

Jöklarannsóknir Hans Ahlmann og samstarfsmanna á öndverðri 20. öld.

Helgi Björnsson

Jarðvísindastofnun Háskólans, Sturlugötu 7, 102 Reykjavík

email: hb@hi.is <https://doi.org/jokull2023.73.101o>

Inngangur

Jöklar vitna um veðurfarssveiflur. Snemma á 19. öld bentu rannsóknir í grennd við jökla til, að ísaldir hefðu ríkt á norðurhvel jarðar. Náttúrufræðingar sáu, að jöklar höfðu legið yfir Norður-Evrópu, rofið land, borið fram aur, ýtt upp jökulgörðum og skilið eftir sig grettistösk. Í jarðlögum fundust leifar af dýrum og gróðri, sem lifað hafði við kaldara loftslag en nú er á þessum slóðum. Spor eftir ísbreiður voru rakin um Norður-Evrópu til Bretlandseyja. Ísaldarjarðfræði varð til í Alpafjallalöndum og Skandinavíu (sjá umfjöllun um framlag Svisslendingsanna Jean de Charpentier (1786–1855), Ignatz Venetz-Sitten (1788–1859) og Louis Agassiz (1807–1873) í bókinni *Jöklar á Íslandi* (Björnsson, 2009)).

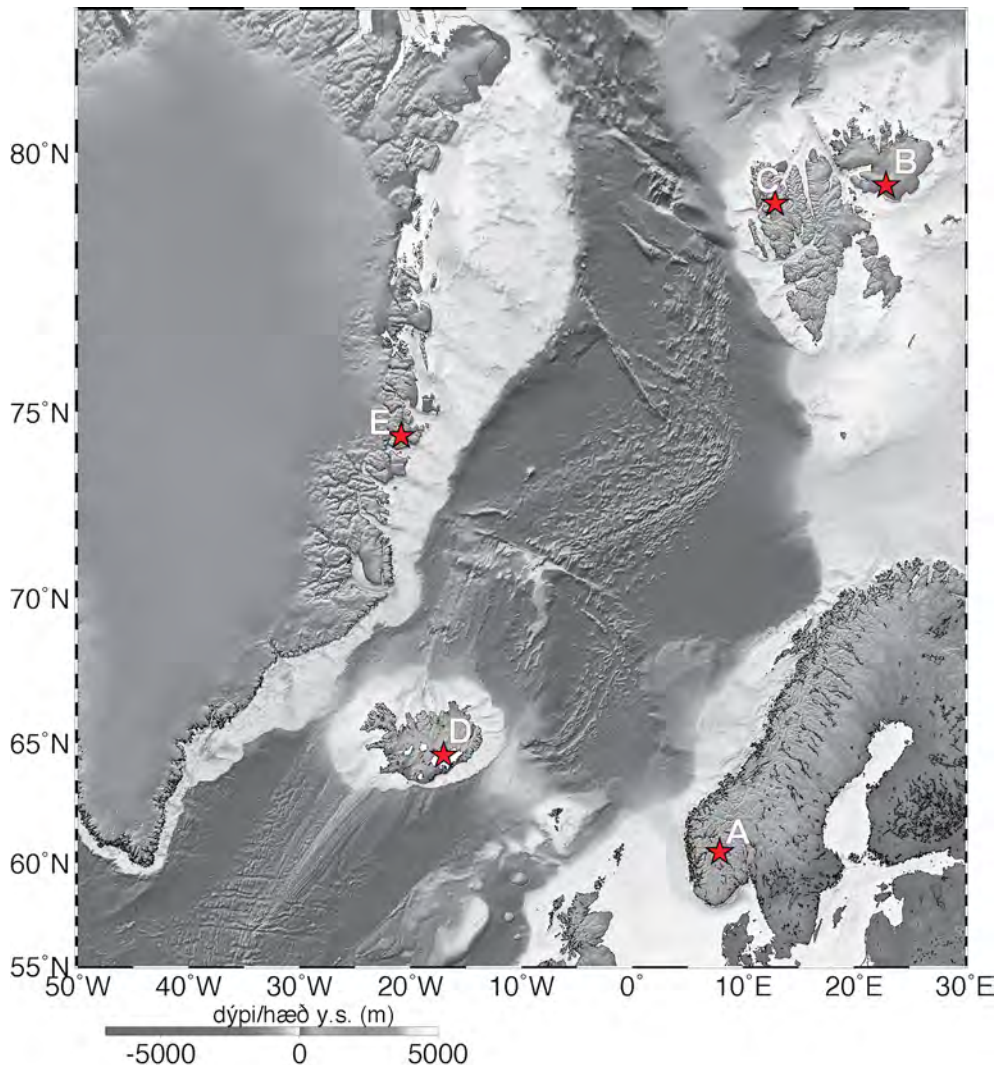
Undir lok 19. aldar sýndi hop jökla í Skandinavíu og Ölpum, að lokið væri kuldaskiði, sem þá hafði staðið í fimm aldir og nefnist litla ísöld. Árlegar mælingar hófust á legu jökulsporða á vegum alþjóðlegrar nefndar jarðvísindamanna (Commission Internationale des Glaciers, CIG), sem stofnuð var árið 1894. Svisslendingurinn Francois-Alphonse Forel (1841–1912), læknir að mennt, en upphafsmaður stöðuvatnafræða, setti fram leiðbeiningar um mælingar, sem tengdu breytingar á stöðu jökulsporða við veðurfar (Forel, 1895). Ítalski landfræðingurinn Luigi de Marchi, háskólakennari í Pauda, og stærðfræðingurinn Sebastian Finsterwalder (1862–1951) frá München, voru frumkvöðlar að gerð stærðfræðilíkana, sem lýstu afkomu jökla og breytingum á lögun þeirra (Marchi, 1895, 1897, 1911; Finsterwalder, 1907). Finsterwalder var upphafsmaður að gerð korta af yfirborði jökla sem byggð voru á ljósmyndum. Einnig lýsti Svíinn Axel Hamberg (1863–1933) við Uppsalaháskóla hlutverki jökla í söfnun vatnsforða í

fjalllendi (Hamberg, 1930). Af öðrum frumkvöðlum, sem lengi héldu uppi mælingum á jökulsporðum, skal nefna Frakkann Charles Rabot (1856–1944) og Svisslendinginn Poul-Louis Mercanton (Hamberg, Rabot, Mercanton, 1930).

