemaks diagnostiliseks tunnuseks mikroskoopilistel vaatlustel. Värvus läbivas valguses sõltub eri lainepikkusega valguskiirte erinevast neeldumisest kristallis. Seega on värvus valguse neeldumise ehk absorptsiooni avaldusvormiks. Täiesti läbipaistmatud ehk opaaksed mineraalid neelavad kogu nähtava valguse kiired, värvitud ja läbipaistvad mineraalid

neelavad kiiri niivõrd vähesel määral, et silm ei eralda läbinud valgust loomulikust valgusest. Värvilistes mineraalides neelab kristall kõige vähem neid valguskiiri, mis annavad mineraalile värvuse. Näiteks mineraali värvus on roheline juhul, kui ta nähtava spektri kiirtest absorbeerib kõige vähem rohelisi kiiri.

Amorfsetes ainetes ja kuubilise süngoonia kristallides absorptsioon ei sõltu polariseeritud valguse võnkumissuunast, seega ka nende värvus ei sõltu suunast. Absorptsiooninähtused alluvad siin kerakujulise optilise indikaatriksi seadusele.

Anisotroopsetes kristallides alluvad absorptsiooninähtused samuti nagu teisedki kristallooptilised nähtused ellipsoidaalse optilise indikaatriksi seadusele - optiliselt üheteljeliste kristallide juures pöördellipsoidse indikaatriksi seadusele, optiliselt kaheteljeliste kristallide juures aga 3-teljelise ellipsoidi seadusele.

Valguse muutumist sõltuvalt suunast anisotroopsetes kristallides nimetatakse pleokroismiks. Pleokroism võib avalduda kas sama värvitooni intensiivsuse (tumeduse) muutusena või koguni värvuse vaheldusena. Viimasel juhul neeldub eri suundades erinev spektri osa.

Kui võrd pleokroism on seotud kindlate suundadega, on pleokroismi jälgimine ja uurimine võimalik vaid polariseeritud (s.o. polarisaatori läbinud) valguses.

Optiliselt üheteljelistes kristallides on absorptsiooni erinevused kõige selgemad optilise telje pinnal ehk indikaatriksi pealõigul. Siin saame esile tõsta kahte olulist suunda - optilise telje suunda ja sellele ristist suunda, mis absorptsioonilt maksimaalselt teineteisest erinevad. Kõikides teistes suundades on absorptsioon nende suhtes vahepealne. Seetõttu võib optiliselt üheteljeliste kristallide puhul kõnelda dikroismist.

Optiliselt üheteljelistes kristallides määrataksegi pleokroism optilise teljega paralleelses kristallilõikes.

Selleks on vaja aga teada polarisaatori läbinud valguse võnkumissuunda ja võnkumissuundi (No ja Ne) kristallilõikes. Viimased määratakse ristnikolites, mistõttu seda küsimust käsitleme lähemalt hiljem. Momendil, mil polarisaatori võnkepind langeb kokku võnkesuunaga No kristallis, määratakse mineraali värvus No suunas. Asendis, kus polarisaatori läbinud valguse võnkumine langeb kokku aga võnkumissuunaga Ne kristallis (90° võrra mikroskoobi aluslaud eelmise asendi suhtes pööratud), kirjeldame värvust Ne suunas. Näiteks võivad esineda turmaliinil, mis on tuntud tugevasti pleokroeeruva mineraalina, järgmised värvused:

No - kollakaspruun	tumepruun	sinine
	või	või
Ne - oliivroheline	helekollane	roosa jne.

Seejuures on turmaliinil alati No suunas värvus tumedam kui Ne suunas. Vastavat absorptsiooni märgitakse vormeliga $No > Ne$ ja seda tuntakse turmaliini absorptsiooni skeemina. Et turmaliin on optiliselt negatiivne ja No on suuremaks murdumisnäitajaks, kasutatakse mõnikord ülalnäidatud skeemi asemel tähistust $Ng > Np$ (või $Nm > Np$). Olgu märgitud, et turmaliini pleokroismi ehk absorptsiooni skeemi iseloomustab mineraali kõige tumedam värvus asendis, kus ta pikitelg (optiline telg) on risti polarisaatori võnkesuunaga.

Optiliselt kaheteljelistes kristallides on pleokroismi iseloomustamisel oluline arvestada kolme erinevat suunda - optilise indikaatriksi telgi Ng, Nm ja Np. Seetõttu nimetatakse kaheteljeliste kristallide pleokroismi ka trikroismiks.

Tavalise mikroskoopilise vaatluse puhul ei ole võimalik kõigis märgitud suundades värvust iseloomustada ühe mineraaliterakese järgi, vaid selleks valitakse sobivad terakesed (indikaatriksi pealõiked). Nii saame näiteks tavalisel küünekivil:

- Ng - roheline
- Nm - pruunikasroheline
- Np - helekollane.

Absorbtsiooni skeem on $Ng \supseteq Nm > Np$.

Leelisküünekiividel on aga absorbtsiooni skeem $Ng > Nm > Np$. Näiteks glaukofaanil

Ng - sinine

Nm - punakasvioletne

Np - helekollane või -roheline.

Biotiit, mis on optiliselt väga lähedane üheteljelisele kristallile, iseloomustub absorbtsiooni skeemiga $Ng = Nm > Np$, kusjuures Ng ja Nm - tumepruun | roheline
või

Np - helekollane helerohe-
või hele- line
pruun

Enamikul kaheteljelistel mineraalidel on absorbtsiooni skeem $Ng > Nm > Np$, mistõttu sellist skeemi nimetatakse normaalseks. Viimasele vastandatakse vastupidine absorbtsiooniskeem $Ng < Nm < Np$ (näiteks ägiriinil).

Sageli räägitakse mineraalide pleokroismi iseloomustamisel veel turmaliini ja biotiidi absorbtsiooniskeemist. Need mõisted ei kattu eelmistega, vaid näitavad, milline seos valitseb mineraali absorbtsiooni ja väljavenitatud suuna ehk pikenduse vahel. Turmaliin, nagu juba märgitud, on kõige tumedam asendis, kus valguse võnkumine on pikendusele risti. Biotiit aga vastupidi saavutab kõige tumedama värvuse just asendis, kui valguse võnkumine toimub pikenduse suunas.

Seoses pleokroismi iseloomustamisega tuleb pöörata tähelepanu ka pleokroistlikele kojakestele. Viimased kujutavad endast teatud suletiste ümber jälgitavaid intensiivsemalt värvunud pesakesi, mis pleokroeeruvad ilmselt tugevamini kui sama mineraali ülejäänud osad. Pleokroistlikud kojakesed on iseloomulikud biotiidile, kloriidile ja turmaliinile, harvem esinevad nad pürokseenides ja amfiboolides. Mõnikord ilmnevad nad aga ka mineraalides, millele pole pleokroism üldse iseloomulik (näit. kordieriit). Suletis-

mineraalideks, mille ümber pleokroistlikud kojakesed nähtuvad, on tavaliselt monatsiit, tsirkoon, ortsiit jt. Pleokroistlike kojakeste tõenäoliseks tekkepõhjuseks loetakse märgitud mineraalide radioaktiivset toimet.

7. Mineraalide murdumisnäitaja hindamine.

Mineraalide murdumisnäitaja määratakse täpselt refraktomeetri abil või enam-vähem täpselt immersioonimeetodil. Õhikus on võimalik mineraali murdumisnäitajat mikroskoopilisel uurimisel määrata vaid ligikaudselt. Murdumisnäitaja ligikaudne määramine ehk hindamine tugineb mineraali pinna jälgimisele.

Õhikus ei ole mineraalide pinnad peegelpindselt poleeritud, vaid nendel esinevad lihvimisjäljed - süvendid ja kühmud. Kui mineraali murdumisnäitaja on võrdne kanada palsami murdumisnäitajaga ($N = 1,537$), milles õhik esineb, läbib valgus palsami ja mineraali kui optiliselt ühtse keskkonna, muutmata suunda mineraali piiripinnal. Sellisel juhul me mineraali pinda peaaegu ei märka, see on sile. Kui mineraali ja palsami murdumisnäitajad erinevad aga tunduvalt, peegeldub suur osa valguskiirtest mineraali pinna ebatajasustel või teeb isegi läbi täieliku sisepeegelduse. Mineraali piiripind saab nähtavaks seda teravamini, mida suu-rem on vastavate murdumisnäitajate erinevus ja mida enam on läbivad kiired omavahel paralleelsed. Viimase tingimuse loomiseks antakse mineraalide murdumisnäitaja hindamisel polarisaatorile võimalikult madalam asend ja diafragmeeritakse kondensator. Mõnikord kasutatakse paralleelsete kiirte saamiseks nn. külvalgustamist, milleks kaetakse polarisaator alt pooleldi ekraaniga. Kõigil neil juhtudel muutub vaateväli küll tumedamaks, kuid seevastu ilmneb kontrastsemalt mineraali pind.

Mineraali ja palsami murdumisnäitaja väga suure erinevuse korral saame krobeline, konarliku pinna, mida nimetatakse šagräänpinnaks. Võrreldes erineva murdumisnäitajaga mineraale õhikus omavahel, näeme, et suhteliselt suurema

murdmisnäitajaga mineraalid on ümbritsetud helelta vöökeseqa - Becke joonega, mis tekib mineraalide kokkupuute-piiril. Ühtlasi tunduvad suurema murdmisnäitajaga mine-raalide terakesed nagu teiste suhtes kõrgemaletöstatuna -neil on positiivne pind.

Teatud kogemuste puhul on võimalik seega pinna ja rel-jeefi põhjal otsustada, kas mineraali murdmisnäitaja on suurem või väiksem kanada palsami omast ja kuivörd ta sel-lest erineb.

Reljeefi ja pinna kontrastsuse põhjal võib mineraale eraldada teatud rühmadesse, mille piires on mineraalidel lähedased murdmisnäitajad.

Näiteks jagas V. Lodotšnikov mineraalid reljeefi ja piirjoonte teravuse alusel järgmistesse rühmadesse:

I Reljeef ja piirjooned mittemärgatavad või peaaegu mittemärgatavad. Pind ei erine kanada palsami pinnast. $N = 1,53-1,56$. Siia kuulub enamik plagioklasse, kvarts, nefeliin, kordieriit jt.

II Reljeef ja piirjooned nõrgalt nähtavad, pind veidi konarlik. Seda rühma võib jagada omakorda kaheks alarüh-maks:

a) $N = 1,48-1,52$. Reljeef negatiivne. Siia kuuluvad vulkaaniline klaas, Na- ja K-päevakivid, tseoliidid ja feldšpatoidid (v.a. nefeliin).

b) $N = 1,57-1,60$. Reljeef positiivne. Sellised on alu-selised plagioklassid, seritsiit, muskoviit, talk jt.

III Reljeef ja piirjooned selged. Esineb šagrään-pind. Ka siin on kaks alarühma:

a) $N = 1,41-1,47$. Reljeef negatiivne. Selles alarüh-mas esinevad opaal, fluoriit jt.

b) $N = 1,61-1,65$. Reljeef positiivne. Siia kuuluvad apatiit, topaas, andalusiit jt.

IV Reljeef ja piirjooned teravad. Šagrään-pind on tugev. Reljeef positiivne. $N = 1,66-1,78$. Selles rühmas nimetame oliiviini, pürokseene, epidooti, granaate, vesuviaani jt.

V Reljeef ja šagrään-pind erakordselt terav, piirjooned

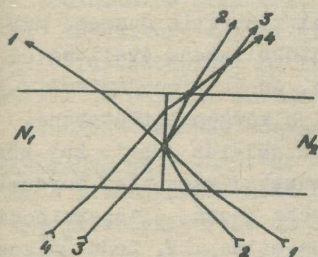
tumedad. Reljeef positiivne. N 1,78. Selle rühma näiteks on tirkoon, rutiil, titaniit, anataas jt.

Mineraalide murdumisnäitaja suurusjärgu hindamine vastavalt esiletõstetud rühmadele nõuab teatud töökogemusi ja silma harjumist.

Kahe kõrvutesineva mineraali murdumisnäitaja suhteliseks hindamiseks õhikus kasutatakse sageli Becke meetodit. Viimane tugineb Becke joone liikumisele mikroskoobi tuubuse liigutamisel. Becke joon, nagu juba märgitud, ilmneb alati erinevate murdumisnäitajatega mineraalide, samuti ka mineraali ja kanada palsami piiripinnal. Ta on tingitud sellest, et osa kiiri, mis langevad nurga all kahe mineraaliterakese piiripinnale üleminekul suurema murdumisnäitajaga mineraalist väiksema murdumisnäitajaga mineraali, teeb

läbi täieliku sisepeegelduse (joon. 29). Seetõttu ääristab heledamalt valgustatud vöökene suhteliselt suurema murdumisnäitajaga mineraali kontuuri.

Mida kõrgemal mineraalis või selle kohal me jälgime murdunud (kiired 1, 3, 4) ja peegeldunud (kiir 2) kiirte ristumist (Becke joon!), seda enam nihkub see suurema mineraali suunas. Siit tulenebki praktiliseks tööks vajalik



Joon. 29. Becke joone teke.

juhü: Tuubuse tõstmisel nihkub Becke joon suurema murdumisnäitajaga keskkonna suunas.

Becke joone jälgimisel on soovitatav valida puhtad kokku-
puutepinnad ja vastavaid vaatlusi teha vaatevälja keskel. Ka annab Becke meetod paremaid tulemusi suurema suurenduse ja ava diafragmeerimise korral.

Mineraalide suure murdumisnäitaja erinevuse korral saame laia Becke joone, mistõttu tuubuse tõstmisel suurema mur-

dumisinäitajaga mineraal muutub tunduvalt heledamaks kui kõrvalesinev väiksema murdumisinäitajaga mineraal.

Becke meetod leiab kasutamist eriti plagioklasside koostise ligikaudsel määramisel, kusjuures võrreldakse nende murdumisinäitajat kvartsi murdumisinäitajaga.

Becke joone olemuse selgitamisel lähtusime nagu varemgi, lihtsalt eeldusest, et valguse murdumisel ja peegeldumisel käituvad kõik valguskiired sõltumata nende lainepikkusest, ühtlaselt. Tegelikult murduvad ja peegelduvad aga erineva lainepikkusega valguskiired üleminekul ühest keskkonnast teise erinevalt (punased kiired murduvad vähem kui violetsed). Seda nähtust nimetatakse murdumisinäitajate dispersiooniks. Viimane põhjustab läbivas valguses kahe erineva murdumisinäitajaga ning läbipaistva, värvitu mineraali piiripinnal teatud kromaatilise efekti, nn. dispersiooni efekti (ka Lodotšnikovi efekt). See seisneb selles, et väiksema murdumisinäitajaga mineraal kontaktis suurema murdumisinäitajaga mineraaliga näib kuld kollasena (valitsevad punased spektriosad) ja madalamana, suurema murdumisinäitajaga mineraal aga sinakasrohelisena ja kõrgemaletõstetuna.

Dispersiooniefekti on võimalik jälgida juhul, kui kõrvutised läbipaistvad mineraalid erinevad väga vähe murdumisinäitajatelt ning ei anna selget Becke joont. Dispersiooniefekti nägemiseks on vaja harjutada silma. V. Lodotšnikov, kes sellele efektile esimesena tähelepanu juhtis, märgib selle edukat praktilist kasutatavust K-päevakivi ja kvartsi, ortoklassi ja albiidi, kvartsi ja palsami, kvartsi ja aluseliste plagioklasside jt. eristamisel.

Murdumisinäitaja hindamisel mineraalide reljeefi, piirjoonte, Becke joone liikumise kui ka dispersiooniefekti alusel ei tohi aga unustada, et anisotroopsete mineraalide murdumisinäitaja sõltub suunast. Ühes kristallilõikes me saame määrata praktiliselt kahte murdumisinäitaja suurust, mis vastavad reljeefile, Becke joonele jne. kahes üksteisele järgnevas kustumisasendis ristnoolite puhul. Seetõttu anisotroopsetes mineraalides on vaja mur-

dumisinäitajaid hinnata kahes kristalliasendis, kus võnkumis- pind kristallis langeb kokku polarisaatori läbinud valguse võnkumispinnaga.

Suure kaksikmurdumisega mineraalide murdumisinäitajate vahe avaldub reljeefi muutustena, eriti kui ühes suunas murdumisinäitaja on lähedane kanada palsami murdumisinäitajale. Tüüpilisteks näideteks selle kohta on mõned karbonaadid - kaitsiit, dolomiit ja magnesiit. Viimastes võib sageli tähele panna nähtust, et mikroskoobi aluslauda pöörates nende pind on kord sile, peaaegu mittemärgatav, kord aga väga tugeva reljeefi ja šagräänipinnaga. Ühtlasi kaasneb sellele valguse intensiivsuse muutumine: sile pind näib heledana, šagräänipind aga tumedamana. Seetõttu tuletab see meelde pleokroismi ja võib viia ekslikule arvamisele, nagu see oleks põhjustatud erinevast absorptsioonist erinevates suundades. Tegelikult aga ei etenda siin osa absorptsiooninähtused, vaid, vastupidi, on tegemist valguskiirte hajumisega kristalli ja palsami murdumisinäitajate suure erinevuse tõttu. Vastavat nähtust soovitas J. Fjodorov nimetada pseudoabsorptsiooniks. Olgu aga märgitud, et pseudoabsorptsioon ei ilmne mikroskoopiliselt peenagregaatse mineraali korral, kus iga mineraaliterake on orienteeritud erinevalt ja agregaat tervikuna annab keskmise, tasandatud efekti. Seetõttu võime pseudoabsorptsiooni jälgida küll jämeda- või keskmise-kristalliliste lubjakivide õhikutes, mitte aga afaniitsete lubjakivide puhul.

8. Mineraalide lõhenevus.

Mineraalide makroskoopiliselt nähtav lõhenevus väljendub mikroskoopilises pildis väga ilmekalt lõhenevuslõhedena. Viimased süvenevad tänu õhiku valmistamisel valitsenud

pingetele ja on mikroskoobis seda selgemalt nähtavad, mida enam erineb mineraali murdumisnäitaja palsami murdumisnäitajast. Mida täiuslikum on mineraali lõhenevus, seda enam tekib temas ühtlasi korrapäraseid ja selgeid lõhesid.

Lõhenevuslõhedest tuleb eraldada eraldislõhesid, mis läbivad mineraali pidevalt ja esinedes tihedalt üksteise kõrval annavad mineraalile nagu kiulise ehituse. Eraldislõhed on väga iseloomulikuks tunnuseks diallaagile, kus nad esinevad (100), harvemini (101) suunas.

Lõhenevuslõhed on mineraalide mikroskoopilisel uurimisel üheks olulisemaks praktiliselt kasutatavaks kristallograafiliseks suunaks. Nad on mineraalide määramisel nii otseks diagnostiliseks tunnuseks kui ka orientiiriks, millele tuginedes saame määrata mineraali optilisi omadusi (indikaatriksi asend kristallis). Näiteks biotiidil on lõhenevus võimalik ainult ühel pinnal ja lõhenevuslõhede suunas on orienteeritud alati Ng, kuna Np asetseb sellele perpendikulaarselt.

Lõhenevus, nagu teada, võib olla:

1. pinakoidaalne, kui lõhenevuspind on paralleelne kahele kristallograafilisele teljele (näit. biotiidi puhul lõhenevus (001) järgi);
2. prismaline, kui lõhenevuspind on paralleelne vaid ühele kristallograafilisele teljele ja lõikab teisi (näit. lõhenevus (110) järgi pürokseenidel ja amfiboolidel);
3. kallutatud, kui lõhenevuspind lõikab kõiki kolme kristallograafilist telge (näiteks kaltsiidi lõhenevus romboedri (110) järgi, harva lõhenevus püramiidi, trapetsoedri jt. pindade järgi).

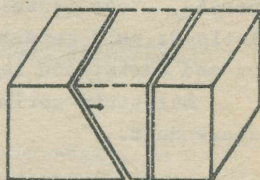
Kõige sagedamini esineb mineraalidel pinakoidaalne lõhenevus - (100), (010) või (001) järgi.

Kui mineraalil on lõhenevus mitme pinna järgi (prisma-

line lõhenevus), võime mikroskoobis jälgida lõikuvaid lõhesüsteeme. Nurk lõhenevuslõhede vahel - lõhenevusnurk peegeldab mineraali lõhenevuspindade vahelist nurka ja on mineraalide määramisel oluliseks diagnostiliseks tunnuseks. Lõhenevusnurga mõõtmisel tuleb aga silmas pidada, et mõõdetav nurk vastab tegelikule lõhenevuspindade vahelisele nurgale tingimusel, kui lõik on risti mõlemale lõhenevuspinna-le. Seepärast on soovitatav lõhenevusnurga mõõtmiseks otsida terad, kus lõhenevuspinna-d ning seega ka lõhed asetseksid vertikaalselt. Vertikaalsed lõhenevuslõhed iseloomustuvad järgmiste tunnustega:

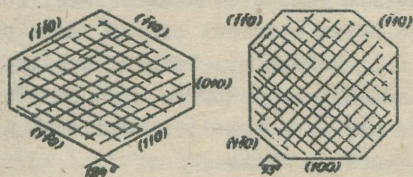
1. nad on kitsamad kui kallutatud lõhed,
2. nad ei nihku tuubuse liigutamisel (mikromeeterkruvist). Esitatut illustreerib joon. 30

Lõhenevusnurka peetakse eriti silmas amfiboolide ja pürokseenide eristamisel. Mõlemale mineraalirühmale on iseloomulik prismaline ($\{110\}$) lõhenevus, kusjuures nurk prismapindade vahel on amfiboolidel 124° või 56° , pürokseenidel 93° või 87° . Ristlõikes prisma servale $[001]$



Joon. 30.

saamegi mikroskoobis iseloomulikud lõhenevusnurgad (joon. 31). Nagu näitavad kogemused, ei mõjуста lõike kallakus



Joon. 31. Amfibooli ja pürokseeni lõhenevuslõhed.

lõhenevuspindade suhtes antud juhul mineraalide õiget määra-

mist, sest isegi maksimaalse kallakuse juures, kus lõhed on veel nähtavad, ei ületa amfiboolide lõhenevusnurk 60° (56° asemel). Pürokseenide lõhenevusnurk ei vähene aga kunagi alla 75° .

9. Suletiste uurimine.

Mineraalides esinevad suletised võivad olla kas tahked, vedelad või gaasilised. Tahked suletised kujutavad endast tavaliselt mineraale ja neid uuritakse tavalises korras. Vedelikusuletised on tuntavad kontrastse kontuuri tõttu, mis on tingitud vedelike ($N \approx 1,3$) ja mineraalide (tavaliselt $N > 1,45$) murdumisnäitajate suurest erinevusest. Sageli võib vedelikusuletistes jälgida gaasimullikesi. Enamasti on vedelikusuletiste kuju ümmargune või ovaalne, harvem korrapäratu. Vedelikusuletistele on kujult sarnased ka gaasisuletised, kuid murdumisnäitajate kontrastse erinevuse tõttu on nad ääristatud laia tumeda vööga.

Suletiste uurimiseks kasutatakse võimalikult suuremat suurendust.

10. Õhiku paksuse ligikaudne määramine.

Õhiku paksuse ligikaudseks määramiseks kasutatakse nn. tolmutükemete meetodit. Et õhiku valmistamisel jääb selle pindadele paratamatult väikesi tolmutükemeid, fokuseeritakse mikroskoop kord õhiku alumisel pinnal, kord ülemisel pinnal leiduvale tolmutükemele. Vahe õhiku alumise ja ülemise pinna vahel annabki ta paksuse, mida on võimalik fikseerida mikromeeterkruvi jaotuselt. Selliselt mõõdetud paksus sõltub aga vastava õhiku (mineraali) murdumisnäitajast ning on seega näiv paksus. Tõelise paksuse leidmiseks kasutatakse ümberarvutusvalemit,

$$d = d_1 \cdot N, \text{ kus}$$

d_1 - mikromeeterkrüvilt mõõdetud näiv paksus,

N - mõõdetud õhiku (mineraali) murdumisnäitaja (õhu suhtes).

Iseloomustatud viisil saame õhiku paksuse määrata liigikaudselt, sest tavaliselt ei saa me kuigi täpselt anda murdumisnäitaja suurust antud lõikes ja võnkumissuunas. Samuti ei saa kuigi täpne olla fokuseerimine, sest silm on võimeline kohanema ka ebatäpselt fokuseeritud objektidele. Fokuseerimise juhuslikkuse vältimiseks soovitatakse seda korrata kuni 10 korda ja võtta keskmine tulemus.

Mineraali murdumisnäitaja täpsusest tulenevat viga on võimalik vähendada immersiooniobjektiiviga kasutamisel, mille puhul kasutatakse valemit

$$d = d_1 \cdot \frac{N}{N_v}, \text{ kus } N_v \text{ on immersiooniõli murdumisnäitaja.}$$

11. Opaaksete mineraalide vaatlused peegelduvas valguses.

Kui õhikus esineb läbipaistmatuid mineraale, on neid soovitatav jälgida peegelduvas valguses. Selleks valgustame õhikut ülalt, objektiiviga juurest, tõstes kas lambi kõrgele või lastes valgusel aknast langeda mikroskoobilauale n.-ö. selja tagant. Oluline on leida kõige sobivam valgustusmoment, milleks tuleb kallutada või pöörata lauda või liigutada valgusallikat seni, kuni opaakne mineraal on hästi valgustatud.

Peegeldunud valguses näivad opaaksed mineraalid tavaliselt sellisena, nagu neid tunneme makroskoopiliselt: püriit on kuldkollane, sageli näeme ta pindadel tüüpilist viirutust, magnetiit ja ilmeniit on terashallid kuni mustad, hematiit annab sageli punakasmusta või punase tooni, kromiit on punane jne.

Tuleb aga märkida, et opaaksetena näivad mikroskoopiliselt vaatlusel sageli ka peeneteralised savikad või tsoi-

siit-epidootsed moodustised, mis aga erinevalt maakmineraalidest on peegelduvas valguses valged, kollakas- või pruunikasvalged või pruunikad.

Seega võimaldab peegelduva valguse kasutamine, eriti aga teatud kogemuste korral, eraldada opaaksete mineraalide hulgas üksikuid mineraale.

Täpsemaks maakmineraalide määramiseks valmistatakse spetsiaalsed poleeritud lihvid, mida uuritakse opaakillumiinaatorite või spetsiaalsete mineragraafiliste mikroskoopidega.

Opaakilluminaatorites ja mineragraafilistes mikroskoopides suunatakse valgus objektile läbi mikroskoobiobjektivi, millega saavutatakse objekti parim pealtvalgustus. Uurimisi teostatakse nii tavalise kui ka polariseeritud valgusega.

Mineragraafilistel uurimistel mõõdetakse valguse peegelduse intensiivsust, analüüsitakse peegeldunud valguse koostist, jälgitakse mineraalide poleeritud pinnal toimuvaid mikrokeemilisi reaktsioone, söövitusreaktsioone jne.

Et mineragraafiline uurimine nõuab omaette aparatuuri ning vastav uurimismetoodika erineb kristallo-optilisest meetodist, ei kuulu selle detailsem käsitlemine käesoleva kursuse raamidesse.

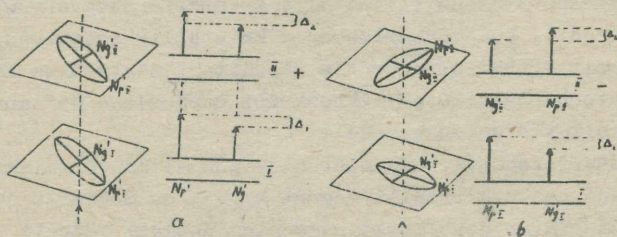
C. Ortoskoopilised vaatlused ristnikolites.

Mineraalide uurimine polarisatsioonimikroskoobis ilma analüsaatorita ei suuda kaugeltki ammendada mikroskoopilise uurimismeetodi kõiki võimalusi. Vaatlustel ristnikolites ilmneb täiendavalt rida mineraalide optilisi tunnuseid, millel võib olla mineraalide määramise seisukohalt määrav või kaasaráäkiiv tähtsus. Nii saame alles ristnikolites määrata indikaatriksi orienteerituse mineraali kristallograafiliste elementide suhtes, hinnata mineraali kaksikmurdumise suurust vaadeldavas lõikes, määrata kustumisnurki jm.

