

Fossiilit kertovat ilmaston kehityksestä

Muinaisten ilmastojen tutkimus – menneisyydessä tulevaisuuden avain?

TEKSTI: J. SAKARI SALONEN

KUVAT: SEIJA KULTTI, J. SAKARI SALONEN

Helsingin ja Lapin yliopistojen tutkijat ovat tehneet Pohjois-Venäjällä viimeisen vuosikymmenen aikana tutkimuksia, joiden tavoite on ollut tutkia alueen ilmaston kehitystä menneisyydessä. Tutkimukset ovat perustuneet alueelta kerättyihin paleontologisiin aineistoihin, kuten geologisissa kerrostumissa esiintyviin kasvifossiileihin. Näiden avulla tutkijat ovat pyrkineet selvittämään, miten alueen ilmasto on vaihdellut viimeisen 10 000 vuoden aikana.

Suomalaisutkijoiden työ Venäjällä on osa laajaa kansainvälistä tutkimuskenttää, jossa tutkijat pyrkivät selvittämään, miten maapallon ilmasto on kehittynyt tuhansien ja miljoonien vuosien aikana. Tieto maapallon muinaisista ilmastovaihteluista on erityisen tärkeää nykyisen ja tulevan ilmakehityksen arvioinnissa.

Tutkimustiedon perusteella maapallon ilmastossa esiintyy runsaasti luonnollista vaihtelua eri aikajänteillä. Kymmenientuhansien vuosien kuluessa ilmastossa tapahtuu syklisiä muutoksia kylmien ja lämpimien ilmastovaihteiden välillä. Näiden niin sanottujen jääkausivaihteluiden aiheuttajaksi tiedetään maapallon radassa kymmenientuhansien vuosien sykleillä tapahtuvat muutokset. Lisäksi ilmasto vaihtelee runsaasti myös lyhyemmällä aikavälillä, joiden pituus vaihtelee muutamasta vuodesta satoihin vuosiin. Näille jääkausivaihteluita pienemmille ilmastomuutoksille tunnetaan lukuisia luonnollisia syitä, kuten suuret tulivuorenpurkaukset ja muutokset auringon aktiivisuudessa tai merivirroissa (Bradley 2003).

Osana nykyistä ilmastomuutoskeskustelua on käyty taajaan väittelyä siitä, missä määrin havaittu ilmaston lämpeneminen on seu-

rausta ihmistoiminnasta ja missä määrin luonnollisista tekijöistä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi tarkka tieto pitkän aikavälin ilmastovaihteluista on keskeisen tärkeää. Suorat mittalaitteilla tehty, niin sanotut *instrumentaaliset* havainnot ilmastosta ulottuvat vain harvoin yli 200 vuoden päähän menneisyyteen. Koska ilmastossa esiintyy runsaasti luonnollista vaihtelua, joka ei tule esiin näin lyhyessä havaintosarjassa, ei instrumentaalisten havaintoaineistojen perusteella voida varmasti sanoa, voisiko jokin luonnollinen ilmast sykli selittää viimeisten vuosikymmenien lämpenemisen. Tämän vuoksi tarvitsemme tietoa siitä, miten ilmasto on kehittynyt satojen ja tuhansien vuosien aikana ennen instrumentaalisten havaintosarjojen alkua (Bradley 1999, IPCC 2007a).

Tietoa niin sanotuista *muinais-* tai *paleoilmastoista* eli suoria havaintosarjoja vanhemmista ilmastovaiheista on mahdollista saada useista eri lähteistä. Kuuluisia paleoilmastoja kuvaavia tutkimuksia ovat Grönlannin ja Antarktiksien jääkairaukset, joiden perusteella on selvitetty muun muassa lämpötilan ja kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kehitystä useiden satojentuhansien vuosien aikana. Myös geologisten kerrostumien fossiilit ja muut piirteet tarjoavat runsaasti tietoa ilmastoista, joissa kyseiset kerrostumat ovat muodostuneet. Lisäksi tietoa paleoilmastoista saadaan puiden vuosirenkaista sekä erilaisista historiallisista asiakirjoista, joihin on kirjattu tietoa sään vaihteluista, kuten maanviljelystä käsittelevistä muistiinpanoista ja laivojen lokikirjoista (Bradley 1999).

