

Soklin saloja: kukharenkoiitti-(Ce) ja kordyliitti-(Ce)

PAAVO NIKKOLA, ESA POHJOLAINEN, TEO LEHTO JA PASI HEINO

”[Soklin] erikoisinta kivilajiryhmää edustavat myöhäisen vaiheen juonet, joiden mineraloginen tutkimus tulee näytemäärän täydentyessä lisäämään tunnistettujen mineraalien lukumäärää”, kirjoitti Heikki Vartiainen jo vuonna 1998.

Soklin karbonaattikompleksi

Soklin valtaisan karbonaattikompleksin ovaalin muodon huomaa Suomen kallioperäkartalta jo kaukaa, kunhan tarkentaa katseensa Savukoskelle Itä-Lappiin. Sen noin 50 neliökilometrin pinta-ala pitää sisällään erilaisia karbonaattisia kivilajiyksiköitä, metasomaattisesti muuttuneita sivukiviä, lamprofyyrejä, foskoriitteja ja feniittejä – kallioperän rapautuessa syntynyttä fosfaattirikasta lateriittia unohtamatta. Syvyyttä Soklin karbonaattintruusiolla on ainakin kuusi kilometriä.

Soklin kompleksi syntyi karbonaattisen magman tunkeutuessa arkeeseen maankuoreen 368–362 miljoonaa vuotta sitten (Vartiainen & Wolley 1974). Tapahtuma liittyi ekstensionaaliseen magmatismiin, jonka seurauksena kehittyi myös Venäjän puolelle leviittäytyvä Kuolan alkalikiviprovinssi. Soklissa ja Kuusamon Iivaarassa sijaitsevat ainoat Suomen puolella olevat Kuolan alkalikiviprovinssin intruusiot.

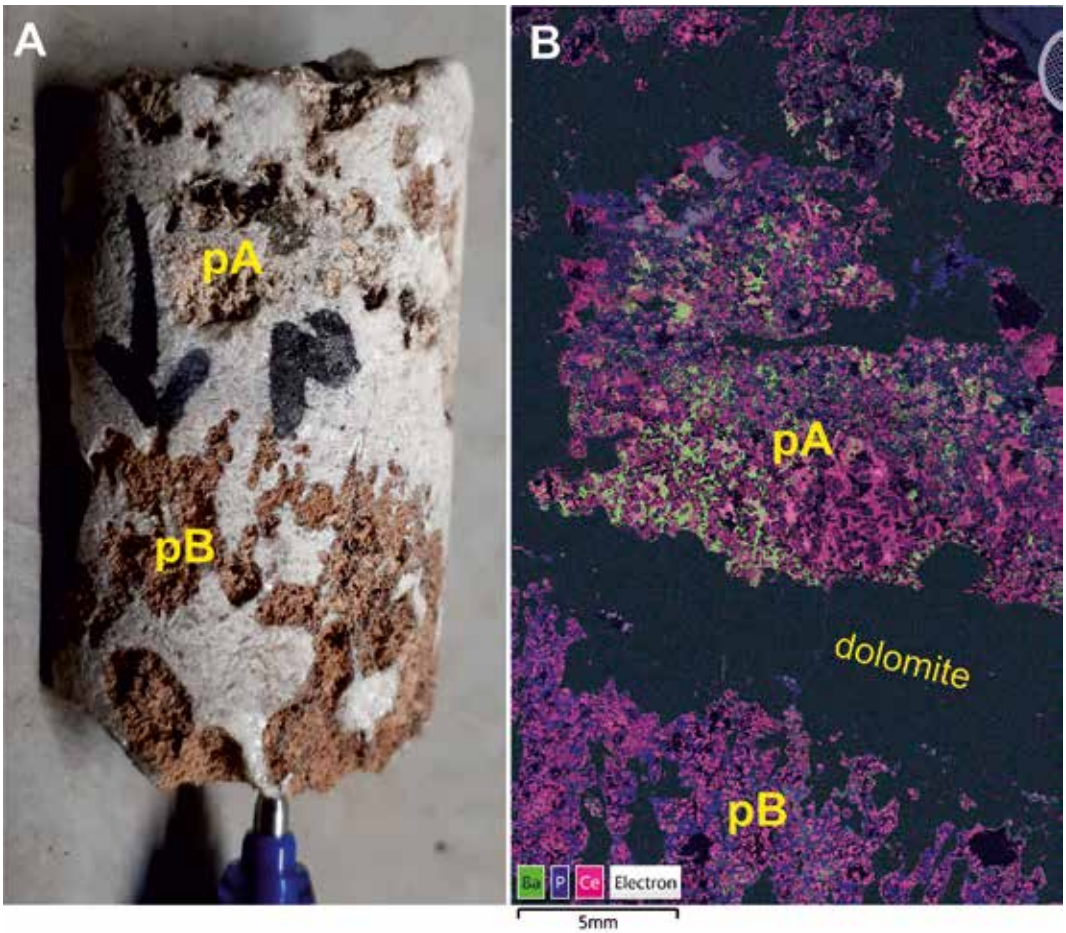
Otanmäki Oy löysi Soklin karbonaattikompleksin vuonna 1967, ja alueen fosfaattipitoisten kivien kaupallista hyödyntämistä on selvitetty siitä lähtien. Tämän lisäksi kiinnostusta ovat herättäneet karbonaattikompleksin harvinaiset maametallit (REE, *rare earth elements*), joita on erityisesti niin kutsutuissa myöhäisissä karbonaattijuonissa. Näiden juo-