12. Indikaatriksi telgede määramine antud kristallilõigis.

Vastavalt optilise indikaatriksi reeglile võime iga mineraalilõiget kujutada indikaatriksi lõikena, kus valguse võnkumine toimub ellipsikujulise lõike raadiuste suunas, raadiuste pikkus näitab aga selles suunas võnkuva valguse murdumisnäitajat (N_g' ja N_p'). Ristnikoli asendis on kristall kustunud, kui üks võnkumissuundadest langeb kokku polarisaatori läbinud valguse võnkumissuunaga, teine võnkumissuund aga on sellele risti. Seega mineraali kustumisasendis näitavad võnkumissuundi kristallis niitristi niidid.

Oletame, et mikroskoobi aluslauale on asetatud kohakuti kaks anisotroopse kristalli lõiget, kusjuures võnkumissuunad mõlemas kristallis on kattuvad ehk paralleelsed. Märgitud paralleelsus võib olla kas otsene - kui langevad kokku ühenimelised teljed - või vastupidine - kui langevad kokku erinimelised teljed.



Joon. 32. Võnkumissuundade otsene (a) ja vastupidine (b) paralleelsus.

Otsese paralleelsuse korral mõlemas kristallis tekki-
vad käiguvahed summeeruvad: $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ (joon. 32, a).
Vastupidise paralleelsuse korral käiguvahed lahutuvad:
 $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ (joon. 32, b). Kui plaadid eraldi võetuna

annavad võrdse käiguvahe ($\Delta_1 = \Delta_2$), siis lahutumisel käiguvahe väheneb nullini ($\Delta = 0$), s.t. kristallilõigete paar ristnikolites on kustunud. Niisugust nähtust nimetatakse kompensatsiooniks. Kui $\Delta_2 > \Delta_1$, siis tekib uus käiguvahe väärtusega $\Delta_2 - \Delta_1$.

Kirjeldatud nähtusele tugineb kristallooptilistel uurimistel kompensatsiooniplaadikeste või -kiilude kasutamine.

Üheks lihtsamaks kompensatsiooniplaadikeseks on kipsplaat. Viimane annab käiguvahe 560-600 m μ , mis vastab I järgu lillakaspunasele interferentsvärvusele. Selline käiguvahe on valitud seetõttu, et juba väike käiguvahe muutus (50 m μ võrra) põhjustab interferentsvärvuse muutuse kas sinise või kollase värvuse suunas. Kipsplaadikesel on plaadi pikema telje suunas orienteeritud võnkumissuund N_p , N_g aga sellele risti. Analoožiliselt on orienteeritud võnkumissuundad ka nn. vilguplaadikesel ehk veerandlainel ($1/4\lambda$) plaadikesel, mis annab käiguvahe 130-150 m μ . Sellele vastab I järgu hall interferentsvärvus.

Kompensatsiooniplaadikeste abil on võimalik määrata uuritavas mineraalilõikes indikaatriksi teljed Ng' ja Np' . Et käiguvahe avaldub ristnikolites interferentsvärvuste näol asendis, kus võnkumissuundad kristallis asetsevad diagonaalselt võnkumissuundadele nikolites, asetatakse ka kompensatsiooniplaadikesed mikroskoobi tuubusesse 45° nurga all nikoli võnkumissuundadele.

Interferentsvärvuse muutumise põhjal on võimalik määrata, kas antud kristalli asendi korral on tegemist otsese või vastupidise paralleelsusega ning ühtlasi määrata kristallides suundad Ng' ja Np' .

Otsese paralleelsuse puhul interferentsvärvus tõuseb plaadikese käiguvahe arvel, vastupidise käiguvahe korral aga vastavalt väheneb.

Kipsplaadikest ja vilguplaadikest saab kasutada edukalt I järgu interferentsvärvustega mineraalide korral. Kõrgemat järku interferentsvärvuste puhul kasutatakse käiguvahe kompenseerimiseks kvartskiilu. Kvartskiil kujutab

endast 4-5 cm pikkust plaadikest, kus kahe klaasi vahele on asetatud optilise telje suhtes paralleelselt lõigatud kvartsi kiilukujuline plaadike. Kvartskiil võimaldab käiguvahet muuta ja kompenseerida kuni III-IV järgu interferentsvärvu-
si. Tavaliselt on ka kvartskiiludes N_p orienteeritud kiilu väljavenitatud suunas. Vastavad suunad, samuti ka kiilu õhem ots on kiilule märgitud. Kvartskiilu kasutamisel tuleb meeles pidada, et kiil lükatakse mikroskoobi tuubusesse alati suunaga kagust loodesse.

Mõnedel mineraalidel on interferentsvärvuse järk niivõrd kõrge, et käiguvahet ei ole võimalik kompenseerida isegi kvartskiilu abil. Tavaliselt on nendel juhtudel võimalik siiski vastupidise paralleelsusega asendit eristada intensiivsemate ja puhtamate (madalamat järku) interferentsvärvuste ilmumise alusel. Selle kõrval on kasulik veel silmas pidada "jooksvate vööde meetodit". Viimase puhul jälgitakse kiilu liigutamisel interferentsvärvuste käitumist mineraali õhemates servades, kus värvused paigutuvad kitsaste, mineraali kontuuri jälgivate vöökestena. Kiilu sisselükkamisel need vöökesed nihkuvad nagu terakese keskosa suunas või vastupidi. Esimesel juhul on tegemist interferentsvärvuste madaldumisega, s.o. vastupidise paralleelsusega, teisel juhul aga interferentsvärvuste kõrgenemise ja otsese paralleelsusega. "Jooksvate vööde meetodi" rakendamine on kasulik ka juhtudel, kui interferentsvärvus on maskeeritud mineraali enda värvuse poolt.

13. Mineraalide pikenduse märgi määramine.

Mineraali pikenduse märgi all mõeldakse ühes suunas väljavenitatud kristallide optilist orienteeritust. Selle mõiste sissetoomine kristallo-optilisse uurimisse lisab mineraalide määramiseks veel ühe suhteliselt hõlpsastimääratava tunnuse.

Pikendust loetakse positiivseks, kui mineraali välja-

venitatud suunaga langeb kokku Ng, negatiivseks - kui väljavenitatud suunas esineb Np.

Kui kristallil on viltukustumine, on võnkumissuunad orienteeritud teatud nurga all kristalli väljavenitatud suunale. Sellistel puhkudel loetakse pikendust positiivseks, kui pikenduse suunaga moodustab Ng väiksema nurga kui Np. Kui aga mineraali pikema telje suhtes moodustab väiksema nurga võnkumissuund Np, on kristalli pikendus negatiivne. Väga suure kallakusnurga puhul ($> 30^\circ$) on pikenduse märgi määramine raskendatud või isegi võimatu (45° nurk), kuna selles asendis on mineraal kas kustumas või kustunud. Selline olukord esineb sageli pürokseenide korral.

Pikenduse märgi määramine ja arvestamine diagnostilise tunnusena tuleb kõne alla vaid väljavenitatud kuju ja korrapäraste kristallograafiliste piirjoontega mineraaliterade korral.

Võimaluse korral on soovitatav kontrollida pikenduse märki mitmes sama mineraali terakeses. Juhul, kui saame seejuures kord positiivse, kord negatiivse pikenduse, on tegemist optiliselt kaheteljelise kristalliga, kus pikenduse suunas asetseb Nm-võnkumissuund. Selline määramatu pikendus on väga iseloomulik näiteks vollastoniidile.

Pikenduse märk ei ole alati kokkulangev kristalli optilise märgiga vaid sõltub kristalli süngooniast, väliskujust (vormist) ja optilise indikaatriksi orientatsioonist kristallis.

Optiliselt üheteljelised kristallid on valdavalt väljavenitatud optilise telje suunas, mistõttu nendes optiline märk vastab pikenduse märgile. Erandiks on vaid tahvlikujulised, c-telje suunas lapikud mineraalid, mille pikenduse märk on optilisele märgile vastupidine. Olgu märgitud, et immersioonipreparaatides asetuvad tahvlikujulised mineraaliterakesed alati oma pinakoidipinnaga klaasile ja on seetõttu ristnoolis kustunud.

Optiliselt kaheteljelistes kristallides sõltub pikenduse märk optilise indikaatriksi asendist ja kindel seos optilise märgi ja pikenduse märgi vahel puudub. Sellele vaatamata võib pikenduse märk olla siingi väärtuslikuks kriteeriumiks mineraalide diagnostikas.

14. Kaksikmurdumise suuruse määramine.

Kaksikmurdumise suurus on anisotroopsete mineraalide üheks olulisemaks ja iseloomulikumaks diagnostiliseks tunnuseks. Mikroskoopilisel uurimisel väljendub kaksikmurdumine, nagu märgitud, ristnikolites interferentsvärvuse näol. Teatavasti on aga mineraali interferentsvärvus mitte ainult kaksikmurdumise, vaid ka mineraalilõike paksuse funktsioon. Interferentsvärvuste põhjal on võimalik kindlaks teha otsest vaid käiguvähe Δ . Kaksikmurdumise suurust saame käiguvähe põhjal arvutada, kui on teada õhiku paksus.

Õhiku paksust võib määrata eelpoolkirjeldatud nn. tolmukübemete meetodil. Sageli kasutatakse paksuse määramiseks aga kaudset, kuid mõnevõrra täpsemat meetodit, mis tugineb mingi meile tuntud mineraali interferentsvärvusele. Sellel meetodil peatume aga veidi hiljem.

Olgu märgitud, et kõneldes mineraali kaksikmurdumisest peame silmas ta maksimaalset kaksikmurdumist Ng-Np. Mineraalide interferentsvärvus petrograafilistes õhikutes peegeldab aga kaksikmurdumise suurust antud lõikes - Ng'-Np'. Viimane on alati väiksem maksimaalsest ja ta suurus sõltub lõike orientatsioonist. Seepärast on vaja mineraalide kaksikmurdumise suuruse määramiseks valmistada või otsida välja õhikus vastavalt orienteeritud lõiked. (Optiliselt 1-teljelistes kristallides optilisele teljele, 2-teljelistes kristallides optiliste telgede pinnale paralleelne lõige.) Õhikus iseloomustab neid lõikeid suhteliselt kõrgem interferentsvärvus (tingimusel, kui õhik on ühtlase paksusega). Kaksikmurdumise suuruse täpsemaks määramiseks ei ole kõrgem interferentsvärvus veel piisavaks tunnuseks: on vaja

kontrollida, kas valitud lõikes tööpoolest esinevad teljed Ng ja Np. Vastav kontrollimine teostatakse lõike konoskoopilisel vaatlusel.

Kui oleme leidnud maksimaalse kaksikmurdumisega mineraalilõike ja määranud õhiku (mineraalilõike) paksuse, võime kaksikmurdumise suurust määrata kahel viisil:

- 1) kasutades interferentsvärvuste nomogrammi,
- 2) määrates interferentsvärvusele vastava käiguvahe gradueeritud kompensatoriga, arvutame murdumisnäitaja suuruse käiguvahe ja õhiku paksuse alusel.

Vaatleme neid määramisviise lähemalt.

Interferentsvärvuste nomogramm (ka Michel-Levy tabel) kujutab endast tabelit, millele on kantud vertikaalse te võõnditena interferentsvärvuste skaala (kuni V järguni). Tabeli horisontaalteljele (joon. 32) on kantud interferentsvärvustele vastavad käiguvahed millimikronites, vertikaalsele teljele aga õhiku paksus (0-0,06 mm). Koordinaatsüsteemi algusest lähtuvad radiaalselt kallutatud sirglõigud, mis vastavad kindlatele kaksikmurdumise suurustele. Viimaste sirgjoonelised antud koordinaatsüsteemis tuleneb valemist $Ng - Np = \frac{\lambda}{d}$.

Kaksikmurdumise suuruse määramiseks kirjeldatud nomogrammi abil on vaja teada käiguvahet λ või viimasele vastavat interferentsvärvust. Interferentsvärvuse määramisel on vaja arvestada kindlasti ka järku, sest mitmed värvused - punane, kollane, sinine, roheline jt. võivad esineda erinevates järkudes ja vastavad seega erinevatele käiguvahele.

Interferentsvärvuse järku on võimalik madalamate järkude korral (I-II järk) määrata lihtsalt vaatluse teel. Täpiliselt on mineraaliterakesed servadelt õhemad või kiilukujulised, mistõttu võib servades jälgida interferentsvärvusi paralleelsete, kontuuri jälgivate vöökestena alates I järgu hallist ja valgest kuni tsentraalse osa maksimaalse interferentsvärvuseni. Olgu näiteks mineraali interfe-

rentsvärvus punane. Et veenduda, kas on tegemist I või II järgu punase interferentsvärvusega, kontrollime, kas me terakese servades ei näe kusagil ka sinist ja rohelist vöökest. Kui servades ilmuvad ainult kollase, valge ja halli värvusega vöökesed, on punane I järgu interferentsvärvus.

Sageli kasutatakse interferentsvärvuse järgu määramisel, eriti kõrgemate järkude korral (alates III järgust), kvartskiilu. Selleks anname mineraalile mikroskoobi aluslaua pööramisega kvartskiilu suhtes vastupidiselt paralleelse asendi, lükkame kvartskiilu mikroskoobi tuubusesse kuni käiguvahe kompenseerub, kiilu väljatömbamisel loendame aga interferentsvärvuste järgu vastavalt värvide kordumisele.

Teades interferentsvärvust ja selle järku saame interferentsvärvuste nomogrammil nüüd hõlpsasti leida vastava kaksikmurdumise suuruse. Selleks määrame tabelil interferentsvärvusele vastava käiguvahe (vertikaalne suund) ja õhiku paksuse (horisontaalne suund) löikepunkti. Viimast läbiv radiaalne suund annabki meile kaksikmurdumise suuruse.

Interferentsvärvuse nomogrammi abil võib lahendada ka pöördülesande - määrata õhiku paksust, kui on teada mineraali kaksikmurdumine. Seda võimalust kasutataksegi sageli praktikas. Määrates mingi tundmatu mineraali kaksikmurdumise suurust, kohtame tavaliselt samas õhikus mõningaid hästituntud mineraale, näiteks kvartsiterakesi ($N_g - N_p = 0,009$). Määrates maksimaalse kaksikmurdumise asendis kvartsi interferentsvärvuse (käiguvahe), leiame õhiku paksuse valemist
$$d = \frac{\lambda}{N_g - N_p} .$$

Olgu märgitud, et õhiku paksuse määramine "kvartsi" järgi annab täpsemaid tulemusi kui eelpool kirjeldatud "tolmukübemete" meetod.

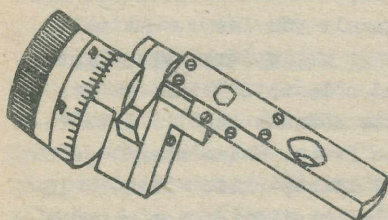
Kvartsiterakeste interferentsvärvuse järgi hinnatakse ka õhiku paksust ligikaudselt (näit. õhiku valmistamise käigus). Õhiku normaalse paksuse korral (0,020-0,030 mm) on kvartsi maksimaalne interferentsvärvus valge.

Käiguvahe hindamine interferentsvärvuse järgi ei ole kuigi täpne. Peale subjektiivse vea, mis sõltub nii vaatle-

ja silma tundlikkusest kui ka töökogemustest, mõjustab interferentsvärvuse õiget määramist ka mõningate mineraalide (amfiboolid, pürokseenid, biotiit jt.) enda värvus, mis se-
guneb interferentsvärvusega. Anormaalsete interferents-
värvuste puhul on aga käiguvahe määramine eriti raskenda-
tud.

Käiguvahe täpsemaks määramiseks kasutatakse spetsiaal-
seid kompensatoreid, mis võimaldavad kompenseeritavat käi-
guvahet mõõta. Kaasajal leiab kõige sagedamini selleks
otstarbeks rakendamist Berecki kompensator.

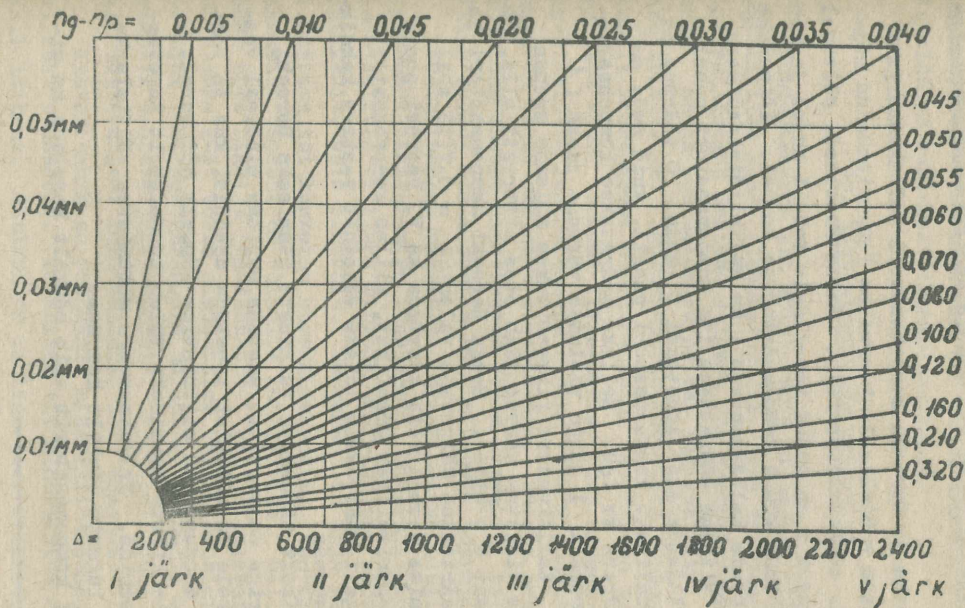
Berecki kompensator



Joon. 34. Berecki kom-
pensaator.

(joon. 34) koosneb õhukesest ringikujulisest kaltsiidiplaa-
dikeseest, mis on lõigatud risti
optilisele teljele ja asetatud
metallplaadikese avasse selli-
selt, et võnkumissuund α on
orienteeritud metallplaadikese
pikitelje suunas. Kaltsiidi-
plaadikese on võimalik kalluta-
da vastava limbi abil, kalla-
kusnurk on aga mõõdetav nooniu-
selt täpsusega $0,1^\circ$. Kompensaatoril on jaotused 0° kuni
 60° , kusjuures nooniuuse nullasend (kaltsiidiplaadikese hori-
sontaalne asend) vastab 30° jaotusele. Selles asendis ei
teki kompensatoris käiguvahet, sest valgus läbib selle op-
tilise telje suunas. Plaadikese kallutamisel saame käigu-
vahe, mis on seda suurem, mida rohkem on plaadike kalluta-
tud.

Berecki kompensator lükatakse mikroskoobi tuubusesse,
samuti võetakse sealt välja, ainult nooniuuse nullasendis.
Mineraali interferentsvärvuse kompenseerimiseks pööratakse
uuritav mineraal kompensatori suhtes vastupidise paral-
leelsuse asendisse ja pööratakse kompensatori limbi kord
ühes, kord teises suunas kuni mineraali kustumiseni. Kus-
tumisasend ehk kompensatsioonimoment määratakse mõõdetud



Joon. 33.

kallakusnurkade aritmeetilise keskmisena, valemi $i = \frac{a-b}{2}$ järgi, kusjuures a ja b on nooniuse lugemid. Kirjeldatud valemi kasutamisel ei ole vajadust kontrollida nooniuse 0-punkti kokkulangemist kaltsiidiplaadikese horisontaalse asendiga.

Käiguvahe ja Berecki kompensaaatori kallakusnurga i vahel valitseb suhteliselt keeruline funktsionaalne sõltuvus,* mida tähistatakse $f(i)$. Selle suurused, sõltuvalt kallakusnurgast i on antud tavaliselt tabeli kujul ja kehitud kõigi sama tüüpi kompensatorite korral. Käiguvahe sõltub aga peale kallakusnurga i ka kaltsiidiplaadikese paksusest. Viimane määratakse iga kompensaaatori puhul eraldi ja väljendatakse konstandi C kaudu. C väärtus on märgitud tavaliselt kompensaaatori passil, kuid seda on võimalik määrata ka ise. Selleks määratakse kompensaaatori kallakusnurk i I järgu violetse värvuse jaoks ($\Delta = 550 \text{ m}\mu$). Kallakusnurk fikseeritakse mõlemas suunas asendis, kus violetne värvus jääb otse niitristi alla. Otsitav konstant $C = \frac{f(i)}{550}$. Seega Berecki kompensaaatori kasutamisel määratakse käiguvahe valemi $\Delta = C \cdot f(i)$ abil.

Arvutamise asemel võib kasutada ka V. Petrovi poolt koostatud logaritmilist graafikut, milles kompensaaatori kallakusnurga i väärtusele leiame vahetult vastava kaksikmurdumise suuruse.

Võimalikult täpsemate tulemuste saamiseks Berecki kompensaaatoriga on soovitatav asetada uuritav mineraal vaatevälja keskele ja mõõtmisi teostada asendis, kus ta võnkumissuunad moodustavad niitristiga täpselt 45° nurga. Paralleelsete kiirte saamiseks tuleb kondensorit tugevasti diafragmeerida. Kallakusnurga mõõtmisvea vältimiseks on soovitatav lugemid limbit korrata.

Berecki kompensaaatorit võib edukalt kasutada ka mi-

* Peale otsese sõltuvuse on vaja arvestada ka valguse murdumist kristalli ja õhu piirpinnal.

neraalide pikenduse märgi määramisel. Selle juures ei tohi aga unustada, et Berecki kompensatori pikitelje suunas on orienteeritud võnkumissuund Ng, mitte aga Np, nagu varem kirjeldatud kompensatsiooniplaadikestes.

15. Kustumisnurkade määramine.

Kustumisnurga all mõistetakse mineraali mingi kristallograafilise suuna (lõhenevuslõhe, tahu piirjoon vm.) ja mineraalilõiget läbinud valguse ühe võnkumissuuna vahelist nurka. Seega kustumisnurk näitab indikaatriksi orienteeritust kristallis. Kustumisnurga mõõtmisel võetakse lugemid libilt mikroskoobi aluslaua kahes asendis ja arvutatakse lugemite vahe. Lugemi fikseerimise ühes asendis on mineraal ristnikolites kustumisasendis ning võnkumissuunad kristallis langevad kokku okulaari niitristiga. Teises asendis viiakse kokkulangemisele niitristiga lähem mineraali kristallograafiline suund, mille suhtes kustumisnurka määratakse.

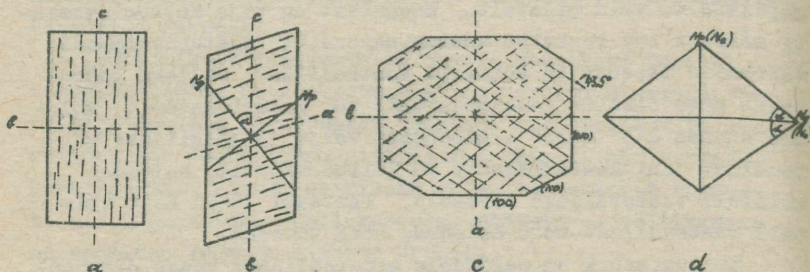
Kustumisnurga määramise täpsus sõltub oluliselt kustumismomendi fikseerimise täpsusest. Mineraali kustumine ristnikolites ei ilmne mikroskoobi aluslaua pööramisel silmapilkselt, vaid pidevalt. Seepärast on vaja kustumismomendi määrata kui keskmist kustumisasendit. Kustumismomendi määramise täpsust on võimalik kontrollida. Selleks pööratakse ühte nikolit (analüsaatorit või polarisaatorit) mölemas suunas 2-3° võrra algasendist välja ja jälgitakse vaatevälja. Kui kustumisasend on leitud täpselt, helendab kristall vaateväljaga võrdselt. Vastasel juhul näib kristall vaateväljast kord heledam, kord tumedam.

Kustumisnurk on paljudele mineraalidele heaks diagnostiliseks tunnuseks. Ta sõltub nii mineraalist kui ka mineraali lõikest. Ühtlasi on oluline see, milliste suundade vahel kustumisnurk määratakse. Seepärast kustumisnurga määramisel teatud mineraalilõikes on alati vaja näidata aluseks võetud kristallograafiline suund ja indikaatriksi telg

(Ng, Nm või Np). Indikaatriksi telg määratakse kompensatsiooniplaadikeste abil (vt. II, 7.p.).

Mineraali kustumisnurgaks loetakse nurka c-telje ja Ng telje vahel ~ 4 cNg. Viimase määramiseks on vaja otsida orienteeritud lõiked. Tavalisel mikroskoopilisel uurimisel ei õnnestu mõnikord selleks sobivaid lõikeid leida. Seepärast piirduakse tihti vaid kustumise iseloomu (otse- või viltukustumine) määramisega reas juhuslikes mineraalilõigetes.

Kustumise iseloom sõltub mineraali süngooniast. Kui kristallograafiline suund langeb kokku valguse ühe võnkumissuunaga kristallis, on kustumisnurk null. Sellisel juhul nimetatakse kustumist otseseks. Kui võrd siin kustumismomendil on indikaatriksi teljed kokkulangevad ehk paralleelsed kristallograafiliste telgedega antud lõikes, võib otsekustumine esineda üheteljelistes kristallides ja rombiline süngoonia kristallides kõikide lõikude korral, monokliinsetes kristallides aga ainult b-teljele paralleelses lõikes (vt. I pt. p. 13). Näiteks võib monokliinne pürokseen või amfibool anda lõikes (100) otsekustumise prisma pinda (110) või sama pinna lõhevuslõhede järgi (joon. 35, a).



Joon. 35. Mineraalide kustumine; a) otsekustumine; b) viltukustumine; c ja d) sümmeetriline kustumine.

Mineraalilõigetes, milles kustumismomendil ei ole

kristallograafilised elemendid paralleelsed okulaari niit-ristiga, vaid moodustavad sellega teatud nurga, nimetatakse kustumist viltukustumiseks. Viltukustumise korral ei lange kristallograafilised teljed vastavas lõikes kokku indikaatriksi telgedega. Viltukustumine iseloomustab kõiki trikliinse süngoonia mineraalide lõikeid ja monokliinse süngoonia mineraalide neid lõikeid, mis ei ole paralleelsed b-teljele (joon. 35,b). Mõningatel juhtudel võib aga konstateerida viltukustumist ka rombilise süngoonia ja isegi optiliselt üheteljeliste mineraalide lõigetes. Nimelt ilmneb viltukustumine neis juhul, kui kustumisnurka mõõdetakse romboeedri (joon. 35,d), püramiidi või mõne teise kallutatud pinna või lõhenemispinna suhtes või prismalise lõhenevuse lõhede järgi lõhede suhtes kallutatud lõikes. Nimetatud pinnad või lõhed on õhikus harva jälgitavad, välja arvatud prismaline lõhenevus mõningate mineraalide puhul.

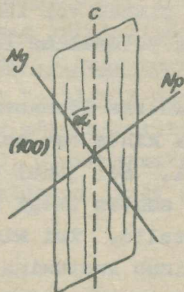
Prismalise lõhenevusega mineraalide mõnedes lõigetes võime näha kahte omavahel teatud nurga all lõikuvat lõhedeüsteemi. Sel juhul ei anna otsekustumist kummagi lõhenevuslõhe suhtes isegi üheteljelised ja rombilise süngoonia mineraalid. Kui mineraalilõige on lõhenemispindadele risti, toimub kustumine lõhede suhtes nii rombilises kui ka üheteljelistes kristallides sümmeetriliselt, s.o. kustumisasendis on niitrist lõhenevusnurga bisektrissiks (joon. 35,c). Samasugune sümmeetriline kustumine ilmneb ka näiteks kaltsiidi romboeedrilises kristallis (joon. 35,d), kui lõige on paralleelne romboeedri pinnale.

Lõhenemispindade suhtes kallutatud lõikes saame alati mõlema lõhenevussuuna suhtes asümmeetrilise viltukustumise.

