

Lähdeluettelo

Diez Fernández, S., Sugishama, N., Encinar, J. R. & Sanz-Medel, A., 2012. Triple quad ICPMS (ICPQQQ) as a new tool for absolute quantitative proteomics and phosphoproteomics. *Analytical Chemistry* 84, 5851–5857.
<https://doi.org/10.1021/ac3009516>

Fritz, J. S. & Gjerde, D. T., 2000. *Ion chromatography*. Wiley-VCH, Weinheim, 254 s.

Houk, R. S., Fassel, V. A., Flesch, G. D., Svec, H. J., Gray, A. L. & Taylor, C. E., 1980. Inductively coupled argon plasma as an ion source for mass spectrometric determination of trace elements. *Analytical Chemistry* 52, 2283–2289.
<https://doi.org/10.1021/ac50064a012>

Kingston, H. M. & Jassie, L. B., 1988. *Introduction to microwave sample preparation*. American Chemical Society, Washington, 263 s.

Pintageokemialliset menetelmät malminetsinnässä

PERTTI SARALA

Pintageokemiallisilla menetelmillä tarkoitetaan maapeitteen pintaosan maannoshorisonteista ja orgaanisesta aineksestä sekä kasveista ja lumesta otettujen näytteiden kemiallista analysointia erilaisilla uutto- ja analyysitekniikoilla. Näitä menetelmiä voidaan käyttää sekä paikallisen että kaukokulkeutuneen syntyneen geokemiallisen signaalin havaitsemiseen. Menetelmien käyttötarkoitus riippuu kerättävästä näytemateriaalista ja käytetyistä näytteiden esikäsittely- ja analysointimenetelmistä. Malminetsinnässä ne auttavat tunnistamaan geofysikaalisilla ja/tai geokemiallisilla menetelmillä havaittuja, malminetsinnällisesti mielenkiintoisia kohteita kallioperässä. Pintageokemiallisten menetelmien avulla voidaan seuloa tutkimuskohteita sekä parhaassa tapauksessa ohjata etsintävaiheen kalleinta osaa eli syväkairausta. Kairaus-tarpeen minimointi ja siten pintavaikutusten ja kustannusten vähentäminen ovat malminetsinnän ja etsintäyhtiöiden kannalta tärkeitä.

Maa- ja kallioperänäytteiden ottaminen paksujen maapeitteiden alueella vaatii usein raskaiden koneiden käyttöä ja on siksi aikaa vievää sekä näytteenottolupien saamisen kannalta haastavaa. Perinteiset etsintätekniikat ovat tehokkaita, kun mineralisoitunut kallioperä on kohtalaisen ohuen maapeitteen alla kallioperän pinnassa (Sarala 2015). Ne eivät

kuitenkaan anna tietoa syvemmällä kallioperässä olevista mineralisoituneista vyöhykkeistä tai malmiesiintymistä. Pintageokemialliset menetelmät antavat tietoa maapeitteen alla ja myös syvemmällä kallioperässä olevista mineralisoitumista (kuva 1). Siksi niitä voidaan käyttää tehokkaasti myös syväalmien etsintämenetelmänä. Menetelmien käyttöä ovat edistäneet viimeisten 15–20 vuoden aikana käyttöönotetut uudet analyttiset tekniikat, kuten induktiivisesti kytketty plasma-massaspektrometria (ICP-MS) ja korkean resoluution (*high resolution*, HR-) ICP-MS, joilla voidaan luotettavasti havaita pienet hivenainepitoisuudet eri näytemateriaaleissa.