Reglubundnar mælingar á rúmmálsbreytingum jökla hófust á þriðja áratugi 20. aldar, svonefndar afkomumælingar jökla. Fyrstu mælingar á afkomu voru reyndar gerðar á Rhonejökli í Svissnesku Ölpunum á árabílinu 1874–1908 (Mercanton, 1905, 1916), og samfelt á Claridenjökli í Sviss frá 1914 (Huss og fl., 2021). Kerfisbundnar afkomumælingar má rekja til Svíans, sem bar það langa heiti Hans Jakob Konrad Wilhelmsson Ahlmann (1889–1974) og mælingamanna hans, en þeir hófu slíkar mælingar á jöklium í Jötunheimum í Noregi og á Lapplandi í Norður-Svíþjóð. Ahlmann og samstarfsmenn héldu rannsókn-um áfram á fjórða áratugi aldarinnar á landssvæðum umhverfis Norður-Atlantshaf, þ. e. á Svalbarða og Grænlandi og á Íslandi (1. mynd). Starfsferill Ahlmanns lýsir vel, hvernig mikilvægur hluti jöklafræði varð til og mótaðist út frá ísaldar- og landmótunarfræði. Ahlmann átti drjúgan þátt í að efla jöklafræði í aldarþriðjung. Hér verður sú saga rakin.

Frá landmótunarfræði til jöklafræði.

Hans Ahlmann var nemandi ísaldarfræðingsins Baron Gerard Jacob de Geer (1858–1943), prófessors við Stokkhólmsháskóla (frá 1897), sem kunnastur er fyrir hvarflagatímatal sitt, en það notaði hann til að skrá 12 þúsund ára sögu hops ísaldarjökuls í Skandinavíu (de Geer, 1912). De Geer lagði grunninn að tímatali jökulhórfunar í lok síðasta jökulskaiðs. Hann fann regluleg árlög í seti, sem jökulár höfðu dreift um fornt baltískt haf, en hafið haldi áður stóran hluta Svíþjóðar. Á sumrin féll grófur framburður ofan á fingert set



1. mynd. Lönd umhverfis Norður-Atlantshaf, þar sem Hans Ahlmann vann að jöklarannsóknum. Stjörnurnar sýna legu jöklanna sem hann vann á. A: Styggelsjökull í Jötunheimum, Noregi, B: Norðausturland Svalbarða, C: Fjórtinga júlí jökull á Vestur-Svalbarða, D: Vatnajökull á Íslandi og E: Frøyajökull á Austur-Grænlandi. – *The North Atlantic. Letters denote the glaciers where Hans Ahlmann and his collaborators did their pioneering work in glaciology.*

frá liðnum vetri, svo að hvert ár mynduðust regluleg hvarflög með þykku og grófu sumarlagi og þunnu og fínu vetrarlagi.

De Geer var einn af eftirmönnum Ottos Martin Torell (1828–1900). Torell var prófessor í Lundi á síðari hluta 19. aldar, síðar yfirmaður Jarðfræðistofnunar

Svíþjóðar (2. mynd). Að menntun var hann læknir og dýrafræðingur, en sneri sér síðar að jarðfræði. Torell gerði sér grein fyrir því, að fyrrum hefði verið heimskautaloftslag í Svíþjóð. Hann fann steingerð liðdýr (*Yoldia arctica*) í Bohusléni á vesturströnd Svíþjóðar, sem lifa eingöngu á heimskautasvæðum. Síðan rakti



2. mynd. Brautryðjendur í ísaldarrannsóknum (frá vinstri til hægri). Gerard de Geer (1858–1943), Otto Torell (1828–1900), Amund Helland (1846–1918), Charles Lyell (1794–1875). – *Pioneers in glacial geology*, Gerard de Geer, Otto Torell, Amund Helland and Charles Lyell.

hann slóð löngu horfinna ísaldarjökla frá Skandinavíu til Norður-Þýskalands, jökulrispur, grettistöð, jökulgarða og set, sem jökulár höfðu borið fram. Jöklar hefðu flutt björg langar leiðir; þau féllu ekki niður á sjávarbotn frá ísjökum, sem flutu á sjónum líkt og fyrr var talið. Torell kannaði forna strandfleti, sem brim hafði rofið, þegar sjávarborð var lægra en nú er, og mikill hluti af vatni jarðar var bundinn í ísbreiðum á þurru landi (Tinkler, 1985, 2020; https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Martin_Torell).

Torell var upphafsmaður rannsókna á heimskautasvæðunum Svalbarða og Austur-Grænlandi. Þar taldi hann, að læra mætti, hvernig ísaldarjökla, sem áður huldu Skandinavíu, hefðu mótað landið. Otto Torell kom til Íslands árið 1857 og ferðaðist um. Athuganir hans við suðurjaðar Vatnajökuls og norður yfir Kjöl juku skilning á ummerkjum ísaldarjökla í Norður-Evrópu. Torell mældi fyrstur hreyfingu jökla á Íslandi, og var það gert á Svínafellsjökli í Örfum (1,5 m á dag; Ohlsson-Gadde, 1857, 1983). Síðar hélt Torell til Svalbarða til þess að lýsa meginlandsjökli.

Fyrstu kynni Ahlmanns af heimskautasvæðum voru árið 1910, þegar hann um tvítugt var aðstoðarmaður de Geer í síðustu ferð þess síðaranefnda til Svalbarða (3. mynd). Á árunum 1912–1914 reyndi Ahlmann fyrir sér í myndlist í París, en sneri eftir það heim og varði árið 1915 doktorsritgerð um Ragundavatnið í Jemtalandi í Mið-Svíþjóð. Vatnið tæmdist skyndilega í hamförum af mannavöldum, árið 1796.

Rauf var gerð í jökulgarð frá síðasta jökulskeiði, sem haldið hafði stöðuvatninu uppi, og við það rofnaði jökulgarðurinn allur, 30 milljónir m^3 af vatni flæddu fram á 4 klst. (meðalrennsli $2.000 m^3/s$), og skemmdu mikið af mannvirkjum, en manntjón varð ekki.

Ahlmann lýsti jökulgörðum í Mið-Svíþjóð frá kuldátíð í lok síðasta jökulskeiðs fyrir um 12.000 til 11.700 árum (Yngra Dryas skeiði). Á árum fyrri heimsstyrjaldarinnar vann hann að rannsóknum á landmótun í Jötunheimum í Noregi og sýndi fram á, hvernig ísaldarjökla grófu botn fjarða, dala og stöðuvatna þar (Ahlmann, 1919, 1923, 1927). Hann fór reyndar þar í fótspor Norðmannsins Amunds Helland (1846–1918), brautryðjandans í ísaldarrannsóknum, sem fyrstur benti á, að jökla hefðu grafið hrikalega firði vesturstrandar Noregs; þeir væru ekki sprungur í jarðskorpunni.