Seega võime juba kustumise üldise iseloomu alusel teatud määral selle üle otsustada, millisesse süngooniasse mineraal kuulub. Sellise otsuse tegemiseks on vaja kontrollida õhikus mitte ainult ühe mineraalilõike käitumist, vaid analüüsida tervet rida sama mineraali erinevaid lõikeid. Üheteljelised (hekso-, tetra- ja trigonaalse süngoonia) ja

rombilise süngoonia mineraalid annavad praktiliselt (üldmääratud erandite võimalust silmas pidades) otsekustumise, trikliinse süngoonia mineraalid aga alati viltukustumise. Kui aga valitseva viltukustumise puhul leiame üksikutes mineraalilõigetel otsekustumise, on meil tegemist tõenäoliselt monokliinse süngooniasse kuuluva mineraaliga.

Mineraali kustumisnurk on hinnatavaks diagnostiliseks tunnuseks eriti monokliinsete pürokseenide ja amfiboolide täpsemal määramisel. Lõige, milles tavalisel mikroskoopilisel uurimisel saame χ cNg määrata, on õhikus tuntav maalse interferentsvärvuse tõttu (optiliste telgede pind!). Ühtlasi on selles lõikes mineraal tavaliselt selge pikendusega - lõige on väljavenitatud c-telje suunas (joon. 36). Kui ülaliseloomustatud lõikes puuduvad korrapärased kristallograafilised piirjooned, siis mineraali kustumisnurk määrataksegi pikenduse järgi. Monokliinsete pürokseenide ja amfiboolide pikendatud terakestes, kui pikkus ületab laiusse 4 või enam korda ja kui neis on jälgitav kõrge interferentsvärvus, võib kustumisnurka määrata julgelt pikenduse järgi. Need mineraalid on pikendatud alati vaid c-telje suunas. Viga mineraali tegeliku kustumisnurga cNg võrreldes ei ületa sel puhul mõnda kraadi.



Joon. 36. Kustumisnurga määramine pikenduse järgi.

16. Kaksikute uurimine.

Mitmed mineraalid moodustuvad seaduspäraselt kokkukasvanud kristalliindiviididest, kusjuures need kristalliindiviidid kattuvad üksteisega kas peegelsümmeetriliselt või mingi suuna ümber 180° võrra pöörates. Pinda, mis on kristalliindiviididele sümmeetriapinnaks, nimetatakse kaksikupinnaks; suunda, mille ümber üks kaksikindiviid on teise suhtes 180° võrra pööratud, nimetatakse kaksikuteljeks. Viimane on seega kaksiku teise järgu sümmeetriatelg ja on alati kaksikupinnale risti.

Kaksikupinnast eristatakse kaksikute kokkukasvamispinda, mida mööda on kaksikindiviidid kokku kasvanud. Kokkukasvamispind võib langeda kokku kaksikupinnaga või olla sellele risti. Seega ka kaksikutelg võib olla kokkukasvamispinnale risti või asetseda viimase pinnal.

Kaksikuid, milles kaksikutelg on kokkukasvamispinnale perpendikulaarne, nimetatakse normaalseteks (kaksikud tahu seaduse järgi), teisi aga paralleelseteks (kaksikud telje- ja komplitseeritud seaduste järgi) kaksikuteks (vt. joon. 70, 71, 72).

Kaksikute mikroskoopilisel uurimisel on jälgitav kokkukasvamispinna löikejoon õhiku pinnaga - kaksikuõmblus. Kahest indiviidist koosnevat kaksikut nimetatakse lihtsaks kaksikuks. Kolme või enama kristalliindiviidi kokkukasvamisel, kus kaksikuõmblused moodustavad üksteise suhtes nurga, säägitakse vastavalt kolmikutest, nelikutest jne. ehk sektorilistest kaksikutest. Sektorilised kaksikud iseloomustavad eriti kordieriiti.

Kolmest või enamast indiviidist koosnevad kaksikud, kus kaksikuõmblused on paralleelsed, on tuntud polüsünteesiliste kaksikutena. Polüsünteesilised kaksikud on eriti iseloomulikud plagioklassidele, kuid esinevad ka monokliinsetes pürokseenides ja amfiboolides. Polüsünteesilistes kaksikutes on kaksikindiviidid optiliselt ühtlaselt orien-

teeritud üle ühe. Seetõttu ilmnevad nad ristaikolites selgelt tänu kõrvutiasuvate lamellikeste eriaegsele kustumisele.

Ristaikolites ei ole aga võimalik kindlaks teha kõiki võimalikke kaksikuid, samuti ka kaksikuid kõigis mineraalilõigetes. Optiliselt käituvad alati monokristallina kaksikud, kus kaksikutelg langeb kokku kristalli sümmeetriateljega (näit. parem ja vasak kvarts), või on risti kristalli sümmeetriapinnale. Nendel juhtudel kattub ka optiline indikaatriks 180° võrra kaksikutelje ümber pöörates iseendaga. Võnkumissuunad kõrvutistes kaksikindiviidides kattuvad.

Kaksikustruktuuri ei nähtu ka kaksikute nende lõigete korral, kus kaksikutelg langeb kokku mikroskoobi optilise teljega ehk on risti lõikepinnale. Kaksikkristalliindiviidid on üksteise suhtes pööratud vaid 180° võrra ja võnkumissuunad neis on paralleelsed. Kui aga kaksikutelg asub õhiku pinnal, seega kaksikupind asetub perpendikulaarselt, paigutuvad kaksikutes võnkumissuunad sümmeetriliselt. Normaalse kaksikute puhul võib kaksikuõmbluse suhtes sellisel juhul tähele panna sümmeetrilist kustumist. Asendis, kus kaksikuõmblus langeb kokku nikolite võnkepindadega või moodustab nende suhtes 45° nurga, on mõlemad kaksikindiviidid valgustatud ühtlaselt.

Kaksikupinna kallutatud asendi korral mineraali lõikepinna suhtes saame üldjuhul asümmeetrilise kustumise.

Ülalesitatatud nähtust kasutataksegi normaalsete kaksikute eristamiseks telg- või komplitseeritud kaksikutest. Selleks otsitakse mineraalilõige, millele kokkukasvamispind on risti (neis on kaksikindiviidide vaheline piir terav) ja viiakse kaksikuõmblus kokkulangemisele ühe nikoli võnkumispinnaga. Kui kaksik käitub märgitud asendis (või sellest 45° võrra nurga all) monokristallina, on tõenäoliselt tegemist normaalse kaksikuga.

Et kaksikute kokkukasvamispind on teatud kristallograafiliseks pinnaks, võib selle alusel määrata indikaatriksitelgede asendit mineraalis samuti, nagu seda tehakse lõhene-

vuuslõhede või mineraali kristallograafiliste piirjoonte järgi. Näiteks võib kasutada kustumisnurga cNg määramiseks monokliinsete pürokseenide ja amfiboolide kaksikuid, kokkukasvamispinnaga (100) järgi. Nende mineraalide pealõige (010) järgi on kaksikute kokkukasvamispinnale risti, mis kergendabki vastava lõike leidmist. Selles lõikes peab kaksikuõmbluse kokkuviimisel okulaari niitristiga kaksik näima ühtlasena. Kustumisnurk kaksikuõmbluse suhtes on kõrvutistes kaksikutes sümmeetriline ja vastabki nurgale cNg.

Eriline diagnostiline tähtsus on kaksikute uurimisel plagioklasside puhul. Et aga plagioklassid kujutavad endast trikliinse süngoonia mineraale ja nendes võib esineda kaksikuid mitme seaduse järgi, võib nende määramisel kustumisnurga põhjal lihtsal mikroskoopilisel vaatlusel teha järemaid vigu. Seetõttu uuritakse plagioklasside kaksikuid Fjodorovi meetodiga.

D. Konoskoopilised vaatlused.

17. Konoskoopilise meetodi olemus.

Vaatamata suurele hulgale mineraalide tunnustele, mida on võimalik määrata ortoskoopilisel vaatlusel, jääb siiski terve rida optilisi omadusi või konstante meile tundmatuks. Nii ei saa me ortoskoopiliste uurimiste käigus teha kindlaks, kas uuritav mineraal on ühe- või kahteljeline, optiliselt positiivne või negatiivne, milline on optiliste telgede vaheline nurk jne.

Nimetatud tunnuseid on võimalik leida samas polarisatsioonimikroskoobis õhiku konoskoopilisel vaatlusel. Selleks koondatakse mikroskoopi valgustav kiirtekimp lühifookuseline kondensori (Lasaulx lääts) abil õhiku tasapinnale, kust valgus väljub juba hajutatud kiirtekoonusena

(joon. 27). Mikroskoobi optilise telje suunas kulgeb vaid tsentraalne kiir. Kõik teised valguskiired läbivad mineraalilõike kallutatult. Kiirte kallakusnurk mikroskoobi optilise telje suhtes on seda suurem, mida kaugemal tsentraalsest kiirest nad kondensorit läbivad. Et mineraali optilised omadused on vektoriaalsed, annab sellise koonduva valguse kasutamine õhiku uurimisel isegi ühel pinnal võimaluse jälgida mineraali optilisi omadusi samaaegselt terves reas erinevalt kallutatud valguskiirte suundades. Erinevalt kallutatud valguskiired interfereeruvad ja annavad ristnooli asendis vaatevälja mitte mineraali kujutise, vaid omavahel lõikuvate kiirte optiliste efektide summana omapärase figuurse kujundi - konoskoopilise kujundi. Konoskoopilised kujundid võivad olla väga mitmesugused, sõltuvalt mineraali teljelisusest, kristalli lõikest indikaatriksi suhtes, kaksikmurdumise suurusest, õhiku paksusest ja vaatlustingimustest (suurendusest).

Konoskoopiliste kujundite alusel on võimalik

1. eraldada optiliselt ühe- ja kaheteljelisi kristalle,
2. määrata indikaatriksi asendit mineraalilõikes,
3. määrata kristalli optilist märki,
4. hinnata optiliselt kaheteljeliste kristallide optiliste telgede vahelise nurga ($2V$) suurust,
5. uurida indikaatriksi ja optiliste telgede dispersiooninähtusi.

Märgitud tunnuste uurimine konoskoopiliste kujundite põhjal ongi konoskoopilise meetodi olemuseks.

Konoskoopiliste kujundite jälgimine on võimalik vaid suure suurendusega objektiiviga, mis haarab hajutatud valgusvihust enam kui 100° nurgaga koonuse. Kujundit on võimalik jälgida okulaarita objektiivi ülemisel fokaalpinnal. Enamasti aga teostatakse konoskoopilisi vaatlusi okulaariga, milleks on vaja sisse lükata ka Bertrand'i lääts. Viimasel juhul saame konoskoopilise kujundi suurendatud

(2-3x) kujutise. Olgu aga märgitud, et Bertrand'i lääts ja okulaari kasutamine annab paremaid tulemusi vaid siis, kui uuritav mineraalitera katab suurema osa vaateväljast.

Konoskoopilise kujundi jälgimiseks teeme mikroskoobi-ga järgmised operatsioonid:

1. kasutades keskmist suurendust asetame uuritava mi-neraalilõike mikroskoobi vaatevälja keskele,
2. suurema vaatenurga saamiseks asendame keskmise suu-rendusega objektiiviga suure apertuuriga objektiiviga, fokuseerime ja tsentreerime mikroskoobi,
3. lülitame sisse Lasaulx lääts ja avame diafragma,
4. lülitame sisse Bertrand'i lääts või seda tegemata võtame välja okulaari,
5. jälgime vaatevälja ühtlast valgustust. Kui valgus-tamiseks ei kasutata matti elektripirni, on soovitav asetada mikroskoobi valgustussüsteemi mattklaas. Ebaühtlane valgustus põhjustab konoskoopilisel ku-jundil varjusid, mis raskendavad selle interpretee-rimist.
6. lükkame sisse analüsaatori,
7. fokuseerime Bertrand'i lääts. Kui peale uuritava mineraali on vaateväljal veel teisi mineraale, mis võivad konoskoopilist kujundit moonutada, diafrag-meeritakse Bertrand'i lääts selle kohal asuvast iirisdiafragmast niivõrd, et konoskoopilise kujun-di annaks ainult keskmist mineraaliterakest läbi-nud valguskiired.

18. Optiliselt üheteljeliste kristallide konoskoopil-
line uurimine.

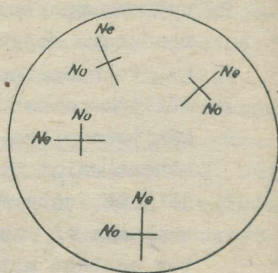
Optiliselt üheteljeliste kristallide lõiked võivad olla orienteeritud kas optilise teljega risti, paralleelselt või kallutatult õhikupinnale. Vastavalt sellele saame ka

kolm erinevat konoskoopilist kujundit. Kõige iseloomuliku-
ma ja selgema konoskoopilise kujundi saame mineraalilõikes,
mis on optilisele teljele risti.

a) Mineraali uurimine lõikes risti optilisele teljele.

Tutvume kõigepealt konoskoopilise kujundi tekkimistin-
gimustega märgitud lõikes.

Nagu teame kristallooptikast, võngub üheteljelise kristalli läb-
binud valguse üks laine (ebaharilik) indikaatriksi pealõigul,
teine (harilik) võngub aga selle-
le ristisel pinnal. Lõikes, mis
on risti optilisele teljele, või-
me vaatevälja igas punktis näida-
ta võnkumissuunda No ja Ne jaoks
(joon. 37). Pealõikudeks on kõik
lõigud, mis läbivad vaatevälja
keskel väljuvat optilist telge.
Seega ebaharilik valgus võngub
vaatevälja kõikides punktides
radiaalses, harilik kiir aga sel-
lele ristises suunas. Lastes läbi mineraalilõike hajuva
valguskiirte koonuse, läbivad ainult vaatevälja keskelt
tulevad kiired mineraali optilise telje suunas. Et siin
on $No = Ne$, saame optilise telje kohal kustumise.

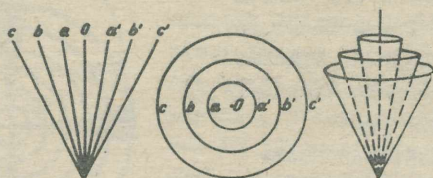


Joon. 37. Hariliku
ja ebahariliku val-
guse võnkumissuunad
optilisele teljele
ristises lõikes.

Ülejäänud kiirtest annavad need, mis moodustavad op-
tilise telje suhtes võrdse kallakusnurga, ka võrdse käigu-
vahe. Käiguvahe on seda suurem, mida suurem on kallakus-
nurk, sest vastavalt kallakusnurga suurenemisele pikeneb
nii valguse teekond mineraalis (õhiku paksus) kui ka kak-
sikaurdumine $Ng' - Np'$.

Ühendades näiteks kiired, mis moodustavad optilise
telje suhtes ühesuguse nurga, saame koonusepinnad, mis an-
navad ka võrdsed käiguvahed (joon. 38). Seetõttu võime
nimetada neid koonusekujulisi pindasid samakäigupindadeks.

Iseloomustatud koonuste lõige õhikupinnaga on ringiku-
juline. Kasutades monokromaatilist valgust näeme ristniko-



Joon. 38. Samakäigupinnad.

lis vaateväljal kustumist nendes ringikujulistes vööndites, kus käiguvahe on $2n \frac{\lambda}{2}$, helendumist aga nendes vööndites, kus käiguvahe on $2n\lambda + \frac{\lambda}{2}$. Seega konoskoopilisel vaatlusel näeme iseloomustatud lõikes rea kontsentrilisi hele-
daid ja tumedaid ringe. Valge valguse kasutamisel asenda-
vad neid erinevate interferentsvärvustega isokromaatilised
ringid, kus interferentsvärvus kõrgeneb perifeersete ringi-
de suunas. Ringid ei ole aga kõikjal ühtlaselt valgustatud.
Kohtades, kus valguse võnkumissuunad kristallis langevad
kokku nikolite võnkumispindadega, valgus kristalli ei läbi
ja ilmneb tumenemine. Seetõttu näemegi optiliselt ühetelje-
liste kristallide lõikes risti optilisele teljele vaatevälja
keskel musta risti, mis langeb kokku niitristiga ja lõikab
interferentsvärvuste ringikujulisi vöökesi või monokromaati-
lise valguse korral valgustatud ja tumedaid vööid (joon. 39.).
Kuivõrd võnkumissuunad jäävad alati nikoli võnkumissuundade-
ga kokkulangevaks vaid niitristi kohale jäävates vaatevälja
punktides, on mõistetav, et konoskoopiline kujund ei muutu
mikroskoobi aluslaua pööramisel.

Konoskoopilises kujundis jälgitavate kontsentriliste
interferentsvärvuste vööde hulk sõltub mineraali kaksikmur-
dumise suurusest, mineraalilõike paksusest ja kasutatava ob-
jektiiv apertuurist.

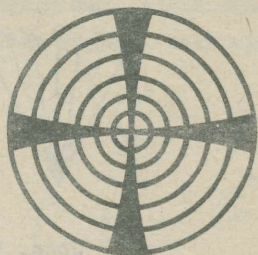
Mineraalide konoskoopiliseks uurimiseks kasutatakse sageli paksemaid mineraalilõikeid, kus konoskoopiline kujund ilmneb selgemalt.

Normaalsete õhikute ($d = 0,03 \text{ mm}$) korral suure suuredusega objektiivi kasutades on konoskoopilise kujundi ilmekus sõltuv mineraali kaksikmurdumise suurusel $N_g - N_p$.

Näiteks kaksikmurdumise suurusel $N_g - N_p < 0,006$ mineraalides (apatiit, nefeliin) näeme vaatevälja kvadrantides vaid halli interferentsvärvust $N_g - N_p \approx 0,015$ puhul (skapoliid) lisandub hallile ka kollane interferentsvärvus. Kui aga $N_g - N_p = 0,025$ (turmalin), ilmnevad vaateväljas juba I ja II järgu interferentsvärvused. $N_g - N_p = 0,100$ puhul (kaltsiit) näeme juba kuni III või IV järgu interferentsvärvusi. Mida suurem on mineraali kaksikmurdumine, seda kitsamana näib vaateväljas tume rist.

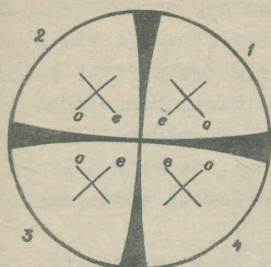
Lõige risti optilisele teljele on parimaks lõikeks mineraali optilise märgi määramiseks. Me teame, et optiliselt üheteljelist kristalli loetakse positiivseks kui $N_e > N_o$. Seega $N_e = N_g$ ja $N_o = N_p$. Et ebahariliku laine võnkumine toimub konoskoopilise kujundi raadiuste suunas, saame võnkumissuundades suhtelisi murdumisnäitaja suurusi määrata kompensatsiooniplaadikeste abil. Kahes kvadrantides saame otsese, kahes kvadrantides aga vastupidise paralleelsuse. Interferentsvärvuste iseloomustamiseks eri kvadrantides järjekorras tamed nad numbriga 1. kuni 4. (joonis 40).

Optiliselt positiivsetes kristallides saame otsese paralleelsuse 1. ja 3. kvadrantides, vastupidise aga 2. ja 4.



Joon. 39. Optiliselt üheteljelise kristalli konoskoopiline kujund optilisele teljele ristises lõikes.

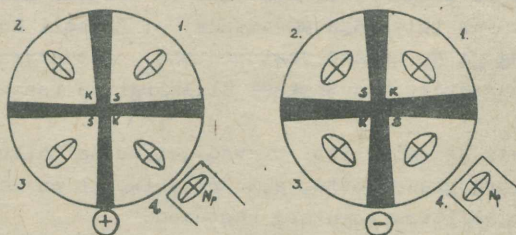
kvadrantis. Optiliselt negatiivsetes kristallides, kus $N_e = N_p$, saame, vastupidi, otsese paralleelsuse 2. ja 4. kvadrantis.



Joon. 40.

Kasutades mineraali optilise märgi määramiseks kipsplaadikest, omandab konoskoopiline kujund otse ristist juures, mis kipsplaadita andis halli või valge interferentsvärvuse, otsese paralleelsuse korral II järgu sinise või rohelise värvuse, vastupidise paralleelsuse korral aga I järgu kollase värvuse (joon. 41). Siit tulenebki mineraalide optilise märgi määramiseks praktikas rakendatav reegel:

Kui kvadrantides, mida läbib kipsplaat (2. ja 4.) ilmneb kollane värvus, on kristall optiliselt positiivne. Kui märgitud kvadrantides ilmneb aga sinine värvus, on meil tegemist optiliselt negatiivse kristalliga.



Joon. 41. Üheteljelise kristalli optilise märgi määramine kipsplaadikesega. s - sinine, K - kollane interferentsvärvus.

Kipsplaadi kasutamisel saame selgelt erinevad inter-

ferentsvärvused eri kvadrantides vaid väikese kaksikmurdu-
misega kristallides, mille konoskoopilises kujundis ei ole
palju erivärvilisi ringe.

Kui kristallil on suur kaksikmurumine, on vaateväljal
palju kontsentrilisi interferentsvärvuste ringe ja vasta-
valt sellele esineb hall või valge interferentsvärvus vaid
väga kitsal alal otse risti juures. Selliste konoskoopiliste
kujundite korral annab optilise märgi määramisel pa-
remaid tulemusi kvartskiil. Viimasega on võimalik määrata
otsest või vastupidist paralleelsust jooksvate vööde meeto-
dil.

Kvartskiilu sisselükkamisel otsese paralleelsusega
kvadrantides kontsentrilised interferentsvärvuste vöökesed
liiguvad tsentri suunas, surutakse nagu kokku. Teistes
kvadrantides, kus paralleelsus on vastupidine, liiguvad
vööd perifeeria suunas.

Seega võime sõnastada mineraalide optilise märgi mää-
ramiseks jooksvate vööde meetodil järgmise reegli:

Kui kvadrantides, mida läbib kvartskiil, kiilu sisse-
lükkamisel interferentsvärvuste vöökesed liiguvad perifee-
ria suunas, on uuritav mineraal optiliselt positiivne, vöö-
keste liikumisel tsentri suunas aga negatiivne.

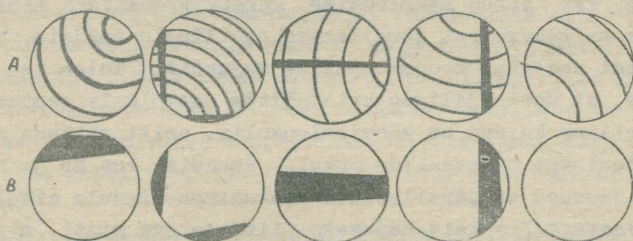
Kvartskiilu asemel võib kasutada ka Berecki kompensaa-
torit. Seejuures tuleb aga arvestada, et Berecki kompen-
saatoris on Ng ja Np suunad vastupidised. Seälepärast on
Berecki kompensaaatori kasutamisel ülalmärgitud reegel vas-
tupidine.

Optilisele teljele risti olevad lõiked on õhikus tun-
tavad oma isotroopsuse tõttu, s.t. ristnikolis on nendes
lõigetes mineraalitera kogu aeg kustunud.

b) Mineraali uurimine optilise telje suhtes kallutatud
lõikes.

Sageli ei õnnestu õhikus leida täiesti isotroopset lõi-
get, et uurida üheteljelise kristalli konoskoopilist kujun-
dit optilise telje ristiasendis. Praktikas esinevad mine-

raalid õhikus kõige sagedamini optilise telje suhtes teatud nurga all. Vastavalt sellele, kui suur on see kallakusnurk, on ka mineraali interferentsvärvus ristnikolis madalam või kõrgem. Kui mineraal on ristnikolis peaaegu kustunud, võib optiline telg olla vaateväljas jälgitav. Sel juhul on nähtavad ka mustad risti harud, mis mikroskoobi lauakese liigutamisel jälgivad optilise telje ringjoonelist liikumist, jäädes kogu aeg paralleelseks nikolite võnkumissuundadele ehk okulaari niitristile. Lõike suurema kallakusnurga korral optiline telg jääb vaateväljast väljapoolsele. Vaateväljas võib näha korraga ühte või kahte risti haru, mis liiguvad mikroskoobi laua pööramisel üle vaatevälja paralleelselt ühele või teisele okulaari niitristi suunale. Tugevasti kallutatud lõigetel on risti haru lai ja liigub üle vaatevälja kiiresti. Seejuures võib ilmnedateatud asendis moment, kus vaateväljal ei ole näha kumbagi risti haru. Interferentsvärvuste ringid, mis ümbritsevad kontsentriliselt optilist telge, võivad nendes lõigetel olla nähtavad kaarekujuliselt. Joonisel nr. 42 on toodud



Joon. 42. Üheteljelise kristalli konoskoopilisi kujundeid optilise telje suhtes kallutatud lõigetel; A - suure kaksikmurdumisega mineraalides; B - väikese kaksikmurdumisega mineraalides.

näitena konoskoopilisi kujundeid optilise telje suhtes kallutatud lõigetel, sõltuvalt kallakusnurgast ja mineraali kaksikmurdumisest.

Optilise märgi määramisel ülaliseloomustatud lõikudes kompensatsiooniplaadikesega ei saa tavaliselt jälgida interferentsvärvuse muutusi korraga kõigis kvadrantides. Teatavasti aga piisab märgi määramiseks ka vaatlusest ühes kvadrantis. Kui vaateväljas on nähtav optiline telg või korraga risti kaks haru, on kvadranti määramine lihtne. Kui aga üle vaatevälja liigub vaheldumisi kord vertikaalne, kord horisontaalne risti haru, võime kvadranti määramiseks kasutada järgmist reeglit:

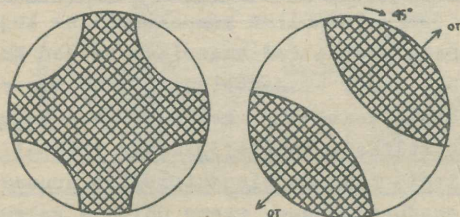
Kui mikroskoobi laua pööramisel päripäeva liigub horisontaalne risti haru üles, ilmub vaatevälja 4. kvadrant.

Mineraali optilise märgi määrame kipsplaadikesega või kvartskiilu abil, jälgides ühes määratud kvadrantis interferentsvärvuse muutumist või isokromaatiliste vöökeste liikumissuunda.

c) Konoskoopiline kujund optilise teljega paralleelses lõikes.

Optilisele teljele paralleelsed lõiked on ristnikolis tuntavad maksimaalse interferentsvärvuse tõttu. Et kontrollida, kas antud maksimaalse kaksikmurdumisega mineraalilõige on tõepoolest paralleelne optilisele teljele, jälgitaksegi vastavat konoskoopilist kujundit. Tuleb aga märkida, et üheteljeliste kristallide pealõikele vastav konoskoopiline kujund on väheiseloomulik, eriti väikese kaksikmurdumisega mineraalide puhul. Asendis, kus No ja Ne võnkumissuunad on paralleelsed võnkumissuundadele nikolites, näeme vaateväljas laia hajuvate piirjoontega risti, mis haarab peaaegu kogu vaatevälja. Laua pööramisel 45° võrra jaguneb see rist kaheks hüperbooliharuks, mis liiguvad kahe vastastikuse kvadranti suunas ja kaovad vaatevälja taha (joon. 43). Iseloomustatud kujundi sümmeetrilisus ja hüperbooliharude liikumise sümmeetrilisus võimaldavadki otsustada, kas meil on tegemist optilisele teljele täpselt paralleelse lõikega. Vaadeldavas lõikes määratakse mineraali optilist märki järgmiselt. On teada, et hüperbooli-

harud liiguvad vaateväljast välja alati optilise telje suunas. Kui pöörame mikroskoobi lauda nii, et hüperbooliharud liiguvad vaateväljast välja 2. ja 4. kvadranti suunas ja



Joon. 43. Üheteljelise kristalli konoskoopiline kujund optilise teljega paralleelses lõikes.

lükkame tuubusesse kompensatsiooniplaadikese, langeb optiline telg kokku kompensatsiooniplaadikese N_p suunaga. Interferentsvärvuse muutumise põhjal vaateväljas saame määrata optilise telje suunas võnkuva valguslaine suhtelise murdumisnäitaja ning viimase alusel mineraali optilise märgi. Kui värvuse muutumist on raske hinnata, soovitatakse jälgida samas laua asendis kompensatsiooniplaadikese mõju paralleelsetes nikolites, kus interferentsvärvuste muutumine on selgem.