Geokemiallisen signaalin muodostuminen

Geokemiallinen signaali syntyy maaperässä kahdella eri tavalla: endogeenisenä ja eksogeenisenä. Näistä endogeeninen eli maa-aineksen mineraalikoostumuksesta aiheutuva signaali edustaa perinteisessä geokemiallisessa tutkimuksessa käytettävää sekundääriseen disper-sioon perustuvaa alkuaineiden jakautumista maaperässä. Jäätiköityneillä alueilla tämä heijastuu esimerkiksi pitkään käytössä olleeseen osittaisuuttoon (esim. kuningasvesiuut-

toon), totaaliuuttoon (esim. 4-hapon uutto) tai kokonaisanalyysiin (esim. XRF-analyysi) perustuvaan moreenigeokemiaan. Siinä sekundäärisenä kuljetusmekanismina toimivat jäätikön eroosio-, kuljetus- ja kerrostumissysteemit, jotka indikoivat jäätikön irrottaman tai aiempien sedimentaatioprosessien irrottamien materiaalien alkuperäisen lähdealueen alkuainekoostumusta. Muita endogeeniseen signaaliin perustuvia geokemiallisia hajontaviuhkoja aiheuttavat esimerkiksi fluviaalinen, glasifluviaalinen ja eolinen toiminta.

Sen sijaan eksogeeninen signaali heijastelee maa-aineksen muodostavien mineraalirakeiden ja orgaanisen aineksen pinnalle heikosti sitoutuneiden ionien muodostamaa geokemiallista komponenttia. Se ei siis muodostu minkään erityisen mekaaniseen toimintaan perustuvan prosessin tuloksena, vaan niin sanottujen mobiilien metalli- (tai epämetalli-/puolimetalli-)ionien liikkumisen seurauksena kallioperästä maapeitteen läpi maan pintaosaan (kuva 1). Maan pintaosassa ionit kiinnittyvät siellä olevien mineraalirakeiden ja orgaanisen aineksen pinnalle löyhillä sidoksilla. Ionit voivat myös jäädä niin sanotusti loukkuun maan pintaosassa olevien tai siinä esimerkiksi rapautumisen seurauksena muodostuneiden mineraalirakeiden (esim. savimineraalit) tai sekundääristen yhdisteiden (mm. amorfiset aineet ja hydroksidit) sekä orgaanisten yhdisteiden huokosiin tai rakenteisiin. Endogeenistä signaalia analysoitaessa maaperästä otettua näyttemateriaalia käsitellään hyvin varovaisesti käyttäen heikkoja tai selektiivisiä uuttomenetelmiä (*weak or selective leaches*) välttämällä samalla varsinaisen mineraalijäätikön eroosio-, kuljetus- ja kerrostumissysteemit, jotka indikoivat jäätikön irrottaman tai aiempien sedimentaatioprosessien irrottamien materiaalien alkuperäisen lähdealueen alkuainekoostumusta. Muita endogeeniseen signaaliin perustuvia geokemiallisia hajontaviuhkoja aiheuttavat esimerkiksi fluviaalinen, glasifluviaalinen ja eolinen toiminta.

Sen sijaan eksogeeninen signaali heijastelee maa-aineksen muodostavien mineraalirakeiden ja orgaanisen aineksen pinnalle heikosti sitoutuneiden ionien muodostamaa geokemiallista komponenttia. Se ei siis muodostu minkään erityisen mekaaniseen toimintaan perustuvan prosessin tuloksena, vaan niin sanottujen mobiilien metalli- (tai epämetalli-/puolimetalli-)ionien liikkumisen seurauksena kallioperästä maapeitteen läpi maan pintaosaan (kuva 1). Maan pintaosassa ionit kiinnittyvät siellä olevien mineraalirakeiden ja orgaanisen aineksen pinnalle löyhillä sidoksilla. Ionit voivat myös jäädä niin sanotusti loukkuun maan pintaosassa olevien tai siinä esimerkiksi rapautumisen seurauksena muodostuneiden mineraalirakeiden (esim. savimineraalit) tai sekundääristen yhdisteiden (mm. amorfiset aineet ja hydroksidit) sekä orgaanisten yhdisteiden huokosiin tai rakenteisiin. Endogeenistä signaalia analysoitaessa maaperästä otettua näyttemateriaalia käsitellään hyvin varovaisesti käyttäen heikkoja tai selektiivisiä uuttomenetelmiä (*weak or selective leaches*) välttämällä samalla varsinaisen mineraalijäätikön eroosio-, kuljetus- ja kerrostumissysteemit, jotka indikoivat jäätikön irrottaman tai aiempien sedimentaatioprosessien irrottamien materiaalien alkuperäisen lähdealueen alkuainekoostumusta. Muita endogeeniseen signaaliin perustuvia geokemiallisia hajontaviuhkoja aiheuttavat esimerkiksi fluviaalinen, glasifluviaalinen ja eolinen toiminta.

