

Musta hiili arktisen alueen lämmittäjänä

– GEOLOGINEN NÄKÖKULMA
ajankohtaiseen ympäristöongelmaan

MERI M. RUPPEL

Arktisen alueen ilmastonmuutos ja musta hiili

Lämpötilamittaukset ja ilmasto-
mallit osoittavat yksimielisesti
arktisen alueen olevan erityisen
herkkä ihmisen aiheuttamalle il-
maston lämpenemiselle. Viimeis-
ten vuosikymmenten aikana arktinen alue on
lämmennyt noin kaksi kertaa nopeammin ja
voimakkaammin kuin maapallo keskimäärin.
Tämän niin kutsutun ”arktisen vahvistumi-
sen” oletetaan liittyvän ainakin osittain arkti-
sen alueen heijastuskyvyn heikkenemiseen.
Arktinen alue on avainasemassa maapallon il-
mastojärjestelmässä sen viilentäessä maapalloa
heijastamalla auringonsäteilyä vaaleilta pin-
noiltaan suoraan takaisin avaruuteen. Kun arkti-
nen alue lämpenee maailmanlaajuisen ilmas-
ton lämpenemisen seurauksesta, sen jää ja lu-
mipeite kutistuvat ja tummia auringonsätei-
lyä lämmöksi muuttavia maa- ja meripintoja
paljastuu entistä enemmän. Tämä laskee arkti-
sen alueen heijastuskykyä, mistä alkaa itse-
ään ruokkiva palautekytkentä (lumi-albedo-

palautekytkentä), jossa lisääntynyt lämmön
sitoutuminen kiihdyttää lumi- ja jääpeitteen
vetäytymistä. Lopputuloksena arktisen alueen
– ja sitä kautta koko maapallon – lämpenemi-
nen kiihtyy entisestään.

Kasvavien kasvihuonekaasupitoisuuksien
ajaman lumi-albedo-palautekytkennän lisäksi
myös muut luonnolliset ja ihmisperäiset pääs-
töt voivat häiritä arktisen alueen säteilytasetta
ja myötävaikuttaa alueen lämpenemiseen.
Musta hiili, kansanomaisemmin noki, on pi-
enhiukkanen, jolla on värinsä ja pintaomai-
suuksiensa ansiosta voimakas ilmastoa lämmit-
tävä vaikutus. Sitä syntyy kaikessa epätäydel-
lisessä poltossa, esimerkiksi metsä- ja ruohik-
kopaloissa sekä teollisessa tuotannossa ja lii-
kenteessä. Musta hiili säilyy ilmakehässä muu-
tamasta päivästä viikkoihin, minkä aikana se
voi kulkeutua tuhansia kilometrejä päästöläh-
teiltään. Ollessaan ilmakehässä musta hiili läm-
mittää sitä voimakkaasti ja vaikuttaa mm. pil-
vien muodostumisprosesseihin. Maailmanlaa-

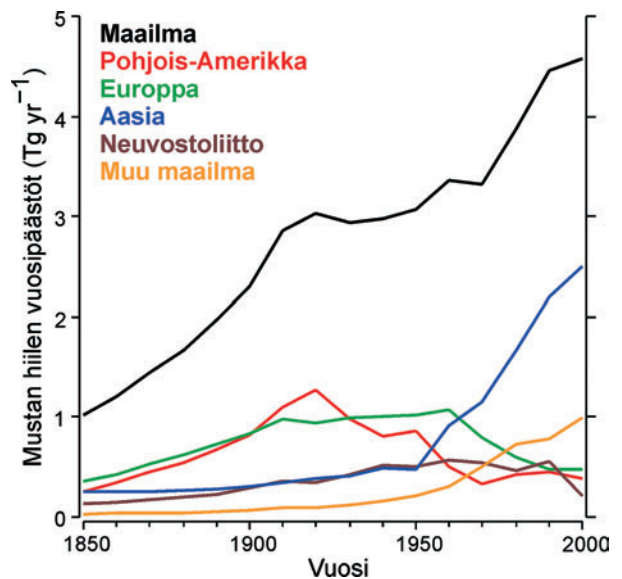
juisesti mustaa hiiltä pidetään toiseksi tärkeimpänä ilmastoa lämmittävänä tekijänä hiilidioksidin jälkeen, eli jopa tärkeämpänä kuin metaania (esim. AMAP 2011, Bond *et al.* 2013). Mustan hiilen ilmastovaikutukset vahvistuvat kuitenkin arktisella alueella, missä sen laskeuma vaaleille lumi- ja jääpinnoille laskee näiden heijastamiskykyä ja kiihdyttää niiden sulamista. Arktisilla alueilla mustan hiilen käynnistämä ja kiihdyttämä lumi-albedo-palauttekytkentä on niin voimakas, että mustan hiilen arvioidaan jopa olevan tärkeämpi arktisen lumi- ja jääpeitteen hupenemiselle kuin kasvihuonekaasujen (esim. Bond *et al.* 2013).