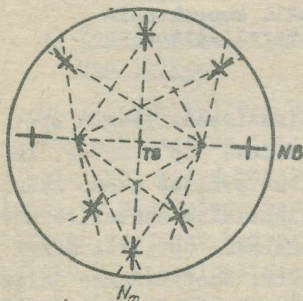
Olgu märgitud, et ebaselge konoskoopilise kujundi tõttu kasutatakse optilisele teljele paralleelset lõiget mineraali optilise märgi määramiseks harva.

19. Optiliselt kaheteljeliste kristallide konoskoopiline uurimine.

Optiliselt kaheteljeliste kristallide konoskoopilisi kujundeid on otstarbekohane eraldada rühmadesse vastavalt

järgmistele mineraalilõikudele: lõikes risti optiliste telgede teravale bissektrissile, risti nürile bissektrissile, risti ühele optilisele teljele ja telgede suhtes kallutatud lõikes.

a) Lõikes, mis on risti teravale bissektrissile saame eriti huvitava ja iseloomuliku konoskoopilise kujundi. Sellele lõike pinnale jäävad indikaatriksi teljed N_m ja nüri bissektriss (NB), terav bissektriss (TB) on aga risti vaateväljale ja väljub vaatevälja keskpunktis. Valguse võnkumine toimub optiliselt kaheteljelistes kristallides optilisi telgi läbivate pindade bissektrisside suunas. Võttes aluseks selle seaduspärasuse, saame näidata valguse võnkumissuundi ükskõik millises vaatevälja punktis (joon. 44.).



Joon. 44. Valguse võnkumissuund kaheteljelise kristalli teravale bissektrissile ristises lõikes.

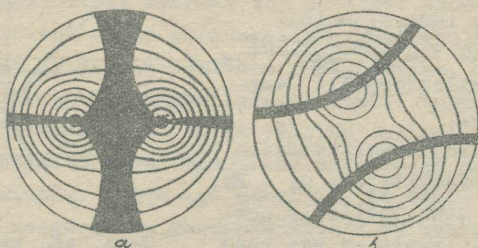
Asendis, kus N_m ja nüri bissektriss langevad kokku nikolite võnkumissuundadega, saame konoskoopilise kujundi, mis meenutab üheteljelise kristalli lõiget risti optilisele teljele. Vaatevälja punktides, mis jäävad N_m -le ja nürile bissektrissile, on võnkumissuunad kokkulangevad nikolite võnkumissuundadega, mistõttu näeme vaatevälja keskel tumedat risti. Erinevalt üheteljelise kristalli kujundist, kus risti harud on võrdsed, on siin N_m suunaga paralleelne risti haru sageli märksa laiem, nüri bissektrissi suunas leiame aga kaks isokromaatiliste ringidega ümbritsetud punkti - optiliste telgede väljumiskohad (joon. 45, a).

Isokromaatilised vöökesed kujutavad endast nagu üheteljeliste kristallidegi puhul, samakäiguvahepindeid. Nad ümbritsevad kumbagi optilist telge esialgu enam-vähem kontsentriselt, kuid hiljem liituvad mõlemad optilisi telgi

Asendis, kus N_m ja nüri bissektriss langevad kokku nikolite võnkumissuundadega, saame konoskoopilise kujundi, mis meenutab üheteljelise kristalli lõiget risti optilisele teljele. Vaatevälja punktides, mis jäävad N_m -le ja nürile bissektrissile, on võnkumissuunad kokkulangevad nikolite võnkumissuundadega, mistõttu näeme vaatevälja keskel tumedat risti. Erinevalt üheteljelise kristalli kujundist, kus risti harud on võrdsed, on siin N_m suunaga paralleelne risti haru sageli märksa laiem, nüri bissektrissi suunas leiame aga kaks isokromaatiliste ringidega ümbritsetud punkti - optiliste telgede väljumiskohad (joon. 45, a).

Isokromaatilised vöökesed kujutavad endast nagu üheteljeliste kristallidegi puhul, samakäiguvahepindeid. Nad ümbritsevad kumbagi optilist telge esialgu enam-vähem kontsentriselt, kuid hiljem liituvad mõlemad optilisi telgi

ümbritsevateks vöökesteks. Isokromaatilised vöökesed, mida tuntakse siin ka lemniskaatidena, esinevad seda tihedamalt,



Joon. 45. Kaheteljelise kristalli teravale bissektrissile ristises löikes nähtuv konoskoopiline kujund.

mida suurem on mineraali kaksikmurdumine. Väikese kaksikmurdumisega mineraalides võivad nad ka puududa.

Mikroskoobi laua pööramisel konoskoopiline kujund muutub: tume rist jaguneb kaheks hüperboolseks haruks, mis liiguvad kahe diagonaalse kvadranti perifeeriasse. Hüperboolsete kõverate, nn. isogüüride kumeruste tippudesse jäävad optiliste telgede väljatulekukohad, millega koos liiguvad ka lemniskaadid (joon. 45, b).

Isogüürid, samuti kui tume rist on nende punktide asukohaks, kus võnkumissuunad on kokkulangevad nikolite võnketasapindadega. Isogüürid on maksimaalselt üksteisest eemaldunud, kui mikroskoobi lauda pöörata risti asendist 45° võrra. See kaugus sõltub optiliste telgede vahelisest nurgast. Tuleb aga märkida, et iseloomustatavas löikes ei saa me kätte optiliste telgede tõelist nurka $2V$, vaid isogüüride vaheline kaugus sõltub näivast nurgast $2E$. Nagu nähtub jooniselt 46, on näiv optiliste telgede vaheline nurk $2E$ valguse murdumise tõttu tunduvalt suurem tõelisest nurgast $2V$. Et optilise telje suunas on mineraali murdumisnäitaja N_m , saame tõelise ja näiva optiliste telgede vahelise nurga vahel järgmise sõltuvuse:

$$\sin V = \frac{\sin E}{N_m} .$$

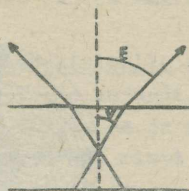
Näivat nurka $2E$ võib vähendada, kui mineraali ja objektiivivi vahel kasutada immersiooniõli. Sel juhul $\sin V = \frac{\sin E \cdot N_1}{N_m}$, kus N_1 on immersiooniõli murdumisnäitaja.

Kui valida immersioonivedelik murdumisnäitajaga $N_1 = N_m$, vastab näiv nurk tõelisele nurgale. Praktiliselt on aga raske viimast tingimust täita, sest mineraalil, mille $2V$ suurus on vaja määrata, ei tea me ka täpset N_m suurus.

Et hüperbooliharude maksimaalne kaugus on võrdeline poole näiva optiliste telgede nurga siinusega, võib $2V$ suurus määrata näiva nurga kaudu okulaarmikromeetri abil. Seejuures lähtume valemist $\sin E = CD$, kus D - hüperbooli kumeruste maksimaalne kaugus, C - koefitsient, mis sõltub mikroskoobi optilisest süsteemist. Seda on võimalik määrata kas spetsiaalse apertomeetriga või mineraalide abil, mille $2E$ on tuntud ja püsiva suurusega. Tõelise optiliste telgede vahelise nurga saame määrata valemi järgi $\sin V = C \cdot D \frac{N_1}{N_m}$, või kui teostame mõõtmisi ilma immersioonivedelikuta, siis valemi $\sin V = \frac{CD}{N_m}$ järgi.

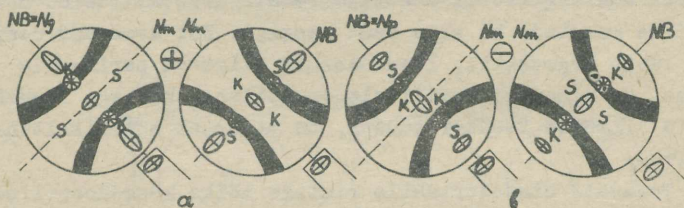
Optiliste telgede vahelise nurga $2V$ määramine ülalkirjeldatud viisil ei võimalda saada kuigi suurt täpsust (viga kuni $\pm 5^\circ$).

Optilise märgi määramine vaadeldavas lõikes toimub analoogiliselt üheteljelise mineraali märgi määramisele lõikes risti optilisele teljele. Lükates mikroskoobi tubusesse kompensatsiooniplaadikese, saame optiliselt positiivsetes kristallides otsese paralleelsuse 1. ja 3. kvadrantis, vastupidise paralleelsusega aga 2. ja 4. kvadrantis. Optiliselt negatiivsetes kristallides vastupidiselt.



Joon. 46. Näiv ($2E$) ja tõeline ($2V$) optiliste telgede vaheline nurk.

Praktiliselt soovitatakse optilist märki määrata mitte risti asendis, vaid sellest 45° võrra pööratud asendis, kus isogüürid on teineteisest maksimaalselt eemaldunud. Sellises asendis langeb kompensatsiooniplaadi pikem telg kokku kas nüri bissektrissi suunaga või optilise normaaliga N_m . Nüri bissektrissi suund ühendab alati hüperbooli harjasid. Kaheteljelist kristalli loetakse positiivseks, kui nüriks bissektrissiks on N_p , negatiivse kristalli korral on nüriks bissektrissiks N_g . Et N_m väärtus on püsiv, taandub mineraali optilise märgi määramine sisuliselt nüri bissektrissi määramisele. Olgu aga märgitud, et nüri bissektrissil võnkuva valguslaine murdumisnäitaja on muutuv suurus ja sõltub laine normaali kallakusest, mis konoskoopilisel vaatlusel vaatevälja eri osades on erinev. Optilise telje suunas kaksikmurdumist ei esine, seega nüri bissektrissi suunas võnkuva laine $N = N_m$. Optilisest teljest vaatevälja perifeeria suunas positiivse kristalli murdumisnäitaja suureneb, vaatevälja tsentri suunas aga väheneb. Optili-



Joon. 47. Kaheteljelise kristalli optilise märgi määramine teravale bissektrissile ristiasetsevas lõikes; a - positiivne kristall, b - negatiivne kristall.

selt negatiivsetes kristallides ilmneb aga vastupidine nähtus (joon. 47): Murdumisnäitaja N_g või N_p väärtust m_e aga nüri bissektrissi suunas võnkuvale valguslainele kunagi ei saavuta, sest nüri bissektrissi suunas leviv valgus ei ole selles lõikes mikroskoobis jälgitav.

Ülalezitatust selgub, et interferentsvärvuste muutus

eri kvadrantides ei sõltu sellest, kas kipsplaadikese pikenduse suunaga langeb kokku Nm või nüri bissektrissi suund. Kvadrantide määramisel tuleb pidada silmas, et kaarjate isogüüride poolt piiratud kvadrandid võivad aheneda, vastaskvadrandid aga selle arvel laieneda, moodustades liitunud kvadranti.

Optilise märgi määramisel võime kasutada reeglit:

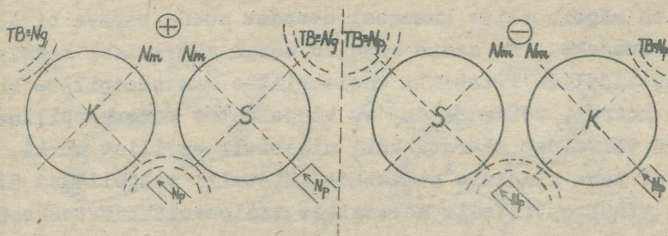
Kui kvadrantides, mida läbib kipsplaat (2. ja 4. kvadrant), ilmneb halli interferentsvärvuse asemel kollane või oranžikaspunane värvus (vastupidine paralleelsus), teistes kvadrantides (1. ja 3.) aga sinine värvus, on mineraal optiliselt positiivne (joon. 47, a). Negatiivsed kristallid annavad nendes kvadrantides vastupidise värvuse (joon. 47, b).

Suure kaksikmurdumisega mineraalide korral, kus ilmneb vaateväljas rida lemniskaate, on optilist märki otstarbekam määrata kvartskiiluga jooksvate vööde meetodil. Lemniskaatide liikumine toimub siin kiilu sisselükkamisel täiesti analoogiliselt üheteljelistele kristallidele. See- ga võime kasutada ka siin sama reeglit: Kui kvadrantides, mida läbib kvartskiil, lemniskaadid liiguvad perifeeria suunas, on mineraal optiliselt positiivne, kui aga lemniskaadid liiguvad tsentri suunas, on mineraal optiliselt negatiivne.

Teravale bissektrissile ristise lõike konoskoopilise kujundi iseloomustamisel ei saa jätta märkimata, et mineraali küllalt suure optiliste telgede nurga $2V$ (näiteks üle 60°) või suure murdumisnäitaja korral ei pruugi olla optilised teljed vaateväljas nähtavad - näiv nurk $2E$ ületab objektiivi haardenurga. Kõnealusel juhul laguneb rist kiiresti mikroskoobi lauakese pööramisel vaatevälja taha kadavateks isogüürideks. Selline konoskoopiline kujund sarnaneb kujundile lõikes risti nürile bissektrissile. Et mineraali optilise märgi määramine toimub nendes lõigetes erinevate reeglite järgi, on soovitatav sellistel juhtudel olla lõike määramisega ettevaatlik.

b) Lõikes, mis on risti nürile bissektrissile jäävad optilised teljed alati vaateväljast välja. Momendil, kui optiliste telgede pind $NgNp$ kattub ühe niitristi niidiga, näeme vaateväljal tumedat risti. Mikroskoobi lauakese pööramisel jaguneb rist kaheks hüperbooliks, mis mikroskoobi lauakese pööramisel 45° võrra kaovad tingimata vaatevälja taha. Olgu märgitud, et selles asendis on hüperbooli kumerusi ühendav suund terava bissektrissi suunaks. Seejärest on vaja mineraali optilise märgi määramisel jälgida, milliste kvadrantide suunas hüperboolsed isogüürid vaatevälja taha kaovad. Nende kvadrantide suunas ongi orienteeritud terav bissektriss (TB). Positiivsetes kristallides on teravaks bissektrissiks Ng , negatiivseks Np . Kipsplaadikese kasutamisel näeme vaateväljas sõltuvalt terava bissektrissi suunast ja mineraali optilisest märgist kas kollast või sinist interferentsvärvust.

Kui kipsplaadikese pikendus langeb kokku terava bissektrissi suunaga, saame optiliselt positiivsetes kristallides kollase, negatiivsetes aga sinise interferentsvärvuse (joon. 48).



Joon. 48. Mineraali optilise märgi määramine nürile bissektrissile ristises lõikes.

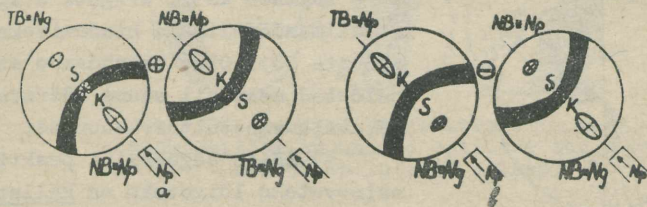
Lõikes risti nürile bissektrissile saame tavaliselt laiavalguva, hajutatud risti, samuti ka laiad hüperboolsed isogüürid, mis mikroskoobi laua pööramisel kaovad kii-

resti vaatevälja taha. Kui aga hüperbooli harud on terava-
piirilised ja liiguvad üle vaatevälja aeglaselt, on võima-
lik, et lõige on risti teravale bissektrissile. Teravale
bissektrissile ristikist lõiget iseloomustab ortoskoopilisel
vaatlusel alati suhteliselt väiksem kaksikmurdumise suurus
ja seega madalam interferentsvärvus. Mineraali optilise
märgi määramine kindlalt orienteerimata lõikes ei ole soovi-
tav.

c) Lõikes risti optilisele normaalile saame konoskoopilise
kujundi, mis sarnaneb väga kujundile, mida vaatlesime
lõikes risti nürile bissektrissile, samuti ka üheteljeliste
kristallide optilisele teljele paralleelses lõikes. Tume,
peasegu kogu vaatevälja kattev rist jaguneb mikroskoobi
laua pööramisel kaheks laiaks hüperbooliks, mis juba 7-12°
laua pöördnurga puhul on vaateväljalt kadunud. Kui 2V on
suur, võib rist jaguneda koguni neljaks hüperbooliks, mis
liiguvad eri kvadrantide suunas. Sel juhul ei ole iseloo-
mustatavas lõikes võimalik mineraali märki määrata. Kahe
hüperbooliharu puhul on kehtivad märgi määramiseks samad
reeglid, mis lõikes risti nürile bissektrissile, sest ka
siin on hüperboolide kumerusi ühendav suund terava bissekt-
rissi suunaks. Et samad reeglid märgi määramisel kehtivad
ka üheteljelise kristalli analoogilise konoskoopilise ku-
jundi korral, võime öelda, et kirjeldatud konoskoopiline
kujund võimaldab määrata küll mineraali optilist märki,
kuid ei luba kindlalt otsustada kristalli teljelisuse üle.
Lõiku risti optilisele normaalile iseloomustab ortoskoopilise
vaatluse korral maksimaalne interferentsvärvus (Ng-Np),
mille alusel on teda võimalik eristada sama mineraali lõige-
test risti nürile bissektrissile.

d) Ühele optilisele teljele ristiasetsevat lõiku ise-
loomustab ortoskoopilisel vaatlusel pleokroismi puudumine,
ristnikolites aga võimalik madal (kuni kustumiseni) inter-
ferentsvärvus. Konoskoopilises kujundis näeme vaateväljal
kogu aeg ühte isogüüri, mis mikroskoobi laua pööramisel

pöörleb vastassuunas oma telje - optilise telje väljatulekukoha - ümber. Isogüür on sirge, kui ta suund on paralleelne ühele niitristi niidile. Suurima kumeruse omandab ta aga niitristi suundadele diagonaalses asendis. Isogüüri kumerus on siin seda suurem, mida väiksem on $2V$. Kui $2V = 90^\circ$, püsib isogüür igas asendis sirge. Sellisel korral ei tule kõne alla ka mineraali optilise märgi määramine ja teda loetakse praktiliselt neutraalseks ($2V = 90^\circ \pm 2^\circ$). Selgelt ilmneva kumeruse korral on võimalik määrata, millises suunas isogüürist asub terav, millises nüri bissektriss ning järelikult otsustada ka kristalli optilise märgi üle. Magu nähtub võrdlusest terava bissektrissile ristise lõike konoskoopilise kujundiga (joon. 43 ja 44), on isogüüri kumerus alati suunatud terava bissektrissi poole. Konoskoopiline kujund on tuletatav kujundist, mille saame teravale bissektrissile ristises lõikes. Erinevus seisneb vaid selles, et vaateväljas näeme vaid ühte hüperbooli haru, nelja kvadranti asemel aga kolme - ühte isogüüri nõgusal, kahte liitunud kvadranti aga isogüüri kumeral küljel (joon. 49). Mineraali optilise märgi määramiseks võib ka-



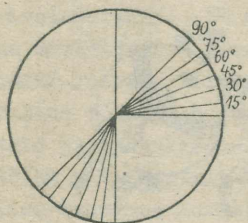
Joon. 49. Kaheteljelise kristalli optilise märgi määramine optilisele teljele ristises lõikes;
a - positiivne kristall, b - negatiivne kristall.

autada seega teravale bissektrissile ristise lõike puhul antud reegleid, tehes eelnevalt endale selgeks, milliste kvadrantidega meil on vaateväljas tegemist. Kõrvuti sel-

lega võib aga rakendada ka järgmist lihtsat reeglit: Kristalli optilise märgi määramiseks lõikes risti ühele optilisele teljele valitakse asend, kus isogüüriil on suurim kõverus ja kipsplaadike lõikab isogüüri enam-vähem ristises suunas. Optiliselt positiivsete kristallide puhul saame kumeruse sees kollase (vastupidine paralleelsus), kumerusest väljaspool (otsene paralleelsus) aga sinise interferentsvär- vuse (joon. 49, a). Optiliselt negatiivsete kristallide korral ilmnevad aga need värvused vastupidiselt (joon. 49, b).

Kui mineraalil on suur kaksikmurdumine, võivad optilise telje ümber esineda lemniskaadid, samuti nagu lõikes risti teravale bissektrissile.

Lõikes risti ühele optilisele teljele on võimalik ligi- kaudselt hinnata 2V suurust isogüüri kumeruse järgi. On tea- da, et $2V = 90^\circ$ korral on isogüür sirge, $2V = 0^\circ$ korral on mineraal optiliselt aga üheteljeline ja vaatevälja keskel näeme tumedat risti. Asendis, kus isogüür on pööratud okulaa- ri niitristi suhtes 45° võrra, vastab 2V suurus isogüüri



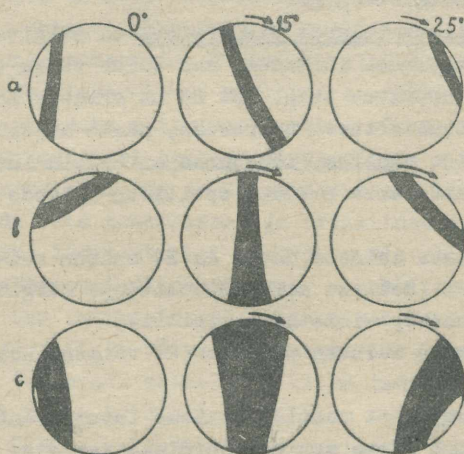
Joon. 50. F. Wrighti diagramm 2V ligikaudselt hindamiseks.

poolt moodustatud väiksemale kaare- nurgale miinus 90° . Sellele põhimõt- tele tugineb ka F. Wrighti diagramm 2V silmamõõduliseks hindamiseks (joonis 50). Olgu tähendatud et kir- jeldatud meetodil saame määrata mitte 2E, vaid vahetult 2V suuruse.

e) Kõige sagedamini praktikas esinevateks lõigeteks on kallutatud lõiked. Viimaste puhul ei tule vaa- teväljas välja ükski optiline ega indikaatriksi telg. Konoskoopiliselt iseloomustuvad need lõiked sellega, et mikroskoobi laua pööramisel lii- guvad üle vaatevälja mitmes suunas sirged või kumerad isogüü- rid. Korraga võib näha vaateväljas vaid ühte isogüüri.

Erinevalt üheteljelise kristalli optilise telje suhtes kal-

lutatud lõikest ei liigu isogüür vaateväljas niitristi niidiga paralleelselt, vaid muudab oma liikumissuunda või kumerust (joon. 51). Mida rohkem on lõige optilise telje suhtes kallutatud, seda laiem ja ebaselgem on isogüür. Väga tugeva kallakusnurga puhul liigub isogüür väga kiiresti üle vaatevälja ähmase halli varjuna. Hajutatud lehviku-kujulised isogüürid ei ole sobivaks lõikeks mineraali optilise märgi määramisel (joon. 51, c), samuti ei anna tulemusi isogüürid, mis liiguvad üle vaatevälja okulaari niitristi suhtes diagonaalselt või on niitristiga paralleelsed



Joon. 51. Kaheteljelise kristalli koskoopilisi kujundeid optilise telje suhtes kallutatud lõikes,

ainult vaatevälja keskel (joon. 51, b).

Optilise märgi määramisel võib soovitada järgmist reeglit:

Kui mikroskoobi laua pööramisele päripäeva isogüür, mis moodustab niitristi vertikaalse niidi suhtes väiksema nurga kui horisontaalse niidi suhtes, läheb paremale, on vaateväljal 3. kvadrant (joon. 51, a). Otsese paralleelsuse, s.o. sinise interferentsvärvuse ilmumise korral on mineraal optiliselt positiivne.

20. Indikaatriksi elementide dispersiooni jälgimine konoskoobis.

Murdumisnäitajate dispersioon kristallides kutsub esile mitte ainult kaksikmurdumise dispersiooni, vaid ka indikaatriksi elementide dispersiooni, s.o. optiliste telgede nurga ja indikaatrikside dispersiooni. See avaldub selles, et erineva lainepikkusega valguse jaoks on optilised teljed ning kogu indikaatriks kristallis erineva kuju või orientatsiooniga.

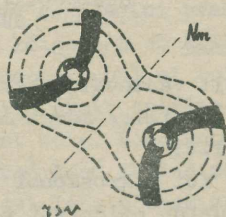
a) Optiliste telgede dispersioon on jälgitav konoskoopilisel vaatlusel lõikudes, kus tuleb välja vaateväljas vähemalt üks optiline telg. Et $2V$ on erineva lainepikkusega valguse puhul erineva suurusega, näeme hüperbooli kumera ja nõgusa külje vahetus läheduses erinevaid interferentsvärvusi. Eraldatakse 2 tüüpi optiliste telgede dispersiooni:

1. Pikemate lainete jaoks on $2V$ suurem kui lühemate lainete jaoks. Sellist dispersioonitüüpi märgitakse $r > v$ (sk. rot - punane, violette - violet).

2. Pikemate lainete puhul on $2V$ väiksem kui lühemate lainete puhul - $r < v$.

Konoskoopilisel vaatlusel näeme interferentsnähtuste tõttu nimetatud värve aga vastupidises asendis. Näiteks dispersiooni $r > v$ puhul näeme hüperbooli nõgusal küljel sinakat, kumeral küljel aga punakat värvust (joon. 52).

Punase valguse jaoks on optiline telg (s.o. käiguvahe null) nõgusal küljel, mistõttu punane värvus on seal kustunud ja näeme selle täiendvärvust. Analoomiliselt sellele näeme täiendvärvisena punast punktides, kus asub optiline telg violetse valguse jaoks.



Joon. 52. Optiliste telgede dispersioon
 $r > v$.

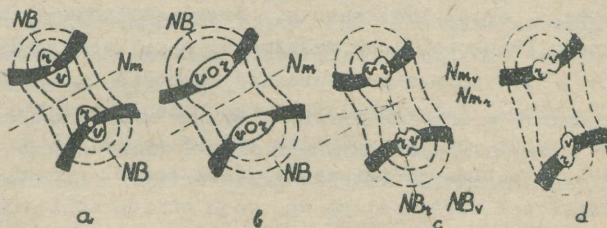
Optiliste telgede tugeva dispersiooni korral ei ole ka hüperbooliharud päris mustad, vaid kromaatiliste servadega, ühelt poolt punakad, teiselt poolt sinakad. Tugeva dispersiooniga on tuntud näiteks titaniit ($2R_T = 51^\circ$, $2E_V = 40^\circ$) ja brukiit. Enamikul mineraalidel avaldub optiliste telgede dispersioon nõrgalt.

Ortoskoopilisel vaatlusel põhjustab optiliste telgede dispersioon lõikes risti ühele optilisele teljele ristnikolis mineraali nõrga helendumise. Kustumise asemel näeme nõrka hallikat interferentsvärvust.

Optiliste telgede dispersiooni võib puhtal kujul jälgida vaid rombilise süngoonia kristallides. Monokliinses ja trikliinses süngoonias lisandub sellele veel indikaatriksi telgede dispersioon, mistõttu konoskoopilised kujundid on oma värvuste paigutuselt vähem sümmeetrilised.

b) Indikaatriksi telgede dispersioon, s.o. eri lainepikkuste korral N_g , N_m ja N_p erinev asend kristallis, võib ilmneda vaid monokliinses ja trikliinses süngoonia kristallides, kus indikaatriksi teljed ei ole rangelt seotud kristalli sümmeetriaelementidega. Monokliinses süngoonias, kus ainult üks indikaatriksi telg on seotud kristallograafilise teljega (L_2), võivad dispergeeruda kaks vaba asendiga telge. Vastavalt sellele, milline indikaatriksi telgedest langeb kokku kristallograafilise teljega, saame:

I) $L_2 = N_m$ - kallutatud dispersiooni, kus dispergee-



Joon. 53. Indikaatriksi telgede dispersioon; a - kallutatud dispersioon, b - horisontaalne dispersioon, c - ristine dispersioon, d - asümmeetriline dispersioon.

ruvad nii nüri kui ka terav bissektriiss. Dispersioon on jälgitav lõikes risti teravale bissektriissile ja avaldub kummagi optilise telje erinevas dispersioonis: ühe telje puhul $r > v$, teise puhul aga $r < v$ (joonis 53, a).