Amund Helland heimsótti Ísland árið 1881, og lýsti þar jöklum og jökulám, og hann mat fyrstur manna aurburð í jökulám á Íslandi (Helland, 1882, 1883). Helland kom hluta af Jöklariti Sveins Pálssonar (1762–1840) út, fékk það prentað í Árbók norska ferðafélagsins (1883). Var það í fyrsta sinn, sem verk Sveins í náttúruvísindum voru kynnt erlendis. Helland var höfundur margra fræðibóka, og hann var einnig litríkur stjórnmálamaður í Venstre, fyrsta stjórnmálaflokki Noregs og barðist ötullega fyrir almennum kosningarétti, trúarfrelsi og alþýðufræðslu.

Þannig mótaðist Ahlmann af frumherjum jarðvísinda á Norðurlöndum, einkum þeim sem könnuðu landmótun og jarðsögu í þeim anda Skotans Charles Lyells (1794–1875), að rannsóknir á náttúrunni væru lykill að skilningi á jarðsögu fortíðar (Lyell, 1990–1991). Með mælingum mætti lýsa lögmálum náttúrunnar. Þetta var boðskapur Alexanders von Humboldt (1769–1859), sem hann birti í ritum sínum.



3. mynd. Hans Jakob Konrad Wilhelmsson Ahlmann (1889–1974).

Jöklarannsóknir í Jötunheimum

Um 1918 vaknaði áhugi Ahlmanns á nútímajökulum, og næstu fimm árin (1918–22) rannsakaði hann daljökla í Jötunheimum í Suður-Noregi, skammt austan við botn Sognsfjarðar (61,5°N, 8,5°A; Ahlmann, 1922). Þar eru nær þrjátíu hæstu fjöll Noregs (hæstur er Galdhøpiggen, 2.469 m hár). Loftslagið er hafrænt, úrkoma mikil, þó aðeins um fjórðungur á við það, sem er við strönd Noregs 100 km vestar. Sumur eru svöl í Jötunheimum, og á hæstu fjöllum er mestöll úrkoman snjór.

Ahlmann lýsti jöklunum við þáverandi loftslag og hve há fjöll þyrftu að vera, svo að jöklar mynduðust þar (nefnt jöklunarmörk, glaciation limit), hvernig snjór dreifðist í fjalllendi eftir ríkjandi vindáttum og sæti eftir á haustin í skuggsælum hvíltum, sem oft sneru til norðurs. Hann safnaði gögnum um stærð jöklanna fyrir á tíð, sem lesa mætti af ummerkjum eftir þá í landslagi, svo sem hæstu rofmörkum í fjallshlíð-

um og görðum, sem jöklarnir hefðu ýtt upp framan við sporða sína. Ahlmann studdist við gömul landakort og ritaðar frásagnir um aldur jökulgarðanna. Hann gat metið rúmmálsbreytingar jöklanna út frá breytingum á flatarmáli þeirra og þykkt, allt frá því jöklarnir voru í hámarki um 1750. Rýrnun jökla síðan vitnaði um hlýnun frá lokum litlu ísaldar. Breytingar á stöðu jökulsporða frá ári til árs voru einnig taldar vitnisburður um sveiflur í veðurfari. Allmörg ár gæti hins vegar tekið snjó, sem safnast á jökulinn, að berast með ís-skríði fram að sporði hans, og hop og framskríð jökla gætu verið ólík, þótt þeir væru í sambærilegu loftslagi og á sama landsvæði, vegna þess að lögun, þykkt, stærð, bratti og flatardreifing miðað við hæð væru ólík frá einum jökli til annars. Með því að mæla að vori, hve mikill snjór safnaðist á jökulinn yfir veturinn og síðan að hausti, hver leysing hafði verið um sumar-ið, fengist betri lýsing á veðurfarssveiflum frá ári til árs heldur en með skráningu á stöðu jökulsporðsins eins. Grafið var með skóflum gegnum vetrarsnjóinn og vatnsgildi snjósins mælt með því að vigta hann. Mælt var á mörgum stöðum dreift yfir jökulinn til þess að finna meðaltal á jöklinum öllum. Þannig fékkst mat á breytingum á rúmmáli og massa jökuls og mat á heildarafkomu hans að hausti, eða ársafkomu í lok svonefnds jökulárs (Ahlmann, 1940). Slíkar afkomumælingar eru tímafrekar, krefjast erfiðra ferða um jökulinn, og dagsverk getur verið að grafa snjógryfju. Sumarleysing var lesin af stikum, sem stungið var niður í jökulinn að vori. Enn er beitt sömu aðferðum, en afkomu yfir árabíl má nú einnig meta með fjarkönnun frá gervitunglum og samanburði á kortum af yfirborði jöklanna.

Með afkomumælingunum fæst einnig mat á afrennsli bræðsluvatns frá jökli til fallvatna, og hve mikill massi hlyti að jafnaði að berast fram við skrið þeirra. Hreyfingin á yfirborði jökulsins var fundin með mælingum á tilfærslu steina, sem lágu á jöklinum og stika sem stungið er niður í hann (Ahlmann, 1928).

Ahlmann valdi Styggedalsjökul í Hornungfjöllum vestast í Jötunheimum (60°28'N og 7°53'A) til nákvæmra afkomumælinga, daljökul, sem skríður fram 2,5 km langur frá 2.270 m niður að 1.300 m y. s., 1 km breiður og um 2 km² að flatarmáli. Á jöklinum var snélína í lok sumars (hjarnmörk) að jafnaði í 1.600–

1.700 m hæð, en í þeirri hæð er ársúrcoma um 2.000 mm og meðalhitastig í þrjá til fjóra sumarmánuði ársins nærri 5°C. Styggedalsjökull taldist hafa hopað um 300 m, frá því hann var stærstur um 1750.

Á þeim árum, sem Ahlmann mældi á Styggedalsjökli, var afkoma jökulsins nærri jafnvægi, bæði „tekjur og gjöld“, um 1,3 m/ár, jafndreift um jökulinn, en síðar hefur hann rýrnað hraðar. Þá kom Hans Ahlmann ásamt Jón Eyþórssyni (1895–1968), veðurfræðingi, upp veðurstöð í 2.070 m y. s. á fjallinu Fanaráken, sem er í nánd við jökulinn (Ahlmann, Eythorsson, 1927). Á veðurstöðinni mældu menn hitastig og gátu tengt það afkomu jökulsins, bæði við leysingu hans og við úrkomu, sem féll á hann sem snjór og regn.