Mustan hiilen tutkimukset arktisella alueella

”Nokiongelman” havahduttiin terveydellisenä haittana esimerkiksi Lontoossa jo aikaisin teollistumisen aikana, mutta mustan hiilen tutkimus ilmastoa lämmittävänä tekijänä on alkanut toden teolla vasta 2000-luvulla. Mustan hiilen ilmakehäpitoisuutta seurataan lukuisissa kohteissa ympäri maailmaa, ja arktisellakin alueella sitä on monitoroitu systemaattisesti kolmessa eri kohteessa (Alert, Pohjois-Kanada; Barrow, Alaska ja Ny-Ålesund, Huippuvuoret, Norja) noin vuodesta 1989 alkaen. Ilmakehämittausten lisäksi on ryhdytty tutkimaan ja seuraamaan myös mustan hiilen pitoisuuksia lumessa. Tutkimukset mustan hiilen pitoisuuksista lumessa eri puolilla arktista aluetta kasvavat nopeasti (esim. Doherty *et al.* 2013), mutta lumimittaukset antavat ajallisesti ja alueellisesti hyvin rajallisen tilannekuvan mustan hiilen pitoisuuksista. Jotta mustan hiilen merkitystä menneissä, nykyisessä ja tulevissa arktisen alueen ilmaston muutoksissa voidaan arvioida kokonaisvaltaisesti, tarvitaan tietoa mustan hiilen pitoisuuksista ja sen vaihteluista myös ajalta ennen

suoria havaintoaineistoja. Tällaista aineistoa pitkiltä ajanjaksoilta menneisyydestä saadaan hyödyntämällä ns. ympäristöarkistoja, kuten jäätikköjäättä, meri- ja järvisedimenttejä sekä suokerrostumia. Nämä arkistot sisältävät suoria todisteita ilmakehästä laskeutuneesta materiaalista, joka kerrostuu yhtenäisesti ja kronologisessa järjestyksessä. Siitä huolimatta, että mustalla hiilellä on tärkeä rooli arktisen alueen lämpenemisessä, tutkimustieto sen laskeuman menneestä vaihtelusta arktisella alueella on vielä hyvin vähäistä.

Koska mustaa hiiltä syntyy epätäydellisessä poltossa, sen päästö määrät eivät ole pelkästään riippuvaisia polttoaineiden käytön määrästä, vaan myös käytetystä polttomenetelmästä ja sen tehokkuudesta. Kuva 1 esittää arvion ihmisperäisen mustan hiilen päästöistä vuodesta 1850 nykypäivään eri alueilla. Maailmanlaajuisesti mustan hiilen päästöt ovat jatkuvasti kasvaneet, mutta vielä 1900-luvun alulla Poh-



Kuva 1. Ihmisperäiset vuosittaiset mustan hiilen päästöt alueittain 1850–2010. Aineisto: Bond *et al.* 2007.

Figure 1. Annual anthropogenic black carbon emissions by region. Data: Bond *et al.* 2007.

jois-Amerikan ja Euroopan päästöt olivat suurimpia, kun taas mm. Kiinan ja Intian (sekä muiden kehittyvien maiden) päästöt ovat kasvaneet voimakkaasti noin 1950 lähtien samalla kun länsimaiden päästöt ovat vähentyneet.

