

Mikroskooppisista olioista makromaailman mullistuksiin

VILLE J. VIRTANEN

Kirjoittaessani tätä tekstiä (1.4.2020) olen kotonani Helsingissä karanteenissa. Jouduin palaamaan ennenaikaisesti laboratoriovierailultaani Zürichin teknilliseltä yliopistolta ympäri maailmaa levinneen koronaviruksen takia. Vaikka en olekaan sairaana, ovat Suomen ja monien muiden maiden hallitukset määränneet ulkomailta palaavat henkilöt kahden viikon karanteeniin pandemian hillitsemiseksi. Tilanteen vakavuutta kuvaa se, että koronaviruksen leviämisen johdosta useiden maiden ja kaupunkien rajoja on suljettu, työntekijöitä on lomautettu laajamittaisesti eri aloilta ja lisäksi pörssikurssit ympäri maailmaa ovat laskeneet huimasti.

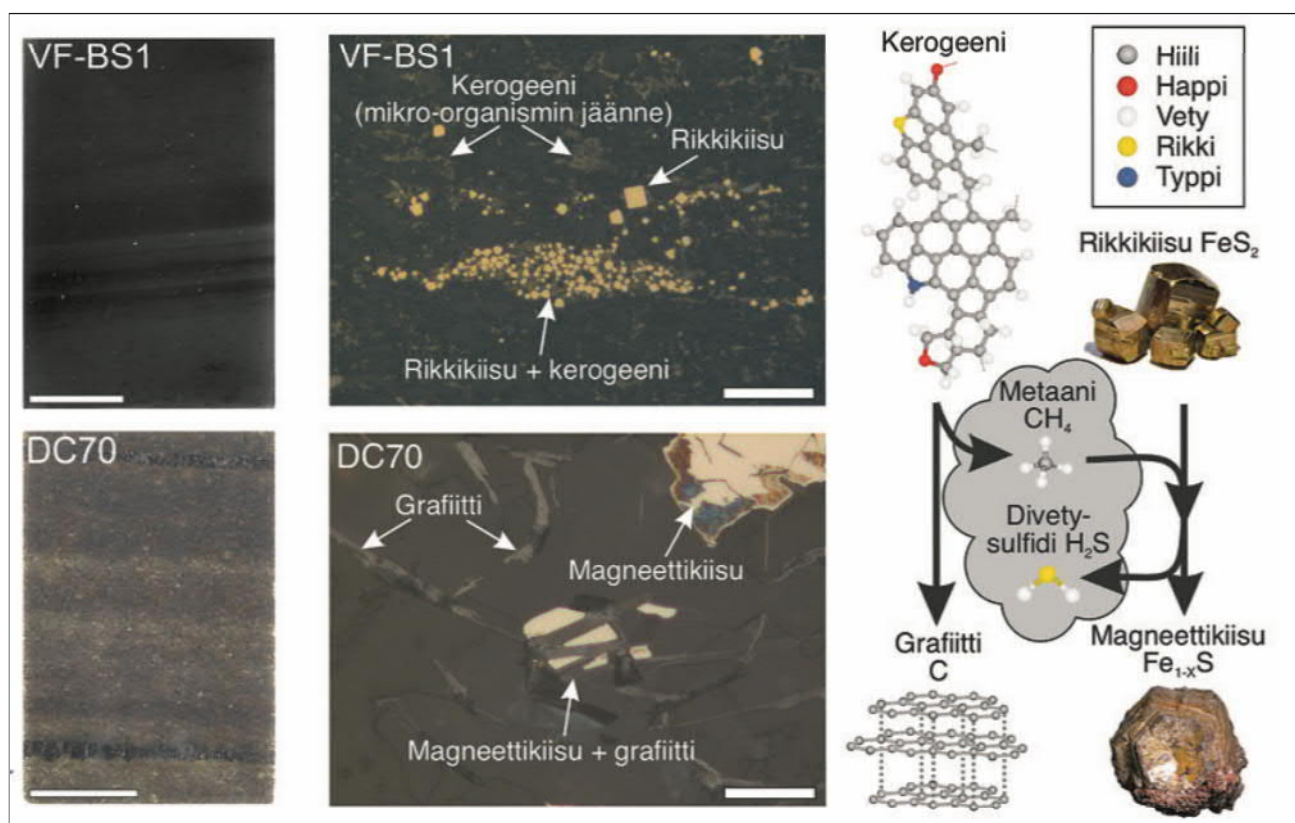
On uskomatonta, miten nanometriluokan virus pystyy aiheuttamaan näin suuren yhteiskunnallisen mullistuksen. Toisaalta meille geologeille on tuttua, että mikro-organismit voivat käynnistää globaaleja luonnonmullistuksiakin. Yhtenä tunnetuimpana esimerkkinä voidaan nostaa esiin yhteyttävien syanobakteerien noin 2,5 miljardia vuotta sitten aloittama ”suuri hapettumistapahtuma” (*Great Oxidation Event*), jonka johdosta maapallon ilma- ja vesikehät muuttuivat pelkistävästä ympäristöstä hapettaviksi ympäristöiksi. Tämä globaali kemiallinen reaktiosarja tappoi suuren osan sen ajan eliöistä, mutta vähitellen mahdollisti monisoluisten eliöiden laajan kirjjon, myös meidän ihmisten kehittymisen.