nien mineralogiaa Geologian tutkimuskeskus (GTK) ja Sokli Oy alkoivat selvittää keväällä 2023 osana laajempaa tutkimuskokonaisuutta.

Kaksikymmentä ohuthienäytettä myöhäisistä karbonaattijuonista kuvattiin ja analysoitiin pyyhkäiselektronimikroskoopilla, ja valittujen näytteiden mineralogiaa selvitetiin röntgendiffraktiomenetelmällä. Tämän jälkeen useiden mineraalifaasien koostumus analysoitiin elektronimikroanalysaattorilla ja LA-ICP-MS-menetelmällä. Tutkimuksissa paljastui rikas ja vaihteleva mineraalikoostumus. Samalla tunnistettiin kaksi Suomesta ennen löytämätöntä mineraalia: kukharenkoiitti-(Ce) ($\text{Ba}_2\text{Ce}(\text{CO}_3)_3\text{F}$) ja kordyliitti-(Ce) ($(\text{NaCa})\text{BaCe}_2(\text{CO}_3)_4\text{F}$). Nämä mineraalit eivät ole vain tieteellinen kuriositeetti. Kukharenkoiitti-(Ce) ja kordyliitti-(Ce) ovat merkittäviä REE-kantajia myöhäisissä karbonaattijuonissa ja siksi taloudellisesti arvokkaita, jos Soklin esiintymää joskus hyödynnetään.

Myöhäiset karbonaattijuonet

Myöhäisen vaiheen karbonaattijuonია esiintyy erityisesti Soklin kompleksin keskiosissa, vaikka ne leviittäytyvät myös ympäröiviin kivilajiyksiköihin (Vartiainen 1980). Juonten leveys vaihtelee 0,1 ja 15 metrin välillä, ja tyyppillisesti ne koostuvat onteloiden laikut-

