

Samsætumælingar¹

Trausti Jónsson 21. október 2010

Túlkun ¹⁸O/¹⁶O, H/D/T og ¹³C/¹²C samsætumælinga

Hér er ekki fjallað um fræðilegan grunn mælinga á samsætuhlutföllum frumefna. Greint er á milli *geislavirkra* og *stöðugra* samsætna. Hlutföll *geislavirkra* samsætna eru notuð til aldurs- og í sumum tilvikum upprunagreininga, en hlutföll *stöðugra* samsætna eru notuð til greininga á veðurfari og umhverfisþáttum fortíðar auk upprunagreininga. Í sumum tilvikum er hægt að nota samsæturnar til einskona hraða- eða streymismælinga auk aldursgreininganna. Töluvert magn þrívetrissamsættunnar ³H (trítín) myndaðist í illræmdum vetrissprengjutilraunum á sjötta og sjöunda áratug síðustu aldar. Trítín er geislavirkt, eyðist smátt og smátt og er mjög sjaldgæft í náttúrunni. Vetrissprengjutrítínið hefur síðustu hálfu öldina verið að dreifast um alla króka og kima hafs og jarðvegs. Fylgst hefur verið með ferð þess um heimshöfin og mælingarnar notaðar til að finna bæði hraða djúpsjávarstrauma og endurnýjunartíma sjávar á ýmsum hafsvæðum.

Í ritum um fornúmhverfisrannsóknir er oftast greint á milli mismunandi samsætna með því að skrifa fjölda kjarnaenda samsættunnar (samanlagðan fjölda róteinda og nifteinda) í smáu lettri ofarlega framan við bókstaf frumefnisins (dæmi: ¹⁶O). Þetta má einnig skrifa: O-16 eða súrefni 16.

Stöðugar samsætur

Það eru stöðugar samsætur súrefnis (¹⁸O/¹⁶O), kolefnis (¹³C/¹²C) og vetnis (¹H/²H) sem hafa mest verið notaðar til greiningar á fornveðurfari. Samsætan ²H er gjarnan kölluð tvívetni (deuterium, þá skammstöfuð með bókstafnum „D“). Léttari súrefnissamsætan (¹⁶O), er um 100 sinnum algengari en hin þyngri (¹⁸O) (súrefnissamsæturnar eru reyndar fleiri).

Svo vill til að tvö meginferli í náttúrunni skilja að súrefnissamsæturnar ¹⁸O og ¹⁶O. (i) Fyrri ferlið er uppgufun og úrkomamyndun. Vatn sem inniheldur léttari samsættuna gufar fremur upp en það vatn sem inniheldur hina þyngri. Vatn sem inniheldur þyngri samsættuna þéttist einnig hraðar en vatn með þá léttari. (ii) Hitt ferlið gerist í lífverum, þær skilja líka léttara og þyngra vatnið að. (Þegar talað er um þungt vatn er reyndar venjulega átt við vatn sem inni heldur tvívetni í stað venjulegs vetnis). Svo einstaklega heppilega vill til að lífveruskiljunin er háð hita lífverunnar sem oftast er hið sama og hiti umhverfisins. Lækki hitinn vex hlutur ¹⁸O í leifum lífverunnar.

Uppgufunarskiljunin hefur þær athyglisverðu afleiðingar að jökulís (sem auðvitað er upphaflega nær eingöngu myndaður úr vatni sem gufar upp úr sjó) inniheldur minna magn af ¹⁸O en sjórinn sem eftir verður. Nú eru um 2,4% vatns sem ofanjarðar er bundið í jökulís, á mestu jökulskeiðum eru það hins vegar upp undir 6%. Þar sem meira fer af léttu súrefni en þungu úr höfunum vex hlutfall þess þunga í því sem eftir situr. Það er því tvennt sem lesa má úr samsætuhlutfalli súrefnis í lífveruleifum: (i) Hita í umhverfi lífverunnar meðan hún lifði, (ii) Heildarmagn vatns sem bundið var í jökulís á sama tíma.

Setkjarnar sem teknir eru úr djúpsjávarseti hafa gefið upplýsingar um samsætuhlutföll tugmilljónir ára aftur í tímann. Í setinu eru leifar bæði uppsjávar- og djúpsjávarlífvera. Hægt er að greina þessa meginflokka í sundur. Með því að bera saman upplýsingar um breytingar á samsætuhlutföllum þeirra má að miklu leyti greina að þær samsætubreytingar sem hafa orðið vegna hitabreytinga í sjónum og samsætubreytinga vegna jökla myndunar. Fleira kemur þó til hjálpar, en ekki verður farið nánar út í það hér.