Hieman tuntemattomampi, mutta saman suuruusluokan vaikutus mikro-organismeilla

on ollut myös kiinteän maan muodostavien mineraalien monimuotoisuuteen. Niin kutsutun mineraalievoluutioteorian mukaan elämän, lähinnä mikro-organismien, aiheuttamat kemialliset muutokset mahdollistivat uudenlaisten mineraalien synnyn (Hazen ja Ferry 2010). Mikro-organismien elintoiminnot muokkasivat alkuaineionien hapetusasteita (elektronien määrää suhteessa protonien määrään) tavoilla, joihin eloton luonto ei kyennyt. Uusien hapetusasteiden myötä ionit kykenivät muodostamaan aiemmasta poikkeavia kemiallisia sidoksia ja näin ollen myös mineraalien määrä kasvoi. Mistään pienestä mineraalien monimuotoisuuden lisäyksestä ei todellakaan ollut kyse, sillä nämä kemialliset muutokset synnyttivät suorasti tai epäsuorasti arviolta noin 3000 maapallolla vuoteen 2010 mennessä löydetystä yli 4400:stä mineraalista (Hazen ja Ferry 2010)!

Mikro-organismit ja mineralisaatiot

Palataan ajassa taaksepäin hetkeen, jolloin olin vielä Zürichissä. Tutkimusvierailullani tarkoituksenani oli tutkia orgaanista ainesta (mikro-organismien jäänteitä) mustaliuskemuodostuman näytteestä (kuva 1), joka syntyi nykyisen Minnesotan (USA) alueella noin kaksi miljardia vuotta sitten. Tämä mustaliuskemuodostuma sai olla jokseenkin rauhallisissa olosuhteissa noin miljardi vuotta kunnes manner sen alla alkoi revetä (samaan tapaan kuin Itä-Afrikan hautavajoama nykyään) ja maan vai-



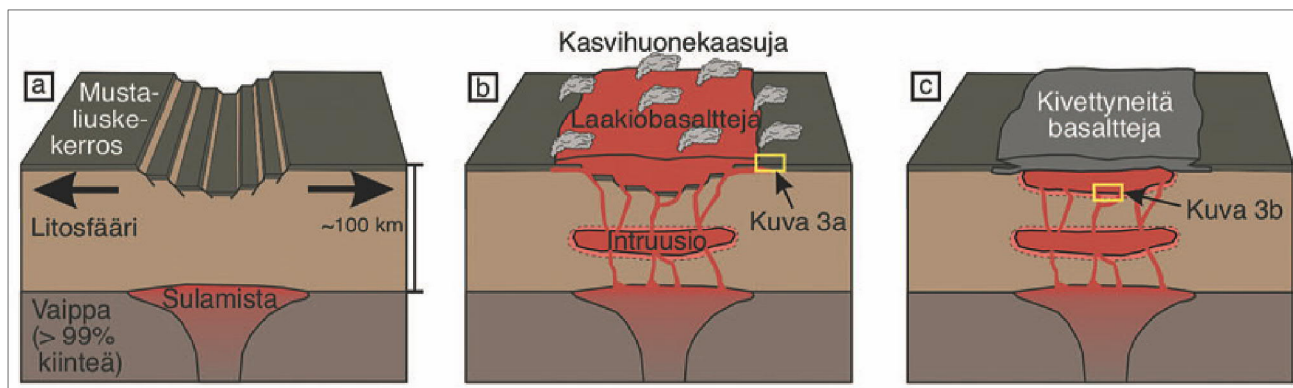
Kuva 1. Vasemmassa laidassa on ohuthiekuvat mustaliuskeesta, johon Duluthin kompleksin magmat tunkeutuivat n. 1,1 miljardia vuotta sitten (Miller *et al.* 2002). Ylempi ohuthie (VF-BS1) on magmojen lämpövaikutuksen ulkopuolelta ja alempi sisäpuolelta (DC70). Mittapalkit ovat molemmissa kuvissa 1 cm. Keskellä on heijastevalomikroskooppilla 50x suurennoksella otetut valokuvat vasemman reunan ohuthieistä. Mittapalkit molemmissa kuvissa 50 μm . Oikeassa reunassa kaavamainen havainnekuva siitä miten kerogeeni (vain osittainen rakenne) ja rikkikiisu ovat muuttuneet lämpöenergian kasvaessa grafiitiksi ja magneettikiisuksi. Luonnolliset kivet ovat usein osittain avoimia systeemejä, jolloin reaktion volatiilit yhdisteet, metaani ja divety-sulfidi (huom. todellisuudessa myös muita yhdisteitä), voivat poistua mustaliuskeesta kaasuna tai fluidina. Rikkikiisukuvan on ottanut Milla Aaltonen ja magneettikiisukuvan Aku Heinonen.