Ahlmann endurbætti aðferðir við kerfisbundnar afkomumælingar frekar á næstu tveimur áratugum í leiðöngrum sínum til norðurheimskautasvæða og Íslands. Enn fremur lýsti hann innri gerð jökla með því að kanna lagskiptingu snjólaga í snjógryfjunum, hvernig snjór breyttist smám saman í hjarn, verður grófari og eðlisþyngri, þegar dýpra kemur niður í jökulinn, kristallar stækka, og hjarn verður að samfelldum jökulís. Svipaðar rannsóknir á kristallagerð jökla, hitastigi, hripi bræðsluvatns og hreyfingu voru á fjórða áratug tuttugustu aldar unnar í Alpajökulunum (Perutz, Seligman, 1939, Hughes; Seligman, 1939, Perutz, 1940, Seligman, 1941, 1948).

Störf Ahlmanns á Styggedalsjökli mörkuðu tímamót, vegna þess að þau beindust að könnun á jöklinum sjálfum og voru beinar mælingar á veðurfari, sem skýrði tilvist jökulsins. Alla tíð voru efnistökin Ahlmanns við jöklarannsóknir með þessu sniði, sem hann markaði sér í Jötunheimum. Hann valdi jökla til rannsókna með vísindagildi í huga, og á þeim skyldi unnið að miklum og kerfisbundnum mælingum eins og um væri að ræða vinnu í rannsóknarstofu. Með slíku verklagi ykist trúverðugleiki jöklarannsókna. Ahlmann var alla tíð í nöp við hetjuskap í rannsóknum. Árið 1929 var hann gerður að prófessor í landfræði við Stokkhólmsháskóla.

Jöklarannsóknir umhverfis Norður-Atlantshaf

Brátt lá leið Ahlmanns á heimskautaslóðir. Árið 1930 fundu Norðmenn, sem kanna skyldu Frans Josefs Land, leifar af bækestöð leiðangurs Salamons August

Andrée (1854–1897), syðst á Hvítey, sem er skammt austan við eyna Norðausturland (Norðaustlandet) á Svalbarða. Árið 1897 hafði Andrée ásamt tveimur öðrum Svíum freistað þess að fljúga frá Svalbarða til Norðrúpólsins í upphituðum loftbelg, en ekkert hafði spurst til þeirra, frá því að þeir lögðu af stað frá Svalbarða. Ferðalagið var glæfræf, knúið af kappsemi þjóða um að vinna afrek á heimskautasvæðum. Lík leiðangursmannanna voru flutt til Svíþjóðar og jörðuð þar með viðhöfn. Dagbækur leiðangursstjórans fundust, og vann Ahlmann að útgáfu þeirra. Norski haf- og veðurfræðingurinn Harald Ulrich Sverdrup (1888–1957) kannaði vísindalegt gildi dagbókanna (Sverdrup, 1931), einkum hvað lesa mætti af þeim um aldur og útlit hafíss á leið þeirra. Um þennan örlagaríka leiðangur hefur margt verið skrifað. Fyrir bókina *Flugarnarins fékk* Per Olof Sundman (1922–1992) bókmenntaverðlaun Norðurlandaráðs árið 1967 (Sundman, 1967).

Sú mikla athygli, sem þessi fundur olli, auðveldaði Ahlmann að afla fjár til sænsk-norsks leiðangurs til rannsókna á ísbreiðu Norðausturlands Svalbarða. Árið 1931 fór leiðangur Svía og Norðmanna þangað (Ahlmann og fl., 1933, 1934, 1936). Ferðin markaði tímamót í rannsóknum á jökulum. Megintilgangurinn var að kanna veðurfar, og hvernig það skýrði tilvist jökla á heimskautasvæðum.

Á þriðja áratugnum höfðu rannsóknir á náttúru norðurslóða eflst, og tengdist það Alþjóðlega heimskautaárinu 1932–1933. Voru þá margir leiðangrar farnir til Svalbarða og Austur-Grænlands, en þær rannsóknir beindust að auðlindum í hafi og á landi (jarð-, líf-, haf- og veðurfræði, en einnig að segulsviði jarðar, háloftaeðlisfræði og fjarskiptum, sem aukið gætu öryggi í flugi og á sjó), og má hér nefna, að Danir og Svisslendingar ráku þá veðurstöð við Snæfellsjökul.

Leiðangur á Svalbarða 1931

Á Norðausturlandi Svalbarða er heimskautaloftslag, kaldur hafstraumur berst frá Norður-Íshafi og landið er mikinn hluta árs umlukkið haffs. Ársúrcoma getur orðið allt að 500 mm, en aðeins í tvo til þrjá mánuði fer meðalhití yfir frostmark. Hjarnbreiðan nær hæst 700 m y. s., og að vestanverðu eru hjarnmörk á jökl-

inum í um 400–450 m hæð, en í 100 m við austurströndina.

Ahlmann skrifaði um landmótun ísaldarjökla á landgrunni Norðausturlands Svalbarða, lýsti jökli um á þurru landi og rýmun þeirra síðustu áratugi, sem greinilega mátti sjá merki um í jökulurðum utan við jökuljaðarinn. Leiðangursmenn settu upp veðurstöð rétt sunnan við 80°N breiddarbaug, í Hinlopensundi (Hinlopenstretet), sem skilur að meginneyjarnar Norðausturland og Spitsbergen (fyrrum nefnt Vestur-Spitsbergen).

Á þessar slóðir hafði Otto Torell farið í fyrsta leiðangri sínum til Svalbarða 1861. Stöðina nefndu þeir Sveanor (79°56'N, 18°18'A). Einnig voru veðurathuganir gerðar á gufuskipinu Quest, sem hafði flutt þá á áfangastað. Skipið er frægt úr sögu heimskautarannsóknna. Um borð í því lést Sir Ernest Shackleton (1874–1922) úr hjartaáfalli 5. janúar 1922 í höfn í Suður-Georgíu. Nú var skipið í eigu Norðmannsins Ludolfs Schjelderup, selfangara, sem lengi hafði siglt um hafísslóðir. Í Sveanor var mæld sólgeislun, loftþrýstingur, hita- og rakastig, hraði vinds og stefna. Slíkar veðurmælingar voru þá fágætar á heimskautasvæðum.