Kuvan 1 osoittama mustan hiilen päästöjen vähentyminen Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa on yhteneväistä arktisten ilmähämmitäusten kanssa, joiden mukaan mustan hiilen ilmähämmitämisuudet ovat laskeneet arktisella alueella 40 prosenttia vuosien 1990 ja 2009 välillä (Sharma *et al.* 2013). Grönlannista kairatut jäätikkösarjat (4 kpl) osoittavat nekin mustan hiilen pitoisuuksien olleen huippusaan n. 1910, minkä jälkeen ne laskivat nopeasti 1950 asti, ja loivemmin sen jälkeen jopa esiteolliselle tasolle (McConnell 2010, Keegan *et al.* 2014; esim. kuva 2A). Näiden tulosten mukaan mustaa hiiltä ei näyttäisi kaukokulkeutuvan arktiselle alueelle esimerkiksi Kiinasta tai Intiasta. Grönlannin jääkaira-aineistoja julkaisseet tutkijat kuitenkin muistuttavat, että Grönlannin musta-hiili-aineistot kuvastavat lähinnä Pohjois-Amerikasta saapunutta laskeumaa, ja vieläpä vain näille korkeille alueille, n. 2.5–3 km korkeudelle merenpinnasta (McConnell *et al.* 2007). Muu osa arktista aluetta sijaitsee kuitenkin huomattavasti matalammalla ja vastaanottaa ilmähämmitäkeumaa lähinnä Euraasiasta. Näin ollen Grönlannin tuloksia mustan hiilen laskeuman ajallisesta trendistä ei voida yleistää koko arktiselle alueelle. Ilmähämmitäuspisteet kattavat alueellisesti paremmin arktisen alueen, mutta ilmähämmitäyksetkaan eivät yksin valota kaikkea mustan hiilen pitoisuuksien vaihtelua alueella. Noin 85–90 prosenttia mustasta hiilestä nimittäin poistuu arktisella alueella ilmähämmitästä märkälaskeumana (sadannan mukana), mikä tarkoittaa, ettei tuota osuutta saada määritettyä ilmähämmitäyksillä. Kuitenkin juuri mustan hiilen laskeuma vaaleille lumija jääpinnoille aiheuttaa sen vahvistuneen il-

mastovaikutuksen arktisilla alueilla. Lisätutkimukset mustan hiilen laskeuman trendeistä arktisella alueella ovat siis hyvin perusteltuja.

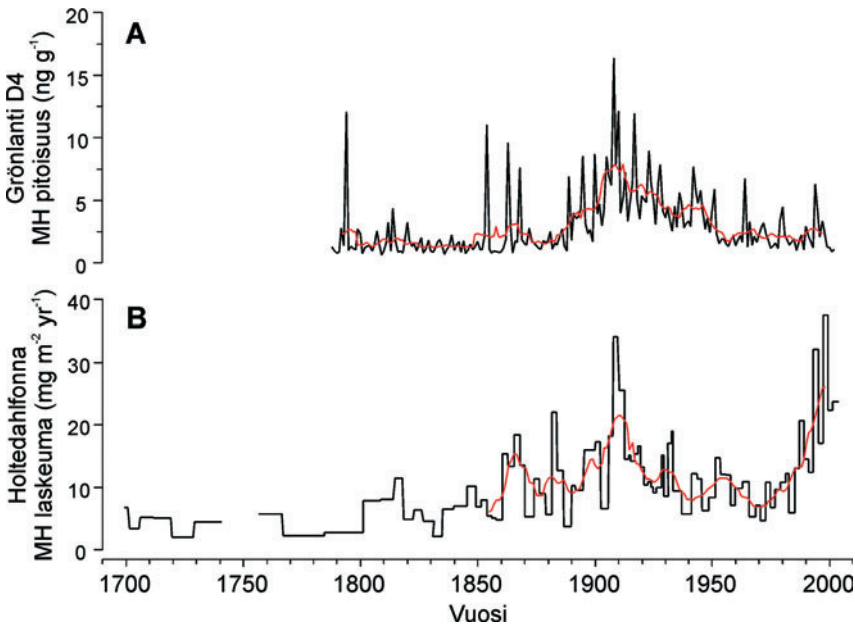
Uusia tuulia Huippuvuorilta ja Pohjois-Suomesta