II) $L_2 \equiv NB$ - horisontaalse dispersiooni. Viimast võib jälgida näiteks adulaari juures. Optiliste telgede pind on erineva lainepikkusega valguse puhul erinev (joon. 53, b).

III) $L_2 \equiv TB$ - ristise dispersiooni. Selle dispersioonitüübi korral moodustuvad eri lainepikkusega valguse korral omavahel lõikuvad optiliste telgede pinnad (joon. 53, c). Ristise dispersiooni saame näiteks booraksi kristallis.

Trikliinse süngoonia kristallides ei lange üksi indikaatriksi telg kokku kristallograafilise teljega, mistõttu kõik kolm telge on disperseeritud. Vastavat dispersiooni nimetatakse asümmeetriliseks (joon. 53, d).

E. Plagioklasside määramise meetodid.

Kivimiõhikute mikroskoopilisel uurimisel on üheks olulisemaks lüliks plagioklasside määramine. Esinedes enamikus kivimitüüpides kivimit moodustava mineraalina, peegeldab plagioklassi koosseis suurel määral kivimi keemilist koostist ja seega ka asendit klassifikatsioonis. Kuivõrd plagioklassi koostis on väga tihedalt seotud tema optiliste omadustega, eriti indikaatriksi orientatsiooniga, tuginetakse tema mikroskoopilisel määramisel optiliste omaduste uurimisele. Plagioklasside määramise meetodid optiliste konstantide alusel leiavad ulatuslikku rakendamist Fjodorovi meetodi puhul, kus on võimalik anda mineraalilõikele optiliste konstantide mõõtmiseks vajalik asend. Tavalisel mikroskoopilisel uurimisel on aga vaja otsida sobivaimad lõigud optiliste konstantide määramiseks.

Alljärgnevalt tutvume plagioklasside mikroskoopilise määramise mõnede enamlevinud meetoditega. Tuleb aga kohe

märkida, et kõik esitatud meetodid on statistilised meetodid, mis nõuavad vaatlusi terves reas sobivates mineraalilõigetes.

21. Plagioklassi määramine ta murdumisnäitaja võrdlemisel kvartsi murdumisnäitajaga.

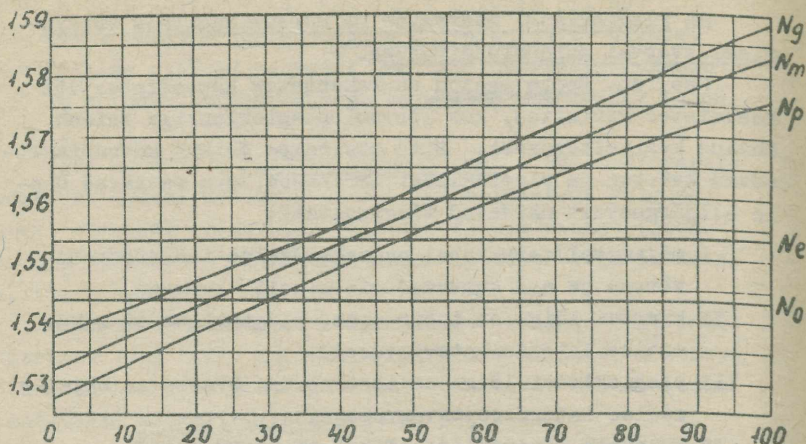
See, nn. Becke meetod on rakendatav happelistes või keskmistes kivimites, kus kõrvuti plagioklassiga esineb õhikus kvartsiterakesi. Siin otsitakse õhikus kõrvuti asetsevad kvartsi ja plagioklassi terakesed, mis vastavad ühele alljärgnevalt näidatud tingimustest:

- I mõlematel terakestel on maksimaalne interferentsvärvus ja nad kustuvad ristnikolis korruga,
- II kvartsi lõige on isotroopne, plagioklass on maksimaalse interferentsvärvusega,
- III plagioklassi lõige on isotroopne, kvarts on maksimaalse interferentsvärvusega,
- IV mõlemate mineraalide lõiked on isotroopsed.

Kõikidel juhtudel saame omavahel võrrelda kvartsi ja plagioklassi peamisi murdumisnäitajaid: esimesel juhul kvartsi N_o ja N_e suurust plagioklassi N_g ja N_p suurusega, teisel juhul kvartsi N_o plagioklassi N_g ja N_p suurusega, kolmandal - kvartsi N_o ja N_e plagioklassi N_m suurusega ja neljandal juhul - kvartsi N_o suurust plagioklassi N_m suurusega.

Nagu nähtub kvartsi ja plagioklasside murdumisnäitajaid kujutavalt diagrammilt (joon. 54), on võimalik sellise võrdlusmeetodiga määrata plagioklasse kuni nr. 46-ni. Määramistäpsus on siin 2-3%.

Murdumisnäitajate suurust võrreldakse Becke joonekese liikumise põhjal, tehes kompensatsiooniplaadikese abil eelnevalt kindlaks indikaatriksi telgede asendi mineraaliterakestes.



Joon. 54. Plagioklasside murdumisnäitajate sõltuvus koostisest.

Plagioklassi numbril määramisel võib kasutada ka alljärgnevalt esitatud tabelit (tabel III).

T a b e l III

Murdumisnäitajate suhe	Plagioklassi number	Plagioklassi nimetus
------------------------	---------------------	----------------------

I tingimus. Kvartsi ja plagioklassi terakesed on maksimaalse kaksikmurdumisega lõikes ning samaaegse kustumisega.

a) Otsene paralleelsus

$$N_p < N_o; N_g < N_e$$

0 - 22

albiit kuni keskmine oligoklass

$$N_p = N_o; N_g < N_e$$

22 - 29

keskmine oligoklass

$$N_p > N_o; N_g = N_e$$

29 - 40

andesiin

1	2	3
$N_p > N_o; N_g > N_e$	40	aluseline plagioklass andesiin kuni anortsiit
b) Vastupidine paralleelsus		
$N_p < N_e; N_g < N_o$	0 - 16	albiit või oligoklassalbiit
$N_p < N_e; N_g = N_o$	16 - 22	happeline või keskmine oligoklass
$N_p < N_e; N_g > N_o$	22 - 40	aluseline oligoklass kuni andesiin
$N_p = N_e; N_g > N_o$	40 - 46	aluseline andesiin
$N_p > N_e; N_g > N_o$	46 - 100	aluseline plagioklass andesiin kuni anortsiit

II tingimus. Kvartsi lõige on isotroopne, plagioklassi lõige maksimaalse kaksikmurdumisega.

$N_g < N_o$	0 - 16	albiit või happeline oligoklass
$N_g = N_o$	16 ± 2	keskmine oligoklass
$N_g > N_o; N_p < N_o$	16 - 30	keskmine või aluseline oligoklass
$N_p = N_o$	30 ± 2	oligoklass-andesiin
$N_p > N_o$	> 30	andesiin kuni anortsiit

III tingimus. Plagioklassi lõige on isotroopne, kvartsi lõige maksimaalse kaksikmurdumisega.

$N_m < N_o$	0 - 22	albiit või happeline oligoklass
$N_m = N_o$	22 ± 2	oligoklass
$N_e > N_m > N_o$	22 - 38	aluseline oligoklass kuni happeline andesiin

$N_e = N_m$	38 ± 2	andesiin
$N_e > N_m$	> 38	andesiin kuni anortsiit

IV tingimus. Kvartsi ja plagioklassi lõiked on isotroopsed.

$N_m < N_o$	$0 - 22$	albiit kuni happeline oligoklass
$N_m = N_o$	22 ± 2	oligoklass
$N_m > N_o$	> 22	keskmine oligoklass kuni anortsiit

Plagioklasside määramisel ülalkirjeldatud meetodil saame seda täpsema tulemuse, mida enam erinevatele tingimustele vastavaid mineraalipaare vaadeldakse.

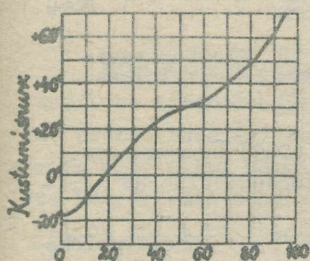
22. Plagioklassi määramine maksimaalse sümmeetrilise kustumisnurga järgi (Michel-Levy meetod). Plagioklasside sümmeetriline kustumine kaksikuõbluse suhtes ilmneb lõikes risti (010) pinnale, kui plagioklassi polüsünteesilised kaksikud on moodustunud tahuseaduse (albiidi seaduse) järgi. Selleks otsitakse plagioklassi lõige, milles on selgelt nähtav kaksikustruktuur (010) järgi. Selles lõikes kaob plagioklassi kaksikustruktuur täielikult, kui kaksikuõmblus langeb kokku ühe nikoli võnkumistasapinnaga. Samuti ei ole kaksikustruktuur nähtav kaksikuõmbluse diagonaalses asendis, s.o. 45° nurga all nikolite võnkepindadele. Lõike ristist asendit (010) pinnale kontrollitakse kaksikuõmbluse liikumise järgi mikroskoobi tuubuse liigutamisel: ristise lõike korral peab kaksikuõmblus jääma paigale.

Kustumisnurga all mõeldakse nurka (010) pinna ja N_p vahel. Selle nurga mõõtmiseks fikseeritakse mikroskoobi laua nooniuselt lugemid kõrvutiste kaksikulamellide kustumismomentidel ning kaksiku asendis, kus kaksikuõmblus on paralleelne okulaari niitristi niidiga. Mõlema kaksikindiviidi kustumisnurgad kaksikuõmbluse suhtes peavad olema

võrdsed. Maksimaalse kustumisnurga leidmiseks määratakse kustumisnurgad reas ülalesitatud tingimustele vastavates mineraalilõigetes.

Nagu näitavad kogemused, on võimalik plagioklassi määramiseks kasutada ka lõikeid, mis ei ole täpselt risti (010) pinnale, vaid on kallutatud sellest asendist väikese nurga all. Näiteks 10-15° erinevuse korral ristisest asendist ei erine kustumisnurk üle 2-3°. Sellistes lõigetes ei saa me ka kaksikutele täpselt sümmeetrilist kustumist. Sellisel juhul võetakse lugemitest keskmine, mis vastab sümmeetrilisele kustumisnurgale.

Nagu ilmneb joon. 55 võimaldab maksimaalne sümmeetriline kustumisnurk määrata plagioklasse alates 40 numbrist.



Joon. 55. Plagioklasside maksimaalne sümmeetriline kustumisnurk.

Happelisti plagioklasse on võimalik omavahel eristada lõigete korral, kus näeme lõhenevuslõhesid (010) ja (001) järgi. Happelistel plagioklassidel kuni nr. 20 asub H_p lõhenevus nürinurgas (nn. negatiivne kustumine), kõigil teistel plagioklassidel aga teravnurgas (positiivne kustumine).

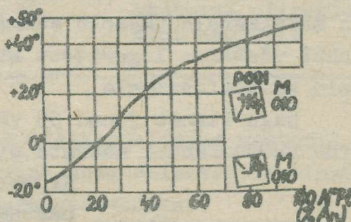
Et tavaliselt ei ole lõhenevuslõhed iseloomustatud mineraalilõikes märgatavad, on happeliste plagioklasside puhul vaja täiendavalt kontrollida murdumisnäitajat või kombineerida see meetod eelpool kirjeldatud meetodiga.

23. Plagioklassi määramine kustumisnurga järgi lõikes 1(010) ja (001) (Becke ja Beckeri meetod).

Selle meetodi puhul määratakse plagioklassi number lõikes risti teisele (010) ja kolmandale (001) pinakoidile. Et mõlema pinakoidipinna järgi on plagioklassides täiuslik lõhenevus, iseloomustub ülalnimetatud mineraalilõige üksteise suhtes enam-vähem risti ($\approx 87^\circ$) paiknevate kahesu-

naliste lõhenevuslõhedega. Lõike ristist asendit saab kontrollida lõhenevuslõhede liikumise järgi mikroskoobi tuubuse liigutamisel.

Plagioklassi määramisel tuginetakse kustumisnurka Np' (010) suurusele, mis on erinevates plagioklassides erinev. Nagu nähtub diagrammilt (joon. 56), vastab kustumisnurka muutumisele 1° võrra ka plagioklassi koostise muutus umbes 1% võrra. Eriti täpseid tulemusi võib selle meetodi korral saada albiidist kuni bitoviidini nr. 80, millise koostisega ongi kivimites enamesinevad plagioklassid.



Happeliste plagioklasside (kuni nr. 40) määramisel on oluline osata eristada positiivset ja negatiivset kustumisnurka.

Positiivseks loetakse kustumisnurka, nagu eelmise meetodi korral, kui Np' võnkumissuund asetseb lõhenevuslõhede (010) ja (001) teravnurgas. Negatiivse kustumisnurka puhul on Np' lõhenevuslõhede nürinurgas.

Joon. 56. Plagioklasside kustumisnurk lõikes (010) ja (001).

Et kustumisnurka mõõdetakse Np' ja (010) lõhenevuslõhede vahel, on vaja osata eristada ka lõhenevuslõhesid (010) ja (001) järgi. Olgu märgitud, et need lõhenevuslõhed ei erine väliselt tunnustelt: mõlema pinna järgi on mineraali lõhenevus täiuslik, samuti võivad mõlema pinnaga paralleelselt esineda ka polüsünteesiliste kaksikute lamellikesed.

Nagu selgub joon. 56, on Np' suund aga iseloomustatavas lõikes alati lähemal lõhenevuslõhede (010) järgi,*) milline tunnus ongi kriteeriumiks nende lõhenevuslõhede määramisel.

*) Erandiks on plagioklassid numbriga 85-100, kus Np' on enam-vähem lõhenevusnurga bissektrissiks.

Sagedamini on esindatud ka kaksikulamellid (010) järgi, s.o. albiidi seaduse järgi. Need kaksikulamellid on ühtlaselt valgustatud, kui kaksikuõmblus on paralleelne okulaari niitristi niidiga.

Kirjeldatud meetodit võib kasutada ka juhul, kui lõik ei asetse teisele ja kolmandale pinakoidile täpselt risti, vaid on sellest asendist väikese nurga võrra kallutatud.

Viimatiiseloomustatud meetod on plagioklasside mikroskoopilise uurimise korral üks lihtsamaid ja paremaid, sest ta annab kindlama ja täpsema tulemuse kui eelpool kirjeldatud meetodid. Seepärast on soovitatav sobivate lõigete esinemisel õhikus eelistada seda meetodit.

F. Kvantitatiivse mineraloogilise analüüsi geomeetrilised meetodid.

Kivimitüübi määramisel on oluline teada peale kvalitatiivse mineraloogilise koostise ka esinevate mineraalide protsentuaalset vahakorda. Viimase ligikaudne hindamine n.ö. silma järgi on subjektiivne ning väheste kogemuste korral võib põhjustada jämedaid vigu. Mineraalide suhtelist hulka on võimalik küllaldase täpsusega määrata kivimiõhiku mikroskoopilisel vaatlusel mitmesuguste geomeetrilise analüüsi meetoditega.

24. Joonmeetod.

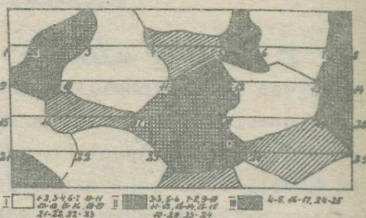
Joonmeetod tugineb eeldusele, et õhikutes esinevate mineraalide lineaarsete mõõtmete suhe vastab nende pindalade ning samuti ruumalade suhtele. Kivimis esinevate mineraalide õige suhtvahakorra määramiseks on vaja mõõta mineraaliterakesi süstemaatiliselt ja suurel hulgal. Mõõtmiste süstemaatilisuse tagab mineraalide mõõtmete määramine piki kindlaid jooni teatud intervalli järele. Joonmeetodi puhul määratakse kivimiõhikus esinevate mineraalide mõõtmed tavaliselt reas paralleelsetes suundades kas ühe või mitme

õhiku ulatuses. Suundade (joonte) vahakaugus sõltub kivimi struktuurist ja peaks vastama uuritava kivimi keskmisele terasuursele.

Küllaldase hulga mõõtmisandmete puhul summeeritakse eri mineraalide kohta leitud pikkuslõigud. Saadud arvud väljendavad mineraalide mahulisi vahakordi kivimis. Mineraalide kaaluprotsentide leidmiseks on vaja tulemused korrutada eelnevalt vastava mineraali erikaaluga.

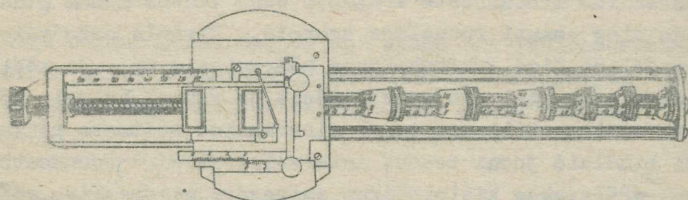
Joonmeetodi rakendamisel võib kasutada okulaarmikromeetrit ja preparaadinihutajat. Seejuures liigutatakse õhikut horisontaalses asendis olevale okulaarmikromeetri joonele paralleelselt ning mõõdetakse iga mineraaliterakse kohta tulev pikkuslõik. Pärast kogu õhiku süstemaatilist läbivaatamist (joon. 57) iga mineraali kohta saadud pikkuslõigud liidetakse ning arvutatakse mineraalide suhtevahekorrad.

Mineraalide kvantitatiivsete vahakordade hindamise hõlbustamiseks on joonmeetodi puhul soovitatav kasutada integratsioonilauakest. Viimasel toimub joonlõikude summeerimine automaatselt.



Joon. 57.

Mineraloogilis-petrograafilise uurimise praktikas kasutatakse laialdasemalt Andini integratsioonilauakest (joon. 58). Viimasega saab õhikus registreerida kuni



Joon. 58.

6 eri mineraali hulka. Selleks on preparaadinihutaja seotud horisontaalsuunas orienteeritud võlliga, millele on monteeritud 6 sõltumatult pöörlevat trumlikest. Integratsioonilauake asetatakse mikroskoobi aluslauale nii, et trumlikesed jäävad paremale. Trumlikeste pööramisele kaasneb preparaadi liikumine. Liikumise intervall on aga fikseeritav trumlikeste limbil.

Kirjeldatud integratsioonilauakese kasutamisel valitakse igale mineraalile kindel trumlike. Trumlikest pööratakse seni, kuni niitristi alla tuleb teine mineraal. Järgneb preparaadi nihutamine teisele mineraalile vastava trumlikese abil jne. kuni õhiku servani. Õhiku tagasivõtmine teise serva toimub integratsioonilauakese vasakul pool oleva kruvi abil. Õhikut saab vertikaalsuunas liigutada preparaadinihutajaga.

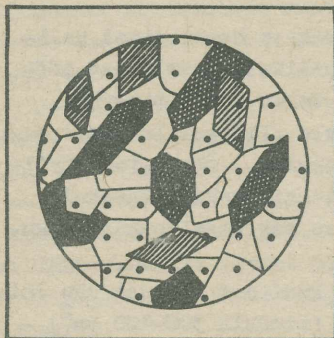
Joonmeetodiga võib saavutada kuni 1 % täpsuse ühe õhiku süstemaatilisel läbivaatamisel (pindala 300-400 mm²) vaid kuni 2 mm keskmise terasuurusega ja massiivse tekstuuriga kivimist. Jämedamateralistes kivimites on aga samasuguse täpsuse saamiseks vaja analüüsida rohkem õhikuid. Orienteeritud tekstuuriga kivimitest on soovitav analüüsida erinevates suundades valmistatud orienteeritud õhikuid.

25. Punktmeetod.

Punktmeetod on üks lihtsamaid kvantitatiivse mineraaloloogilise analüüsi viise. Siin määratakse üksteisest võrdsel kaugusel asuvate punktide arv, mis jääb ühe või teise mineraali kohale õhikus. Kui loendatud punktide hulk on küllaltki suur, vastab suurte arvude seaduse põhjal punktide vahekorrd mineraalide pindalade (samuti ka ruumalale) vahekorrale.

Praktiliselt töövõtelt on punktmeetod oma lihtsamal kujul lähedane joonmeetodile. Ka siin kasutatakse okulaarmikromeetrit ning preparaadinihutajat. Õhik vaadatakse läbi süstemaatiliselt, kusjuures loendatakse vaid mineraalid,

mis jäävad preparaadinihutaja igal järgmisel liigutamisel niitristi keskpunkti. Fikseerimispunktide ja -joonte vahed-
kauguseks valitakse kivimi keskmine terajämedus (joon. 59).
Punktide vahemaa fikseeritakse kas okulaarmikromeetri või
preparaadinihutaja skaala järgi.



Joon. 59.

Samas vaateväljas on võimalik suurt arvu (100-200) punkte fikseerida võrkokulaar-
mikromeetrit või ruudukujulise võrguga plaadikest kasutades. Viimane asetatakse okulaari tuubusesse, millel pundub niitrist. See moodus on kasutatav tingimusel, kui kivimi keskmine terasuurus vastab ligikaudu võrgu ühele ruudule. Järgmise vaatevälja loendamiseks nihutatakse õhik edasi

kas horisontaal- või vertikaalsuunas terve ruudustiku võrra.

Et punktmeetod eeldab pidevat ülesmärkimist, on ta küllaltki aeganõudev. Loendamise hõlbustamiseks saab siin aga edukalt kasutada lihtsaid klaviatuuriga loendajaid-summaatoreid.

Täielikult on mineraalide suhtvahetade määramine punktmeetodil automatiseeritud Glagolevi pušš-integraatori kasutamisel. Viimases on preparaadinihutaja painduva trosi abil ühendatud registraator-loendajaga. Iga vajutus klaviatuurile registreerib loendatud mineraali ning põhjustab ühtlasi õhiku edasinihkumise vajaliku intervalli võrra.

Punktmeetodi täpsus kvantitatiivsel mineraloogilisel analüüsil ei jää oluliselt maha joonmeetodi täpsusest. 1% täpsuse saavutamiseks on nõutav määrata mineraalid vähemalt 1000 punktis.

26. Pindmeetod.

Mineraalide pindalade suhete ligikaudseks määramiseks

kasutatakse võrkokulaarmikromeetrit (10x10 või 20x20 ruudustikuga). Õhiku vaatlemisel loendatakse, mitu ruutu katab üks või teine mineraaliterake. Osaliselt mineraali poolt kaetud ruudud võetakse arvesse juhul, kui vastav mineraal katab ruudust enam kui poole.

Ka pindmeetodil on tulemuste summeerimiseks otstarbekohane kasutada loendajaid.

Võrreldes varemkirjeldatud meetoditega annab pindmeetod vähemtäpseid tulemusi (täpsus 5-10 %), eriti polümineraalsete ja ebaühtlase terajämedusega kivimite puhul.

Pindmeetod kui üks lihtsamaid analüüsi geomeetrilisi meetodeid leiab praktikas sageli kasutamist mineraalide kvantitatiivsete vahekordade ligikaudsel hindamisel.

27. Purdsete kivimite kvantitatiivsest mineraloogilisest analüüsist.

Purdsetest kivimitest tulevad mikroskoopiliseks analüüsiks kõne alla eelkõige peeneteralised liivad ja aleuriidid. Nende mineraloogilise koostise määramine toimub tavaliselt immersioonimeetodil (vt. pt. III).

Purdkivimite mikroskoopilist analüüsi võib teostada kas algproovis või terajämeduse, erikaalu, magnetilisuse, elektromagnetilisuse vm. tunnuste alusel eraldatud funktsioonides.

Mineraalide kvantitatiivsete vahekordade leidmiseks ebaühtlase terajämedusega või fraktsioneerimata setetes on vaja arvestada terakeste suurus. Et eri mineraalid esinevad purdkivimis sageli eri suurusjärku terakestena, ei vähene terajämeduse erinevustest tingitud vead nimetamisväärselt ka analüüsitava mineraalide arvu suurendamisel. Sellisel korral võib teostada mikroskoopiliselt kõrvuti mineraalide määramisega kõikide preparaadil olevate terakeste mõõtmise. Selleks liigutatakse preparaati okulaarmikromeetri skaalale ristises suunas ning fikseeritakse iga terake (mineraal ja selle läbimõõt või suurusklass)

skaalajoone ületamisel. Sellise detailise analüüsi tulemusel saame ühtlasi purdkivimi granulomeetrilise koostise. Ühe või teise mineraali keskmise sisalduse leidmiseks kivimis võib kasutada valemit:

$$q = \frac{x_1 k_1 + x_2 k_2 + \dots + x_n k_n}{X_1 k_1 + X_2 k_2 + \dots + X_n k_n}, \text{ kusjuures}$$

q - teatud mineraali mahuline protsent kivimis;

x_1, x_2, x_n - mineraaliterakeste arv eri suurusklassides;

X_1, X_2, X_n - kõikide loendatud mineraalide hulk eri suurusklassides;

k_1, k_2, k_n - suurusklassi koefitsient, mis näitab vastava suurusklassi terakese mahu erinevust kõige väiksema analüüsitud suurusklassi kuuluva keskmise terakese mahust;

n - arvestatud suurusklasside hulk.

Koefitsiendi k võib arvutada vastavalt eraldatud suurusjärgu keskmisele terasuurusle. Tabelil IV on esitatud koefitsientide väärtused enamkasutatavate granulomeetriliste intervallide jaoks, kusjuures väikseimaks suurusklassiks on võetud vahemik 0,10-0,01mm.

T a b e l I V

Fraktsioon mm	0,01-0,10	0,10-0,25	0,25-0,50	0,50-1,00
Keskmine diameeter mm	0,055	0,175	0,375	0,75
Koefitsient	1	32	320	2500

Ülaltoodud valemit võib kasutada ka proovi keskmise mineraloogilise koostise arvestamisel eri fraktsioonidest tehtud analüüsi tulemuste järgi.

Suhteliselt lihtsamaks ja vähem aeganõudvaks mineraalide suhtvahekorra määramise viisiks ebaühtlase terajämedu-

sega setete puhul on nn. valikanalüüs. Valikanalüüsil kasutatakse erilise võrguga nn. Glagolevi võrguga plaadikest, mis asetatakse okulaari tuubusesse. Glagolevi võrk koosneb 4 kontsentrilisest ringist, mille pindala on jagatud ruutudeks. Ringide pindala on võrdeline selle piires esinevate ruutude külje kuubiga (joon. 60).

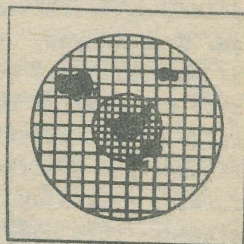
Vaatevälja igas ringis loendatakse mineraaliterakesi eraldi. Arvesse võetakse vaid need terakesed, mille pindala ületab vastava ruudu pindala. Kui mõni mineraal langeb ringi vaid osaliselt, arvestatakse teda juhul, kui ta kaatab ringis enam kui ühe ruudu.

Valikanalüüsil läbiviidud mineraalide loendamise arvulised andmed vastavad mineraaliterakeste mahulis-tele vahakordadele. Meetodi täpsus on enam-vähem isomeetrilise kujuga terakeste korral küllaltki suur.

Purdkivimi mineraloogilisele analüüsile eelneva fraktsioneerimise eesmärgiks on tavaliselt mineraloogilise koostise määramise hõlbustamine. Samal ajal rea erinevate fraktsioonide analüüs on sageli töömahukam ja muudab kivi- mi keskmise mineraloogilise koostise väljaarvutamise komplitseerituks.

Eelnevalt sõelutud fraktsioonide mineraloogilisel analüüsil mineraalide terajämedust tavaliselt ei arvestata. Kuigi näiteks granulomeetrilises fraktsioonis 0,25-0,10 mm ekstreemsete terasuurustega isomeetrilised terakesed erinevad mahult kuni 15 korda, eeldame, et suure arvu terakeste loendamisel on kõikumised taandatavad keskmisele terasuurusele.

Preparaadiklaasile puistatud mineraalid määratakse kogu vaatevälja piires arvuliselt, kusjuures preparaati nihutatakse edasi vaatevälja kaupa. Tõepäraste kvantitatiivsete vahakordade leidmiseks on soovitatav loendada kokku 400-500 terakest.