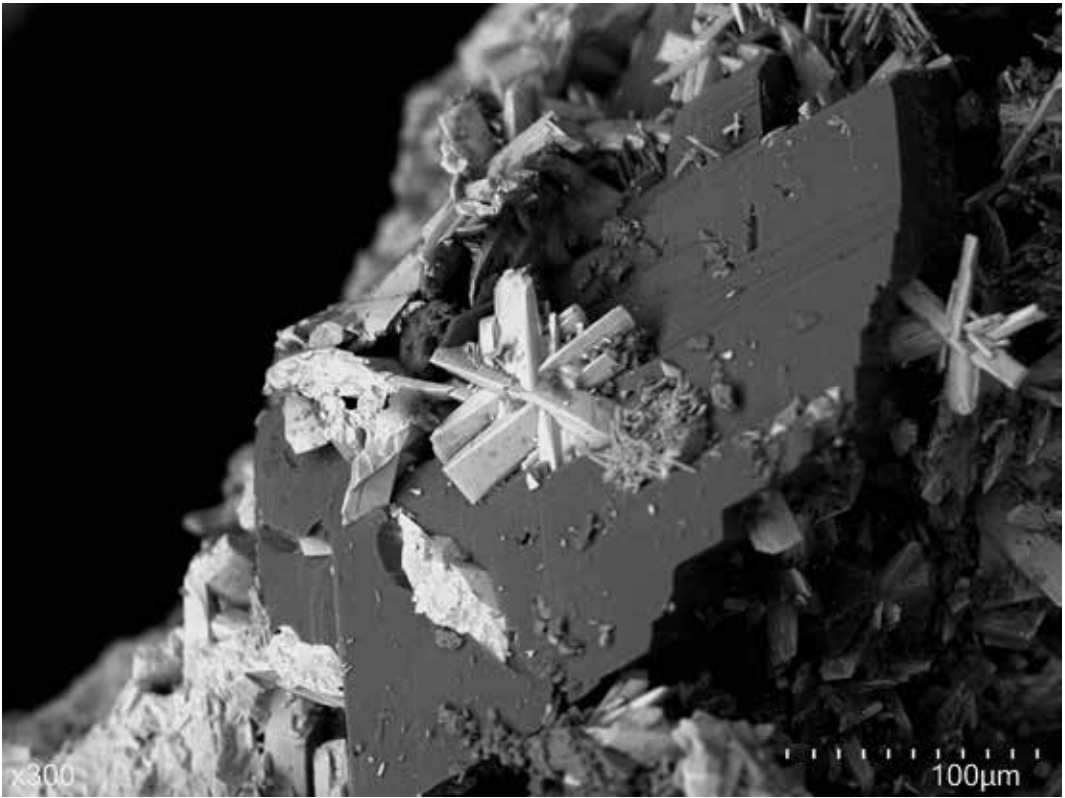


Kuva 1. Näytekappale Soklin myöhäisestä karbonatiittijuonesta (A), ja samasta näytteestä tehdyn ohuthien alkuainekartta, josta näkyvät bariumin (Ba), fosforin (P) ja ceriumin (Ce) pitoisuudet näytteessä (B). Näyte sisältää kaksi toisistaan poikkeavaa ontelotyyppiä: pA ja pB. Ontelo pA koostuu pääosin ankyliittistä, kukharenkoitista, sideriitistä ja kvartsista. Ontelo pB on lähinnä ankyliittiä, hematitiittiä, sideriittiä ja apatiittiä sekä sisältää myös pieniä määriä kordyliittiä. Muista näytteistä poiketen nämä ontelot eivät sisältäneet strontianiittiä. Kuvat: Esa Pohjolainen (A) ja Paavo Nikkola (B).

Figure 1. A sample of late-stage carbonatite dyke from the Sokli complex (A) and a Ba, P, Ce elemental map of a thin section made from this sample (B). The sample includes two cavity types: pA and pB. The cavity pA is dominantly ancylite-(Ce), kukharenkoite-(Ce), siderite, and quartz. Cavity pB is mainly ancylite-(Ce), hematite, siderite and apatite, and some cordylite-(Ce). Unlike the other studied late-stage carbonatite dykes, this did not contain strontianite. Photos: Esa Pohjolainen (A) and Paavo Nikkola (B).