Figure 1. On the left side, there are thin section images of the black shale in which the Duluth Complex magmas intruded ca. 1.1 Ga (Miller *et al.* 2002). The upper thin section (VF-BS1) is outside the thermal aureole caused by the magmas, whereas the lower one (DC70) is from thermal aureole. Scale bars in both images are 1 cm. In the middle, there are reflected light images, taken under 50x magnification, of the thin sections shown on their left side. Scale bars in both images are 50 μm . On the right side, a schematic illustration of how kerogen (only partial structure) and pyrite converted into graphite and pyrrhotite due to increasing heat energy. Natural rocks are often partly open systems, hence volatile reaction compounds, methane and hydrogen sulphide (and in reality, many other compounds as well), are able to leave the black shale as fluid or gas. The "rikkikiisu" photograph has been taken by Milla Aaltonen and the "magneettikiisu" by Aku Heinonen.

pasta purkautui kuumia laakiobasalttilaavoja sen päälle (kuva 2) (Miller *et al.* 2002).

Laakiobasalttien purkaus jatkui noin 20 miljoonan vuoden ajan ja niitä kertyi maan pinnalle paikoin jopa 10 kilometrin paksuinen kerrossarja (huom. kerrossarjan korkeus meren pintaan nähden oli kuitenkin huomattavasti pienempi, sillä maan kuori vajosi samaan aikaan basalttien painosta samaan tapaan kuin Suomessa maan kuori vajosi jäätikön painosta) (Miller *et al.* 2002). Osa basalteista ei enää kyennyt purkautumaan paksun kerrossarjan läpi, joten ne muodostivat intruusiota mustaliuskeen ja kerrossarjan väliin (kuva

tavasti pienempi, sillä maan kuori vajosi samaan aikaan basalttien painosta samaan tapaan kuin Suomessa maan kuori vajosi jäätikön painosta) (Miller *et al.* 2002). Osa basalteista ei enää kyennyt purkautumaan paksun kerrossarjan läpi, joten ne muodostivat intruusiota mustaliuskeen ja kerrossarjan väliin (kuva



Kuva 2. Skemaattinen havainnekuva mantereisen litosfäärin repeytymisestä ja siihen liittyvästä mafisesta magmatismista. a. Vaipan kiviaines sulaa ja ympäristöään kevyempänä pyrkii ylöspäin aiheuttaen samalla litosfäärin repeämisen. Joissakin tapauksissa litosfäärin repeytyminen johtuu mannerlaattojen liikkeistä, jolloin vaipan sulaminen aiheutuu paineen laskemisesta. b. Vaipassa syntynyt sula purkautuu maan pinnalle laakiobasalttilaavoina. Osa vaipan sulasta tunkeutuu litosfäärin kiviin muodostaen intruusion. Vaipan magma sulattaa osittain litosfääriä ympärillään. Todellisuudessa laavoja purkautuu pitkän ajan kuluessa ja ne muodostavat päällekkäin kivettyneitä laavapatjoja, joiden yhteispaksuus voi olla jopa useita kilometrejä. Magmatismi vapauttaa ilmakehään kasvihuonekaasuja, jotka ovat peräisin sekä vaipasta että mustaliuskeista. c. Kivettyneet basaltit estävät kivilsulien purkautumisen, jolloin ne muodostavat uuden intruusion. Intruusion alle jääneet mustaliuskeet kuumenevat ja vapauttavat volatiileja yhdisteitä, kuten rikkiä. Reagoidessaan magman kanssa rikki muodostaa sulfidisulan, joka rikastaa magmasta nikkeliä ja kuparia. Suotuisissa olosuhteissa prosessin tuloksena voi muodostua taloudellisesti merkittävä metalliesiintymä.