Joon. 60.

Keskmise proovi mineraloogilisel analüüsil võime rahuldavaid tulemusi saada vaid peamiste kivimit moodustavate mineraalide (kvarts, päevakivid, vilgud jt.) suhtvahekor-
rast. Nende kõrval leidub purdkivimites mitmesuguseid teisi mineraale (tsirkoon, granaat, turmaliin, apatiit, maakmineraalid jm.), mis analüüsitavas preparaadis esinevad vaid üksikute terakestena või koguni puuduvad. Ometi pakuvad nende sisalduse täpsemad andmed suurt huvi kas paleogeograafilisest, stratigraafilisest, tööstuslikust jm. seisukohast. Enamasti on sellised mineraalid kvartsist ja päevakividest suurema erikaaluga ning kuuluvad nn. raskete mineraalide rühma. Raske fraktsiooni mineraalide hulga ja kvantitatiivsete vahekordade määramiseks separeeritakse nad proovist rasketes vedelikes (tavaliselt bromoformis, erikaaluga 2,89). Rasked mineraalid analüüsitakse enamasti vaid ühes granulomeetrilises fraktsioonis (näit. 0,25–0,10 või 0,10–0,05 mm). Üksikute mineraalide protsent arvutatakse vastavalt loendatud terakeste arvule kas raske fraktsiooni suhtes või kogu granulomeetrilise intervalli kohta.

Olgu märgitud, et terakeste arv vastab nende mahule vaid enam-vähem ühesuguse kujuga mineraalide korral. Mõned mineraalid on aga sageli teiste põhiliste isomeetriliste terakeste hulgas esindatud väljavenitatud prismaliste (ruutiil, tsirkoon), tahveljate või soomuseliste (vilgud) terakestena. Ei oleks õige purdkivimite analüüsil näiteks vilgusoomuste arvu kvantitatiivsete vahekordade näitamisel kõrvutada kvartsi, päevakivi vt. terakeste hulgaga. Vilgu lehekeste maht on vähemalt 10 korda väiksem sama mõõtmetega isomeetriliste terakeste mahust. Seepärast on vaja purdsete mineraloogilisel analüüsil saadud arvuliste andmete transformeerimisel mineraalide esinemissageduseks va- ja sisse viia ka kujust tingitud parandused.

III Immersioonimeetod

1. Immersioonimeetodi olemus.

Immersioonimeetod on tuntud eelkõige mikroskoopiliste kristallikeste või pulbrilise aine murdumisnäitajate määramise meetodina. Immersioonianalüüsil vaadeldakse mineraaliterakesi preparaadiklaasile asetatud immersioonikeskkonnas, mille murdumisnäitaja on täpselt teada. Immersioonikeskkonnana kasutatakse tavaliselt vedelikke, harvem sulameid. Keskkonna ja mineraali murdumisnäitaja erinevustest sõltub mineraali pinna ja piirjoonte iseloom ja kontrastsus mikroskoobi vaateväljas. Murdumisnäitajate suure erinevuse korral ilmnevad terakeste reljeef ja piirjooned selgelt. See on tingitud täielikust sisepeegeldusest kahe keskkonna piiril. Murdumisnäitajate erinevuse vähenemisel reljeefi kontrastsus väheneb kuni kristall muutub immersioonikeskkonnas peaaegu nähtamatuks. Erineva murdumisnäitajaga immersioonikeskkondade sihikindla vahetamise või keskkonna murdumisnäitaja suuruse muutmise (kromaatiline ja termiline variatsioon) teel saavutatakse uuritava aine ja immersioonikeskkonna murdumisnäitaja kokkulangemine. Mineraali murdumisnäitaja fikseeritakse kokkulangemismomendil keskkonna murdumisnäitaja järgi. Juhul, kui mineraali murdumisnäitaja on kahe lähedase murdumisnäitajaga vedeliku suhtes vahepealne, võib määrata selle väärtuse interpretatsiooni teel.

Mineraalide murdumisnäitaja täpne määramine ei ole tavalisel petrograafilisel uurimisel aga omaette eesmärgiks, vaid üheks mineraalide määramise võimaluseks. Samuti nagu teised optilised tunnused, ei ole ka murdumisnäitaja mineraali lõplikuks määramiseks enamasti küllaldane. Esiteks, mingile murdumisnäitaja väärtusele võib vastata mitu mineraali. Teiseks, anisotroopsete kristallide murdumisnäitaja sõltub kristalli asendist preparaadis ning leitavad murdumisnäitajate väärtused ei pruugi vastata mineraali iseloomustavatele N suurustele. Kolmandaks, rea mineraalide murdumisnäitajad ei olegi konstantsed suurused, vaid varieeruvad keemilisest koostisest või lisanditest sõltuvalt. See-

tõttu on immersioonimeetodi puhul vaja arvestada peale murdumisnäitaja kõiki teisi mineraali optilisi või morfoloogilisi tunnuseid, mida mikroskoopilisel vaatlusel on võimalik kindlaks teha. Peale selle on oluline silmas pidada ka mineraalide parogeneesi.

Immersioonimeetodi esimeseks autoriks tuleb lugeda O. Maschket (1872, 1890). Ta kirjeldas külvalgustuse efekti ning kristalli ja ümbritseva keskkonna piiril ilmnevat heledat vööndit. Viimast tuntakse nüüd Becke joonena F. Becke järgi, kes soovitas seda efekti kasutada mineraalide murdumisnäitajate võrdlemiseks õhikus.

Laialdasemalt hakkas immersioonimeetod mineraalide määramise praktikas juurduma tänu J.L.C. Schroeder van der Kalki töödele (1899, 1900). Viimane kirjeldas üksikasjalikult analüüsi meetodikat ning soovitas kasutada umbes 60 immersioonivedelikku (murdumisnäitajatega 1,33-1,98).

Tänapäeval on immersioonimeetod laialdaselt juurdunud purdsete setete ja tardkivimite aktseessoorsete mineraalide määramise praktikas. Tänu olulisemate optiliste tunnuste kompleksele arvestamisele annab immersioonimeetod häid tulemusi ka uuritava mineraali väga väikeste koguste (mõni mikroskoopiline terake) puhul. Järjest rohkem leiab ta rakendamist ka välitööde mikroskoopilise meetodina.

2. Immersioonikeskkonnad.

Immersioonikeskkonnadena leiavad kõige enam rakendamist vedelikud, murdumisnäitajaga 1,4-1,8. Immersioonivedelike komplekti kuulub tavaliselt kuni 100 eri murdumisnäitajaga vedelikku. Neid valmistatakse omavahel hästi segunevate põhivedelike segamisel. Põhivedelikele esitatakse järgmised nõuded:

- 1) nad ei tohi lahustada mineraale;
- 2) nad ei tohi olla intensiivselt värvunud, suure viskoossusega, mürgised ega kergelt lenduvad;
- 3) nad peavad olema keemiliselt püsivad ning seisemiselt säilitama konstantse murdumisnäitaja;

Tabel V.

Immersioonivedelike murdumisnäitajad.

	$n_{D_{20^{\circ}C}}$	$\frac{dn}{dt}$	Märkused
Metüülpiiritus	1,330		
Vesi	1,333	nõrk	
Atsetoon	1,357		
Etüülpiiritus	1,362	0,00040	
Amüülalkohol	1,409	0,00042	Lahustab mitmeid madala N-ga mineraale
Petrooleum	1,448	0,00035	
Glütseriin	1,473		
Ortoksülool	1,496		
Monokloorbensool	1,527	0,00053	
Kanada balsam	1,537		
Nitrobensool	1,553	0,00046	
Monobroombensool	1,560	0,00054	
Bromoform	1,589	0,00056	
Monojoodbensool	1,621	0,00054	
α -monokloornaftaliin	1,626	0,00053	
α -monobroomnaftaliin	1,658	0,00048	
α -monojoodnaftaliin	1,700	0,00048	
Joodmetüleen	1,737	0,00070	Valguse käes seisest muutub tumedaks. Seda välditakse metallse Cu või Sn tükkide lisamisega.
8 küllastatud lahus joodmetüleenis	1,778	---	

- 4) segatavatel vedelikel peavad olema toatemperatuuril lähedased aurumiskiirused ning nad peavad üksteises hästi lahustuma.

Andmed olulisemate immersioonivedelike kohta on esitatud tabelil V.

Tänapäeval kasutatakse immersioonivedelike valmistamisel järgmisi põhivedelikke:

1. nafta madala keemistäpiga (220-240° C) destillaadid (N - 1,408-1,46);
2. α - monokloornaftaliin (N - 1,626);
3. joodmetüleen (N - 1,74-1,76);
4. väävlil küllastatud lahus joodmetüleenis (N kuni 1,78).

Vedelikke murdumisnäitajaga üle 1,78 kasutatakse harva. Neid võib valmistada joodmetüleeni baasil, lahustades selles jodoformi, antimoonjodiidi, väävlit, fosforit jt. Need lahused on aga mürgised, fosforilahus võib aga kergesti ise süttida.

Kõrgema murdumisnäitajaga mineraalide määramiseks kasutatakse sulameid. Selleks raputatakse uuritava kristalli terakesed kuumutatud sulamisse. Jahutamisel tardub sulam preparaadiklaasil optiliselt isotroopse läbipaistva massina. Sulamitest on soovitatud piperiini ($C_{17}H_{19}NO_3$) antimoni- ja arseenijodiidiga (SbJ_3 , AsJ_3), mis võimaldavad saada keskkonna murdumisnäitajaks 1,80-2,05. Veelgi kõrgema murdumisnäitajaga (kuni 2,7) on väävlil ja seleeni sulamid.

Murdumisnäitaja määramine sulamite abil on tunduvalt ebatäpsem kui vedelikes. Praktiliselt ei ületa neis määramistäpsus 0,01-0,02, kuna vedelike puhul võib saada täpsuse kuni 0,001. Selleks on vaja aga vedeliku murdumisnäitaja määrata täpsusega kuni 0,0005.

Immersioonivedelike murdumisnäitaja võib aja jooksul muutuda. Madalama murdumisnäitajaga (alla 1,46) vedelikel see tõuseb, kuna kõrgema murdumisnäitajaga vedelikel vähe-

neb. Seetõttu on vaja aegajalt, eriti aga vastutusrikaste analüüsides eel vedelike konstante kontrollida refraktomeet- ril või etaloonpulbrite abil. Kõrge murdumisnäitajaga klaaspulbreid kasutatakse eriti nende vedelike kontrollimi- seks, mille murdumisnäitajad jäävad refraktomeetrite skaa- last välja (näiteks laboratoorsel refraktomeetril MPФ -22 on võimalik määrata murdumisnäitajat kuni 1,7).

Nii immersioonivedelike N kontrollimisel kui ka kasu- tamisel on vaja silmas pidada, et komplektis märgitud N suurused on kehtivad monokromaatilise valguse lainepikkuse 589 m μ (Na-leegi valgus, N_D) ja kindla temperatuuri (tava- liselt 20° C) puhul. Temperatuuri alanemisel vedeliku mur- dumisnäitajad märgatavalt suurenevad. Murdumisnäitaja muu- tumist 1° C temperatuuri intervallis ($\frac{dn}{dt}$) nimetatakse tem- peratuuri koefitsiendiks. Standartse komplekti immersiooni- vedelikel on $\frac{dn}{dt}$ väärtus 0,0004 (madalama N-ga vedelikel) kuni 0,0007 (kõrgema N-ga vedelikel). Seega keskmiselt juba 2° temperatuuri muutumine nõuab vedeliku murdumisnäitaja parandust 0,0001 võrra. Tahketel ainetel on temperatuuri koefitsient kümneid kordi väiksem, mistõttu immersioonimee- todil ei ole seda vaja arvestada.

3. Immersioonipreparaatide valmistamine.

Immersioonianalüüsil peab uuritav mineraal olema pee- nestatud enam-vähem ühtlase terajämedusega pulbriks. Opti- maalseks terajämeduseks loetakse 0,05-0,25 mm. Peenemate terakeste korral ei ole võimalik jälgida konoskoopilisi ku- jundeid, külvalgustuse efekti jm. Jämedamad terakesed on aga sageli halvasti läbipaistvad ja nendegi puhul on rea optiliste tunnuste jälgimine raskendatud. Preparaadi valmis- tamisel puistatakse enam-vähem võrdse suurusega terakesed ühtlaselt ja mitte eriti tihedalt alusklaasile ning kaetak- se katteklaasiga. Vedelike vahetamise hõlbustamiseks on soovitatav kasutada mitte tervet katteklaasi, vaid väikest osa (1/4-1/20) sellest. Erandiks on purdsetete kvantita-

tiivne mineraloogiline analüüs, kus ühes preparaadis tuleb määrata ja loendada 400-500 terakest.

Immersioonipreparaate võib valmistada lahtiste või kinnistatud terakestega. Esimesel juhul valmistatakse iga vedeliku jaoks uus preparaat. Selliseid preparaate saab vaadelda vaid horisontaalsel mikroskoobilaul, sest kallutatud asendis terakesed liiguvad vedelikus. Lahtiste terakestega preparaate võib soovitada vaid juhul, kui uuritavat mineraali on küllaldaselt hulgal, ta on optiliselt ühtlane ning selle murdumisnäitaja määramiseks ei ole vaja otsida kindlaid löike.

Terade kinnistamiseks preparaadile on mitu võimalust. Kõige tähtsamaks viisiks on alusklaasi niisutamine tilga veega, milles on kristallipulber hajutatud. Pärast vee aurumist osutuvad terakesed alusklaasile kleepuniuks. Terakeste tugevamaks kinnistamiseks preparaadile võib puhta vee asemel kasutada lahja NaCl või želatiini lahust. Massiliste immersioonianalüüside puhul on soovitav õhukese želatiinikilega kaetud alusklaasid ette valmistada. Selleks niisutatakse alusklaasid klaaspulga abil 1 % želatiinilahusega ja lastakse kuivada. Kui sellisele alusklaasile puistata uuritavaid mineraaliterakesi ning siis klaasile paaril korral hingata ja nõrgalt koputada, kleepuvad terakesed želatiinikilele.

Immersioonivedelik viiakse kinnistatud terakeste vahele pärast preparaadi katmist katteklaasiga. Selleks võetakse klaaspulgakese või pipettkorgikesega tilk vedelikku ja viiakse katteklaasi servale. Sealt imbub vedelik katteklaasi alla kapillaartungide mõjul. Kinnistatud preparaatides toimub ka vedelike vahetamine katteklaasi eemaldamata. Selleks hoitakse katteklaasi serval tükikest filterpaberit, millesse eelmine vedelik imendub. Uue vedeliku sisseviimisel säiluvad terakesed vaateväljas endises asendis. Seetõttu on kinnistatud preparaadil võimalik määrata murdumisnäitajat samades, kõige sobivimates asendites olevates mineraaliterakestes, neid vaateväljast kaotamata.

Vedelike vahetamisel jääb paratamatult väike osa endi-

sest vedelikust terakeste vahele. Kuivõrd murdumisnäitaja saame viimetest mõõtmistest, kus üksteisele järgnenud vedelikud ei erine oluliselt, ei ole eelmiste vedelike mitte-täielikust kõrvaldamisest põhjustatud viga tavaliselt suurem mõõtmise täpsusest. Kui aga on põhjust arvata, et eelmise vedeliku jääk on järgmise vedeliku murdumisnäitajat muutnud või on eelmine vedelik kilena terakeste ümber säilinud, tuleb preparaati paaril korral uue vedelikuga läbi uhta (s.o. sama vedelikku korduvalt vahetada).

4. Mineraalide murdumisnäitajate võrdlemise meetoditest immersioonialüüsil.

Mineraalide murdumisnäitajad määratakse immersiooni-meetodil võrdlemise teel vedelike (või sulamite) murdumisnäitajaga. Võrdlemisel võib kasutada mitmeid optilisi efekte. Vastavalt sellele kõneleme ka murdumisnäitajate võrdlemise eri meetoditest.

Kõige enam tuntud ja rakendatud meetodiks immersioonialüüsi praktikas on Becke meetod. Siin jälgitakse Becke joone nihkumist mikroskoobi tuubuse tõstmisel (vt. pt. I, p. 7). Võrdlusel lähtutakse seaduspärasest, et tuubuse tõstmisel liigub Becke joon suurema murdumisnäitajaga keskkonna suunas.

Ei tohi aga unustada, et murdumisnäitajate väga suurel erinevusel, kus mineraali ääristab tume vöönd, liigub hele vöönd tuubuse tõstmisel alati vedeliku suunas, sõltumata mineraali ja vedeliku murdumisnäitaja vahekorras. Niisugustel juhtudel peab jälgima, kas tuubuse tõstmisel koondub valgus terakese keskosas suunas ja tume vöönd laieneb või valgub valguse keskosast vedeliku poole. Esimesel juhul on mineraalide murdumisnäitaja vedeliku omast suurem. Kirjeldatud nähtust on oluline veel arvestada väga väikeste ning servadest muutunud või pigmenteerunud terakeste korral, kus Becke joon ei ole jälgitav.

Becke meetod annab paremaid tulemusi keskmise kuni suu-

re suurendusega objektiividega ning võimalikult paralleelsete valguskiirte kasutamisel. Selleks seatakse peegel (tasapindne) maksimaalse valgustuse asendisse, kondensor lastakse võimalikult madalale ning diafragmeeritakse kondensorlääts kuni optimaalsete vaatlustingimuste saamiseni. Tugevasti kallutatud kiired vähendavad Becke joone kontrastsust.

Becke joone käitumise järgi võime murdumisnäitajaid võrrelda kogu vaatevälja ulatuses. Eksimatuid tulemusi annab aga Becke joon vaatevälja keskel, kuna perifeerias võime tugevasti kallutatud kiirtekimbu korral saada mõnikord vastupidise liikumissuuna.

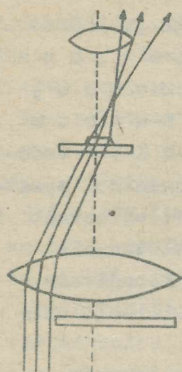
Optimaalsetel vaatlustingimustel võime Becke joone abil fikseerida murdumisnäitajate erinevust kuni 0,001.

Mineraali ja vedeliku lähedaste murdumisnäitajate puhul võib ilmuda kaks eri suunas liikuvat Becke joont. See on põhjustatud immersioonivedeliku murdumisnäitajate dispersioonist. Olgu näiteks kristalli ja vedeliku murdumisnäitaja võrdne spektri keskmises osas. Sellistes tingimustes kalduvad violetsed kiired vedeliku, punased kiired aga kristalli suunas. Näeme kahte erivärvilist joont, mis tuubuse tõstmisel eralduvad teineteisest. Becke joone täielik kadumine valge valguse korral ei ole mõeldav. Seejärel kasutatakse murdumisnäitaja suurema täpsuse (kuni 0,0001) saamiseks monokromaatilist valgust või monokromaatilisi valgusfiltreid.

Viimasel ajal on immersioonianalüüsi praktikasse juurdunud nn. ringekraniseerimise meetod, kus kasutatakse iirisdiafragmaga varustatud objektiive. Viimane võimaldab küllaltki kiiresti fikseerida spektriosa, kus vedeliku ja mineraali murdumisnäitajad kattuvad. Vastava spektriosa värvusega selge vöönd avaldub mineraali servadel, kui mikroskoobi optilise telje suhtes kallutatud kiired ekraniseeritakse objektiivi ülemisel fokaalpinnal.

Kõrvuti Becke meetodiga leiab laialdast kasutamist im-

mersioonianalüüsil külgvalgustuse meetod. Selle meetodi puhul osa valguskiirtest, mis langeb mikroskoopi, tõkestatakse ekraaniga kas kondensori all või

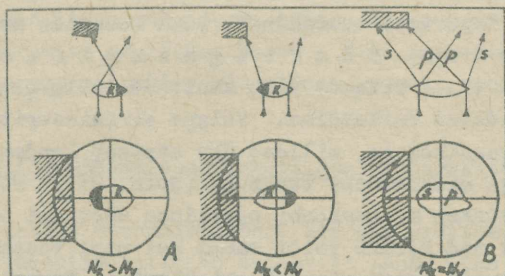


Joon. 61.

mikroskoobi tuubuses. Viimasel juhul lükatakse analüsaator poolleldi mikroskoobi tuubusesse.

Ekraniseerimisel osa mikroskoobi optilise telje suhtes kallutatud valguskiiri pärast kristalli läbimist edasi ei pääse (joon. 51). Sõltuvalt vedelike ja kristalli murdumisnäitaja suhtest jääb tumedaks kas ekraanipoolne või vastaspoolne kristalli serv. Esimesel juhul on kristalli murdumisnäitaja suurem vedeliku murdumisnäitajast, teisel juhul vastupidi.

Selle efekti selgitamisel on vaja iga mineraaliterakest käsitleda kui kaksikkumerat läätsekest, mis sõltuvalt suhtest ümbritseva keskkonna murdumisnäitajaga, võib kiiri koondada või hajutada (joon. 62, A). Selgeima efekti annavad ümmarguse kujuga terakesed. Seevastu õhukestel plaatjatel kris-



Joon. 62:

tallikestel on efekt jälgitav vaid kitsa vööndina mineraali serval. Et mikroskoobis saame objektist überpööratud kujutise, näeme varju joonisel nr. 62 näidatud kiirte käiguga võrreldes teisel pool.

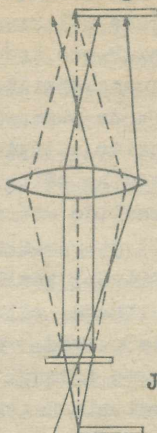
Külvalgustuse meetodi korral võib seega juhinduda reeglist: kui mineraal on varjutatud ekraanipoolsest servast, on ta murdumisenäitaja suurem kui immersioonivedelikul. Vedeliku ja mineraali murdumisenäitajate kokkulangemisel spektri keskmises osas näeme terakeste vastasservi erinevalt värvunult. Sel puhul on mineraaliterake violetsetele kiirtele hajutavaks, punastele kiirtele aga koondavaks läätsekeseks. Vastav kiirte käik on skemaatiliselt näidatud joon. 62, B.

Olgu aga märgitud, et värvid ilmnevad terakeste servadel mitte ainult mineraali ja vedeliku murdumisenäitajate kokkulangemisel, vaid ka nende läheduse puhul. See vedelike murdumisenäitajate dispersioonist tulenev nähtus kahan-dab külvalgustuse meetodi tundlikkust valges valguses. Meetodi täpsust on võimalik tõsta samuti kui Becke meetodilgi, monokromaatilist valgust kasutades.

Külvalgustuse efekt on suurim 8-10x suurendusega objektiivide korral. Suurel suurendusel ei ole see meetod rakendatav. Tugevamal suurendusel võib kasutada seevastu kahekordse diafragmeerimise meetodit. Viimast võib käsitleda külvalgustuse meetodi täiendatud variandina. Valgus ekraaniseeritakse siin kahe ekraanikesega, millest üks asetseb kondensori all, teine aga mikroskoobi tuubuses (joon. 63). Mõlemad ekraanid lükatakse mikroskoobi optilisse süsteemi ühelt poolt nii, et nad kataks veidi vähem kui pool vaateväljast. Et alumine ekraan annab mikroskoobi ülemisel fokaalpinnal vastassuunalise kujutise, näeme mõlema ekraani sisselükkamisel mikroskoobi tuubuses (kui vaadata ilma okulaarita) kitsast valgustatud pilu. Murdumisenäitajate võrdlemisel on

kahekordsel diafragmeerimisel kehtivad samad reeglid, mis külvalgustuselgi.

Mii külvalgustuse kui ka kahekordse diafragmeerimise meetodit soovitatakse rakendada mineraalide kvantitatiivsete vahekordade määramisel. Eriti otstarbekas on kirjeldatud meetodid kerge fraktsiooni mineraalide analüüsil, kus valitsevateks mineraalideks on kvarts, happelised päevakivid ja vilgud. Murdumisnäitajaga 1,546-1,548 immersioonivedelikus annavad kvartsiteerakesed värvilise efekti, vilkudel ilmneb vari ekraanipoolsel, päevakividel aga vastaspoolisel serval. Seega on kogu vaatevälja piires terakesed kiiresti määratavad, kuna Becke meetod nõuaks pidevat mikroskoobi defokuseerimist ja väsitab seetõttu silmi.



Joon. 63.

Ülalkirjaldatud meetodid on immersioonianalüüsil leidnud kõige enam rakendamist. Peale nende on soovitatud veel rida teisi meetodeid, nagu termilise variatsiooni meetod, kromaatilise variatsiooni meetod, nimetatute kombinatsiooni kujutav kahekordse variatsiooni meetod, faasikontrasti meetod, tumevälja kondensormeetod jt. Nende puhul on vaja spetsiaalseid lisaseadmeid, mistõttu neid rakendatakse mineraalide määramise praktikas harva. Küll aga võimaldavad nad mineraalide murdumisnäitajaid määrata sageli suurema täpsusega.

5. Mineraalide määramisest immersioonipreparaatides.

Mineraalide murdumisnäitaja kui ühe olulisema optilise konstandi leidmine laiendab tunduvalt tahke aine mikroskoopilise määramise võimalusi. Immersioonimeetodit rakendatakse tänapäeval eriti laialdaselt settekivimite mineraloogilisel uurimisel. Purdsete settekivimite puhul on ta aga ain-

saks mikroskoopilise uurimise meetodiks.

Mineraalide määramine immersioonimeetodil ei toimu, nagu juba märgitud, ainuüksi murdumisnäitajate, vaid ka kõigi telste polarisatsioonimikroskoobis jälgitavate tunnuste (terakeste kuju, värvus, pleokroism, interferentsvärvus, konoskoopilised kujundid jm.) kompleksel arvestamisel. Nende tunnuste kompleks annab real juhtudel isegi murdumisnäitaja ligikaudse hinnangu puhul uuritava mineraali diagnoosiks täiesti piisava informatsiooni. See võimaldab mineraalide määramist immersioonipreparaatides lihtsustada. Nii piirduetakse purdsete mineraloogilise koostise kvantitatiivsel analüüsil sageli ühe kindla murdumisnäitajaga vedelikuga, milles esinevad mineraalid kõige selgemini on eristatavad. Kerge fraktsiooni mineraalide analüüsil soovitatakse immersioonivedelikke $N = 1,546-1,548$. Raske fraktsiooni mineraalide analüüsil õigustab end vedelik, mille $N = 1,630$, kusjuures mõningate kõrgema murdumisnäitajaga mineraalide eristamiseks võib kasutada täiendava vedelikuna joodmetüleeni ($N = 1,737$).

Kuigi mineraalide mikroskoopilisel uurimisel immersioonipreparaatides jälgitakse põhiliselt samu tunnuseid, mis õhikute uurimiselgi, ei tohi unustada rea tunnuste erinevaid avaldusvorme.

Õhikus on mineraalide paksus enam-vähem püsiv, immersioonipreparaatides aga muutuv ning sõltub tavaliselt terakese plaanilistest mõõtmetest. Seaduspäraselt on terakeste paksus tema pikkusest ja laiusest väiksem, s.t. terakesed asetsevad preparaadil kõige stabiilsenas asendis. Immersioonipreparaatides jälgitavad pinnad kujutavad endast kas mineraalide tegelikke kulutuspinde (purdsete mineraalid) või lõhenevuspindu (pulbristatud mineraalid). Pinna iseloom (söövitus- või lahustuspinnad granaatidel, stauroliidil jt) on täiendavaks kriteeriumiks nii mineraalide diagnoosil kui ka vastavate setete kujunemistingimuste selgitamisel.

Lõhenevus ei avaldu immersioonipreparaatides korrapärase lõhede süsteemina, nagu õhikus, vaid mineraalide kor-

rapärase kuju ja orientatsiooni näol. Ainult ühe pinna järgi täiuslikult lõhenev mineraal annab tavaliselt plaanis korrapäratu kujuga terakesed (vilgud). Kahesuunaline lõhenevus avaldub prismaliste ebatasaste otstega kristallide näol (pürokseenid, küünekiivid). Kolmes või enam suunas lõhenev mineraal annab korrapärate sirgete piirjoontega hulknurkseid terakesi (karbonaatide romboedrid, barrüüt).