Hiljattain julkaistiin ensimmäinen musta hiili -aineisto Huippuvuorilta Høltedahlfontnajaätiköltä kairatusta jääsarjasta (Ruppel *et al.* 2014). Sen tulokset sopivat hyvin yhteen Grönlannin aineistojen kanssa esiteollisesta ajasta noin vuoteen 1950 saakka erityisesti sitä osin, että korkeimpien laskeumien ajoittuvan noin vuoteen 1910 (Kuva 2B). Huippuvuorten aineistossa tapahtuu kuitenkin odottamaton käänne mustan hiilen pitoisuuksien ja laskeumien kääntyessä nousuun noin vuodesta 1970 lähtien sarjan loppuun eli vuoteen 2004 asti. Paikalliset lähteet tälle viime vuosikymmenten kehitykselle voitiin sulkea pois tutkimuksessa, ja nousevan trendin oletetaan selittyvän Pohjois-Venäjällä, Uralin ympäristössä, tapahtuvalla jatkuvasti lisääntyvällä maa-kaasun soihdutuksella. Tämän öljyn ja maa-kaasun porauksen yhteydessä tapahtuvan ylijäämäkaasun polton oletetaan olevan aiemmin aliarvioitu mutta huomattava mustan hiilen lähde arktisella alueella (Stohl *et al.* 2013). Soihdutus päästöjen arvioidaan kattavan peräti 42 prosenttia arktisen alueen vuosittaisesta mustan hiilen ilmähämmitämisuudesta. Soihdutus päästöt eivät kuitenkaan kulkeudu juurikaan Grönlannin mannerjäätikön laelle, sillä soihdutus tapahtuu lähellä Jäämeren rannikkoa, eivätkä päästöt ehdi niin lyhyellä etäisyydellä nousta ilmähämmitämisuudesta riittävän korkealle saavuttaakseen Grönlannin jääkairauspisteitä. Matalammalla sijaitsevilla Huippuvuorten jäätiköillä nämä päästöt voivat kuitenkin ilmetä selvemmin. On mahdollista, että kasvavat soihdutus päästöt eivät puolestaan näy ilmähämmitäyksissä, koska ilmaston lämmitessä – kuten arktisella alueella on mitattu tapahtu-

neen yhtäjaksoisesti 1970-luvulta lähtien – musta hiili sitoutuu entistä tehokkaammin sadantaan, jolloin sitä ei havaita ilmakehämitauksissa. Olipa syy Høltedahlfonnan jääkairasarjan mustan hiilen vaihteluille mikä tahansa, mitatulla laskeuman trendillä on ollut merkittävä vaikutus alueen säteilytaseeseen.

Høltedahlfonnan jääkairasarja ei kuitenkaan ole ainoa aineisto, joka osoittaa mustan hiilen laskeumien kasvaneen viimeisinä vuosikymmeninä. Myös kahdessa Suomen Lapista kairatussa järvisedimenttisarjassa, yksi Sallan Värriöstä ja toinen Inarista, näkyy hyvin

samankaltainen ja selkeä noin vuonna 1970 alkava ja nykypäivään kestävä mustan hiilen nousutrendi kuin Høltedahlfonnalla. Kuitenkin kaksi muuta järvisedimenttisarjaa Kilpisjärveltä ja Utsjoelta viittaavat mustan hiilen laskeuman laskeneen 1960-luvulta nykypäivään, mikä sopii hyvin yhteen kuvassa 1 esitettyihin laskeviin mustan hiilen päästöihin Euroopassa (Ruppel 2015). Siten näiden osittain ristiriitaisten Lapin järvisedimenttisarjojen perusteella on vaikeampi arvioida, kuinka laajalla alueella mustan hiilen päästöt ovat mahdollisesti nousseet tai laskeneet. Lisätutkimuk-