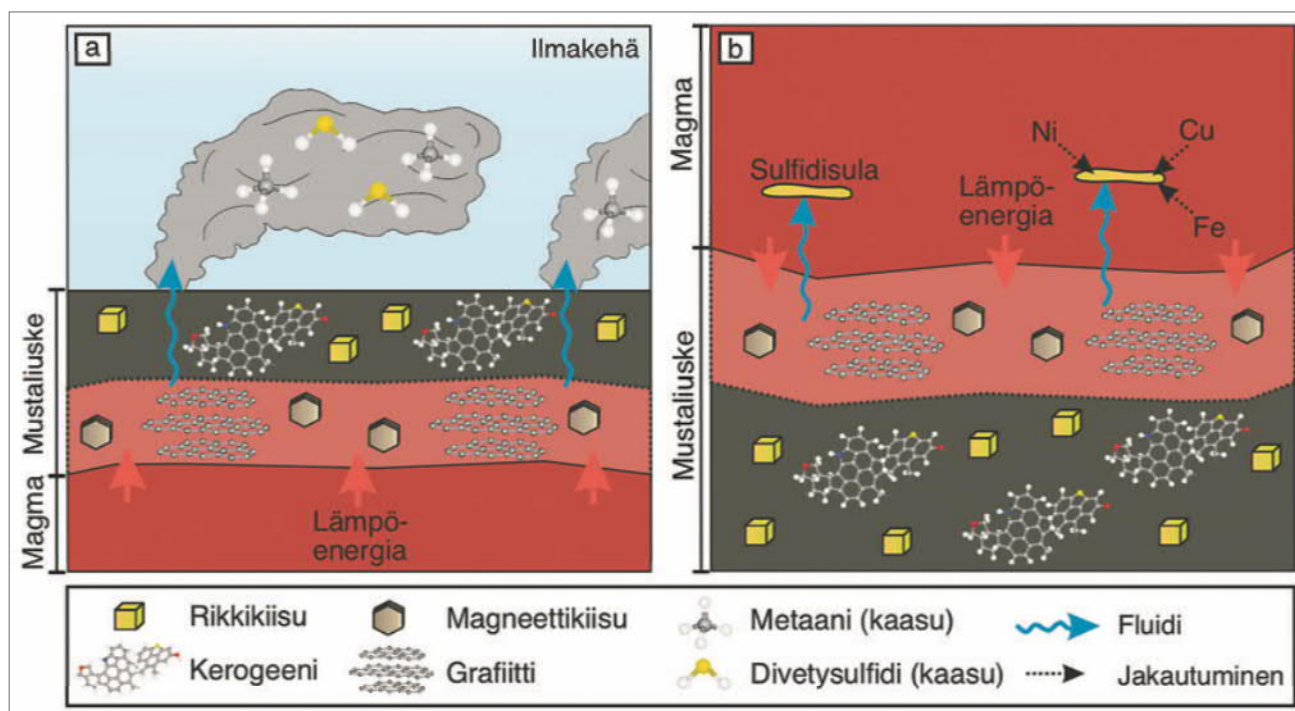
Figure 2. A schematic illustration of continental lithospheric rifting and associated mafic magmatism. The topmost dark grey layer depicts a black shale, which is part of the lithosphere. The lowermost brown block is > 99 % solid mantle. a. Mantle rocks melt and upwelling of the lower density melt causes the lithospheric rifting. In some cases, lithospheric rifting is caused by movement of tectonic plates. In these cases, lithospheric thinning and consequent pressure release causes mantle melting. b. Mantle melt extrudes as continental flood basalts. Part of the melt pools in the lithosphere and forms an intrusion. The intrusion partially melts the surrounding lithosphere. In reality, the lavas extrude over long time period and form a stacked series of solidified lava layers that can reach several kilometres in thickness. The magmatism releases greenhouse gases that originate both from the mantle and the heated black shales. c. The solidified basaltic cap inhibits further extrusion and the subsequent magmas form a shallow intrusion. The intrusion heats the underlying black shales, which release volatile substances, including sulphur. As sulphur reacts with the intrusion magma, an immiscible sulphide melt forms and scavenges nickel and copper from the surrounding silicate melt. In favorable conditions, an economic metal deposit can form. The yellow boxes indicate the sections shown in Figure 3.

2). Intruusiot kuumensivat ympäristöään niin tehokkaasti, että mustaliuskeesta alkoi ensin vapautua volatiileja yhdisteitä kuten metaania (kuva 1 ja 3a) ja lopulta lämpötilan kohotessa mustaliuskeen mineraaliaines alkoi sulaa ja sekoittua intruusion magman kanssa (kuva 2) (Ripley 1981, Miller *et al.* 2002).

Eräs alkuaine, jota mustaliuskeissa on moniin muihin kivilajeihin nähden erityisen paljon, on rikki (kuva 1). Rikki on pääosin varastoituneena rikkikiisuun, mutta esimerkiksi kerokeenista vapautuva metaani kykenee

tehokkaasti muuttamaan rikkikiisun magneetikiisuksi ja volatiiliksi divetyysulfidiksi (kuva 1). Kerokeen taas on mikro-organismien jäänteistä muodostunut pitkäketjuinen hiilivetyyhdiste (kuva 1). Mikro-organismien hautausmaa on siis erittäin otollinen ympäristö rikkikaasujen ja -fluidien muodostumiselle.

Jos mustaliuskeesta vapautunut rikkipitoinen fluidi kohtaa magman, voi tapahtua niin kutsuttu sulfidin saturoituminen (kuva 3b). Kun sulfidi saavuttaa saturaatiopisteen tarpeeksi kuumassa magmassa, se erkaantuu



Kuva 3. a. Havainnekuva siitä, miten mafinen magma tunkeutuessaan mustaliuskeen alle lähellä maan pintaa (kuva 2) vapauttaa mustaliuskeesta kasvihuonekaasuja. Magman lämpöenergia kuumentaa mustaliusketta, jolloin rikkikiisu ja kerogeeni muuttuvat magneettikiisuksi ja grafiitiksi (kuva 1). Reaktiossa muodostuu metaania ja divetyysulfidia, jotka kulkeutuvat ilmakehään. b. Havainnekuva magman tunkeutumisesta mustaliuskeen päälle syvemmällä kuoressa (kuva 2). Magma aiheuttaa mustaliuskeessa saman reaktion kuin 3a-kuvassa, mutta muodostunut fluidi kulkeutuukin yläpuolellaan olevaan intrusioon ja aiheuttaa sulfidisaturaation. Silikaattisulasta erkaantuu sekoittumaton sulfidisula, joka rikastaa itseensä metalleja, kuten nikkeliä ja kuparia.