Paleoilmastoja kuvaavien glasiolo-

gisten, paleontologisten, geologisten ja historiallisten aineistojen perusteella on mahdollista muodostaa kuva siitä, miten maapallon ilmasto on kehittynyt satojen, tuhansien ja miljoonien vuosien aikajänteellä ja missä rajoissa siinä esiintyy vaihtelua. Tieto tästä luonnollisesta vaihtelusta muodostaa pohjan, jota vasten ilmaston nykyistä ja tulevaa kehitystä ja sen syitä on mahdollista arvioida.

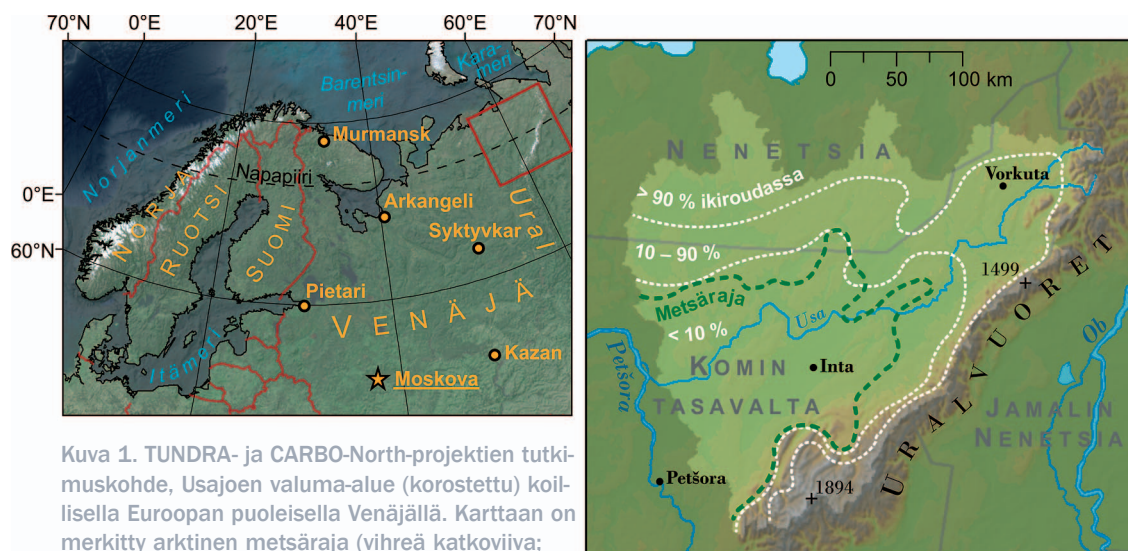
Pohjois-Venäjän fossiiliaineistoja tutkimassa

Kirjoittaja ja joukko muita Helsingin ja Lapin yliopistojen paleontologeja, geologeja, maantieteilijöitä ja kasvitieteilijöitä ovat tutkimuksissaan rekonstruoineet Pohjois-Venäjän ilmaston ja kasvillisuuden kehitystä holoseenikauden (viimeisten noin 11 700 vuoden) aikana. Työ on tapahtunut vuosina 1999–2010 osana Euroopan Unionin rahoittamia, monikansallisia TUNDRA- ja CARBO-North-tutkimushankkeita, joissa on ollut mukana tutkijoita muun muassa Iso-Britanniasta, Saksasta, Alankomaista, Ruotsista, Tanskasta ja Venäjältä.

TUNDRA- ja CARBO-North-tutkimushankkeet ovat sijoittuneet Euroopan puoleisen Venäjän arktisiin koillisosiin, lähelle Uralvuoristoa. Näiden tutkimushankkeiden kohdealueeksi on rajattu Usajoen valuma-alue (kuva 1). Usa on Petšoran merkittävä sivu-

joki, joka laskee arktiselta Uralilta. Hallinnollisesti tutkimusalue kuuluu Komin tasavaltaan ja Nenetsien autonomiseen piirikuntaan (Nenetsiaan). Arktinen metsäraja kulkee tutkimusalu-





Kuva 1. TUNDRA- ja CARBO-North-projektien tutkimuskohde, Usajoen valuma-alue (korostettu) koillisella Euroopan puoleisella Venäjällä. Karttaan on merkitty arktinen metsäraja (vihreä katkoviiva; Olsonin et al. (2001) mukaan) ja ikiroutavyöhykkeet (valkoiset katkoviivat; yksinkertaistettu Mazhitovan ja Obermanin (2003) perusteella).

Figure 1. The study area of the TUNDRA and CARBO-North projects, the watershed of Usa River (highlighted) in northeast European Russia. The map shows the arctic treeline (green dashed lines; shown according to Olson et al. 2001) and permafrost zones (white dashed lines; simplified from Mazhitova and Oberman 2003).