Kuva 1. Mobiilien metalli-ionien teorian perusperiaate. Ionit vapautuvat kalliopinnassa tai syvempänä esiintyvistä mineraaliesiintymistä (*sub-outcropping / deep buried mineral deposit*) ja kulkeutuvat maanpintaan kiinnittyen siellä maaperän mineraalien ja orgaanisten partikkeleiden pintoihin. Kasvit hyödyntävät näitä ioneja ravinteinaan ja myös varastoivat niitä eri osiinsa. Osa ioneista jatkaa matkaansa ylöspäin myös talvikaudella jäädessä lumipeitteen pohjaosan lumikiteisiin. Mineraalimaassa (*mineral soil*) ja lumessa (*snow*) havaittavia anomaliatyyppejä ovat yksi selkeä piikki (*apical*), kaninkorva-anomalia (*rabbit-ear*) ja sekundäärinen (*secondary*). Muokattu Middleton ym. (2022) pohjalta.

Figure 1. Mobile metal ion concept. Ions are released from the deep buried or sub-cropping mineral deposits, transported to the surface and accumulated on mineral and organic particle surfaces, taken up by plants and trapped at the base of snow. Anomaly patterns are apical, rabbit-ear and secondary. Modified after Middleton et al. (2022).

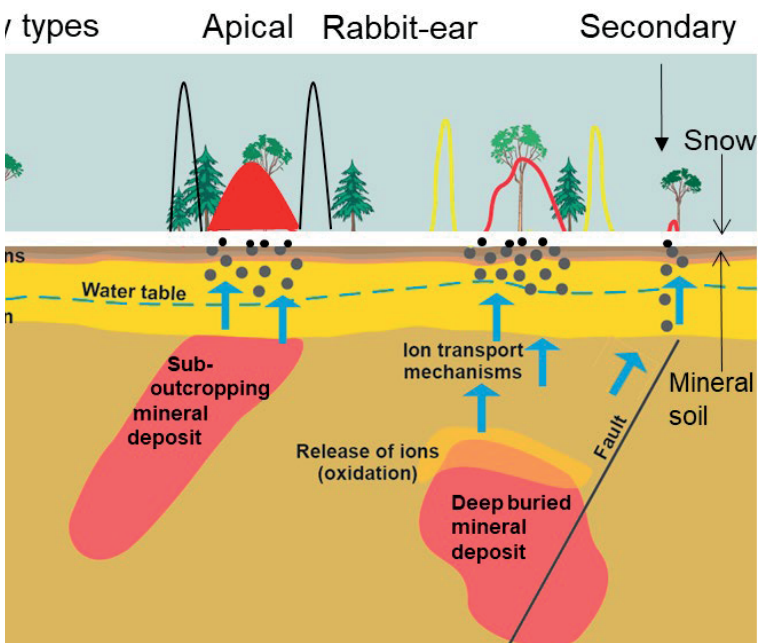
Anomaly



Mobiilien metalli-ionien teoria

MMI-teorian perusajatuksena on, että maapeitteen alla kalliopinnassa tai syvempänä kallioperässä olevan mineraaliesiintymän pinnalla tapahtuu alas vajoavan sadeveden tai pohjaveden seurauksena mineraalien hapettumista, tai bakteeritoiminnan seurauksena mineraalien hajoamista ja erilaisten hiilivetyjen ja hiilidioksidin vapautumista. Hapettumisen ja kaasujen muodostumisen seurauksena mineraaliesiintymästä vapautuu ioneja, jotka kulkeutuvat erilaisten prosessien seurauksena maapeitteen pintaosaan ja akkumuloituvat pintasedimentteihin tai orgaaniseen ainekseen (Aspandiar ym. 2008). Tämän jatkuvan prosessin seurauksena kallioperässä eri syvyyksillä olevista esiintymistä muodostuu geokemiallinen signaali pintasedimenttiin. Teorian mukaisesti kalliopinnalla olevalla maa-aineksella ja sen koostumuksella ei ole juurikaan vaikutusta geokemiallisen signaalin koostumukseen.