Sænski veðurfræðingurinn Backa Erik Eriksson (1905–1958, 4. mynd) vann að veðurathugunum á jöklinum. Hann taldi sumarið 1931 hafa verið dæmigert fyrir loftslag á Svalbarða, sem þá hafði reyndar ekki verið skráð nema í um 20 ár. Eftir Backa er nefndur jökull upp af Sveanor (Backajökull, 79°50'N, 18°30'A, í um 160 m y.s.). Leiðangursmenn fóru á hundasleðum á 45 dögum (2. júní–18. júlí 1931) hringferð yfir ísbreiður Norðausturlands, (270 km leið frá Wahlenberginsundi austur um kjöl Suðurjökuls og þaðan norðaustur yfir á hvel Norðurjökuls, alls 130 km, en síðan til baka vestur Norðausturlandið 140 km leið yfir á Vesturjökul og loks niður að ströndinni til bækistöðvarinnar Sveanor. Hæst fóru þeir í um 700 m hæð. Á leið sinni mældu þeir vetrarafkomu og hitastig í 17 snjógryfjum og könnuðu, hvernig snjór breyttist við aukið dýpi í jöklinum. Fyrir lok sumars hafði frost horfið úr yfirborðssnjónum á allri leið þeirra.

Veðurfræðingurinn Anders Knutsson Ångström (1888–1981, 4. mynd) taldi, að hlutur geislunar í heildarleysingu sumarins við Sveanor væri um fjórð-

ungur varmans, en þrír fjórðu hans kæmu frá hlýju og röku lofti, sem bærast inn yfir jökulinn. Heildarorkan var metin með því að mæla leysingu af stikum, en geislun með tæki, sem Ångström fann upp (Ångström, 1933). Með því að beita sams konar reikningum á mæligögn frá Styggedalsjökli í Jötunheimum og gert var við Sveanor, dró Ahlmann þá ályktun, að þar hefði varmi frá hlýju lofti brætt tvöfalt á við geislun.

Að loknum leiðangrinum á Svalbarða árið 1931 setti Ahlmann fram tillögu um flokkun jökla eftir hitastigi þeirra og legu á jörðinni (Ahlmann, 1935b). Næst heimskautasvæðum væru jöklar undir frostmarki allt árið, og þá kallaði hann póljökla (arktiska, ísl. gaddjökla). Engin bráðnun væri á yfirborði þeirra, og þurr snjór héldist undir frostmarki og breyttist svo hægt með hverju ári, eftir að hann græfist neðar í jökulinn, og yrði ekki að ís fyrr en djúpt í jöklinum (100 m dýpi). Þannig jöklar væru á Suðurskautslandinu og á mestum hluta Grænlands. Ísaldarjökla sagði hann falla í þann hóp. Fjærst heimskautum, í tempraða loftslagsbeltinu, væru hins vegar jöklar við frostmark í lok sumars. Allt frost, sem um vetur næði um 15 m niður í jökul með varmaleiðni, eyddist að sumri vegna sólgeislunar, og vegna bræðsluvarmans, sem losnaði, þegar bræðsluvatn af yfirborði hripaði niður í snjóinn og frysi þar. Þessháttar jökla nefndi hann tempraða (ísl. þíðjökla). Þeir væru í Ölpunum og Skandinavíu og á Íslandi. Á þeim jöklu næði snjór að ummyndast í jökulís á 20–30 m dýpi. Á milli heimskautasvæða og tempraða loftslagsbeltisins væru jöklar að hluta til þíðjökla, en annars staðar héldist frost í þeim. Vetrarsnjór er gjarnan þunnur á sporðum heimskautajökla, svo að frost nær þar djúpt niður í ísinn, og sumur eru of stutt til þess að varmaleiðing nái að eyða frosti úr ísnum. Frost berst því með hverju árinu dýpra í ísinn, svo að sporðurinn getur verið botnfrosinn, þótt snjór sé þíður ofar á ákomusvæði jökulsins (enda nær bræðsluvatn að hripa þar gegnum allt snjólagið, sem vetrarfrost nær til). Þá jökla kallaði hann sub-polar (poli-thermal). Í þann hóp féllu flestir jöklar á Svalbarða. Enn vísa jöklafræðingar til þessarar flokkunar, þótt nú sé oftast tilgreint beint, hvert hitastig sé á einstökum svæðum í jöklu, því að allar þrjár ofangreindar jökulgerðir geta verið í einum og sama jöklinum.



4. mynd. Samstarfsmenn Ahlmanns við jöklarannsóknir á Svalbarða 1931 og 1934. Andreas Knutsson Ångström (1888–1981), Harald Ulrich Sverdrup (1888–1957, og Backa Erik Eriksson (1905–1958). – Ahlmann's collaborates in glaciological research in Svalbard; 1931 and 1934.

Ahlmann greindi einnig á milli virkra jökla og óvirkra. Í virkum jökulum berst ís hratt niður frá safnsvæði til leysingarsvæðis, en óvirkir jöklar hreyfast lítið. Virkastir eru jöklar í úthafsloftslagi. Þar er ákoma og leysing mikil, hröð velta í afkomu og hreyfing mikil. Slíkir jöklar eru að jafnaði næmir fyrir langvarandi breytingum í afkomu. Aukist afkoman, vex hraði þeirra, en ef afkoma er neikvæð til lengdar, hægir á þeim. Gaddjöklar eru síður virkir en þíðjöklar. Ahlmann lýsti einnig flokkun jökla eftir lögun þeirra og nefndi þá hvílfarjökla, daljökla og hveljökla.

Leiðangur á Svalbarða 1934

Árið 1934 fór annar norsk-sænskur leiðangur undir stjórn Ahlmanns og jarðeðlisfræðingsins Haralds Ulrich Sverdrup (1888–1957, 4. mynd) til jökla- og veðurannsókna á norðvestanverðum Svalbarða (á Haakon VII Land), (Ahlmann, Sverdrup, Olsson, 1935, 1936). Þangað nær grein frá Golfstraumnum, og þar gætir mildra og rakra suðlægra strauma í hafi og lofti (loftslag sub-polar). Mest allt árið er þar ís-laust í fjörðum. Ársúrcoma er 300–400 mm og meðalhiti árs -3 til -4 °C, en hitastigið fer yfir frostmark í þrjá til fjóra sumarmánuði.

Ahlmann og Sverdrup unnu á Fjórtaðajúljökli ($79^{\circ} 09'N$, $12^{\circ} 56'A$), sem Prins Albert I af Monaco nefndi eftir þjóðhátíðardegi Frakka; en prinsinn kostaði marga leiðangra til Svalbarða. Jökullinn er 16 km langur (127 km^2) og kelfir fram í Krossfjörð, en ofan við hann tekur við Isachsenbreiðan ($79^{\circ} 10'N$, $12^{\circ} 53'A$, 140 km^2), sem nær 900 m hæð (nefnd eftir

norska landkönnuðinum og landmælingamanninum Gunnari Isachsen (1868–1939). Á Vestur-Svalbarða, þar sem gætir mildra og rakra suðlægra strauma í hafi og lofti, eru hjarnmörk að jafnaði í 400 m hæð, en rísa í 500–600 m, þegar fjær dregur frá ströndinni.