Figure 3. a. An illustration of how mafic magma intrudes black shale close to the Earth's surface (Figure 2) and releases greenhouse gases from the black shale. The magma heats (lämpöenergia) the black shale causing pyrite (rikkikiisu) and kerogen conversion to pyrrhotite (magneettikiisu) and graphite (Figure 1). Additional reaction produces, methane and hydrogen sulphide (divetyysulfidi), migrate to the atmosphere. b. An illustration of mafic magma intruding black shale deeper in the crust (Figure 2). Magmas causes the same reaction in the black shale as in the Figure 3a, but fluid migrates now into the overlying intrusion causing sulphide saturation. An immiscible sulphide melt (sulfidisula) forms and scavenges metal, such as nickel and copper, from the surrounding magma.

omaksi sulafaasikseen samaan tapaan kuin esimerkiksi vesi ja öljy voivat esiintyä toisiinsa sekoittumattomina nesteinä (kuva 3b).

Sulfidisulan erikoisominaisuutena on se, että se vetää metalleja puoleensa voimakkaammin kuin ympäröivä silikaattisula (esim. Barnes *et al.* 2016). Erityisesti nikkeli ja kupari, jotka eivät yleensä esiinny muissa kuin sulfidimineraaleissa korkeina pitoisuuksina, rikastuvat sulfidisulaan (kuva 3b). Korkean tiheydensä vuoksi sulfidisula alkaa vajoamaan silikaattisulan läpi kohti intruusion pohjaa (Bar-

nes *et al.* 2016). Suotuisissa olosuhteissa uppoavat sulfidisulapisarat voivat kasautua taloudellisesti merkittäväksi mineralisaatioksi. Esimerkiksi edellä mainittu nikkeli ja kupari ovat yhteiskunnallemme erityisen tärkeitä metalliteollisuuden, akkujen ja sähkölaitteiden raaka-aineita.

Sen lisäksi, että mikro-organismien jäänteet ovat tärkeässä roolissa volatiilien rikkiyhdisteiden muodostamisessa, niillä on myös toinen vähintäänkin yhtä tärkeä rooli tässä magmaattisessa mineralisoitumistapahtumassa

(kuva 1). Tämä liittyy siihen, että nämä mikro-organismit elivät aikanaan hyvin erityisessä ympäristössä, joka mahdollisti mustaliuskeiden muodostumisen. Mutta mitä erityistä juuri mustaliuskeiden muodostumisympäristössä tarkalleen ottaen on?

Mustaliuskeet merenpohjan sulfidirikastamoina

Mustaliuske on lähinnä kivettyntä laminaarista savea, jossa on mukana runsaasti orgaanista ainesta eli pelkistyneen hiilen yhdisteitä. Jotta orgaaninen aines säilyisi savessa hapettumatta hiilidioksidiksi, on sen kerrostuttava vedessä sellaisessa osassa, jossa ei ole läsnä vapaata happea (kuva 4). Tämä varsin tylsältä kuulostava ympäristö on avainasemassa useiden mineralisaatioiden synnyn ja jopa globaalien massasukupuuttojen kannalta (esim. Ganino ja Arndt 2009, Aarnes *et al.* 2011).

Kuvitellaanpa kaksi miljardia vuotta vanha meri – yksisoluinen elämä on laajalle levinnyttä, mutta monisoluinen elämä, kuten kalat ja äyriäiset loistava poissaolollaan. Meren pintakerroksessa lilluu syanobakteereja yhteyttämässä ja luomassa hapekkaampaa ilma- ja vesikehää, joista nykyään saamme nauttia (kuva 4). Kun nämä bakteerit kuolevat, niiden jäänteet uppoavat meren syvyyksien savi-
liejuihin. Näissä savi-
liejuissa ei ole vapaata happea ja niissä elää toisenlaisia mikro-
organismeja, jotka saavat energiansa pelkistämällä meriveteen liuenneita typen ja rikin yhdisteitä. Tämän tarinan kannalta oleellisimpia näistä mikro-
organismeista ovat sulfaatinpelkistäjäbakteerit (kuva 4).

Sulfaatinpelkistäjäbakteerit ”hengittävät” pelkistämällä nimensä mukaisesti meriveteen liuenutta sulfaattia (SO_4^{2-} , jossa rikki on muodossa S^{6+}) sulfidiksi (S^{2-}) samaan tapaan kuin me hengittäessämme pelkistämme ilmassa olevaa happea (ilman O_2 pelkistyy O^{2-} ioneiksi, jotka reagoivat hiilen kanssa tuottaen