Kuva 2. Mustan hiilen (MH) pitoisuudet Grönlannin D4 jääkairasarjassa ja laskeuma Huippuvuorten Høltedahlfonna jäätiköllä viimeisten vuosisatojen aikana. A) Mustan hiilen pitoisuus (ng g^{-1}) Grönlannin D4 jääkaira-aineistossa (McConnell *et al.* 2007). Tämä pitoisuusaineisto tiivistää hyvin Grönlannin muidenkin jääkaira-aineistojen osoittaman mustan hiilen laskeuman trendin (ks. McConnell 2010). B) Mustan hiilen laskeuma milligrammoina neliömetrille vuodessa ($\text{mg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) Huippuvuorten Høltedahlfonna jäätiköllä (Ruppel *et al.* 2014). Molemmissa kuvissa musta viiva kuvaa vuosittaista pitoisuutta tai laskeumaa ja punainen 10 vuoden liukuvaa keskiarvoa.

*Figure 2. Black carbon (BC) concentrations in the Greenland D4 and deposition in the Svalbard (Høltedahlfonna) ice core during the last 300 years. A) BC concentration (ng g^{-1}) in the Greenland D4 ice core (McConnell *et al.* 2007). This concentration record synthesizes and reflects well the general BC deposition trend observed also in other Greenland ice cores (cf. McConnell 2010). B) BC deposition ($\text{mg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$) in the Høltedahlfonna glacier (Svalbard) (Ruppel *et al.* 2014). In both figures the black line presents the annual concentration or deposition while the red line presents the 10-year running average.*

sia tarvitaan paljon näitä tutkimuksia kattavammalta alueelta. Joka tapauksessa nämä uudet tulokset antavat viitteitä siitä, että mustan hiilen laskeumat ovat voineet olla merkittävässä roolissa arktisen alueen lumen ja jään kutistumisessa viimeisten vuosikymmenten aikana, eikä mustan hiilen roolia ainakaan tule sivuuttaa, kuten pelkkiin ilmakehämittauksiin ja Grönlannin jääkaira-aineistoihin vedoten oltaisiin saatettu tehdä. Lisäksi tulokset viittaavat siihen, että arktisen alueen sisällä on merkittäviä mustan hiilen lähteitä. Tämä on erityisen huolestuttavaa, sillä arktisen alueen sisäisillä mustan hiilen päästöillä on viisi kertaa voimakkaampi ilmastoa lämmittävä vaikutus kuin samansuuruisilla päästöillä etelämpä-

nä, koska arktisen alueen sisäiset päästöt laskeutuvat suuremmalla todennäköisyydellä arktiselle alueelle (Sand *et al.* 2013).

Musta hiili maailmalla ja ilmastoneuvotteluissa

Holtedahlfonnan jääkaira-aineisto osoittaa myös selvästi, että viime vuosikymmeninä lisääntynyt jäätikön jokakesäisen osittainen sulamisen selittyy paremmin lämpötilavaihtelulla yhdessä mustan hiilen vaihteluiden kanssa kuin pelkän lämpötilamuutoksen avulla. Musta hiili onkin yhdistetty jäätiköiden kiihtyneeseen vetäytymiseen myös esimerkiksi Himalajalla ja Euroopan Alpeilla. Euroopan Alpeilla on peräti esitetty ns. pienen jääkauden loppu-



Kuva 3. Prof. Jason Boxin työryhmän leiri teltoineen Grönlannin mannerjäätikön reuna-alueella kesällä 2014. Kuvan oikeassa laidassa näkyy mustan hiilen ja muiden epäpuhtauksien tummentamaa lunta ja jäätä; keskeemmällä sulavesivirta. (Kuva: NASA Earth Observatory)