Skiljunin sem verður við úrkomamyndun hefur líka mikilvægar afleiðingar. Megnið af vatnsgufunni í lofthjúpunum hefur gufað upp úr hlýjum höfum, úrkomamyndast þegar loftið kólnar og ¹⁸O samsætan

¹ Textinn er byggður á ýmsum heimildum. Þeim sem vilja kynna sér frekar notkun á samsætumælingum í fornveðurfræði má benda á tvær ágætar kennslubækur: Paleoclimatology eftir Raymond S. Bradley (2. útgáfa 1999) og Principles of Paleoclimatology eftir Thomas M. Cronin (1999). Í þessum bókum eru vísanir á ítarlegri heimildir.

fellur hraðar út en hin léttari. Mest af ^{18}O hefur þegar fallið út þegar hiti er orðinn lágur. Úrkoma sem myndast við lágan hita hefur því lægra hlutfall ^{18}O en sú sem myndast við háan hita. Þetta sést vel við þau veðurfarsskilyrði sem nú eru ríkjandi. Hlutfall ^{18}O er lægra hér á landi en suður í höfum.

Borkjarnar úr Grænlandsjökli og öðrum freðjöklum innihalda upplýsingar um hita við úrkomumyndun í fortíðinni. Margt er þó að gæta við túlkun hlutfallanna og hér má minnst á nokkur atriði: (i) Hlutfall ^{18}O er ekki aðeins háð hita þar sem úrkoman fellur, heldur líka að nokkru leyti því hver hitinn var þar sem vatnsgufan sem myndar hana gufaði upp. Þar sem jökulsildirnir eru mjög stórir breyta þeir loftstraumum og geta þannig valdið því að úrkoma seint á jökulskeiði kemur annars staðar að en úrkoma á fyrri hluta þess meðan jökullinn er lítill. (ii) Eftir því sem meiri ís safnast fyrir á landi breytist samsætuhlutfall heimshafanna og þar með vatnsgufunnar sem gufar upp. Úrkoma sem fellur seint á jökulskeiði hefur því ekki sama samsætuhlutfall og sú sem fellur snemma, jafnvel þó hitinn sé sá sami. (iii) Hæð jöklanna vex eftir því sem líður á jökulskeiðið og yfirborðshiti þeirra lækkar því, og úrkoman sem er að falla á þá hefur myndast við lægri hita en sú úrkoma sem á þá féll meðan þeir voru lágir. (iv) Hin eðlilega árstíðasveifla hitans er langoftast meiri en breytingar á honum frá ári til árs. Miklar breytingar á hlutfalli sumar- og vetrarúrkomu geta valdið samsætuhlutfallsbreytingum sem gætu túlkast sem hitabreytingar en eru það ekki. Hættan á villum af þessu síðasta tagi er langmest þegar gengið er svo langt að nota samsætur til túlkunar á hitabreytingum frá ári til árs eða mjög fárra ára. Líkur eru á að því stærri og lengri sem sveiflur eru því stærra svæði eigi þær við. Samsætur eru einnig mældar í grunnvatni (fornu og nýlegu) og geta þær stundum gefið veðurfarssögulegar upplýsingar (auk margt annars).

Tvær meginforsendur liggja til grundvallar notkunar samsætuhlutfalla eins og þeirri sem gróflega hefur verið lýst hér að ofan. Önnur er sú að heildarmagn hvorrar súrefnissamsætu sem virk er í ferlakerfinu sé óbreytt til mjög langs tíma. Gjarnan er miðað við 150 milljón ár. Hin er að samsætuhlutföll séu nú nánast jöfn í öllum úthöfunum. Hvorug þessara forsendna er fullvís. Þær eiga báðar einnig við túlkun á hlutföllum stöðugu kolefnissamsætanna ^{13}C og ^{12}C . Nýlega var farið að gera tilraunir til að meta samsætuþúskaþing og breytingar á honum í meiri smáatriðum en áður til að meta líkleg samsætuhlutföll í horfnum jökulhvelum. Þeir reikningar virðast gefa þá athyglisverðu ábendingu að hlutfall ^{18}O í jökulskjöldum norðurhvelsins hafi verið umtalsvert hærra en er í fornum ís bæði á Grænlandi og á Suðurskautslandinu. Úrkoma sem myndaði þessa jökulskildi hafi því annaðhvort myndast við hærri hita en ríkti á Grænlandi á jökultímanum eða þá sé áttuð af suðlægari slóðum. Hvorugt er í sjálfu sér óvænt.