tamasta rautarikkaasta dolomiitista. Juuri nämä dolomiitin ontelot, joiden väri vaihtelee punaisen eri sävyistä vihreään, ovat rikkaita harvinaisista maametalleista. Paatunutkin mineralogi häkeltyy näiden onteloiden monimuotoisuuden edessä. Muutaman senttimetrin kivenkappale saattaa sisältää useamman

tyyppisiä ontelotäytteitä, joilla kaikilla on oma mineraalikoostumuksensa (kuva 1). Tyypillisiä Soklin myöhäisen vaiheen karbonatiittijuonesta tunnistettuja ontelomineraaleja ovat apatiitti ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$), ankyliitti-(Ce) ($\text{CeSr}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$), strontianiitti (SrCO_3), kvartsi (SiO_2), kukharenkoitti-(Ce),



Kuva 2. Pyyhkäiselektronimikroskooppikuva ontelon pinnalla kasvavista tähtimäisistä kukharenkoitti-(Ce)-kiteistä Soklin myöhäisessä karbonaattijuonessa. Näyte: Hugh O'Brien. Kuva: Krisztian Szentpeteri.

Figure 2. Back-scattered electron image of stellate kukharenkoitti-(Ce) grains growing on a cavity surface in a Sokli late-stage carbonate dyke. The sample is a courtesy of Hugh O'Brien. Photo: Krisztian Szentpeteri.

alstoniitti (tai barytokalsiitti, $\text{BaCa}(\text{CO}_3)_2$) ja kordyliitti-(Ce). Tutkituissa ohuthienäytteissä kukharenkoitti-(Ce), ankyliitti-(Ce) ja monatsiitti ovat merkittävimmät harvinaisten maametallien kantajamineraalit.

Kukharenkoitti-(Ce)

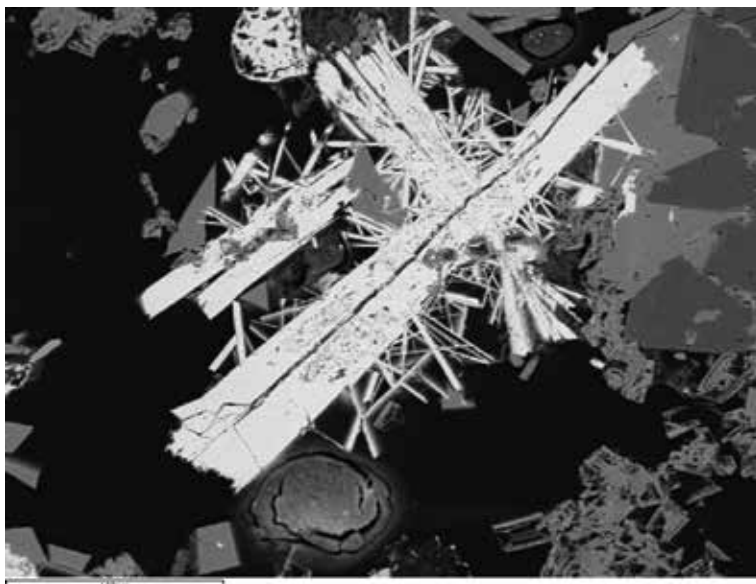
Kukharenkoitti-(Ce) on monokliininen barium-cerium-fluorikarbonaattimineraali (kuva 2). Se on nimetty Kuolan alkalikiviprovinssia tutkineen professori Alexander A. Kukharenkon mukaan. Kirjallisuudesta sama mineraali saattaa löytyä myös nimellä ”*zhonghuacerite-(Ce)*”, mutta tätä mineraalinimeä ei ole viral-

lisesti hyväksytty. Kukharenkoitti-(Ce) on harvinainen: sitä löytyy muun muassa Sisä-Mongolian Bayan Obon Fe-REE-Nb-esiintymästä, Kuolan niemimaan Hiipinän ja Vuorijärven alkalikivi-intruusioista sekä Kanadan Mont Saint-Hillairen alkalikivikompleksista (Zaitsev ym. 1996).