Hitastig var mælt í snjógryfjum frá yfirborði niður á 15 m dýpi, hitamælar skildir eftir í snjónum og fylgst með því, hvernig frost hvarf úr honum fyrir sumarlok. Sverdrup benti hins vegar á, að frost gæti verið í jökulsporðinum, af því að varmaleiðing næði ekki að eyða frosti úr ísnum. Jökullinn gæti því verið „sub-polar“.

Afkoma jöklanna var neikvæð, Fjórtaðajúljökull tapaði að jafnaði á yfirborði um $0,26 \text{ cm/ár}$ ($34 \times 10^6 \text{ m}^3$, ákoma $79 \times 10^6 \text{ m}^3$, en leysing $113 \times 10^6 \text{ m}^3$); auk þess kelfdi hann í sjó fram. Á safnsvæði Isachsenbreiðunnar var afkoman hins vegar um $+20 \text{ cm/ár}$.

Í leiðangrinum mældi Sverdrup (1935a,b,c; 1936a,b) lofthita, raka og vindhraða í mismunandi hæð yfir jöklinum og beitti fyrstur manna lögmálum eðlisfræði til þess að meta orkustrauma frá hlýju og röku lofti, sem streymdi yfir jökulinn. Annars vegar skynvarma og hins vegar dulvarma, sem losnar úr læðingi, þegar rakt loft kólnar, svo að vatnsgufa þéttist á yfirborði jökulsins. Þannig endurbætti Sverdrup tölfræðilegt líkan Ångströms frá 1931 við mat á varma, sem jökull fengi frá loftstraumum. Sverdrup taldi, að neðst á Fjórtaðajúljökli ($79^{\circ} 07'N$, $12^{\circ} 00'A$) væri rúmur helmingur (60%) leysingar vegna varma frá lofti, en tæpur helmingur af heildarleysingunni, þegar kæmi upp á Isachsens-ísbreiðuna.



5. mynd. Þátttakendur í Sænsk-íslenska Vatnajökulsleiðangrinum 1936. Hans Ahlmann og Jón Eyþórsson (1895–1968), Sigurður Þórarinnsson (1912–1983), Carl Mannerfelt (1913–2009). – *Collaborators in the Swedish-Icelandic Vatnajökull expedition 1936. Hans Ahlmann and Jón Eythorsson, Sigurður Þórarinnsson, Carl Mannerfelt.*

Leiðangur á Vatnajökul 1936

Á árunum 1936–1938 var farinn sænsk-íslenskur leiðangur á Vatnajökul undir stjórn Hans Ahlmanns og Jóns Eyþórssonar (1895–1968), veðurfræðings, en með í för voru stúdentar Ahlmanns, Sigurður Þórarinnsson (1912–1983) og Carl Mannerfelt (1913–2009), (5. mynd); (Ahlmann, Thorarinsson, 1937, 1938, 1939, 1940, 1943a; Ahlmann, Thorarinsson, 1943b). Meginmarkmið leiðangurins var að kanna jökla í haf-rænu loftslagi sem væri gerólfíkt heimskaualoftslagi. Öskulag frá Grímsvatnagosinu vorið 1934 lá grafið í jöklinum, og því var auðvelt að meta snjósöfnun, frá því að það féll. Fram á níunda áratug aldarinnar var sænsk-íslenski leiðangurinn mesta jöklarannsóknarverkefni, sem unnið hafði verið að á Íslandi.

Við Ísland mætast kaldir og hlýir straumar, bæði í hafi og lofti. Lægðir á braut yfir Norður-Atlantshaf bera með sér mikla úrkomu, og loftslag er milt. Hlýr Irmingerstraumur umlykur landið, en úr norðri kemur kaldur Austur-Grænlandsstraumur. Syðst á Vatnajökli reyndust bæði snjókoma og leysing með því mesta, sem þekktist á jöklum á jörðinni. Þannig eru aðstæður í úthafsluftslagi á eyju í miðju Norður-Atlantshafi. Mestur snjór féll sunnan við hábungu Vatnajökuls. Á hájöklinum er allt að 4.000 mm ársúrkomu, sem er um tífold úrkomu á jöklum Svalbarða. Neðst á sunnan-

verðum sporðinum bráðnaði ís um sumarið, sem jafngilti 10 m vatnslagi, en að auki 2 m að vetri, því að þar leysti ís alla mánuði ársins. Við þessa 12 m bættust 2.000 mm af regni, svo að alls rann af jökulsporðinum vatn sem samsvaraði um 14.000 mm úrkomu á ári. Það jafngildir afrennsli frá mestu úrkomusvæðum jarðar. Til samanburðar er ársúrkomu á heimskautasvæðum Svalbarða um 500 til 1000 mm á ári.

Nákvæmstu mælingarnar voru gerðar á Hoffellsjökli, daljökli, sem skríður frá hveljökli Vatnajökuls. Afkoma var mæld í þrjú ár, frá 1935–1938, og reyndist í heildina vera neikvæð, enda öll árin hlý. Þó var afkoma jákvæð eitt árið, 1936–1937, vegna óvenju mikillar snjókomu. Í hafrænu loftslagi ræður hitastig miklu um það, hve mikill hluti úrkomu er snjór og þar með því, hver afkoma jökla er. Að meðaltali tapaði jökullinn um 0,3 m/ár af vatni, jafndreift yfir hann allan, en samt hreyfðist hann fram nær 2 m/ár. Svo virkir geta jöklar verið í hafrænu loftslagi, þótt tap sé í afkomu þeirra.

Hjarnmörk við sunnanverðan Vatnajökul voru að jafnaði í um 1.100 m hæð og ársúrkomu þar um 2.000 mm og meðalárshiti um frostmark. Er fjær dregur suður- og suðausturströndinni minnkar úrkomu, og hjarnmörk á jöklum hækka inn til landsins, eru í 1.200–1.300 m á Langjökli, Hofsjökli og norðan-

verðum Vatnajökli en lækka í 900 til 1.100 m hæð við norðurströnd landsins og eru lægst í um 700 m á Vestfjörðum, þar sem gætir kulda og raka frá Norðaustur-Grænlandsstraumi (Ahlmann, Thorarinsson, 1943).