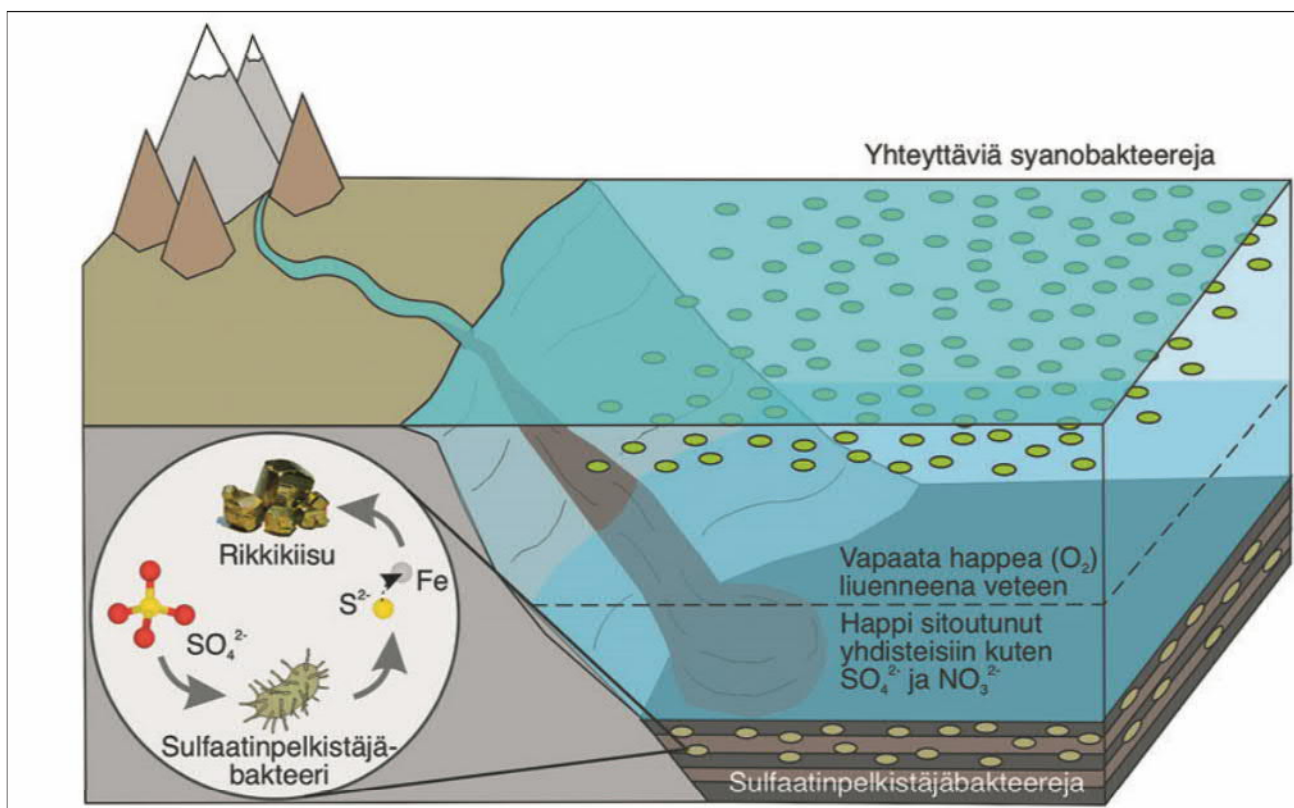
hiilidioksidia [CO_2]) (kuva 2, Jørgensen *et al.* 2019). Sulfaatin pelkistysreaktiossa bakteerien kannalta kuona-aineena syntyvä sulfidi reagoi herkästi savi-
liejuissa olevan hapettuneen ferriraudan (Fe^{3+}) kanssa muodostaen kiinteitä sulfideja, kuten rikkikiisua (FeS_2) (kuva 2, Jørgensen *et al.* 2019).

Sulfaatinpelkistäjäbakteerien soluhengitys siis rikastaa tehokkaasti vedessä liuenneena olevaa rikkiä ympäröivään savi-
liejuun rikkikiisun muodossa ja tästä syystä juuri mustaliuskeissa on moniin muihin kivilajeihin nähden niin paljon sulfideja (kuva 1). Mikro-
organismit siis hoitavat tehokkaasti rikin esirikastuksen, joka on äärimmäisen tärkeä esivaihe edellä esitettyjen mineralisaatiotyyppien muodostumisprosessissa.

Mafiset magmat ja mustaliuskeet – sääntö vai poikkeus?

Kuinka yleinen tämä muodostumisprosessi sitten on ja syntyykö niistä millään tavalla merkittävän kokoisia metalliesiintymiä? Ensinnäkin mustaliuskeiden muodostumisympäristöt, eli hapettomat merten ja pienemmässä mittakaavassa järvien pohjat, ovat globaalisti erittäin yleisiä ja näitä ympäristöjä on ollut maapallolla lähes koko sen geologisen kehityksen ajan (Tourtelot 1979). Lisäksi nämä ympäristöt muodostuvat usein merellisten ja mantereisten litosfäärilaattojen rajoille, jotka toimivat sopivina heikkousvyöhykkeinä, joita pitkin maapallon vaipasta nousevat magmat pystyvät tunkeutumaan maan pinnalle.