Terakeste orientatsioon immersioonipreparaadis ei ole juhuslik, vaid määratud mineraalide kristallograafilisest kujust, veelgi enam aga mineraalide lõhenevusest.

Mineraalid asetuvad preparaadis võimalikult suuremale pinnale. Nii näeme pulgakujulisi rutiili, turmaliini ja tsirkooni terakesi alati prismapindadel, mis on ühtlasi neil maksimaalse kaksikmurdumise asendiks. Anataas, eriti autigeenne, esineb sageli õhukeste tetragonaalsete tahvlikena, mis ristnikolis on peaaegu kustunud. Väljavenitatud prismapindadel asetsevad enamasti ka pürokseeni ja amfibooli terakesed.

Täiusliku ja hea lõhenevusega mineraalid, eriti eelnevalt pulbristatud proovis, on paigutunud reeglina lõhenevuspinnale. Seetõttu ei ole rea optiliste konstantide, sealhulgas ka murdumisnäitajate n_g , n_m ja n_p leidmisel immersioonipreparaatides rakendatav suurte arvude seadus. Näiteks on vilgud peaaegu eranditult paigutunud pinakoidipinnale, kus isotroopsuse tõttu ei ole jälgitav vilkude iseloomulik pleokroism ja kaksikmurdumine. Romboedri pinna järgi lõhenevates karbonaatides saame registreerida küll N_o , mitte aga N_e suuruse jne.

Mehhaanilisele kulutusele allunud purdsetetes määrab terakeste orientatsiooni pigem terakeste kuju kui lõhenevus. Kuid ei tule unustada, et purdsete mineraalide kuju on sageli just lõhenevuse väljendusvorm. Seepärast on lõhenevus immersioonimeetodil alati väärtuslikuks diagnostiliseks tunnuseks. Optiliselt ühtlaselt orienteeritud sama mineraalide suhteline hulk preparaadis võib olla lõhenevuse kvantitatiivselt väljendatavaks kriteeriumiks.

Lõhenevuse uurimine immersioonipreparaatides seisneb terakeste kaju, kustumise iseloomu ja vastavate konoskoopiliste kujundite vaatluses. Lõhenevuspindade järgi on sageli võimalik määrata kristalli süngooniat ja teljelisust.

Üheteljelistel kristallidel võib lõhenevus esineda pinakoidi (001) või (0001), prisma (hk0) või (h $\bar{1}$ k0) ja kallutatud tahu (hkl) või (h $\bar{1}$ kl) järgi. Vastavalt sellele saame ristnukolis kas isotroopsed kustunud, otsekustuvad või sümmeetriliselt kustuvad terakesed. Otsese või sümmeetrilise kustumise annavad ka korrapärase kujuga kahtteljelised rombiline süngoonia mineraalid, mis lamavad lõhenevuspinnal. Monokliinse süngoonia mineraalidel võib leida otsest ja sümmeetrilist kustumist kõrvuti viltukustumisega. Trikliinse süngoonia pinakoidipindadel saame alati viltukustumise.

Mineraalide teljelisust ei ole ka konoskoopiliselt võimalik kõikides asendites veenvalt määrata. Täiusliku lõhenevusega mineraalid võivad mõnikord esineda just sellistes ebasoodsates asendites. Kallutatud tahu järgi lõhenevad üheteljelised kristallid võivad anda ebaselge, optilise telje suhtes tugevasti kallutatud lõikele iseloomuliku konoskoopilise kujundi. Viimane ei ole eristatav kahtteljelise kristalli kujundist näiteks prismalise lõhenevusega rombiline süngoonia mineraalidest. Sellistel puhkudel määratakse teljelisus kustumise iseloomu alusel. Üheteljeliste kristallide sellistes lõigetes saame alati sümmeetrilise, kahtteljelistes kristallides aga otsekustumise.

Ebaselge konoskoopilise kujundi - laialivalguva halli risti - saame prismapinnal asuvates üheteljelistes kristallides. Selline kujund ei ole eristatav kahtteljeliste pinakoidaalse lõhenevusega terakeste puhul saadavast. Siingi on eristamise kriteeriumiks kustumise iseloom lõhenevuspindade järgi. Üheteljelised kristallid annavad sellistes lõikudes alati otsekustumise, kahtteljelised aga sümmeetrilise kustumise.

IV Fjodorovi meetod

1. Fjodorovi meetodi olemus ja tähtsus.

Polarisatsioonimikroskoop võimaldab uuritava objekti asendit muuta vaid mikroskoobi aluslaua pinnal. Seetõttu saame jälgida preparaadis leiduvaid mineraale vaid juhuslikes lõigetes, kus neid lõikab õhiku pind. Juhuslikes lõigetes ei avaldu aga sageli need pinnad, suunad või optilised konstandid, mis on ühele või teisele mineraalile ta määramiseks iseloomulikud. Selle puuduse vältimiseks tuleb sama mineraali uurida reas erinevates lõigetes ning otsida nende hulgast kõige soodsama asendiga terakesed. Selline analüüs on aeganõudev. Mõnel juhul, kui uuritava mineraali terakesi on vähe, tuleb piirduda ligikaudsete andmetega.

Polarisatsioonimikroskoobi nimetatud puudus on kõrvaldatud Fjodorovi lauakese kasutamisel. Fjodorovi lauake võimaldab preparaati pöörata nelja kuni viie telje ümber. Selle lauakese monteerimisel polarisatsioonimikroskoobi aluslausale võime anda uuritavale mineraalile soovitud asendi.

Fjodorovi meetodi loojaks on tuntud vene kristallograaf Jevgraf Stepanovitš F j o d o r o v . Ta nimetas oma lauakese esialgu teodoliitseks, hiljem universaalseks lauakeseks. Oma arvukates töödes (1891-1902) esitas ta selle seadme kasutamise teoreetilised alused ja kivimitmoodustavate mineraalide määramise metoodika. Tänapäeval on nii vastav uurimismeetod kui ka lauake õigustatult seotud Fjodorovi nimega.

Fjodorovi lauakese loomist ja rakendamist mineraloogilistel uurimistel saab tähtsusele võrrelda vaid polarisatsioonimikroskoobi kasutamiselevõtmisega. See avas uurijatele uued võimalused anisotroopsete kristallide optiliste omaduste tundmaõppimiseks ja mineraalide määramiseks.

Esimese universaalse lauakese valmistas J. Fjodorov 1891.a. Sellel lauakesel oli kaks vastastikku ristuvat telge, mille ümber lauakest pöörates võis anda preparaadi-
le ükskõik millise asendi. Lauakese pööramisel viiakse kristalli kristallograafilised ning kristallooptilised pinnad või suunad kokkulangemisele mikroskoobi telgsummeer-
ria pinnaga või mikroskoobi optilise teljega. Kokkulange-
mismomendid fikseeritakse vastavate telgede libide järgi. Saadud arvud - koordinaadid näitavad indikaatriksi ruumi-
list asendit kristallis.

Mineraalide kristallooptiliste uurimiste praktiliste võtete hõlbustamiseks täiendas J. Fjodorov pidevalt oma lauakest, lisades hiljem sellele veel kaks telge ja klaassegmendid. Fjodorovi meetodit arendasid edasi ka ta õpilased - V. Nikitin, M. Ussov, A. Zavaritski, V. Lodotšnikov jt. Ameerika geoloog V. Emmons li-
sas 1929.a. Fjodorovi lauakesele veel viienda telje; 5-teljisel lauakesel on võimalik lahendada küllaltki keerukaid ülesandeid kristallograafiliste ja kristallo-
optiliste elementide stereograafiliste projektsioonide-
ta. 4-teljisel Fjodorovi lauakesel töötades on projektsioonide koostamine aga möödapääsmatult vajalik. Tänapäeval toodetakse meie maal ainult 5-teljelisi Fjodorovi lauakesi.

Fjodorovi lauakese abil saab määrata optilise indikaat-
riksi tüüpi (teljelisust, kristalli optilist märki, 2 V suurust), indikaatriksi orientatsiooni kristallograafiliste elementide suhtes, uurida kaksikute seadusi, pleokroismi ning määrata kaksikaurdumise suurust. Ainult murdamisnäita-
ja määramisel ei anna Fjodorovi lauake nimetamisväärseid eeliseid polarisatsioonimikroskoobiga võrreldes. Seetõttu soovitatakse kombineerida Fjodorovi meetodit immersiooni-
meetodiga.

Laialdaselt rakendatakse Fjodorovi meetodit tänapäeval päevakivide, eeskätt plagioklasside määramisel. Samuti võib meetodit edukalt kasutada pürokseenide, amfiboolide, oli-

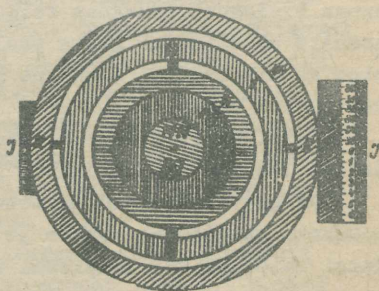
viinide ja teiste isomorfseid segusid moodustavate mineraalide koostise uurimisel.

Kõrvuti kristallooptiliste uurimistega on Fjodorovi meetodit laialdaselt hakatud kasutama kivimite mikrostruktuuri uurimistel. Teatavasti omandavad magma- ja moondekivimite mineraalid diferentsiaalsete magmaliste liikumiste või deformatsioonide mõjul seaduspärase kristallooptilise orientatsiooni. Mikrostruktuuri uurimised võimaldavad lahendada edukalt mitmeid petrogeneetilisi probleeme. Viimastel aastatel on mineraalide orientatsiooni seaduspärasused kõitnud ka settekivimite uurijaid.

2. 5-teljelise Fjodorovi lauakese ehitus.

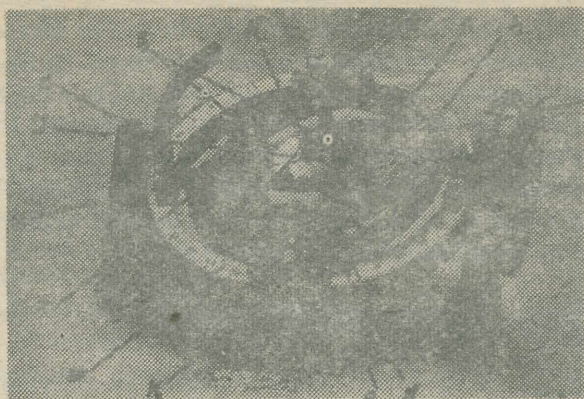
5-teljeline Fjodorovi lauake koosneb statiivile monteeritud 4 ringist, mis on iseseisvalt (sisemine ring) või koos sisemise ringidega liigutatavad 5 telje ümber. Ringe nimetatakse, alates välimisest m, k, h ja n ringiks, vastavaid telgi aga M, K, H ja N teljeks. Neist teljed M ja N on lauakese lähteasendis vertikaalsed, H ja K aga horisontaalsed. Kõik ringid on pööratavad veel statiivil ümber horisontaalse I-telje (joon. 64). Kõikide ringide liikumisnurki oma telgede ümber on võimalik mõõta vastavalt limbidelt.

Ringide keskel asetseb kaks poolkerajat klaassegmenti, mis koos nende vahel asetatava preparaadiga moodustavad enam-vähem ühtse optilise süsteemi (joon. 65). Valguse täieliku sissepeegelduse vältimiseks kaetakse preparaadi pinnad glütseriiniga. Selleks, et ei toimuks nimetamisväärset valguskiirte murdumist, sõltumata kiirte langemis-



Joon. 64. 5-teljelise Fjodorovi ringide ja telgede asend lauakese lähteasendis.

nurgast, peavad klaassegmentide murdumisahtajad olema
lähedased uuritava mineraali murdumisahtajale.



Joon. 65.

Tänapäeval on Fjodorovi lauakeste komplektis 3 segmen-
dipaari murdumisahtajatega $N = 1,516$ (K-päevakivide uuri-
miseks), $N = 1,548$ (plagioklasside uurimiseks) ja $N = 1,647$
(pürokseenide ja amfiboolide uurimiseks).

M-ringi alumisel küljel on spetsiaalne "tüüriratas",
mis võimaldab preparaadi asendit koos klaassegmentidega re-
guleerida sõltuvalt preparaadi klaasi paksusest. Õhik peab
asuma Fjodorovi lauakese telgedesüsteemi tsentris. Õhiku
asendit on võimalik muuta peale Fjodorovi lauakesel pööra-
mise ka mikroskoobi aluslaua pöörämisel mikroskoobi optili-
se telje A ümber.

5-teljelist Fjodorovi lauakest võib kasutada ka 4-tel-
jelise lauakesena, kusjuures jäetakse kasutamata telg K.

Järgnevas käsitluses tutvumegi 4-teljelise Fjodorovi
lauakese kasutamise võtete ja vastava uurimise meetodikaga.
Kuigi 4-teljelisel lauakesel töötamine eeldab andmete kand-
mist stereograafilistele projektsioonidele ning on aeganõud-
vam, kasutatakse vastavat meetodikat tänapäeval veel sageli.

Fjodorovi meetodi omandamisel on see aga vajalikuks eelduseks.

3. Stereograafiliste projektsioonide kasutamine Fjodorovi meetodil.

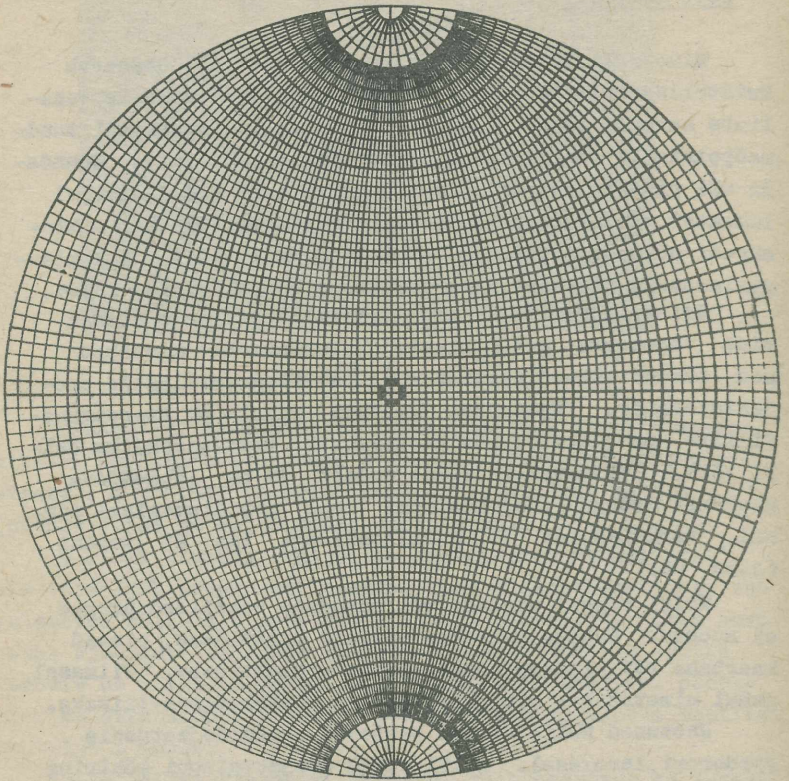
Mineraalide määramine Fjodorovi meetodil baseerub kristallooptiliste ja kristallograafiliste suundade vaheliste nurkade mõõtmisele ning optilise indikaatriksi tunnemaõppimisele (teljelisus, 2V, optiline märk jm.). Suundade või pindade asendi määramiseks viiakse nad Fjodorovi lauakest vastavalt kallutatades kokkulangemisele kas mikroskoobi sümmeetriapinnaga või telgedega I või A. Kokkulangemismoment fikseeritakse vastavate koordinaatide kaudu.

Kristallograafiliste ja kristallooptiliste elementide vahekorra graafiliseks kujutamiseks kantakse nad saadud koordinaatide abil stereograafilisele projektsioonile. Fjodorovi meetodi puhul on stereograafiliste projektsioonide koostamisel transparentiks Wulfi võrk. Viimane kujutab endast 10 cm läbimõõdus gloobuse võrgu projektsiooni ühel meridionaalsel pinnal, meridiaanide ja paralleelidega iga 2° tagant (joon. 66).

Wulfi võrgul pindade või suundade vahelised nurgad ei muutu. Suunad kantakse sellele punktidenä, pinnad kaartena või pindade normaalidenä - punktidenä. Viimasel juhul nimetatakse projektsiooni gnomostereograafiliseks.

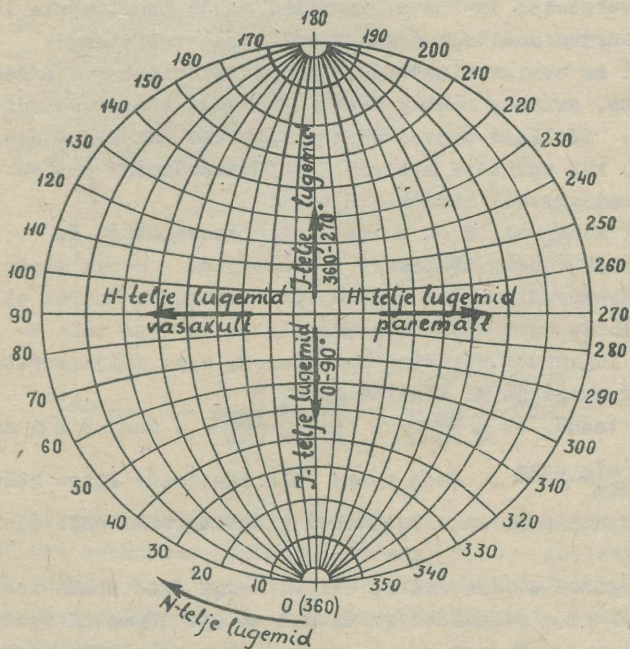
Jaotused Wulfi võrgul vastavad kraadidejaotusele Fjodorovi lauakesel. Wulfi võrgu projektsiooni põhiring vastab Fjodorovi lauakese n-ringile. Lugen sellelt kantakse Wulfi võrgu põhiringile. n-ringi null-asend on Wulfi võrgu lõunapooluseks (joon. 67).

Wulfi võrgu keskpunktiga langevad kokku Fjodorovi lauakese teljed M ja N ning mikroskoobi telg A. H-telg vastab lauakese lähteasendis Wulfi võrgu vertikaalsele diameetrile. Lugeמיד H-telje järgi tuleb kanda võrgu



Joon. 66.

keskpunktist vasakule või paremale, olenevalt sellest, kas lugem on saadud vasakult või paremalt poolt. Et H-telje järgi saadud lugemit õigesti kanda projektsioonile, on oluline märkida, kust poolt lugem on võetud.



Joon. 67.

Näiteks tähistus $H \leftarrow 20^\circ$ näitab, et lugem 20° on saadud vasakult, lauakese vasak pool on tõstetud kõrgemale, kuna $H \rightarrow 15^\circ$ viitab lugemile lauakese paremalt poolt.

I-telg langeb Fjodorovi lauakese lähteasendis kokku Wulfi võrgu horisontaalse diameetriga (ekvaatoriga). Lugemid I-telje järgi kantakse aga võrgu vertikaalsele diameetritele, kusjuures väärtused $0-90^\circ$ kantakse keskpunktist allapoole, väärtused $360^\circ (0^\circ)-270^\circ$ keskpunktist ülespoole.

4. Fjodorovi ringdiagramm.

Fjodorovi laua klaassegmentid peavad koos preparaadi ja glütseriiniga moodustama homogeense sfääri. Homogeensus saavutatakse uuritava mineraali murdumisnäitajale lähedase murdumisnäitajaga klaaspoolkerade valimisega.

Kui me uuriks mineraale ilma spetsiaalsete klaassegmentideta, erineks nähtav nurk β teravalt tõeselisest nurgast α . Tõeselised nurgad õhikus erinevad nähtavast nurgast ka siis, kui uuritava mineraali murdumisnäitaja erineb vastava klaassegmenti murdumisnäitajast.

Kui mineraali N on suurem kui klaassegmenti N , on nähtav nurk suurem tõeselisest ja vastupidi. Seega mineraali ja klaassegmenti murdumisnäitajate erinevuste korral ei vasta nähtav nurk tõeselisele nurgale ja on vaja teha H- ja I-telje lugemites vastavad parandused, s.o. välja arvutada mõõdetud nurga järgi tõeseline nurk.

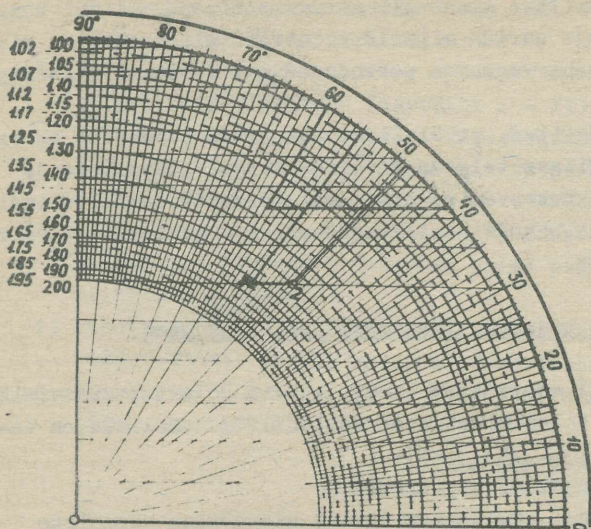
On teada, et $\frac{N_{\min}}{N_{\text{segm}}} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \frac{\text{segm}}{\min}$, kust $\sin \alpha \min = \frac{N_{\text{segm}} \sin \text{segm}}{N_{\min}}$. Seda nurka võib aga leida kõige hõlpsamini graafiliselt nn. Fjodorovi ringdiagrammi abil (joon. 68).

Märgitud diagrammil on välise ringi raadiuseks loetud tinglikult 1. Sisemised raadiused on aga tõmmatud vastavalt suhtele $\frac{N_{\text{segm}}}{N_{\min}} < 1$. Fjodorovi ringdiagrammis on aga sisemiste ringjoonte $\frac{N_{\text{segm}}}{N_{\min}}$ väärtuste asemel näidatud nende pöördväärtused, näit. 1,02; 1,05; 1,07; 1,10; 1,12 jae. kuni 2,00.

Fjodorovi ringdiagrammi saab kasutada kahel viisil, kui on teada uuritava mineraali ja klaassegmenti murdumisnäitajad. Toome selle kohta näited.

1. viis. Olgu $\beta = 60^\circ$; $N_{\min} = 1,97$; $N_{\text{segm}} = 1,516$;

$$\frac{N_{\min}}{N_{\text{segm}}} = 1,30.$$



Joon. 68.

Liigume raadiusvektoril 60° kuni ringjooneni, mille raadiuse suuruseks (pöördväärtuseks) 1,30. Sellest punktist tõmbame horisontaalse joone kuni lõikumiseni välise ringjoonega. Saadud lõikepunkt annabki meile tõelise nurga väärtuseks $\alpha = 41^\circ 45'$.

2. viis. Olgu $\beta = 55^\circ$, $N_{\min} = 1,65$, $N_{\text{segm}} = 1,50$. Suhet $\frac{N_{\min}}{N_{\text{segm}}}$ ei ole vaja välja arvutada. Liigume mööda raadiusvektorit 55° ringi tsentri suunas kuni väärtuseni 1,65 (punkt 1), sealt aga horisontaalses suunas paremale kuni väärtuseni 1,50 (punkt 2). Viimasest tõmmatud raadiusvektor annabki meile välisringil tõelise nurga suuruse $\alpha = 48^\circ 20'$.

Fjodorovi ringdiagrammilt selgub, et mida väiksem on kaldenurk ja murdumisnäitajate vahe, seda väiksem on erinevus näiva ja tõelise nurga vahel. Seepärast on soovitatav

valida klaassegmentid, mis erineks vähe oma murdumisnäitaja suuruselt uuritava mineraali murdumisnäitajast. Kui samas õhikus on vaja uurida mitmeid erinevaid mineraale, on siiski lihtsam teha vastavad parandused kui vahetada klaassegmente.

Olgu märgitud, et ülaliseloomustatud parandusi on vaja teha optiliste telgede vahelise nurga, lõhenevuse ja kaksikute kokkukasvamise pinna määramisel. Optilise indikaatriksi pealõikude pealekanõmisel neid parandusi tavaliselt ei tehta.

5. Fjodorovi lauakese lähteasend ja parandused.

Enne kui asetada Fjodorovi lauake polarisatsioonimikroskoobile, tuleb mikroskoop kontrollida. Selleks on vaja:

- a) mikroskoop, tsentreerida,
- b) asetada okulaari niitrist nähtavasse asendisse ning kontrollida niitristi ristist asendit,
- c) kontrollida, kas niitristi niidid on paralleelsed (langevad kokku) analüsaatori ja polarisaatori võnkepinnaga,
- d) määrata polarisaatori võnkepind.

Nüüd võib kinnitada õhiku Fjodorovi lauakesele ja kinnitada Fjodorovi lauakese mikroskoobi aluslauale. Enne tööleasumist tuleb aga asetada Fjodorovi lauake lähte- ehk põhiasendisse

Fjodorovi lauakese lähteasendi korral:

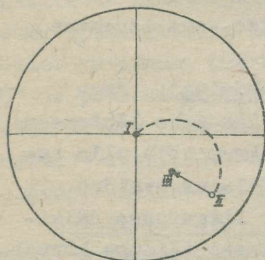
- a) ta teljed M ja N peavad langema kokku mikroskoobi optilise teljega A, mis on mikroskoobi aluslaua pöördteljeks,
- b) teljed I ja K on \perp mikroskoobi sümmeetriapinnaga,
- c) telg H \perp telgedele I ja K,
- d) teljed I, K ja H peavad olema samas tasapinnas kus õhik, ja risti telgedele M, N ja A.

Fjodorovi laua lähteasendisse viimiseks tuleb teha järgmised operatsioonid:

Fjodorovi lauakese tsentreerimine (et M ja $N \bar{=} A$)

teostatakse laua horisontaalses asendis. Tsentreerimiseks

- valitakse preparaadis selge täpp, mis viiakse okulaari niitristi tsentrisse;
- liigutatakse n -ringi ümber N -telje 180° . Täpp liigub pool ringjoont (asendist I - II);
- liigutame käega preparaati klaassegmentide vahel nii, et jälgitav täpp läheks nimetatud kaare keskpunkti (asendist II - III);
- lõdvendame Fjodorovi lauakest kinnitavad kruvid ja liigutades Fjodorovi lauakest viime punkti uuesti niitristi keskele;
- kinnitame Fjodorovi lauakese kruvid, kontrollime tsentreeritust ja kui vaja, kordame operatsiooni uuesti, kuni N -telje ümber pöörates valitud punkt jääb niitristi all püsima.



Joon. 69. Fjodorovi lauakese tsentreerimine.

ühtumisele okulaari horisontaalniidiga. Registreerime mikroskoobi aluslaua lugemi nooniuse järgi. See ongi I -telje lähteasendi lugem (tavaliselt $0-3^\circ$). Sama lauakesega töötamisel ei ole vaja hiljem seda parandust läbi teha, vaid asetatakse Fjodorovi lauake I -telje lähteasendisse.

I -telje parandus (I -telje lähteasendi määramine).

a) Võtame välja objektiivi, lülitame sisse Bertrandi läätsse (nii jääb ka 3. ja 4. paranduseks).

b) Vabastame I -telje kinnituskruvi ja pöörame m -ringi vertikaalsesse asendisse, tõstes mikroskoobi tuubust, kuni on m -ringi ribiline serv nähtav vaateväljas. Kinnitame sellises asendis I -telje kruvi.

c) Viime mikroskoobi aluslauda pöörates m -ringi serva

I-telje limbi nullasendi määramine. I-telje asend, mis vastab õhiku pinnale, peaks olema 0° . Et see aga alati ei ole täpselt nii, tuleb erinevus määrata. Selleks pöörame lauda I-telje ümber seni, kuni H-telje otsa keskoht langeb kokku niitristiga. Märgime vastava lugemi I-telje limbil. Siis liigutame I-telje 180° teises suunas, kuni teine H-telje ots langeb oma keskusega kokku okulaa-ri niitristiga. Teeme uuesti lugemi.