Kuva 2. Ikiroutan muovaamaa tundramaisemaa ilmasta kuvattuna.

Figure 2. An aerial view of tundra landscape, showing signs of permafrost activity.

een halki – alueen pohjoisosa on puutonta tundraa, kun taas pohjoisin taigametsä peittää eteläosan. Tutkimusalueen pohjoisosassa maasta yli 90 % on ikiroudassa (kuva 2).

Tutkimusalueen syrjäisyys on luonut tutkimustyölle aivan erityisiä logistisia haasteita. Alueen tärkeimpiin asutuskeskukseen, Intan ja Vorkutan pikkukaupunkeihin pääsee Mosko-

vasta junalla noin 40–50 tunnissa. Matkaa lähimpään merkittävään kaupunkiin, Komin tasavallan pääkaupunkiin Syktyvkariin, on linnuntietä noin 800 kilometriä. Alueen tieverkosto on olematon, sillä historiallisesti alueella ei ole ollut muuta merkittävää aktiviteettia kuin Intan ja Vorkutan lähistöllä sijainneet rangaistusvankien työleirit (gulagit) ja Vorkutan pommikonetukikohta. Kenttätyökohteisiin siirtymisessä jouduttiinkin turvautumaan paljolti helikoptereihin ja telaketjuajoneuvoihin.

Tutkimuksemme perustuvat useista Usajoen valuma-alueen järvistä ja soista kairattuihin sedimenttisarjoihin (kuva 3). Tyypillisesti tämän alueen järviin ja soihin on kerrostunut liejua tai turvetta noin 10 000 vuoden ajan tai vähän pidempään – kuten Suomessakin, kerrostuminen on useimmiten alkanut vasta vii-



Kuva 3. Tundrajärven pohjasedimentin kairaus Komin tasavallan pohjoisosissa.

Figure 3. Coring of a sediment sequence from a tundra lake, northern Komi Republic.

meisen jääkauden loputtua noin 11 700 vuotta sitten. Järvistä ja soista kairattujen sedimenttisarjojen ajoitus on tutkimuksissamme perustunut lähinnä radiohiilimenetelmään.

Laboratoriossa järvi- ja suosedimenttinäytteistä erotetaan fossiilit. Tutkimuksissamme keskityimme erityisesti kahteen fossiiliryhmään: makroskooppisiin kasvien jäänteisiin ja fossiilisiin siitepölyihin. Makroskooppiset kasvijäänteet voidaan erottaa hienojakoisesta sedimentistä seulomalla. Fossiilisten siitepölyjen erottamiseen käytetään kemiallista käsittelyä, jossa sedimenttinäytteistä syövytetään erilaisilla hapoilla pois muita aineksia.

Kasvimakrofossiilit ja fossiiliset siitepölyt tarjoavat yhdessä hyvin monipuolista tietoa Usajoen alueen ilmaston ja ympäristön kehityksestä. Kasvimakrofossiilien ja siitepölyjen merkittävin ero on niiden esiintymisrunsauudessa sedimentissä. Makroskooppisia kasvijäänteitä voi esiintyä sedimentissä hyvinkin vähän. Tuulen levittämää siitepölyä puolestaan kerrostuu sedimenttiin valtavia määriä: yhdestä kuutiosentistä järviliejua tai suoturvetta voidaan tavallisesti löytää tuhansittain siitepölyhiukasia. Koska siitepölyä kerääntyy niin suuria määriä sedimentteihin, voidaan eri-ikäisistä kerroksista analysoida, miten eri kasvilajien osuudet siitepölystössä muuttuvat vuosituhansien aikana. Näin fossiilisen siitepölystön lajisuhteiden vaihteluiden perusteella voidaan selvittää tutkimusalueen kasvillisuudessa tapahtuneita muutoksia.

Koska kasvillisuus ja sen tuottama siitepöly ovat riippuvaisia ilmastosta, on fossiilinäytteiden siitepölykoostumusten muutosten perusteella mahdollista tutkia myös ilmaston kehitystä vuosituhansien aikana. Erilaisia tilastollisia menetelmiä käyttämällä voidaan siitepölyjen lajikoostumuksen perusteella arvioida, mikä on ollut kasvukauden lämpötila ajankohtana, jolloin kyseinen siitepölystö on kerrostunut sedimenttiin (ks. tietolaatikko).