Ein af niðurstöðum sænsk-íslenska leiðangursins var sú, að í hafrænu loftslagi á Vatnajökli væru áhrif varma frá lofti mun meiri en geislunar, vegna þess að suðlægir vindar væru hlýir og rakir. Stuðst var við reynslu frá rannsóknum Ångström á Svalbarða 1931 og 1934, og sólgeislun var metin út frá fræðilegum reikningum á sólgeislun á 64°18'N jarðar og mati á skýjahulu í veðurathugunarstöð á Hólum í Nesjum í Hornafirði. Á Hoffellsjökli var talið, að neðan við 200 m hæð væru 90% leysingar vegna varma frá hlýju og röku lofti, en hlutur loftvarma minnkaði með hæð og væri um helmingur til jafns við geislun í 1.500 m hæð.

Leiðangur til Grænlands 1939–1940

Síðasti leiðangur Ahlmanns, 1939–1940 var á daljökul á Austur-Grænlandi, Frøyajökul (74°25'N, 20°50'V), sem er nær 6 km langur og liggur í 1.300 m til 270 m y.s., um rúma 5 km² að flatarmáli (Ahlmann og fl., 1941, 1942, 1943, 1946). Þar við vestanvert Norður-Atlantshaf ræður kaldur Austur-Grænlandsstraumur miklu um veðurfar. Ársúrkoma er nærri 200 mm og meðalhiti árs um –10°C. Hjarnmörk voru í 800 m hæð. Afkoma jökulsins reyndist um –0,3 m/ár á tímabilinu 1930 til 1940, jafndreift yfir hann allan. Jökullinn hafði greinilega minnkað undanfarna áratugi. Á jöklinum var varmi frá lofti hlutfallslega langstærsti orkuþáttur til leysingar, er leið á sumar. Hlutur sólgeislunar var innan við 10%, enda endurvarpaðist hún að mestu frá hreinum jöklinum (Eriksson, 1942).

Skipulag jöklarannsókna á Suðurskautslandi og á Norðurlöndum

Á árum seinni heimsstyrjaldarinnar safnaði Ahlmann saman gögnum frá rannsóknarferðum sínum á jökla umhverfis Norður-Atlantshaf (Ahlmann, 1948a,b). Árið 1946 stóð hann fyrir því að koma upp rannsóknarstöð í Tarfala í Lapplandi í Norður-Svíþjóð, sem enn starfar. Hvergi er til lengri samfelld mæliröð ársafkomu en á Storglaciären í Tarfala (Holmlund, Karlén, Grudd, 1996). Lengstum stjórnaði prófessor Valter Schytt (1919–1985, 6. mynd) störfum þar.

Einnig vann Ahlmann að undirbúningi leiðangurs Norðmanna, Breta og Svía til Dronning Moud Lands á Suðurskautslandinu, sem farinn var árið 1949 og stóð til 1952 undir stjórn Norðmannsins John Scheldrup Giæver (1901–1970). Sjálfur fór Ahlmann ekki þangað, vegna þess að hann var skipaður sendiherra Svía í Noregi árið 1950 og gegndi þeirri stöðu til starfsloka 1956. Harald Sverdrup kom einnig að undirbúningi þessara rannsókna. Leiðangurinn til Dronning Moud Land var fyrsti vísindaleiðangur til Suðurskautslandsins, þar sem saman unnu fræðimenn frá ýmsum löndum, og var hann fyrirmynd að alþjóðlegri samvinnu um jöklarannsóknir. Fyrir jöklarannsóknum fór Svíinn Valter Schytt, en þar unnu einnig bresku jöklafræðingarnir Brian Birley Roberts (1912–1978) og Charles Swithinbank (1926–2014) og sænski veðurfræðingurinn Gösta Hjalmar Liljequist (1914–1995).

Jöklafræðingarnir lýstu því, hvernig fjallshryggir skildu að einstaka straua ísbreiðunnar og veittu skriði þeirra til sjávar mótstöðu. Þeir könnuðu hreyfingu ísbreiðunnar, úrkomu, og hve hratt snjór varð grófari og eðlismassi óx með dýpi. Með því að mæla hitastig niður á 20 m dýpi í borholum gátu þeir lýst meðalofthita á yfirborði á Suðurskautslandinu. Svo djúpt niður í jökulinn nær varmi að berast með leiðingu á einum vetri, en þar sem ekkert bræðsluvatn hripar niður í snjóinn, sýnir hiti á um 20 m dýpi, hver meðallofthiti er á yfirborði ísbreiðunnar. Fram kom, að hann reyndist víða –50 °C. Ástralinn Gordon de Quetteville Robin (1921–2004) vann að mælingum á ísþykkt með hljóðbylgjum, sem sýndu, að ísbreiða Suðurskautslandsins er mun þykkari en áður var talið. Því var ljóst, að ís bundinn í Suðurskautslandinu réði mestu um hæð sjávarmáls á jörðinni (Schytt, Robin, 1953). Engin ummerki voru um, að yfirborð ísbreiðunnar hefði lækkað á liðnum áratugum, og af því drógu þeir þá ályktun, að ís á Suðurskautslandinu hefði ekki rýrnað á sama hátt og greinilega hafði sést á jökklum á norðurhveli jarðar eftir lok litlu ísaldar.

Ahlmann vann að friðarmálum eftir stríð og hvatti mjög til norrænnar og alþjóðlegrar samvinnu vísindamanna, var forsvarsmaður í alþjóðlegum vísindafélögum, tók þátt í ráðstefnum fræðimanna austan hafs og vestan og var vísindaráðgjafi stjórnvalda í Sví-

þjóð og í Noregi. Hann tók þátt í að skipuleggja heimskautarannsóknir, meðal annars við heimskaustofnun Norðmanna ásamt vini sínum, Harald Sverdrup. Hann benti á mikilvægi heimskautarannsókna og loftslagsrannsókna fyrir lífríki, sjávarútveg og siglingaleiðir, sem opnuðust vegna hlýnunar á norðurhveli. Þar var hann á undan samtíð sinni, en nú eru norðurslóðamál aftur orðin mikilvæg vegna hlýnunar jarðar. Ahlmann samdi margar fræðigreinar fyrir almenning í tímarit og blöð. Í rannsóknarferðum sínum til margra landa hvatti hann mjög til samvinnu við heimamenn. Hann var forseti Alþjóðasamtaka landfræðinga (International Geographical Union) á árunum 1956 til 1960. Ahlmann hlaut margs konar heiðursviðurkenningar frá vísindafélögum.