Figure 3. Field camp of prof. Jason Box and his research team on the edge of the Greenland ice sheet in summer 2014. Black carbon and other impurity-rich snow and ice is visible on the right-hand side of the image, while melt streams run through the middle. (Image: NASA Earth Observatory)

neen ennenaikaisesti ja jäätiköiden alkaneen vetäytyä jo 1850 lähtien kun mustan hiilen laskeumat kasvoivat teollistumisen edetessä, vaikka lämpötila- ja sadanta-aineistojen perusteella jäätiköiden olisi täytynyt kasvaa 1910-luvulle saakka (Painter *et al.* 2014). Myös luonnollisista (toki ilmastonmuutoksen takia lisääntyneistä tai voimistuneista) metsäpaloista voi aiheutua hyvin merkittävää mustan hiilen laskeumaa. Professori Jason Box työryhmineen on havainnoinut useampana vuotena valtavia silminnähtäviä mustuneita alueita Grönlannin mannerjäätiköllä, mikä on mallinnuksin yhdistetty poikkeuksellisen voimakkaisiin Kanadan metsäpaloihin (ks. esim. www.darksnow.org; kuva 3). Kun jäätiköt sulavat ja vetäytyvät paljastuu alemmista lumi- ja jääkerroksista yhä enemmän mustaa hiiltä ja pinta tummuu entisestään, sillä musta hiili on vesipainoisista ja jää sulavan jään ja lumen pinnalle.

Sen lisäksi, että mustan hiilen laskeuma kiihdyttää Himalajan jäätiköiden vetäytymistä, musta hiili on Aasiassa erittäin merkittävä terveysongelma. Musta hiili lukeutuu kaikista pienijakoisimpiin pienhiukkasiin, mikä tarkoittaa, että se pääsee kulkeutumaan syvälle hengitystiehyeyksiin ja peräti verenkiertoon. Ongelmaa pahentaa se, että musta hiili toimii ilmakehässä aktiivihiihen tavoin imien pintansa raskasmetalleja ja muita myrkyllisiä aineita ja kuljettaa niitä mukanaan elimistöön. Mustan hiilen arvioidaan aiheuttavan vuosittain miljoonia ennenaikaisia kuolemia Aasiassa (WHO 2013).

On ilmiselvää, että mustan hiilen päästöjä vähentämällä voitaisiin hidastaa maailmanlaajuisia ilmastonmuutosta. Mustan hiilen tapauksessa päästövähennysten vaikutukset näkyisivät myös heti, koska musta hiili säilyy vain suhteellisen lyhyen aikaa ilmakehässä, toisin kuin esimerkiksi hiilidioksidi tai metaani. Kovimpien arvioiden mukaan ilmastonmuutosta voitaisiin hillitä 30 prosentilla tai hidastaa

10–20 vuodella mustan hiilen päästöjen radikaalilla leikkaamisella, mikä antaisi lisääntymään ilmastonmuutoksen kokonaisvaltaisemmalle ratkaisemiselle. Mustan hiilen päästörajoitukset voivat myös toivotulla tavalla yhdistää länsimaiden pyrkimykset hidastaa ilmastonmuutosta Aasian maiden tavoitteisiin parantaa ilmanlaatuaan.

MERI M. RUPPEL

Ympäristömuutoksen tutkimusyksikkö
(ECRU)

Ympäristötieteiden laitos
PL 65

00014 Helsingin yliopisto
meri.ruppel@helsinki.fi

Summary

The Arctic amplification, i.e. the Arctic warming at twice the rate of the rest of the world, is estimated to be at least partly caused by changes in the surface reflectivity of the Arctic region. Black carbon (BC) is a fine particle produced by incomplete combustion of biomass and fossil fuels. It has strong climate warming efficiency in the atmosphere and is estimated to be globally the second most important climate warming agent after carbon dioxide. The climatic effects of BC are amplified in the Arctic where its deposition on high-reflectivity snow and ice decreases their albedo and hastens their melt.