Samsætuvík

Mælingarnar sjálfar segja til um samsætuhlutfallið, en þær þarf einhvern veginn að kvarða. Þá er gripið til þess ráðs að skilgreina staðlað viðmið, eins konar meðalvatn. Kallast viðmiðið á ensku: *Standard mean ocean water* eða SMOW. Flest sýnishorn sem mæld eru sýna ekki sömu samsætuhlutföll og eru í sameindum meðalvatnsins. Víkin sem fram koma í súrefni eru venjulegast tilfærð í þúsundstuhlutum (prómill). Venjulega er vikið skrifað sem $\delta^{18}\text{O}$ – les sem : delta O átján eða del O átján o.s.frv.

Jökulís er rýrari af ^{18}O samsætunni heldur en meðalvatnið og víkin í honum eru því neikvæð. Á nútíma (eftir að ísöld lauk) sveiflast gildin í GRIP-kjarnanum frá Grænlandi aðallega á bilinu -34,5 til -36 prómill. Hver þúsundastihluti á nútíma jafngildir um það bil 2,5°C í ársmeðalhita.

Í sjávarsetinu eru vex hlutur ^{18}O hins vegar eftir því sem jökulskildir eru stærri, frávik eru því jákvæð á köldum tímabilum. Í þeim jafngildir einn þúsundastihluti 50 til 100 metra mismun á sjávarstöðu. Taka má eftir því að lág sjávarstaða þýðir ekki endilega að kalt sé í veðri þegar sjávarlífveran lifði heldur að nægilega kalt hafi verið á undan til að jökulskildir stækkuðu að rúmmáli.

Stöðugar kolefnissamsætur

Í bókum og greinum sem fjalla um samsætumælingar ber allmikið á umfjöllun um kolefnissamsætur. Notkun geislavirku ^{14}C samsætunnar til aldursgreininga er þar sér á parti og er lauslega lýst aftur í þessum texta. Kolefni á tvær algengar stöðugar samsætur, ^{13}C og ^{12}C . Það er eins með þessar samsætur og súrefnissamsæturnar að lífið er hrifnara af annarri en hinni og lífsskiljun á sér því stað. ^{13}C er mun sjaldgæfari en ^{12}C . Samsæturnar mynda misþungan koltvísýring og ljóstillífur er hrifnari af léttari samsætunni en hinni þyngrri. Lífrænt kolefni inniheldur því tiltölulega meira af ^{12}C en ólífrænt.

Mun erfiðara er að túlka breytingar (merki) á samsætuhlutfalli kolefnis en súrefnis, en þó skulum við hér bjóða upp á eftirfarandi. (i) Sé botndýra- og yfirborðdýrasmerki það sama er talið að breytingarnar verði vegna samskipta við ytri geymi, t.d. við miklar lífmassabreytingar á meginlöndum (eyðimerkurmyndun eða stórfelldar breytingar á gróðursamsetningu) eða losun kolefnis (í formi metans úr metanhýrötum) úr sjávarlögum. (ii) Sé botn- og yfirborðsmerki ekki það sama tákna breytingarnar breytingu á framleiðni lífmassans. (iii) Ef merkið mismunandi frá einu hafi til annars, þýðir það að samskipti hafanna hafa raskast.

Geislavirk samsæta kolefnis

Það flækir mjög alla frásögn af atburðum við ísaldarlokin og á fyrri hluta nútíma að tvenns konar tímatal er í notkun og sérstök ástæða er til að vara við ruglingi sem af þessu getur stafað. Annað tímatalið byggist á talningu vetrar- og sumarlagi í ískjörnum og árhringjum í trjám, en hins vegar er tímatal sem byggir á leifahlutfalli geislavirku ^{14}C samsætunnar. Á ensku nefnist almanaks (áhringja-) tímatalið „Calendar years before present“ oftast skammstafað „Cal. yr. BP“, við skulum kalla það almanaksár. Samsætutímatalið er yfirleitt tilfært sem „ ^{14}C yr. BP“ eða aðeins „yr. BP“ aftan ártalsins. Til hægðarauka fyrir framtíðina var ákveðið að „núið“, „the present“ væri fest við 1950. Almanaksárin BP miðast því við 1950. Cal. yr. 1500BP er því 450 eftir Krist og Cal. yr. 4000BP er 2050 f. Kr.