Näin ollen mustaliuskeisiin liittyvien mineralisaatioiden yleisyys ei ole kovinkaan yllättävää ja niitä löytyy esimerkiksi Pohjois-Amerikasta, Australiasta, Venäjältä ja Suomes-
ta. Esimerkiksi oman tutkimukseni kohteena oleva Minnesotassa (osittain *Finland* -kansallispuiston alueella) sijaitsevan Duluthin intruusiokompleksin mineralisaatio on kooltaan



Kuva 4. Havainnekuva mustaliuskeen muodostumisesta. Hienoainessedimentti kulkeutuu merenpohjalle, joka on niin syvällä, että veteen ei ole liuenneena vapaata happea. Merenpohjan hapettomissa olosuhteissa elää sulfaatinpelkistäjäbakteereja, jotka käyttävät hengitykseen veteen liuennutta sulfaattia (SO_4^{2-}). Uloshengityksenä vapautuu sulfidia (S^{2-}), joka reagoi tehokkaasti raudan kanssa muodostaen rikkikiisua. Sedimenteissä ja mahdollisesti myös meren pintaosissa elävien mikro-organismien jäänteet kerääntyvät hapettomaan sedimenttiin orgaanisiksi hiiliyhdisteiksi, kuten kerogeeniksi. Näistä prosesseista johtuen mustaliuskeissa on moniin muihin kivilajeihin nähden paljon hiiltä ja rikkiä.

Figure 4. An illustration of black shale formation processes. Fine sediment particles deposit to the ocean floor in depths, where there is no free oxygen dissolved in water. Sulphate reducing bacteria, which live in anoxic ocean floor conditions, use dissolved sulphate (SO_4^{2-}) for breathing and exhale sulphide (S^{2-}), which readily reacts with iron and forms pyrite. The remains of the micro-organisms living in the ocean floor, and possibly in the surface water as well, accumulate in the anoxic sediment as organic carbon compounds, such as kerogen. Due to these processes, black shales tend to contain more carbon and sulphur than many other rock types.

yli neljä miljardia tonnia (Miller *et al.* 2002). Näin ollen se on kooltaan maailman suurin tunnettu magmaattinen nikkeli-kupari-esiintymä, vaikkakin se on keskipitoisuudeltaan (metallien suhde ympärillä olevaan kiviainekseen) kohtalaisen köyhä. Aiempien isotooppitutkimusten perusteella jopa $\frac{3}{4}$ tämän mineralisaation rikistä on peräisin mustaliuskeesta (Ripley 1981), jonne puolestaan rikin todennäköisesti alun perin rikastivat merivedestä sulfaatinpelkistäjäbakteerit.

Mikro-organismit ovat siis epäsuorasti jättäneet meille perinnöksi metallirikastumia, joita nyt voimme hyödyntää kiihtyvässä teknologisessa kehityksessämme. Mutta tarina ei pääty tähän. Muodostumisvaiheessa mustaliuskeisiin siis kasautuu rikin lisäksi orgaanista hiiltä, kun sekä meren pinta- että pohjaosissa elävien mikro-organismien jäänteet hautautuvat kasautuvan sedimenttimassan alle. Tämä poistaa hiiltä ilma- ja vesikehien nopeasta kiertokulusta ja näin kontrolloi osaltaan ilmake-

hän hiilidioksidipitoisuutta. Siinä missä rikki on volatiili alkuaine, niin sitä on hiilikin – ja sitä on mustaliuskeissa sitoutuneena monin verroin rikkiä enemmän.

Massasukupuutot ennen ja nyt

Laakiobasalttipurkausten on huomattu aiheuttavan globaaleja massasukupuuttoja. Suurin näistä on Siperian laakiobasalttipurkausten aiheuttama permikauden päättänyt massasukupuutto noin 250 miljoonaa vuotta sitten, jossa arviolta jopa yli 80 prosenttia kaikista eläinsuvuista katosi maapallolta. Kaikki laakiobasalttipurkaukset eivät kuitenkaan ole aiheuttaneet suuria massasukupuuttoja. Muutamat tutkimukset ovatkin esittäneet, että useat massasukupuuttoihin liitettävissä olevissa tapahtumissa laakiobasaltit purkautuivat nimenomaisesti laaja-alaisten hiilirikkaiden sedimenttikivien, kuten mustaliuskeiden ja karbonaattikivien yhteyteen (esim. Ganino ja Arndt 2009, Aarnes *et al.* 2011). Kuumentuneet sedimenttikivet vapauttivat äkillisesti suuren määrän kivikehään sitoutuneesta hiilestä ilmakehään, kiihdyttäen ilmastonmuutosta.

Me ihmiset oikeastaan aiheutamme tällä hetkellä fossiilisten polttoaineiden käytöllä hyvin samankaltaista muutosta hiilen kiertokulussa kuin laakiobasaltit aikoinaan. Eräs suuri eroavaisuus tässä kuitenkin on ihmisen tarkoituspäisyys – siinä missä laakiobasaltit purkautuivat hiilivarastojen päälle enemmän tai vähemmän sattuman kautta, me vapautamme hiiltä suunnitelmallisesti juuri kaikkein rikkaimmista esiintymistä. Nähtäväksi jää kuinka suuresti toimintamme tulee ilmastoon ja yhteiskuntaamme vaikuttamaan.