Ionien kulkeutumisprosesseja on suuri joukko (Kelley ym. 2002; Cameron ym. 2004; Hamilton 2007), mutta niistä otollisimpia Suomen olosuhteissa lienevät kapillaarisuus,



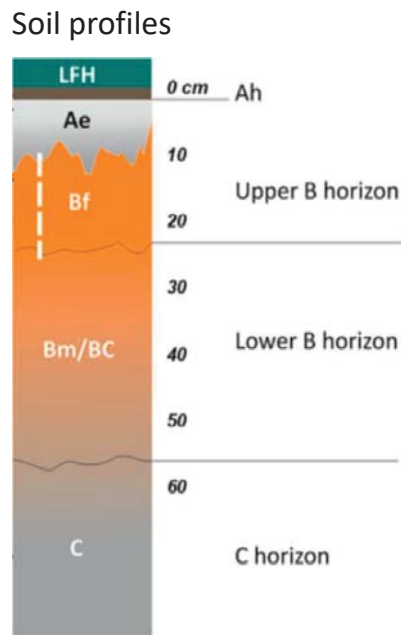
elektrokemiallinen varausero, pohjaveden kuljetus, kaasujen kuljettava vaikutus ja biologiset prosessit. Nämä mekanismit voivat kuljettaa ioneja syvältäkin kallioperästä maanpintaan muodostaen selkeän anomaliapiikin suoraan kalliiossa olevan mineraaliesiintymän kohdalle tai niin sanotun kaninkorva-anomalian, joka näkyy linjamuotoisessa näytteenotossa piikkeinä molemmilla puolilla esiintymää (kuva 1) tai tasavälisessä ruudukkonäytteenotossa ympäränä esiintymän ympärillä. Joskus voimakas, kohonnut pitoisuus voi näkyä myös varsinaisen mineraaliesiintymän ulkopuolella. Tällöin anomalian aiheuttajana voi olla kallioperässä oleva siirros tai ruhjevyyöhyke, jota myöten ioneja kuljettavat prosessit löytävät helpoimman tien kuljettaa ioneja pintaan päin. Toisena vaihtoehtona voi olla myös niin sanottu hydromorfinen dispersio, joka aiheutuu pintaja pohjaveden virtauksesta ja sen siirtäessä ioneja alavaan paikkaan. Toki signaali voi olla peräisin myös aiemmin tuntemattomasta, syväällä kallioperässä sijaitsevasta esiintymästä. Anomalioiden tunnistamisessa olennainen tieto onkin kallioperän kivilajikoostumus ja rakenteet, jotka auttavat tunnistamaan todelliset anomaliat kallioperän häiriörakenteiden synnyttämistä anomaliaista.

MMI-menettelyn soveltamiskohteet

MMI-menettelyn pääsoveltamiskohde on malminetsinnällinen pintageokemiallinen tutkimus, jossa maannoshorisontin ylimmistä kerroksista kerätään pienistä lapiokuopista joko mineraalainesta tai orgaanista materiaalia analysoitavaksi heikko- tai selektiivisten uuttojen jälkeen ICP-MS-tekniikalla (kuva 2). Näihin uuttotekniikoihin perustuvista menetelmistä on tullut käyttökelpoisia muun muassa siksi, että niiden avulla pystytään minimoimaan kalliit ma- ja kallioperän kaivamisesta ja kairaamisesta johtuvat etsintäkulut (Mann ym. 1998). Uuttomenetelmiä on suuri joukko riippuen hapon liuotustehosta ja toisaalta tarvittavasta liuotusvoimasta ionien vapauttamiseksi mineraali- ja/tai orgaanisesta aineksestä sekä erilaisista mineraalaineksen muodostamista lukoista (*traps*; esim. götiitin huokosten muodostamat tarttumapinnat ioneille tai ioninvaihtosavien toimiminen ionien sitojina). Ioni (*ionic leach*, IL)-, MMI-M-, ammonium-asetatti- ja natriumpyrofosfaattiuutto sekä heikko kuningasvesiuutto (niin sanottu modifioitu kuningasvesi) ovat tyypillisimmin käytettyjä kaupallisia menetelmiä heikosti kiinnittyneiden ionien analysoinnissa. Niillä saadaan analysoitua näytteistä laaja kirjo alkuaineita. Modifioitu kuningasvesi toimii myös humuskerroksen pohjaosasta löytyvän niin sanotun Ah-horisontin aineksen liuottamisessa. Esimerkkejä menetelmien käytöstä eri puolilla maapalloa on nykyisin runsaasti saatavilla (esim. Mann ym. 1998; Heberlein 2010; Heberlein ym. 2013; de Caritat ym. 2016). Myös Suomen olosuhteissa on tehty jo jonkin aikaa tutkimusta menetelmän toimivuudesta erilaisille malmityypeille esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen vetämissä Tekesin ja EU:n rahoittamissa UltraLIM-, UpDeep- ja NEXT-projekteissa. Lisäksi malminetsintäyhtiöt käyttävät näitä menetelmiä nykyisin osana näytteenottokampanjoitaan.