FOSSIILISET SIITEPÖLYT "PALEOLÄMPÖMITTARINA"

Nykyaikaisissa paleoilmaotutkimuksissa on tavallisesti keskeisenä tavoitteena muinaisten ilmastovaiheiden *kvantitatiivinen* kuvaaminen. Kvantitatiivisessa lähestymistavassa fossiiliaineistoista tai muista paleoilmaotista kuvaavista aineistoista pyritään erilaisilla numeerisilla menetelmillä johtamaan arvioita jon-

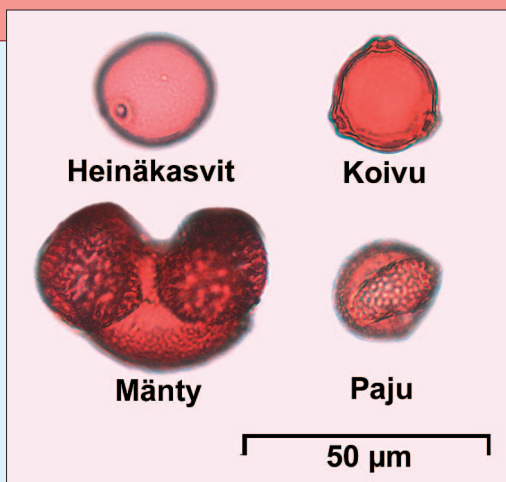
kin ilmaston piirteen, kuten keskilämpötilan absoluuttisesta suuruudesta, sen sijaan että paleoilmaotia kuvattaisiin vain *kvalitatiivisilla* määreillä, kuten "nykyistä lämpimämpi" tai "nykyistä viileämpi". Paleoilmaotjen numeerinen kuvaus helpottaa niiden vertailua nykyiseen ilmastoon ja antaa tarkempaa tietoa maapallon ilmaston vaihtelevuudesta ja herkkyydestä.

Miten maaperästä löytyvisiä fossiiliaineistoista voidaan johtaa numeerisia arvioita tuhansien vuosien takaisista lämpötiloista? Tämäntyyppinen tutkimus perustuu lähes poikkeuksetta jonkinlaiseen nykyisestä luonnosta kerätyyn *kalibrointi-aineistoon*. Tutkijat keräävät tietoa siitä, minkälaisessa ilmastossa fossiileina esiintyvät kasvit tai eläimet viihtyvät parhaiten *nykyään*. Tämä on mahdollista sil-

loin, kun tutkitaan verraten hiljattaisia geologisia ajanjaksoja, eikä merkittävää evoluutiota tai sukupuuttoon kuolemista ole ehtinyt tapahtua. Esimerkiksi viimeisen jääkauden jälkeisellä ajalla esiintyvä lajisto on käytännössä sama kuin nykyäänkin. Jos jokin laji esiintyy tietyn ikäisenä fossiilina, tiedetään tuon ajankohdan ilmaston muistuttaneen sitä ilmastoa, jossa kyseinen laji menestyy nykyään. Jos fossiilina esiintyvä laji on sukupuuttoon kuollut, voidaan paleoilmaotiarvio perustaa kyseisen lajin lähimpään yhä esiintyvään sukulaiseen (esim. Birks *et al.* 2010).

Kun numeerisia paleolämpötila-arvoja johdetaan fossiilisista siitepölyistä (kuva 4), perustuu "paleolämpömittarin" kalibrointi siihen, kuinka paljon eri lajien siitepölyjä kerrostuu nykyään eri ilastoissa. Eri alueiden nykyisen siitepölysaateen koostumus voidaan mi-

tata analysoimalla siitepölystön lajikoostumus esimerkiksi järvien pintasedimentistä, joka edustaa viimeisten vuosien kerrostumaa. Kun pintasedimenttinäytteitä on analysoitu monista eri ilastoista, voidaan laskea, minkälaisessa ilmastossa kunkin siitepölytyypin kerrostuminen on runsainta. Näin muodostuu moderni vertailuaineisto eri siitepölytyyppien optimilämpötiloista, jonka pohjalta voidaan rekonstruoida muinaisten ilmastovaiheiden lämpötiloja. Yksittäisessä tietyn ikäisessä fossiilinäytteessä esiintyy tyypillisesti useita kymmeniä eri siitepölytyyppejä. Tämän menneen ajankohdan paleolämpötila voidaan johtaa kaikkien näytteessä esiintyvien siitepölytyyppien optimilämpötilojen yhdistelmänä käyttäen erilaisia tilastollisia menetelmiä.



Kuva 4. Noin 10 000 vuotta vanhoja siitepölyhiukkasia mikroskooppissa kuvattuna.

Figure 4. Microscope photographs of ca. 10,000 years old fossil pollen grains.