To comprehensively assess the role of BC in the past, present and future climate change in the Arctic information is required on its past deposition, including on long timescales beyond direct observational data. Such information can be provided by natural archives such as ice cores and marine and lake sediments. Greenland ice cores suggest that BC values peaked in the early 20th century and declined to preindustrial values since then. However, the high-elevation Greenland ice

core sites receive atmospheric transport mainly from North America, and cannot be seen as representative for the rest of the low-lying Arctic, much of which receives atmospheric transport mainly from Eurasia.

An ice core record from Holtedahlfonna glacier on Svalbard shows a similar trend in BC deposition between 1800 and ca. 1950 as the Greenland records. However, the Svalbard ice-core record shows increasing BC values from 1970 to 2004, in contrast with the Greenland records. This discrepancy is likely explained by within-Arctic flaring emissions from northern Russian oil and gas extraction not reaching the Greenland ice coring sites but affecting Svalbard. Such increasing BC deposition during the last few decades is also observed in two northern Finland lake sediment records while two other lake sediment records from the same region show decreasing BC values during the same time period. These partly conflicting results highlight that further data is needed to assess the general trend over wider areas of the Arctic. However, the data also underlines that the role of BC in the climate warming and particularly increased melting in the Arctic during the last few decades may have been substantial.

Kirjallisuus

- AMAP, 2011. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate (2011). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norja, 72 s.
- Bond, T.C., Bhardwaj, E., Dong, R., Joghani, R., Jung, S., Roden, C., *et al.*, 2007. Historical emissions of black carbon and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000. *Global Biogeochemical Cycles* 21:GB2018.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D. W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., *et al.*, 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118:5380–5552.
- Doherty, S.J., Grenfell, T.C., Forsström, S., Hegg, D.L., Brandt, R.E. ja Warren, S.G., 2013. Observed vertical redistribution of black carbon and other insoluble light-absorbing particles in melting snow. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118:1–17.
- Keegan, K.M., Albert, M.R., McConnell, J.R. ja Baker, I., 2014. Climate change and forest fires synergistically drive widespread melt events of the Greenland Ice Sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111:7964–7967.
- McConnell, J.R., 2010. New Directions: Historical black carbon and other ice core aerosol records in the Arctic for GCM evaluation. *Atmospheric Environment* 44:2665–2666.
- McConnell, J.R., Edwards, R., Kok, G.L., Flanner, M.G., Zender, C.S., Saltzman, E.S., *et al.*, 2007. 20th century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing. *Science* 317:1381–1384.
- Painter, T.H., Flanner, M.G., Kaser, G., Marzeion, B., VanCuren, R.A. ja Abdalati, W., 2013. End of the Little Ice Age in the Alps forced by industrial black carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110:15216–15221.
- Ruppel, M.M., 2015. Black carbon deposition in the European Arctic from the preindustrial to the present. *Dissertationes Scholae doctoralis scientiae circumiectalis, alimentariae, biologicae / Universitatis Helsinkiensis*, 11/2015, 142 s.
- Ruppel, M.M., Isaksson, E., Ström, J., Beaudon, E., Svensson, J., Pedersen, C.A., *et al.*, 2014. Increase in elemental carbon values between 1970 and 2004 observed in a 300-year ice core from Holtedahlfonna (Svalbard). *Atmospheric Chemistry and Physics* 14:11447–11460.
- Sand, M., Berntsen, T.K., Seland, Ø. ja Kristjánsson, J.E., 2013. Arctic surface temperature change to emissions of black carbon within Arctic or mid-latitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118:1–11.
- Sharma, S., Ishizawa, M., Chan, D., Lavoué, D., Andrews, E., Eleftheriadis, K., *et al.*, 2013. 16-year simulation of Arctic black carbon: Transport, source contribution, and sensitivity analysis on deposition. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118:943–964.
- Stohl, A., Klimont, Z., Eckhardt, S., Kupiainen, K., Shevchenko, V.P. ja Kopeikin, V.M., 2013. Black carbon in the Arctic: the underestimated role of gas flaring and residential combustion emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13:8833–8855.
- WHO, 2013. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project, Technical Report. World Health Organization Regional Office for Europe, Kööpenhamina, Tanska, 309 s.