Olgu näiteks lugemid 92° ja 272° . Nulli asend on seega 2° . Töötamisel tuleb seda parandust alati arvestada. Esitatud näite puhul tuleb lahutada alati I-telje limbi lugemitest 2° .

H-telje parandus (lähteasendi määramine, H I).

a) Viime n-ringi H-telje ümber pöörates vertikaalses-
se asendisse nii, et n-ringi serv on näha okulaa-ri-
s.

b) Pöördega M-telje ümber viime n-ringi serva paral-
leelsesse asendisse okulaa-ri vertikaalse niidiga. Kinni-
tame n-ringi ja registreerime n-ringi lugemi nooniuse jär-
gi.

Ka H-telje kontrollimist teostatakse sama lauakese
korral vaid üks kord.

Õhiku justeerimine (õige kõrguse andmine): Nagu
märgitud, peavad H- ja I-telg asetsema lauakese lähteasen-
dis õhikuga samal tasapinnal. Õhiku paksus võib olla aga
muutuv, mis tingib ekstsentrilisuse. Viimane avaldub
selles, et lauakest I- ja H-telje ümber liigutades jälgi-
tav terakene ei püsi samal kohal. Ekstsentrilisuse kõrval-
damiseks on n-ringi all eriline vindiga pööratav "tüüri-
ratas", mille abil saame õhiku kõrgust muuta. Kui prepa-
raat on paksem, pööratakse sisemine ketas allapoole, kui
aga õhem, siis ülespoole. Terakene liigub kallutamise
suunas kui õhik on madalamal; kui terakene liigub vastas-
suunas, on preparaat kõrgemal. Vastavalt sellele pööra-
takse "tüüriratas" kuni ekstsentrilisus on täiesti kõrval-
datud.

Kõikide ülalmärgitud paranduste läbiviimisega oleme Fjodorovi lauakese viinud lähteasendisse ning võime asuda mõõtmiste ja uurimiste teostamisele. Õhiku vahetamisel on vajalik justeeritust uuesti kontrollida.

6. Kristallide optilise indikaatriksi uurimine.

Isotroopsuse või anisotroopsuse kindlakstegemine.

Optiliselt isotroopsed kristallid on polarisatsioonimikroskoobis ristnikolites kogu aeg kustunud, anisotroopsed kristallid aga üldjuhul helenduvad. Erijuhtudel (lõige risti optilisele teljele) võib säiluda kustumine ka anisotroopsel kristallil. Et eristada seda juhust isotroopsest kristallist, pöörame Fjodorovi lauakest I-telje ümber umbes 45° , kinnitame I-telje kruvi ja pöörame uuesti ümber A-telje. Kui mineraal nüüd helendub, on ta anisotroopsus tõestatud. Kui aga mineraal jääb kustunuks - on tegemist isotroopse kristalliga või haruldase kokkusattumisega, kus optiliselt kaheteljelisel kristallil langes enne üks, nüüd teine optiline telg kokku mikroskoobi optilise teljega. Et selles veenduda, pöörame lauda I-telje ümber teisele poole 45° ja pöörame selles asendis uuesti mikroskoobi lauda A-telje ümber. Kui nüüd tööpoolest mineraal helendub, on meil tegemist optiliselt 2-teljelise kristalliga, kus optiliste telgede vaheline nurk on umbes 45° .

Optiliselt ühe- ja kaheteljeliste kristallide eristamine. Liigutame lauakest ümber N-telje kuni saame terakese kustumisasendi. Kontrollime, kas kustumine säilib I-telje pööramisel. Kui ei säilu, kontrollime sama ka teises kustumisasendis. Optiliselt üheteljelistel kristallidel ühes kustumisasendis (pealõigul) tumedus säilib, kaheteljelistel aga tavaliselt mitte. Kustumine võib säiluda 2-teljelistel kristallidel vaid juhul, kui I-teljega langes kokku üks indikaatriksi telg - Ng, Nm või Np. Väga harva, kui lõige on paralleelne optilisele teljele (Ng ja Np on õhiku pinnal), võivad säiluda optiliselt 1-teljeliste kristallide

juures ka mõlemad kustumisasendid. Samuti säiluvad mõlemad kustumisasendid 2-teljelistel kristallidel, kui õhiku pinnale jääb 2 indikaatriksi telge. Et kontrollida, kas sellisel erandlikul juhul on tegemist optiliselt 1- või 2-teljelise kristalliga, kallutame lauda H-telje ümber. 1-teljelistel kristallidel säilib tumedus igas H-telje kalakuses I-telje pööramisel, 1-teljelistel aga mitte. See seaduspärasus on kõige lihtsamaks 1- ja 2-teljeliste kristallide eristamisvõimaluseks.

Optiliselt 2-teljeliste kristallide indikaatriksi pealõikude määramine.

- a) Asetame uuritava mineraaliterakese niitristi keskele;
- b) liigutame lauda ümber N-telje, kuni terakene kustub;
- c) kontrollime, kas kustumine I-telje pööramisel säilib. Tavaliselt terakene hakkab helenduma; Liigutame lauda I-telje ümber, kuni helendumine on kõige intensiivsem;
- d) viime terakese H-telje kallutamisega kustumiseni;
- e) I-telge pöörates teises suunas viime terakese uuesti kõige heledama asendini;
- f) liigutades N-telge viime terakese uuesti kustumiseni. Kui kustumine I-telje ümber pöörates ei säilu, kordame veel samas järjekorras operatsiooni, kuni saame viia mineraali asendisse, kus ta I-telje ümber pöörates jääb tumedaks. Sellisel korral langeb mikroskoobi sümmeetriapinnaga kokku üks indikaatriksi pealõik. Sellele pealõigule ristiasetsev indikaatriksi telg langeb aga kokku I-teljega. Seega oleme kätte saanud ühe indikaatriksi pealõigu.

Selleks, et määrata, milline pealõik on meil viidud kokkulangemisele mikroskoobi sümmeetriapinnaga:

- a) liigutame Fjodorovi lauakest A-telje ümber (mikroskoobi lauaga) 45° vastupäeva;

b) liigutame lauakest I-telje ümber ühele ja teisele poole.

Lõik NgNp ehk I Nm tuntakse ära järgmiste tunnuste tõttu:

1. Üks optiline telg tuleb välja. Kui viimane langeb kokku A-teljega, siis terakene kustub. Sel korral tumedus säilib A-telje ümber pöörates (I-telg on kinnitatud). Luges I-telje limbil, mis vastab optilisele teljele, tuleb üles kirjutada, et kanda optilist telge stereograafilisele projektsioonile.
2. Kaks optilist telge tuleb välja. I-telje ümber pöörates saame kaks tumenemist, mis säiluvad mõlemad A-telje ümber pöörates. Tuleb võtta mõlema optilise telje lugemid I-telje limbilt. Lugemite vahe annab optiliste telgede vahelise nurga suuruse.
3. Kallutuse äärmistel seisudel interferentsvärvused madalduvad. Lõik on risti nürile bissektrissile.

Lõigud NgNm ja NmNp iseloomustuvad sellega, et nende korral I-telje kallutamisel ei ilmne tumenemist ega ka interferentsvärvuse tunduvat madaldumist. Nende pealõikude nimetus määratakse kvartskiilu või kipsplaadi abil. Kui laud on pööratud A-telje ümber 45° vastupäeva, ilmneb kvartskiilu sisselükkamisel lõigus NgNm interferentsvärvuse madaldumine või koguni kompensatsioon, lõigus NmNp interferentsvärvus aga kerkib.

Kui meil on määratud indikaatriksi üks pealõik, kirjutame üles ta koordinaadid N- ja H-telje järgi ja kanname selle stereograafilisele projektsioonile Wulfi võrgu alusel. Pealõigu pooluse (normaali) asukohta projektsioonil määrame graafiliselt.

Indikaatriksi teise pealõigu määramisel lähtume sama terakese teisest kustumisasendist analoogiliselt ülalkirjeldatuga. Teise pealõigu projektsioonile kandmisel on vaja silmas pidada, et ta projektsioon täpse määramise korral peab läbima esimese lõigu pooluse, tema poolus peab aga langema esimese pealõigu projektsioonile.

Indikaatriksi kolmas pealõik leitakse juba graafiliselt. Selleks asetame indikaatriksi leitud pealõikude poolused (telgede projektsioonid) Wulfi võrgu ühele meridionaalile ja tõmbame seda mõõda välja kõvera, mis ongi 3. pealõigu projektsiooniks. Viimase poolus ehk indikaatriksi kolmas telg asub eelmiste pealõikude projektsioonide lõikepunktis.

2-teljeliste kristallide optilise märgi ja 2V määramine. Optiliste telgede vahelise nurga 2V määramiseks tuleb otsida suhteliselt madala interferentsvärvusega lõige, s.o. lõige risti teravale bissektrissile. Määrame selle pealõigud, fikseerime pealõigul NgNp optiliste telgede väljatulekukohad ja kanname nad saadud koordinaatide järgi stereograafilisele projektsioonile. Kui me saame kätte mõlema optilise telje väljatulekukohad, saame otse projektsioonil määrata 2V ja ka optilise märgi. Et Ng ja Np kui indikaatriksi teljed on optiliste telgede nurgapoolitajateks ja optilised teljed asetsevad nende suhtes sümmeetriliselt, on optilist märki ja 2V suurust võimalik määrata ka ühe optilise telje väljatuleku korral.

7. Plagioklasside määramine 4-teljelisel Fjodorovi laual.

Nagu teada, muutuvad plagioklasside koosseisu muutumisega seaduspäraselt ka nende kristallooptilised omadused. Nii võib indikaatriksi orientatsiooni põhjal määrata küllaldase täpsusega plagioklassi numbri. Optilise indikaatriksi orientatsiooni võib määrata täiuslike lõhenevuspindade (010) ja (001) järgi, kaksikuelementide või kristallipindade järgi. Viimaste järgi saame aga kõige vähem täpse tulemuse.

Enne kui käsitleda plagioklasside määramist kaksikuelementide järgi (kaksikutelje, kaksikupinna või kokkukasvamise pinna järgi) tutvume põgusalt kaksikute elementide ja olulisemate kaksikute seadustega.

Kaksikutelg (KT) on suund, mille ümber üks kaksikuindiviid on teise suhtes pööratud 180° võrra. Sagedamini on

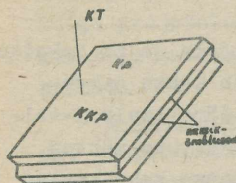
kaksikutelg plagioklasside juures risti tahkudele (010), (001), harvem (021) ja (0 $\bar{2}$ 1). Kaksikutelje tunnuseks on see, et kui ta langeb kokku mõne Fjodorovi lauakese teljega, siis lauakeest selle telje ümber liigutades kaksikustruktuuri ei ole näha.

Kaksikupind (KP) on risti kaksikuteljele ja on kaksiku sümmeetriapinnaks. Kui kaksikupind langeb kokku mikroskoobi sümmeetriapinnaga (aga kaksikutelg järelikult I-teljega) ei ole I-telje pööramisel kaksikustruktuur nähtav. Kui kaksikutelg langeb kokku A-teljega (seega kaksikupind järelikult on risti mikroskoobi optilise teljega), ei ilmne kaksikustruktuur A-telje ümber pöörates. See kaksikute omadus on kaksikute peamiseks optiliseks tunnuseks.

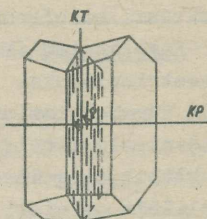
Kokkukasvamise pind (KKP) on pind, mida mööda on kaksikuindiviidid kokku kasvanud. Tavaliselt on selleks tahud (010), (001), harvem (021) ja nn. rombiline lõik. Sageli segatakse KKP kaksikuõmbluse mõistega, mis on tegelikult kokkukasvamispinna ja õhiku pinna lõikejoon. Et viia kokkukasvamispind kokkulangemisele mikroskoobi sümmeetriapinnaga, viiakse kõigepealt kaksikuõmblus kokkulangemisele mikroskoobi sümmeetriapinnaga (vertikaalse niitristiga) ja kallutusega H-telje ümber registreerime asendi, kus kaksikuõmblus on kõige teravam ja kitsam ning ei nihku paigast mikroskoobi tuubuse liigutamisel.

Kaksikute kokkukasvamispind võib olla 1) kokkulangev kaksikupinnaga ja risti kaksikuteljega (tahuseaduse korral) või 2) kaksikupinnale risti. Sel juhul kaksikutelg on kokkukasvamispinnal (telje ja komplitseeritud seaduste korral).

Tahuseaduste korral on kokkukasvamispinnaks kristalli tahk, kaksikutelg on sel korral risti selle tahuga (joon. 70). Seega kaksikupind langeb kokku kokkukasvamispinnaga. Tahuseaduse korral kokkukasvamispinna kokkulangemisel mikroskoobi sümmeetriapinnaga (kaksikuõmblus peab olema näha kitsa, selge lõhena) lauakese liigutamisel ümber I-telje kaksik käitub monokristallina (sest I-telg langeb kokku kaksikuteljega). Teiste seaduste korral kaksikustruktuur säilib.



Joon. 70. Tahu seadus.



Joon. 71. Telje seadus.

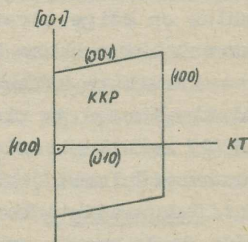
Teljeseaduste korral on kaksikuteljeks üks kristallograafiline telg: (100) , (010) või (001) . Kaksikutelg asub kokkukasvamispinnal. Kaksikupind ja kokkukasvamispind on üksteise suhtes risti (joon. 71).

Komplitseeritud seaduste korral on kaksikutelg samuti kokkukasvamispinnal ja on risti ühel samal pinnal esinevaie kristalli servale - (100) , (010) või (001) -le. Kokkukasvamispinnaks on kas (010) või (001) . Näiteks albiit-karlsbadi seaduses on kokkukasvamispinnaks (010) , kus asub ka kaksikutelg $[001]$ (joon. 72).

Esinemissageduselt on seadustest tavalisim plagioklassides albiidi seadus, järgneb karlsbadi,

perikliini ja albiit-karlsbadi seadus. Teised esinevad harva ja neid tuleb väga hoolikalt määrata.

Plagioklassi koosseisu määramine kaksikutelje koordinaatide järgi. Nagu teada, on kõikide seaduste korral KT



Joon. 72. Albiit-karlsbadi seadus.

kaksikute optiliste indikaatriksite suhtes sümmeetriateljeks, s.t. optilised indikaatriksid on KT ja KP suhtes paigutatud sümmeetriliselt. Seega teades optiliste indikaatriksite paigutust projektsioonil võime nii kaksikutelje kui ka kaksikupinna leida projektsioonil graafiliselt. Graafiliselt leitud KT tuleb aga praktiliselt kontrollida.

Töö teostamise järjekord on järgmine:

a) Määratakse mõlema kaksikuindiviidi indikaatriksi pealõigud ja kantakse projektsioonile. Eri indiviidide projektsioonid on soovitatav näidata eri värviga. Indikaatriksi teljed mõlema kaksiku kohta märgitakse projektsioonil Ng^1 , Nm^1 , Np^1 ja Ng^2 , Nm^2 , Np^2 .

b) Liigutatakse järjekorras projektsiooni Wulfi võrgul nii, et ühenimelised teljed Ng^1 , Ng^2 jne. satuks ühele meridiaanile, mis siis tõmmatakse välja projektsioonile. Saadud kolme meridiaani lõikepunkt ongi KT projektsioon. Mõnikord ei lõiku 3 meridiaani ühes punktis (kui töö ei ole väga täpne). Saame vea kolmnurga. KT projektsiooniks loeme sel juhul kolmnurga raskuspunkti.

c) Saanud kätte KT graafiliselt, kontrollime seda praktiliselt. Selleks tõmbame Wulfi võrgul stereograafilisel projektsioonil välja pinna, mis on risti KT-le. See on KP. Saadud KP asetame vastavate koordinaatide järgi Wulfi võrgul kokku kas 1) mikroskoobi sümmeetriapinnaga, kui kaldenurk H-telje ümber ei ole suur või 2) mikroskoobi lauaga, kui KP kaldenurk H-telje ümber on suur.

Esimesel juhul KT langeb kokku I-teljega, teisel juhul A-teljega.

Kui KT oli õigesti määratud, siis esimesel juhul I-telje, teisel juhul A-telje ümber lauakest pöörates ei ilmne kaksikute struktuuri. Kui aga näeme kaksikuid, tuleb lauakese liigutamisel saavutada asend, kus kaksikud käituvad ühtse kristallina.

Esimesel juhul saavutatakse see lauakese järkjärgulise liigutamisega ümber N- ja H-telje, kontrollides I-telge liigutades (sama printsiip, mis indikaatriksi pealõikude määramisel).

Teisel juhul liigutatakse lauakest I-teljest vähe mõlemale poole ja kontrollitakse A-telje ümber pöörates kaksikute struktuuri kadumist.

Kui oleme kätte saanud graafilisel teel KT ja kontrollinud selle koordinaatide õigsust praktiliselt, tehes vastavad parandused, arvutame välja KT koordinaadid kaksikute indikaatriksi telgede suhtes. Selleks kantakse KT vastavate telgedega järjekorras ühele meridiaanile ja mõõdetakse Wulfi võrgul nende vaheline nurkkaugus kraadides.

Tulemused kirjutatakse üles järgmise tabeli kujul:

Koordinaadid	KT Ng	KT Nm	KT Np	Seadus	Pg nr.
I indi- viid	29°	116°=(64°)	106°=(74°)		
II indi- viid	149°=(31°)	66°	76°	010	nr. 57-58
Keskmine	30°	65°	75°	albiidi	

Saadud koordinaatide järgi, millised kanname Fjodorovi või Nikitini diagrammile, saame punktid või punkti, mis langevad ühele kõverale või selle lähedusse. Vastavalt sellele saamegi kätte kaksikute seaduse ja plagioklassi numbri.

Fjodorovi ja Nikitini diagramm. Fjodorov ja tema õpilane Nikitin tegid ära suure töö päevakivide keemilise koosseisu ja optilise indikaatriksi vahelise seose uurimisel. Vastavate andmete alusel nad koostasid plagioklasside määramiseks diagrammid.

Fjodorov kasutas diagrammi alusena stereograafilist võrku, mille ekvaatoriga on kokkulangev Ng, vertikaalse diameetriga Np ja võrgu keskpunktiga Nm.

Et kasutada Fodorovi diagrammi on vaja teada, kas lõhenevuspindade pooluste, kristalli pindade pooluste või kaksikutelje ja optilise indikaatriksi telgede vahelisi nurki - koordinaate. Viimaste kandmisel diagrammile saame 4 punkti, millistest tuleb välja valida üks, mis on kõige

lähedasem või kokkulangev mõne kõveraga. Saadud kõvera punkti järgi saame määrata plagioklassi numbrit, tahu sümboli, mille järgi esineb lõhenevus, kaksikuseaduse jne.

Kaasajal on enam kasutamist leidnud Nikitini diagramm, mis kujutab endast Fjodorovi stereograafilisest võrgust vaid ühte kvadranti, kuhu on kantud kõik kõverad ning kõik peamised plagioklasside ning K-päevakivide kristallograafilised elemendid optilise indikaatriksi telgede suhtes. Kandes Nikitini võrele saadud koordinaadid, saame vastusena ühe punkti või veakolmnurga. Vastavalt sellele, missugusele kõverale punkt või kolmnurk satub, leiamegi otsitava plagioklassi numbrit ja muud tundmatud (kaksikute seaduse, tahu nimetuse, lõhenevuse jne.).

Plagioklasside koosseisu määramine kokkukasvamispinna koordinaatide järgi. a) plagioklassi kaksikus määratakse mõlema indiviidi indikaatriksi pealõigud ja kantakse stereograafilisele projektsioonile.

b) asetatakse kaksikute kokkukasvamispind kokku mikroskoobi sümmeetriapinnaga. Selleks asetatakse kaksikuõmblus // vertikaalsele niidile ja kallutamisega H-telje ümber leitakse selle maksimaalne teravus, mis ei muutu I-telje ümber pöörates.

c) saadud koordinaatide järgi kantakse kokkukasvamispind ja selle poolus stereoskoopilisele projektsioonile. Loetakse Wulfi võrgul kokkukasvamispinna pooluse koordinaadid telgede Ng, Nm ja Np suhtes ja arvutatakse mõlema indiviidi keskmine.

d) saadud koordinaatide järgi saame Nikitini diagrammil punkti (või veakolmnurga), mis peaks langema kas kõverale (010), (001) või (021) (või nende lähedale), harvem teistele. Kõvera indeksi järgi saame teada kokkukasvamispinna, punkti asukoha järgi aga plagioklassi numbrit.

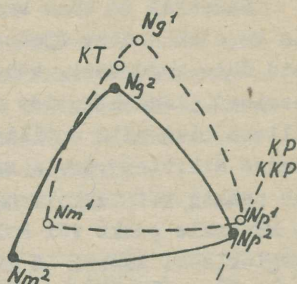
Happeliste plagioklasside määramise erinevused. Aluselistes plagioklassides kaksikuindiviidide indikaatriksite teljed Ng^1 - Ng^2 jt. moodustavad projektsioonil omavahel küllaltki suuri nurki, mistõttu täpse töö korral kaared

lõikuvad kas ühes punktis või annavad väga väikese kolmnurga.

Happelistes plagioklassides on N_p orienteeritud peaaegu // (100) ja albiidi jt. seaduste järgi kaksikutes satuvad N_p^1 ja N_p projektsioonil peaaegu kokku, neid ühendav kaar võib kulgeda ükskõik millises suunas (joon. 73). Siit on selge, et KT ei ole siin võimalik määrata graafiliselt, vaid see tuleb leida praktiliselt.

Happelistes plagioklassides esineb KT tavaliselt kas $Ng^1 Ng^2$ vahel või $Nm^1 Nm^2$ vahel (harva $Np^1 Np^2$ vahel). KT praktiliseks otsimiseks

tuleb viia I-teljega kokkulangemisele punktid, mis jagavad pooleks kaare $Ng^1 Ng^2$ ja $Nm^1 Nm^2$. Üks neist ongi tavaliselt KT.



Joon. 73. Kaksikute indikaatriksite pealõikude projektsioonid happeliste plagioklasside korral.

Plagioklasside määramine lõhenevuspinna (010) ja (001) koordinaatide järgi. Samuti nagu KT koordinaatide järgi Ng , Nm , Np suhtes, saame määrata plagioklassi numbriga lõhenevuspinna pooluse koordinaatide järgi optilise indikaatriksi telgede suhtes. Samuti on võimalik ühtlasi määrata ka tahu sümbol, mille järgi lõhenevus toimub.

Töö käik on järgmine:

- Valime selge lõhenevusega plagioklassi terakese, asetame selle niitristi alla.
- Kanname selle plagioklassi indikaatriksi pealõigud stereograafilisele projektsioonile.
- Määrame kindlaks lõhenevuspinna samal põhimõttel kui kaksikute kokkukasvamispinna korral; ajame lõhenevuse kokku vertikaalse niitristiga ja kallutusega H-telje ümber leiame maksimaalse lõhenevuse teravuse (kitsas, ei liigu fokuseerimisel!). Kanname lõhenevuspinna stereograafiliselt

sele projektsioonile, märgime ära lõhenevuspinna pooluse.

d) Kasutades Wulfi võrku, määrame lõhenevuspinna pooluse koordinaadid indikaatriksi telgede Ng, Np, Nm suhtes.

e) Saadud koordinaatide järgi leiame Nikitini diagrammilt punkti, mis langeb mingile kõverale. Plagioklassi numbri leiame interpoleerimisel. Kõvera indeks aga osutab lõhenevusele.

Kaksikute korral võib täpsuse suurendamiseks arvestada lõhenevuspinna koordinaadid kahe indiviidi indikaatriksi telgede suhtes ja võtta nende keskmise.

Kui plagioklassi määramine toimub lõhenevuse järgi, on soovitatav valida selge lõhenevusega terakene, kui aga kaksikute järgi, siis selgete kaksikupiirjoontega terakene. Viimasel korral on soovitatav enne määrata, kas plagioklass on kaksistunud tahu, telje või komplitseeritud seaduse järgi. Selleks kantakse kokkukasvamispind stereograafilisele projektsioonile, samuti selle poolus. Kui KT langeb kokku viimasega, on tegemist tahu seadusega.

Plagioklasside määramisel võime saada ebaselgeid tulemusi juhul kui KT langeb mitme kõvera lähedusse. Sellisel korral tuleb teha täiendavaid uurimisi, püüda määrata plagioklassi kokkukasvamispinna pooluse koordinaatide järgi, lõhenevuspooluse järgi, murdumisnäitaja jm. järgi.

Plagioklasside mõõtmisel saadud tulemused on soovitatav kanda järgmisele tabelile:

Õhik nr. 822 (näide)

Laua teljed	I indiviid	II indiviid	Märkused
N	71° 0°	88° 0°	KT on saadud graafiliselt ja kontrollitud I-telje kokkulangemisel
H	- 22° -38°	- 30° - 6°	
I	- 332	-	
Lõik (Np'=Ng'Nm) Nm'		Ng ² Np ²	
2 V = - 88°			

KKP = KP - N - 216°, H - 17°

7. Mineraalide murdumisnäitaja hindamine . . .	55
8. Mineraalide lõhenevus	59
9. Suletiste uurimine	62
10. Ohiku paksuse ligikaudne määramine . . .	62
11. Opaaksete mineraalide vaatlused peegeldu- vas valguses	63
C. Ortoskoopilised vaatlused ristnikolites	
12. Indikaatriksi telgede määramine antud kristallilõigus	65
13. Mineraalide pikenduse märgi määramine . .	67
14. Kaksikmurdumise suuruse määramine	69
15. Kustumisnurkade määramine	75
16. Kaksikute uurimine	79
D. Konoskoopilised vaatlused	
17. Konoskoopilise meetodi olemus	81
18. Optiliselt üheteljeliste kristallide ko- noskoopiline uurimine	83
19. Optiliselt kaheteljeliste kristallide konoskoopiline uurimine	91
20. Indikaatriksi elementide dispersiooni jälgimine konoskoobis	102
E. Plagioklasside määramise meetodid	
21. Becke meetod	105
22. Michel-Levy meetod	108
23. Becke-Beckeri meetod	109
F. Kvantitatiivse mineraloogilise analüüsi geo- meetrilised meetodid	
24. Joonmeetod	111
25. Punktmeetod	113
26. Pindmeetod	114
27. Purdsete kivimite kvantitatiivsest mine- raloogilisest analüüsist	115
III Immersioonimeetod	
1. Immersioonimeetodi olemus	119
2. Immersioonikeskkonnad	120
3. Immersioonipreparaatide valmistamine . .	123

4. Mineraalide mürdumisnäitajate võrdlemise meetoditest immersioonianalüüsil	125
5. Mineraalide määramisest immersioonipreparaatides	129

IV Fjodorovi meetod

1. Fjodorovi meetodi olemus ja tähtsus	133
2. 5-teljelise Fjodorovi lauakese ehitus . . .	135
3. Stereograafiliste projektsioonide kasutamine Fjodorovi meetodil	137
4. Fjodorovi ringdiagramm	140
5. Fjodorovi lauakese lähteasend ja parandused	142
6. Kristallide optilise indikaatriksi uurimine	145
7. Plagioklasside määramine 4-teljelisel Fjodorovi laual	148

Херберт Вайдинг
КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ

На эстонском языке

Тартуский государственный университет
ЭССР, г.Тарту, ул.Милкооли, 18

Vastutav toimetaja T. Kuuspalu
Korrektor N. Mitt

TRÜ rotaprint 1971. Paljundamisele antud 12.IV 1971
Trükipoognaid 9,88. Tingtrükipoognaid 9,19. Arves-
tuspoognaid 7,9. Trükiarv 400. Paber 30 x 42. 1/4.

MB 03599. Tell. nr. 301

Hind 40 kop.

Hind 40 kop.

Hind 40 kop.

Tartu Riikliku Ülikooli Kirjanduslik Muuseum

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

H. Viiding

MINERAALIDE KRISTALLOOPTILINE
UURIMISMEETOD

TARTU  1971