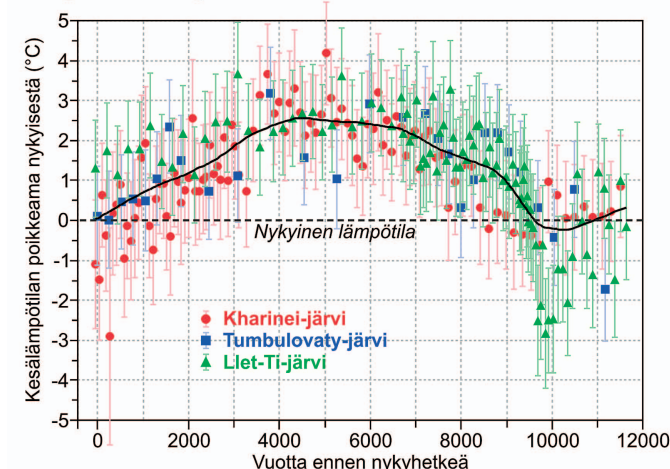
Näin eri-ikäisistä, radiohiilellä ajoitetuista siitepölynäytteistä voidaan laatia lämpötilakäyrä, joka kuvaa lämpötilan muutosta vuosituhansien kuluessa.

Lämpötilan lisäksi fossiiliaineistot kertovat myös muista ympäristössä tapahtuneista muutoksista. Tutkimuksissamme Pohjois-Venäjällä olemme erityisesti keskittyneet tutkimaan, mitä muutoksia muinaiset lämpötilan vaihtelut ovat saaneet aikaan alueen kasvillisuudessa. Sekä siitepölystön että makroskoopipisten kasvifossiilien perusteella on mahdollista selvittää, miten tundra- ja metsäkasvillisuus ovat vaihdelleet alueella ilmaston muuttuessa (Kultti *et al.* 2003, 2004, Välranta *et al.* 2006, 2011, Salonen *et al.* 2011). Lisäksi suokerrostumista löydetty kasvimakrofossiilit

kertovat ikiroudan laajuudessa tapahtuneista muutoksista. Tämä perustuu siihen, että tietyt kasvilajit esiintyvät tyypillisesti routakerrostumien yhteydessä, kun taas toiset lajit vaativat roudattoman kasvualustan (Oksanen *et al.* 2001, Oksanen 2005).

Tutkimuksemme antavat hyvin dynaamisen kuvan Pohjois-Venäjän ilmaston ja ympäristön kehityksestä viimeisen noin 12 000 vuoden aikana. Varhaisella holoseenikaudella noin 10 000 vuotta sitten kesälämpötilat olivat lähellä nykyistä tasoa. Lämpötilat nousivat korkeimmilleen keskiholoseenissa, noin 3000–7000 vuotta sitten, jolloin ne olivat noin 2,5 °C nykytasoa korkeammalla (kuva 5; Kultti *et al.* 2004, Salonen *et al.* 2011, 2012, Salonen 2012). Tämän niin sanotun *holoseenin lämpö-*

Lämpötila Pohjois-Uralin alueella holoseenikaudella



Kuva 5. Yllä: Järvisedimenttien siitepölystön muutosten perusteella rekonstruoitu lämpötilakäyrä viimeisten 12 000 vuoden ajalle. Rekonstruktio perustuu kolmen Pohjois-Uralin alueen järven radiohiiliajoitettuihin sedimenttisarjoihin. Alla: fossiiliaineistojen perusteella arvioitu metsärajan asema 5000 vuotta sitten (katkoviiva) verrattuna nykyiseen metsärajaan (yhtenäinen viiva). Yksinkertaistettu Salosen (2012) pohjalta.

Metsärajan vetäytyminen myöhäisholoseenissa

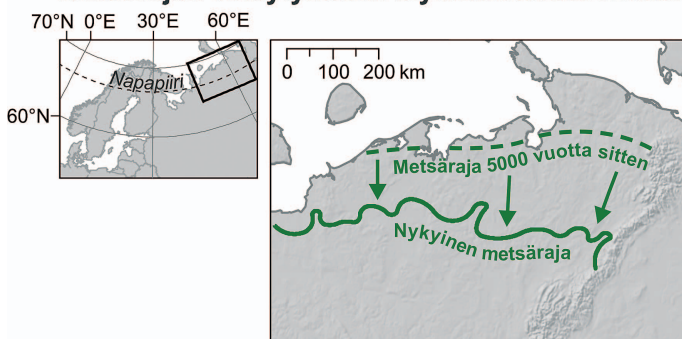


Figure 5. Top: Reconstructed summer temperatures during the past 12,000 years based on fossil pollen preserved in lake sediments. The reconstruction is based on radiocarbon-dated sediment sequences from three lakes in the northern Urals region. Bottom: Estimated location of the arctic treeline 5000 years ago (dashed line), compared with the current location of the treeline (solid line). Simplified from Salonen (2012).