Kuva 2. Tyypilliset näytteenottokerrokset (Ah-horisontti ja B-horisontin yläosa) podsolimaannos-profilissa. Kuvat: Pertti Sarala.

Figure 2. Typical sampling layers (Ah horizon and upper part of B horizon) in the podzol soil profile. Photos: Pertti Sarala.



Muita MMI:n sovelluksia ovat biogeokemia ja lumen geokemia. Biogeokemiassa hyödynnetään kasvien joko suoraan kallioperästä (ohuen maapeitteen alueilla), pohjavedestä ja/tai pintamaasta ottamiensa ravinteiden heijastamaa geokemiallista koostumusta. Kasvit sijoittavat ylimääräisen ja/tai kasvulle haitallisen alkuainekuorman ääreviin osiinsa, jolloin ne pääsevät vähitellen eroon tuosta aineksesta. Esimerkiksi kaarna, oksien päät, neulaset ja lehdet sekä puiden pihka ovat paikkoja joihin alkuaineita konsentroituu. Näitä osia keräämällä (kuva 3) ja kemiallisesti analysoimalla päästää kiinni alla olevan kallioperän

koostumukseen ja mahdollisiin mineraali-esiintymiin. Kasvien osalta on syytä muistaa, että eri kasvit voivat olla hyvin valikoivia käyttämiensä ravinteiden ja maaperän olosuhteiden sekä malmityyppien suhteen. Näin ollen kaikki kasvit eivät välttämättä sovellu kaikkien malmityyppien etsintään. Viimeaikaiset tutkimukset ovat kuitenkin valottaneet tätä mysteeria jonkin verran ja tiedossa on monia kasvilajeja, jotka toimivat jäätiköityneiden alueiden olosuhteissakin hyvin tietyille malmityypeille (Dunn 2007; Dunn & Heberlein 2020; Middleton ym. 2022).

Uusin pintageokemiallisista sovelluksista



Kuva 3. Näytteenottoa eri kasvosista biogeokemiallista tutkimusta varten. Kuvat: Maarit Middleton, Geologian tutkimuskeskus.

Figure 3. Sampling of different parts of plants for biogeochemical research. Photos: Maarit Middleton, Geological Survey of Finland.

on lumen geokemia. Siinä näytteet kerätään kevättalvella, jolloin lumipeite on ollut pisimpään alttiina maaperästä nouseville kaasuille ja niiden mukana kulkeutuneille ioneille. Erityisesti lumikerroksen pohjaosa on otollinen näytteiden keräämiseen (kuva 4), koska siihen on syntynyt talven aikana voimakas geokemiallinen signaali ja se on ollut kyseisen lumikerroksen jälkeen ylempänä olevan lumipeitteen suojaamana eli siis vähiten alttiina ilmaperäiselle kontaminaatiolle. Luminäytteet kerätään huolellisesti kaikenlaista kontaminaatiota välttäen käyttäen esimerkiksi akryyliputkea, josta näyte pudotetaan suoraan happokäsiteltyyn näytekuppiin. Näytteet säilytetään pakastetuna laboratorioon saakka, jossa ne sulatetaan juuri ennen analysointia. Analysointiin voidaan käyttää *Spatiotemporal Geochemical Hydrocarbon* (SGH) -menetelmää tai HR-ICP-MS-tekniikkaa (Taivalkoski ym. 2019).