Soklin myöhäisissä karbonaattijuonissa kukharenkoitti-(Ce) muodostaa vaaleanpunaisia ontelotäytteitä (kuva 1A). Kirjallisuudessa kukharenkoitti-(Ce) mainitaan alkalikivien ja karbonaattien harvinaisena aksessorisena mineraalina (esim. Zaitsev ym. 1998), mutta Soklissa kukharenkoittia voi olla runsaastikin. REE-rikkaimmassa ohuthienäytteessä noin 2/3 punaisesta ontelotäytteestä määritettiin

Kuva 3. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva kordyliitti-kiteistä kiillotetussa ohuthieessä. Kuva: Paavo Nikkola.

Figure 3. Back-scattered electron image of cordylite-(Ce) grains on a polished thin section. Photo: Paavo Nikkola.



kukharenkoiitiksi, muiden mineraalien ollessa ankyliittiä, alstoniittia (mahdollisesti barytokalsiittia) ja strontianiittia. Muita kukharenkoiitin kanssa yleisesti Soklin kompleksin näytteissä tavattuja mineraaleja ovat baryytti (BaSO_4), hematiitti (Fe_2O_3), sulfidit, kvartsi ja kordyliitti-(Ce). Kukharenkoiitti-(Ce) esiintyy joko massamaisena tai myöhäisinä tähtimäisinä kideaggregaatteina (kuva 2).

Kordyliitti-(Ce)

Kordyliitti-(Ce) on heksagoninen natrium-barium-cerium-fluorikarbonaatti (kuva 3). Kordyliitti löydettiin Grönlannin Narssarssukin pegmatiiteista 1800-luvulla (Flink 1899). Grönlannin lisäksi kordyliittia tavataan esimerkiksi Bayan Obo -esiintymässä ja Kuolan alkalikiviprovinssissa (Giester ym. 1998).

Soklin myöhäisissä karbonaatti-juonissa kordyliittiä esiintyy pieninä määrinä muiden REE-kantajamineraalien kanssa. Kordyliitti tunnistettiin dominoivaksi REE-kantajafaaiksiksi vain yhdestä näytteestä, jossa se muodostaa ilmeniitin (FeTiO_3), ankyliitin ja strontianiitin kanssa punaisia ontelotäytteitä. Kor-

dyliitti-(Ce) esiintyy tyypillisesti onteloiden aivan viimeisimpinä kiteytyneenä mineraalina ja muodostaa prismaattisia kiderykkelmiä (kuva 3).

Etsivä löytää

Tehtyjen tutkimusten tavoitteena oli tunnistaa Soklin karbonaattikompleksin keskeiset REE-kantajamineraalit ja analysoida niiden koostumus massataselaskelmia varten. Näytteiden hivenfaaseja ei kuitenkaan tutkittu vielä riittävästi. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että Soklin kompleksin myöhäiset karbonaatti-juonet eivät vielä paljastaneet kaikkia salojaan.

Itärajan takaisista Kuolan alkalikiviprovinssin myöhäisistä karbonaatti-juonista on vuosikymmeniä kestäneiden tutkimusten tuloksena dokumentoitu ainakin 25 REE-kantajamineraalia (Wall & Zaitsev 2004), joista monet ovat varsin harvinaisia. Mukana on myös lukuisia Soklin kompleksin geokeemiaan sopivia Ba-Sr-REE-mineraaleja, kuten *burbankite* $((\text{Na,Ca})_3(\text{Sr,Ba,REE})_3(\text{CO}_3)_5)$ ja *carbocernaite* $((\text{Na,Ca})(\text{Sr,REE,Ba})(\text{CO}_3)_2)$. Soklin karbonaattikompleksia tutkitaan jäl-

leen aktiivisesti: on todennäköistä, että Soklin kivissä piilee vielä useita toistaiseksi tunnistamattomia mineraalifaaseja.