kauden aikana taigametsän pohjoisraja näyttää omien tutkimustemme ja muiden tutkijoiden Pohjois-Venäjältä saamien tulosten perusteella siirtyneen noin 150 km nykyistä pohjoisemmaksi (kuva 5; Salonen *et al.* 2011, Salonen 2012). Samoin fossiiliaineistojen perusteella ikiroudan esiintymisalue näyttää olleen merkittävästi nykyistä suppeampi holoseenin lämpökaudella (Oksanen *et al.* 2001, Oksanen 2005). Viimeisten 3000 vuoden aikana kesälämpötila on hiljalleen laskenut nykytasolle. Samalla metsäraja on vetäytynyt etelään nykyiseen asemaansa pohjoisen tundra-alueen ja ikiroudan laajentuessa (Salonen *et al.* 2011, Salonen 2012).

Mitä fossiilit kertovat tulevaisuudestamme?

Tutkimusalueellamme havaittu vähittäinen kesälämpötilojen lasku näyttää muiden tutkimusten perusteella tapahtuneen myös maapallon muilla pohjoisilla alueilla viimeisten vuosituhansien aikana (Wanner *et al.* 2008, Kaufman *et al.* 2009, Miller *et al.* 2010). Pääasiallinen syy tähän viilenemiseen on erittäin todennäköisesti ollut maapallon radan vähittäinen muuttuminen siten, että pohjoiset alueet vastaanottavat kesällä vähemmän auringon lämpösäteilyä kuin aikaisemmin holoseenin aikana. Tämä hitaan, vuosituhansien aikana tapahtuneen viilenemisen lisäksi paleoilmatossa tiedetään tapahtuneen myös nopeampia, vuosikymmenien ja vuosisatojen aikana tapahtuneita heilahduksia. Kansainvälinen ilmastomuutospaneeli IPCC on kuitenkin vuoden 2007 raportissaan tullut siihen lopputulokseen, ettei viimeisten vuosituhansien ilmastokehityksessä voida nähdä mitään sellaista säännöllistä syklistä, joka selittäisi viime vuosikymmeninä havaitun lämpenemiskehityksen luonnollisella tavalla (IPCC 2007a; ks. myös Kaufman *et al.* 2009). Näin ollen paleoilmattoja kuvaava tutkimusaineisto näyttää tukevan

vallitsevaa hypoteesiä, jonka mukaan havaittu ilmaston lämpeneminen on seurausta ihmisen teollisesta toiminnasta.

Tuloksemme Usajoen alueelta osoittavat, miten herkästi metsäraja voi reagoida lämpötilan muutoksiin. Kuten yllä todettiin, keskiholoseenissa noin 3000–7000 vuotta sitten kesälämpötilan ollessa noin 2,5 °C nykyistä korkeammalla oli taigametsä laajentunut noin 150 km nykyistä pohjoisemmaksi. IPCC:n ilmastomalleihin perustuvien ennusteiden mukaan tutkimusalueemme kesälämpötilat tulevat nousemaan noin 2,5–3 °C aikavälille 2080–2099 mennessä käytettäessä keskilinjan arviota kasvihuonekaasupitoisuuksien kehitykselle (A1B-emissioskenaario; IPCC 2007b). Siten ilmaston lämpeneminen palauttaisi kesälämpötilat samalle tasolle, jolla ne olivat keskiholoseenin lämpökaudella 3000–7000 vuotta sitten.

Koska fossiilitutkimuksiemme perusteella ennustetun suuruiseen lämpötilan nousuun voi liittyä hyvin suuria metsärajan ja ikiroudan muutoksia, näyttää mahdolliselta, että ilmaston lämpeneminen tulee aiheuttamaan merkittävää ikiroudan hupenemista ja metsien laajenemista Pohjois-Euraasiassa. Tämä on erityisen huolestuttavaa sen takia, että sekä metsien laajeneminen tundralle että ikiroudan sulaminen toimivat niin sanottuina *positiivisina palautekytkentöinä*. Metsien laajeneminen tai ikiroudan sulaminen voi toisin sanoen itessään aiheuttaa etenevää lämpenemistä ja siten voimistaa jo tapahtunutta lämpenemistä. Metsien laajenemisen lämmittävä vaikutus on seurausta niiden pienemmästä heijastavuudesta verrattuna tundrakasvillisuuteen, minkä vuoksi metsät sitovat enemmän auringon lämpösäteilyä (Foley *et al.* 2003). Ikiroudan sulaminen puolestaan aiheuttaa metaanin – hiili-dioksidiakin voimakkaamman kasvihuonekaasun – vapautumista maaperästä ilmakehään (Zimov *et al.* 2006).