Keskustelua ja yhteenveto

Jotta jollakin geologisella tai geokemiallisella etsintämenetelmällä on käytännön merkitystä, on sen oltava riittävän helposti toteutettava, kemiallisesti kontrolloitava, analyttisesti käyttökelpoinen sekä helposti tulkittava (Chao 1984). Perinteiset moreenigeokemialliset osittais- tai kokonaisuutteen perustuvat etsintämenetelmät ovat tällaisia. Mahdollisimman vähän maastoon jälkiä jättävälle ja ympäristöä kuormittamattomalle näytteenotolle ja malminetsintää tukevalle tutkimukselle on kuitenkin lisääntyvä tarve. Viimeisten parin vuosikymmenen aikana kehitetyt ja käyttöön otetut pintageokemialliset menetelmät tarjoavat tuohon tarpeeseen ratkaisun.

Maaperän maannoshorisonttien, kasvinosien ja luminäytteiden pitoisuuksien analysointi soveltuvat mineraaliesiintymien etsintään erilaisista ympäristöistä ja erilaisille malmityypeille. Pintageokemiallisiin menetelmiin liittyy kuitenkin hieman enemmän epävarmuutta kuin perinteisiin geokemian



Kuva 4. Luminäytteenottoa käyttäen akryyliputkea. Näytteet kerätään lumipeitteen pohjaosasta 10–20 cm syvyydeltä maanpinnasta ylöspäin. Kuva: Jorma Valkama, Geologian tutkimuskeskus.

Figure 4. Snow sampling using acrylic tube. Samples have been collected from the bottom of snow cover, about 10–20 cm above ground. Photo: Jorma Valkama, Geological Survey of Finland.

menetelmiin tai suoraan kallioperästä tehtyyn näytteenottoon (mm. litogeokemia) ja geofysiikan mittauksiin. Monimutkaiset kuljetusprosessit ja ympäristötekijöiden tuottamat spatiaaliset anomaliakuviot vaikuttavat mineraaliesiintymän tuottamaan geokemialliseen signaaliin ja tekevät siten tulkinnasta haastavampaa verrattuna esimerkiksi moreenigeokemian tulosten arviointiin.

Viimeaikaiset Suomessa, Australiassa ja Kanadassa tehdyt tutkimukset kuitenkin osoittavat, että pintageokemialliset menetelmät ovat riskin arvoisia, koska mikään muu geokemiallinen menetelmä ei voi antaa suoraa tietoa alla olevan kallioperän koostumuksesta ja mahdollisesta malmipotentialista. Pintageokemiallinen näytteenotto on edullista ja nopeaa ja siten erittäin kustannustehokasta. Kyseisten menetelmien käytön ympäristöjalanjälki on myös minimaalinen. Pintageokemiallisten menetelmien potentiaali mineraalien etsinnässä on selkeä, ja sen käyttö lisääntyy koko ajan. Samalla kehittyvät myös uutto-, analyysi- ja data-analyysimenetelmät, mitkä vähentävät menetelmiin liittyvää epävarmuutta ja lisäävät niiden käytettävyyttä.

PROF. PERTTI SARALA

(pertti.sarala@oulu.fi)

Kaivannaisalan yksikkö, Oulun yliopisto

Kirjoittaja on sovelletun geokemian professori Oulun yliopiston kaivannaisalan yksikössä.

Summary

Surface geochemical methods in mineral exploration

Surface geochemical methods can be used to detect local geochemical signal caused by the mobile metal ion (MMI) process. Purpose of the methods depends on the sample material to be collected, the sample pre-treatment and analytical methods used. In ore prospecting, these help to identify lithological units and structures detected by geophysical and/or geochemical methods, which can be potential for mineralization. Because of this, research targets can be screened and, at best, the most expensive part of the exploration phase, i.e., deep drilling, can be diminished and controlled. Minimizing the need for use of heavy machines such as test pitting and deep drilling, and thus reducing environmental impacts and costs is what mining sector and exploration companies have come up with.