Mikro-organismit ja virukset ovat siis linkittyneet planeettamme ja yhteiskuntamme kehityksiin voimakkaasti monilla kiehtovilla tavoilla. Osa näistä vaikutuksista on meille ihmisille negatiivisia, kuten pandemiat ja osa po-

sitiivisia kuten metallirikastumat. Tässä katsauksessa esitetyt vaikutukset ovat todennäköisesti vain pintaraapaisu kaikista monimutkaisista mikro-organismien aiheuttamista suuren mittaluokan prosesseista. Tulevaisuudessa tutkimukset, toivottavasti myös omani, tulevat paljastamaan varmasti vielä uusia syy-seuraussuhteita mikro- ja makromaailmojen välillä. Lopuksi, mikro-organismeja on ollut maapallolla jo noin neljän miljardin vuoden ajan ja ne tulevat olemaan täällä myös kauan sen jälkeen, kun planeettamme olosuhteet käyvät meille ihmisille soveltumattomiksi. Meillä on vielä paljon opittavaa niiltä.

VILLE J. VIRTANEN

(ville.z.virtanen@helsinki.fi)

Tohtorikoulutettava

Geotieteiden ja maantieteen osasto

PL 64

00014 Helsingin yliopisto

Kirjoittaja tutkii sulatuskokeiden, Raman spektroskopian ja termodynaamisten tietokonesimulaatioiden avulla mustaliuskeen sulamista ja devolatilisaatiota ja näiden prosessien vaikutuksia nikkeli-kupari-mineralisaatioiden syntyyn. Tutkimus on osa laajempaa Suomen Akatemian rahoittamaa *Partial melting processes at the contact zones of layered intrusions* -projektia (<https://blogs.helsinki.fi/jsheinon/author/jsheinon/>). Kirjoittaja kiittää Jussi Heinosta, Milla Aaltosta sekä Aku Heinosta avustuksesta tekstin ja kuvien kanssa, sekä Kieran Ilesia englanninkielisten osien tarkastamisesta.

Summary

From micro-organisms to convulsion in the macroscopic world

The recent outbreak of the coronavirus pandemic has reminded us of the omnipresence of micro-organisms. The micro-organisms do not only affect our lives, but they have also fundamentally influenced the

geological evolution of our planet. Probably the best known example is the Great Oxidation Event, which was caused by photosynthesizing cyanobacteriae. The ability of life to manipulate redox chemistry in a way impossible to inorganic world, lead to explosion in mineral diversity. Approximately two thirds of the ca. 4400 minerals found on Earth formed directly or indirectly as a consequence of life.

Life has also played a key role in the formation of some magmatic Ni-Cu sulphide deposits. These deposits are often hosted by mafic rocks that are in close association with black shales. Based on field observations and sulphur isotopes, many studies suggest that mafic magmas assimilated significant amounts of sulphur from their wall-rock black shales. Life can have a twofold effect on this process.

Firstly, black shales are often rich in organic carbon compounds, such as hydrocarbon kerogen, which are remains of (micro-) organisms. Heat from mafic magma can cause graphitization of kerogen, a process in which volatile compounds, mostly methane, are released and the residual carbon becomes increasingly organized graphite. Methane in return can react with pyrite forming pyrrhotite and hydrogen sulphide. In open natural systems, these highly mobile volatile components can end up in the adjacent magma or atmosphere. Depending on where the volatiles end up, they can lead to formation of a sulphide mineralization or release of greenhouse gases and ultimately to a mass extinction event.

Secondly, micro-organisms effectively enrich sulphur in black shales during the deposition process. In anoxic ocean floors, sulphate reducing bacteriae use dissolved sulphate for breathing and exhale sulphide, which effectively react with iron precipitating pyrite. Hence, sulphate reducing organisms

enrich the black shale in sulphur, which is a crucial step if sulphur is to be assimilated later by a magma.

The life-induced processes listed here are probably only the tip of the iceberg in the complexly interwoven micro and macro worlds. In order to deeply understand the geological processes (surface and subsurface), it is undoubtedly important for us geologists to realize how life chemically and physically affects its habitats.

Lähdeluettelo

- Aarnes, I., Frisstad, K., Planke, S. ja Svensen, H., 2011. The impact of host-rock composition on devolatilization of sedimentary rocks during contact metamorphism around mafic sheet intrusions. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 12:1–11.
- Barnes, S.J., Cruden, A.R., Arndt, N. ja Saumur, B.M., 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews* 76:296–316.
- Ganino, C. ja Arndt, N.T., 2009. Climate changes caused by degassing of sediments during emplacement of large igneous provinces. *Geology* 37:323–326.
- Hazen, R.M. ja Ferry, J.M., 2010. Mineral Evolution: Mineralogy in the Fourth Dimension. *Elements* 6:9–12.
- Jørgensen, B.B., Findlay, A.J. ja Pellerin, A., 2019. The Biochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Frontiers in Microbiology* 10:1–27.
- Miller, J.D., Jr., Green, J.C., Severson, M.J., Chandler, V.W., Hauck, S.A., Peterson, D.M., *et al.*, 2002. Geology and mineral potential of the Duluth Complex and related rocks of Northeastern Minnesota. Minnesota Geological Survey, Report of Investigations 58, 207s.
- Ripley, E.M., 1981. Sulfur isotopic studies of the Dunka Road Cu-Ni deposit, Duluth Complex, Minnesota. *Economic Geology* 76:610–620.
- Tourtellot, H.A., 1979. Black Shale – Its Deposition and Diagenesis. *Clay and Clay Minerals* 27:313–321.