Toisaalta paleoilmastoaineistojen ja IPCC:n ilmastomallien vertailu osoittaa, että tulevaisuuden ilmasto pohjoisilla alueilla voi olla joiltain osin erilainen verrattuna mihinkään aikaisempiin ilmastoihin (Salonen 2012). IPCC:n mallien mukaan arktisilla alueilla talvet tulevat lämpenemään noin kolme kertaa enemmän kesiin verrattuna. Näin pohjoisten alueiden ilmaston vuodenaikaisuus vähenisi merkittävästi. Paleoilmastotutkimukset viittaavat puolestaan siihen, että nykyiset kesän ja talven lämpötilaerot pohjoisilla alueilla ovat jo verraten pieniä, mitä tulee vuodenaikaisuuden luontaiseen vaihteluun satojentuhansien vuosien aikavälillä. Viimeisten 10 000 vuoden aikana ilmaston vuodenaikaisuus näyttää tasaisesti pienentyneen. Jos vuodenaikojen väliset erot edelleen merkittävästi pienenevät ihmisen aiheuttaman ilmastomuutoksen seurauksena, on mahdollista, että tuloksena on ilmastotyyppi, jolle ei löydy läheistä vastinetta sen paremmin nykyisyydestä kuin viimeisten satojentuhansien vuosien geologisesta historiasta. Koska tällaiselle ilmastokehitykselle ja sen seurauksille ei löydy mennyttä vertailukohtaa, on sen erilaisten ympäristövaikutusten ennustaminen erityisen vaikeaa.

Summary

Fossils record the development of climate

Geoscientists and biologists from two Finnish universities have undertaken studies in 1999–2010 in the north-eastern part of European Russia, aiming to unravel the past changes in the climate and environment in the region. These studies have examined the variability of climate, vegetation, and permafrost in the northern Russian tundra zone over the past ca. 10,000 years, based on studying fossil pollen grains and macroscopic plant remains preserved in lake sediments and peat deposits. These research

efforts, funded within two European Union projects, constitute a part of an international field of *palaeoclimate* research that studies the natural variability of Earth's climate over geological timescales.

The fossil record of the tundra zone of northeast European Russia suggests that major climatological and environmental dynamics have taken place during the past millennia. During the so-called *Holocene thermal maximum* (HTM), 3000–7000 years ago, summer temperatures were ca. 2.5°C above the present-day level. During this warm period the northern taiga forest had advanced by ca. 150 km into the modern tundra zone, while the extent of permafrost was significantly smaller than today. The HTM was followed by a period of cooling over the past 3000 years, during which the treeline retreated to its current position and permafrost expansion took place. These results demonstrate the overall sensitivity of the Arctic tundra environment to climatic change, as the fossil record of past environmental change shows how relatively modest temperature changes can cause major shifts in vegetation and permafrost zones.

Lähteet

- Birks, H.J.B., Heiri, O., Seppä, H. ja Bjune, A.E. 2010. Strengths and Weaknesses of Quantitative Climate Reconstructions based on Late-Quaternary Biological Proxies. *The Open Ecology Journal* 3:68–110.
- Bradley, R.S. 1999. *Paleoclimatology*. Academic Press, San Diego, 613 s.
- Bradley, R.S. 2003. Climate forcing during the Holocene. Teoksessa: Mackay, A., Battarbee, R., Birks, J. ja Oldfield, F. (toim.). *Global Change in the Holocene*. Arnold, Lontoo, 107–123.
- Foley, J.A., Heil Costa, M., Delire, C., Ramankutty, N. ja Snyder, P. 2003. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:38–44.
- IPCC (Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. ja Zhang, D.). 2007a. *Palaeoclimate*. Teoksessa: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. ja Miller, H.L. (toim.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cam-