Surface geochemical techniques that utilize sampling from the surface part of the soil cover, e.g., soil horizons and organic matter, plant samples and snow provide information not only on sub-outcropping but also deep-seated mineral deposit in the bedrock. Therefore, they can be used effectively as a method for searching deep ores. The use of the methods has been promoted by active development of suitable analytical techniques such as inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and high-resolution ICP-MS, which can reliably detect small trace element concentrations in different sample materials.

Lähdeluettelo

- Aspandiar, M. F., Anand, R. R. & Gray, D. J., 2008. Geochemical dispersion mechanisms through transported cover: Implications for mineral exploration in Australia. CRC LEME Open File Report 246, 84 s.
- Cameron, E. M., Hamilton, S. M., Leybourne, M. I., Hall, G. E. M. & McClenaghan, M. B., 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 4, 7–32. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-019>
- Chao, T. T., 1984. Use of partial dissolution techniques in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 20, 101–135. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(84\)90078-5](https://doi.org/10.1016/0375-6742(84)90078-5)
- de Caritat, P., Main, P. T., Grunsky, E. C. & Mann, A. W., 2016. Recognition of geochemical footprints of mineral systems in the regolith at regional to continental scales. *Australian Journal of Earth Sciences* 64, 1033–1043. <https://doi.org/10.1080/08120099.2017.1259184>
- Dunn, C., 2007. Biogeochemistry in mineral exploration. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry* 9. Elsevier, Amsterdam, 341 s.
- Dunn, C. & Heberlein, D., 2020. A geochemical investigation of halogens in spruce treetops and integration with existing multi-element data – Blackwater/TREK regions. Central British Columbia (NTS 093C, 093F). *Geoscience BC Report 2020-04*, 46 s.
- Hamilton, S. M., 2007. A prospector's Guide to the Use of Selective Leach and Other Deep Penetrating Geochemical Techniques in Mineral Exploration. Ontario Geological Survey, Open File Report 6209, 39 s.
- Heberlein, D. R., 2010. An assessment of Soil Geochemical Methods for Detecting Copper-Gold Porphyry Mineralization through Quaternary Glaciofluvial Sediments at the WBX-MBX and 66 Zones, Mt. Milligan, North-Central British Columbia. *Geoscience BC Report 2010-08*, 68 s.
- Heberlein, D. R., Dunn, C. & MacFarlane, B., 2013. Use of Organic Media in the Geochemical Detection of Blind Porphyry Copper-Gold Mineralization in the Woodjam Property Area, South-Central British Columbia (NTS 093A/03, 06). *Geoscience BC, Report 2013-20*, 97 s.
- Kelley D. L., Hall, G. E. M., Closs, L. G., Hamilton, I. C. & McEwen, R. M., 2002. The use of partial extraction geochemistry for copper exploration in northern Chile, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3, 85–104. <https://doi.org/10.1144/1467-787302-048>
- Mann, A. W., Birrell, R. D., Mann, A. T., Humphreys D. B. & Perdrix, J. L., 1998. Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 61, 87–102. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00037-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00037-X)
- Middleton, M., Taivalkoski, A., Kallio, R., Sarala, P., Torppa, J., ym., 2022. Ultra Low-Impact exploration Methods in the subarctic 2 Surface geochemical orientation surveys in northern Finland. *Geologian tutkimuskeskus, Bulletin, käsikirjoitus*.
- Sarala, P., 2015. Surficial geochemical exploration methods. *Teoksessa: Mayer, W. D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.), Mineral deposits of Finland. Chapter 10.1. Elsevier, Amsterdam, 711–731.*
- Taivalkoski, A., Sarala, P., Lahaye, Y., Lukkari, S. & Sutherland, D., 2019. Snow in mineral exploration – examples and practices in glaciated terrain. *Journal of Geochemical Exploration* 200, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.01.006>