^{14}C -samsætan myndast í lofthjúpnum fyrir áhrif geimgeisla en eyðist hratt aftur (breytist í ^{14}N (nitur)) og helmingast magnið á hverjum 5730 (+- 40) árum. Rétt er að benda á það að í upphafi (um 1950) var talið að helmingunartíminn væri aðeins styttri. Kolefni sem er nú að bindast vefjum lífvera er byggt er upp úr kolefni sem er í umferð þessar mundir. Þar með er örlítið magn samsætunnar ^{14}C . Gert er ráð fyrir því að þegar lífveran deyr ljúki samskiptum vefja hennar við lofthjúpin og þar með nýsköpun ^{14}C . Samsætan eyðist því jafnt og þétt í friði bundin lífvefnum. Ef sýni inniheldur helming af því sem það myndi gera væri það nýtt er það því 5730 ára, innihaldi það fjórðung er það 11460 ára. Í öllum lífsýnum er því eins konar skeiðklukka sem er mislangt gengin. Mæling á hlutfalli $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ gefur til kynna hvað klukkan sé, hún er því meira eftir því sem hlutfallið er lægra.

En því miður er málið ekki alveg svona slétt og fellt. Á síðustu öld var brennt miklu magni af jarðefnaeldsneyti. Það inniheldur nær ekkert ^{14}C því það er svo gamalt. Kjarnorkuvopnatilraunir árána eftir síðari heimsstyrjöldina bættu „manngerðu“ ^{14}C inn í kerfið. Koltvísýringurinn í lofthjúpnum inniheldur um það bil 100 ára uppsafnaðar birgðir af ^{14}C og í hafinu er enn eldra kolefni á ferðinni. Ný lífsýni úr sjó virðast því vera nokkur hundruð ára gömul. Af þessum ástæðum öllum eru ^{14}C -aldursgreiningar marklausar fyrir síðustu 150 ár eða svo.

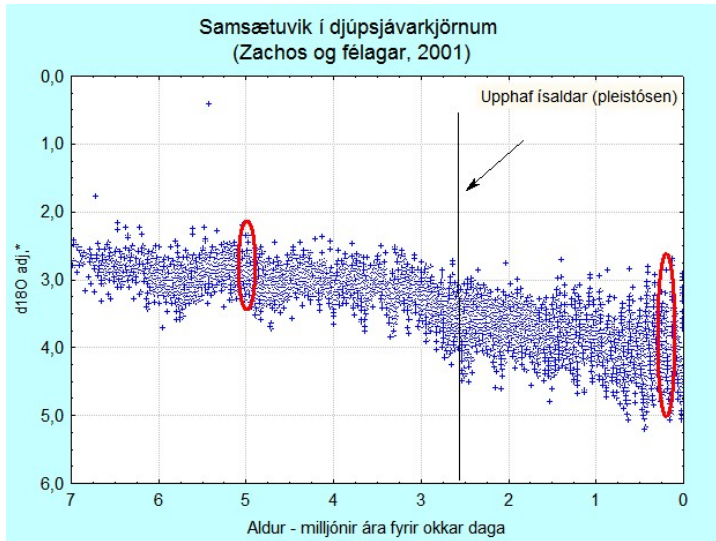
Þegar farið var að bera saman nákvæmar áhringjatalningar og ^{14}C -aldur kom í ljós að þeim ber allvel saman síðustu 2500 árin eða svo, en vaxandi misræmis gætir fyrir. Við upphaf Nútíma (við endann á Holtasólaeyjarskeiðinu) er það orðið um 1500 ár, ^{14}C -aldur er lægri sem því nemur. Upphaf Nútíma er því fyrir um 10 þúsund ^{14}C -árum, en 11.500 almanaksárum.

Það flækir málið enn frekar að misræmið er ekki samfellt vaxandi og er greinilegt að mismikið ^{14}C hefur verið í umferð á hverjum tíma. Ástæðurnar eru margar en aðeins minnst á tvær hér, annars vegar hefur framleiðsla á ^{14}C verið mismikil (sólin misvirk) og hins vegar getur upptaka sjávar verið mishröð - hafi miklar breytingar orðið á hringrás hans. Þar sem vitað er að miklar breytingar urðu á sjávarhringrásinni í lok jökulskeiðsins er klukkan sérlega ónákvæm um það leyti, jafnvel þó leiðréttingum sé beitt.