- bridge University Press, Cambridge, 433–497.
- IPCC (Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D., Friedlingstein, P., Gaye, A.T., Gregory, J.M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J.M., Noda, A., Raper, S.C.B., Watterson, I.G., Weaver, A.J. ja Zhao, Z.-C.). 2007b. Global climate projections. Teoksessa: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Avery, K.B., Tignor, M. ja Miller, H.L. (toim.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 747–845.
- Kaufman, D.S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., Miller, G.H., Otto-Bliesner, P.L., Overpeck, J.T. ja Arctic Lakes 2k Project Members. 2009. Recent warming reverses long-term arctic cooling. *Science* 325:1236–1239.
- Kultti, S., Välranta, M., Sarmaja-Korjonen, K., Solovieva, N., Virtanen, T., Kauppi, T. ja Eronen, M. 2003. Palaeoecological evidence of changes in vegetation and climate during the Holocene in the pre-Polar Urals, northeast European Russia. *Journal of Quaternary Science* 18:503–520.
- Kultti, S., Oksanen, P. ja Välranta, M. 2004. Holocene tree line, permafrost, and climate dynamics in the Nenets Region, East European Arctic. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41:1141–1158.
- Mazhitova, G. ja Oberman, N. 2003. Permafrost of the Usa River Basin. Digital Media. National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology. Boulder, Colorado. http://nsidc.org/data/docs/fgdc/ggd614_map_usariver/ [12. maaliskuuta 2009]
- Miller, G.H., Brigham-Grette, J., Alley, R.B., Anderson, L., Bauch, H.A., Douglas, M.S.V., Edwards, M.E., Elias, S.A., Finney, B.P., Fitzpatrick, J.J., Funder, S.V., Herbert, T.D., Hinzman, L.D., Kaufman, D.S., MacDonald, G.M., Polyak, L., Robock, A., Serreze, M.C., Smol, J.P., Spielhagen, R., White, J.W.C., Wolfe, A.P. ja Wolff, E.W. 2010. Temperature and precipitation history of the Arctic. *Quaternary Science Reviews* 29:1679–1715.
- Oksanen, P.O. 2005. Development of palsa mires on the northern European continent in relation to Holocene climatic and environmental changes. *Väitöskirja. Acta Universitatis Ouluensis A* 446, 251 s.
- Oksanen, P.O., Kuhry, P. ja Alekseeva, R.N. 2001. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, European Russian Arctic. *The Holocene* 11:25–40.
- Olson, D.M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E.D., Burgess, N.D., Powell, G.V.N., Underwood, E.C., D'Amico, J.A., Itoua, I., Strand, H.E., Morrison, J.C., Loucks, C.J., Allnutt, T.F., Ricketts, T.H., Kura, Y., Lamoreux, J.F., Wettengel, W.W., Hedao, P. ja Kassem, K.R. 2001. Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience* 51:933–938.
- Salonen, J.S. 2012. Quantitative climate reconstructions based on fossil pollen: novel approaches to calibration, validation, and spatial data analysis. *Väitöskirja. Department of Geosciences and Geography A* 17, 102 s.
- Salonen, J.S., Seppä, H., Jones, V.J., Self, A., Välranta, M., Heikkilä, M., Kultti, S. ja Yang, H. 2011. The Holocene thermal maximum and late-Holocene cooling in the tundra of NE European Russia. *Quaternary Research* 75:501–511.
- Salonen, J.S., Ilvonen, L., Seppä, H., Holmström, L., Telford, R.J., Gaidamavicius, A., Stancikaite, M. ja Subetto, D. 2012. Comparing different calibration methods (WA/WA-PLS regression and Bayesian modelling) and different-sized calibration sets in pollen-based quantitative climate reconstruction. *The Holocene* 22:413–424.
- Välranta, M., Kultti, S. ja Seppä, H. 2006. Vegetation dynamics during the Younger Dryas–Holocene transition in the extreme northern taiga zone, northeastern European Russia. *Boreas* 35:202–212.
- Välranta, M., Kaakinen, A., Kuhry, P., Kultti, S., Salonen, J.S. ja Seppä, H. 2011. Scattered late-glacial and early-Holocene tree populations as dispersal nuclei for forest development in NE European Russia. *Journal of Biogeography* 38:922–932.
- Wanner, H., Beer, J., Butikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Kuttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. ja Widmann, M. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews* 27:1791–1828.
- Zimov, S.A., Schuur, E.A.G. ja Chapin III, F.S. 2006. Permafrost and the Global Carbon Budget. *Science* 312:1612–1613.

J. SAKARI SALONEN

Geotieteiden ja maantieteen laitos

Helsingin yliopisto

sakari.salonen@helsinki.fi