FT PAAVO NIKKOLA

(paavo.nikkola@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus

FM ESA POHJOLAINEN

(esa.pohjolainen@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus

FM TEO LEHTO

(teo.lehto@mineralsgroup.fi)

Sokli Oy

FM PASI HEINO

(pasi.heino@mineralsgroup.fi)

Sokli Oy

Paavo Nikkola tutkii kiviä ja muita kiinteitä materiaaleja Geologian tutkimuskeskuksen tutkimuslaboratoriossa. Esa Pohjolainen työskentelee erikois-asiiantuntijana Geologian tutkimuskeskuksen Espoon toimipisteessä. Teo Lehto on Suomen Malmijalostus-konserniin kuuluvan Soklin kaivoshankkeen projekti-geologi, ja Pasi Heino toimii hankkeen projekti-johtajana.

Summary

New observations from the Sokli carbonatite: kukharenkoite-(Ce) and cordylite-(Ce)

Sokli is a massive carbonatite intrusion in Savukoski, Finnish Lapland. The intrusion belongs to the Kola Alkaline Province and was emplaced 368–362 Ma. The intrusion encompasses diverse rock units such as carbonatites, metasomatized wall-rocks, lamprophyres, phoscorites, and a sizable fenite aureola. Furthermore, the intrusion is crowned with a phosphate-rich laterite deposit.

In 2023, as a part of a larger research effort,

the Geological Survey of Finland (GTK) and Sokli Oy characterized the mineralogy of the REE-rich late-stage carbonatite dykes from twenty thin section samples. A diverse mineral composition was recognized from the cavities of ferroan dolomite rocks, including two minerals previously not identified from Finland: kukharenkoite-(Ce) and cordylite-(Ce). Both minerals, kukharenkoite in particular, are significant REE-carrier phases in the studied samples.

Lähdeluettelo

- Flink, G., 1899. On the minerals from Narsarsuk on the firth of Tunugdliarfik in Southern Greenland. *Meddelelser om Grønland* 24, 7–180.
- Giester, G., Ni, Y., Jarosch, D., Hughes, J. M., Ronsbo, J. G., ym., 1998. Cordylite-(Ce): a crystal chemical investigation of material from four localities, including type material. *American Mineralogist* 83, 178–184. <https://doi.org/10.2138/am-1998-1-219>
- Vartiainen, H., 1980. The petrography, mineralogy and petrochemistry of the Sokli carbonatite massif, Northern Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 313, 126 s.
- Vartiainen, H., 1998. Suomen Alkalikivet – apatiitista timanttiin. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.), Suomen kallioperä 3000 vuosimiljoonaa. Suomen Geologinen Seura, Helsinki, 286–307.
- Vartiainen, H. & Woolley, A. R., 1974. The age of the Sokli carbonatite, Finland, and some relationships of the North Atlantic alkaline igneous province. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 46, 81–91. <https://doi.org/10.17741/bgsf/46.1.010>
- Wall, F., & Zaitsev, A. N., (toim.), 2004. Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province. *Mineralogical Society Series*, 10. Mineralogical Society, London, 498 s.
- Zaitsev, A. N., Yakovenchuk, V. N., Chao, G. Y., Gault, R. A., Subbotin, V. V., ym., 1996. Kukharenkoite-(Ce), $\text{Ba}_2\text{Ce}(\text{CO}_3)_3\text{F}$, a new mineral from Kola Peninsula, Russia and Québec, Canada. *European Journal of Mineralogy* 8, 1327–1336. <https://doi.org/10.1127/ejm/8/6/1327>
- Zaitsev, A. N., Wall, F. & Le Bas, M. J., 1998. REE-Sr-Ba minerals from the Khibina carbonatites Kola Peninsula, Russia: their mineralogy, paragenesis and evolution. *Mineralogical Magazine* 62, 225–250. <https://doi.org/10.1180/002646198547594>