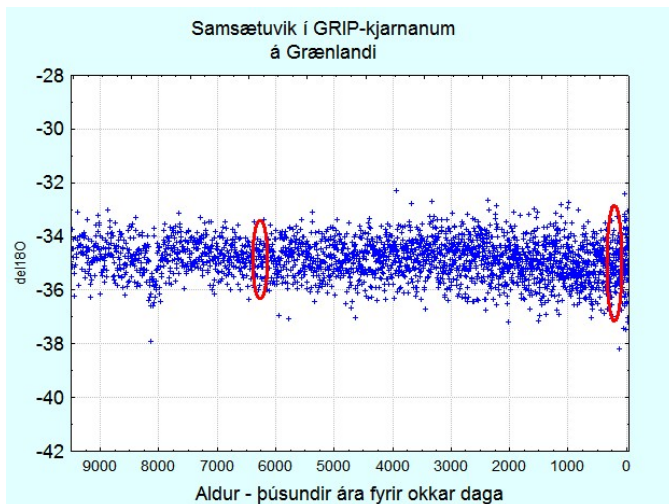
Sé verið að tala um nákvæmar tímasetningar frá ísaldarlokum og fyrri hluta Nútíma verður jafnframt að vera ljóst hvort tímatalið er notað. Meginástæða þess að menn breyta ekki ^{14}C -tíma í almanaksár jafnharðan er sú að mæliniðurstöðurnar eru í ^{14}C -árum og breytast ekki nema helmingunartíminn verði enn betur ákvarðaður. Nákvæm leiðrétting til almanaksára er mjög óviss á þeim tímabilum sem ^{14}C -magnið hefur breyst mjög ört og fyrir sýni sem eru eldri en 10 þúsund ^{14}C -ár er ekki fullt samkomulag um hver leiðréttingin á að vera. Notkun ^{14}C -ára heldur því áfram enn um sinn.

Enn er rétt að benda á að lífverur greina á milli ^{14}C og ^{12}C , rétt eins og ^{13}C og ^{12}C , það leiðir til þess að hlutfallið sem festist í plöntuvefnum er allt að því 5% lægra en hlutfallið í lofthjúpnum og þar að auki eru plöntur misvandfýsnar, leiðrétt þarf fyrir áhrifum sem þessum. Af þessu má sjá að þó kolefnisklukkan sé góð, er að mörgu að hyggja þegar lesið er á hana.

Samsætur fleiri frumefna koma við sögu í fornumhverfisrannsóknum.



Samsætuviik í djúpsjávarkjörnum, athugið að kvarðar eru öfugir. Yngstu punktarnir eru við núllið lengst til hægri á lárétta kvarðanum, en elstu punktarnir eru gildi úr 7 milljón ára gömlu seti. Mæliröðin er fengin úr grein Zachos og féлага (2001). Hér má sjá að hlutur samsættunnar ^{18}O hefur farið hægt vaxandi síðustu 7 milljón árin – það er túlkað þannig að meira og meira af vatni hafi bundist í jökulís (sjá megintexta). Athyglisvert er að spönn frávikanna vex eftir því sem nær dregur í tíma, rauðar sporöskjur til áherslu. Talið er að spannarvöxturinn sé raunverulegur, veðufar hafi orðið breytilegra. Eitthvað af aukningunni má þó efalítið rekja til þess að mælingar þéttast eftir því sem nær okkar tíma dregur.



Samsætuviik í GRIP-kjarnanum frá Grænlandi síðustu 9500 árin. Í aðalatriðum hafa vikagildin haldist í kringum -35 þúsundustuhluta allt þetta tímabil, e.t.v. hafa þau lækkað lítillega. Spönn hefur aukist (sjá rauðu sporöskjurnar). Líklegt er að aukninguna megi að einhverju leyti skrifa á aukna þétni mælinga næst okkar tíma (lengst til hægri á myndinni). Punktarnir sem hanga neðan í punktaveimnum tákna kaldari úrkomu. Taka má eftir kuldaskiðinu mikla fyrir rúmum 8 þúsund árum.

Myndir – heimildagreinar:

Johnsen, S.J., H.B. Clausen, W. Dansgaard, N.S. Gundestrup, C.U. Hammer, U. Andersen, K.K. Andersen, C.S. Hvidberg, D. Dahl-Jensen, J.P. Steffensen, H. Shoji, A.E. Sveinbjörnsdóttir, J.W.C. White, J. Jouzel,

and D. Fisher. 1997. The $\delta^{18}\text{O}$ record along the Greenland Ice Core Project deep ice core and the problem of possible Eemian climatic instability. *Journal of Geophysical Research* 102:26397-26410.

Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, and K. Billups. 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, Vol. 292, No. 5517, pp. 686-693.