Meginniðurstöður rannsóknarleiðangra Ahlmanns

Framlag Ahlmanns og samstarfsmanna til jöklarannsókna var margþætt. Þeir lýstu jöklum umhverfis Norður-Atlantshaf og drógu upp hæð hjarnmarka, gerðu grein fyrir sameiginlegum eiginleikum jökla, hvernig snjór breytist í jökulís og berst frá safnsvæði fram á jökulsporð. Þeir mátu breytingar á stærð jökla, frá hámarki þeirra á litlu ísöld og síðan frá ári til árs. Flestir höfðu jöklarnir hopað og þynnst, frá því að reglubundnar jökulsporðamælingar hófust á níunda áratugi 19. aldar og í takt við meginrætti breytinga í lofthita. Ahlmann setti fram kerfisbundna aðferð til þess að meta afkomu jökla, með því að mæla breytingar í rúmmáli þeirra vor og haust. Leiðangrar Ahlmanns á þriðja og fjórða áratugi 20. aldar sýndu, að tap var í afkomu allra mældra jökla umhverfis Norður-Atlantshaf. Fyrst og fremst hefði hlýnað að hausti og vori, snjór bráðnaði fyrr að vori og hann féll síðar að hausti, leysingartími jöklanna lengdist, bráðnun jökst, afkoma jökla rýnaði, og þeir hopuðu.

Áhrifa þessarar hlýnunar hefði gætt mest í þiðjöklum og á sub-arktískum svæðum, því að þeir jöklar væru nærri bræðslumarki íss (á tempruðum svæðum jarðar), en á norðlægustu slóðunum var hitastig í jöklum langt undir frostmarki, svo að þeir náðu lítið að bráðna, þótt hlýnaði í lofti. Hafís hvarf að sumri við strendur Evrasíu og Alaska. Sjór hlýnaði.

Árið 1940 birti Sigurður Þórarinnsson (Thorarinsson, 1940) yfirlit um rýrnun jökla á þeim svæðum heims, þar sem jöklabreytingar höfðu verið mældar.

Af niðurstöðum mátti ráða, að sjávarmál hefði hækkað um 0,03 mm/ár vegna jöklarýrnunar, en gögn vantaði hins vegar víða frá stærstu ísbreiðum og alveg frá suðurhveli jarðar. Í ljósi þessara niðurstaðna hvatti Ahlmann til enn víðtækari jöklamælinga, einkum á svæðum, þar sem veðurathuganir skorti og óvíst væri, hvort hlýnað hefði. Rýrnun jökla á norðurslóðum benti til þess, að sambærileg jöklarýrnun væri víðar um heim. Auka þyrfti mælingar í Alaska, Himalajafjöllum, jafnvel í Mið-Evrópu, en ekki síst vantaði athuganir á Suðurskautslandinu. Á sama tíma benti jarðeðlisfræðingurinn Beno Gutenberg (1941) á, að sjávarhæðarmælingar víða sýndu, að sjávarborð gæti hafa risið um 1 mm/ár nokkra undanfarna áratugi. Meira en 90% af öllu flatarmáli íss á jörðinni er á Suðurskautslandinu. Af því mætti ætla, að á stærstu ísbreiðum jarðar, Suðurskautslandinu og Grænlandsjökli, hefði orðið óveruleg bráðnun, miðað við það sem mælst hefði á smærri jöklum á norðurhveli á fjórða áratug aldarinnar.

Rýrnun jöklanna á norðurslóðum á árabílinu 1920 til 1940 vitnaði um loftslagsbreytingar, sem Ahlmann og samstarfsmenn hans töldu, að tengdust hægfara breytingum á lofthringrás og flutningi varma með hafstraumum, hlýir og rakir suðlægir loftmassar hefðu borist æ oftar til norðlægra jökla-slóða. Greinar frá Golfstraumi og lægðir á Atlantshafi næðu norðar en þær hefðu gert á litlu ísöld (Ahlmann, 1948b). Jöklafræðingunum virtist jafnframt, að hlýnunin væri bundin við norðurslóðir, því að ekki hefði mælst hlýnun í hitabeltinu.

Varmaskipti við yfirborð jökla og flutningur varma til norðurslóða

Rannsóknir veðurfræðinganna Andreas Ångström og Haralds Sverdrup á orkuskiptum við yfirborð jökla bentu til þess, að varmi frá hlýju og röku lofti, sem færi yfir jöklana, bræddi þá meira en sólargeislu; víða tvöfalt meira (Sverdrup, 1936a,b; Ahlmann, Thorarinsson, 1943; Eriksson, 1942, 1943). Einnig yxi þáttur loftvarma, þegar líður á sumar og dregur úr sólgæislu (þótt minna endurkast vegi það nokkuð upp). Leysing hefði einkum aukist neðst á jöklunum nærri hafi, mun minna, þegar ofar drægi og á hábungum stórra ísbreiða. Áhrif breytinga í loftslagi væru lítil á hæstu hveljöklum. Engin merki voru um,



6. mynd. Þrír veðurfræðingar og jöklafræðingur sem lýstu hlýnun norðurslóða á fjórða áratug 20. aldar: Theodor Hesselberg (1885–1966), Bernt Johannes Birkeland (1879–1955), Sverre Petterssen (1898–1974). Jöklafræðingurinn Valter Schytt (1919–1985). – *Three meteorologists who presented data showing warming of the Northern Hemisphere in the 1930's. The glaciologist Valter Schytt.*

að heildargeislun hefði aukist á norðurslóðum. Þetta töldu þeir styðja þá ályktun, að hækkun sjávarborðs væri að mestu vegna rýrnunar lítilla jökla nærri hafi á norðurhveli, og að ísbreiður Grænlands og Suðurskautslandsins hefðu lagt þar lítið til.

Athuganir í veðurstöðvum á norðurhveli og mælingar á hitastigi, seltu og straumum í hafi sýndu aukinn straum varma til norðurslóða; að sterkir sunnanvindar bæru æ meira hlýja og raka loftmassa til norðlægra slóða, og þar hefðu einkenni úthafsloftslags aukist. Greinar frá Golfstraumi og lægðir á Atlantshafi næðu norðar en þær hefðu gert á litlu ísöld. Norðmennirnir Theodor Hesselberg (1885–1966) og Bernt Johannes Birkeland (1879–1955), (6. mynd), nemendur Vilhelms Bjerknes (1862–1951), sem lagði grunninn að nútíma veðurfræði, bentu einna fyrstir á, að veðurathuganir á Svalbarða og öðrum heimskautasvæðum Noregs frá árunum 1912–1938 sýndu, að hlýnað hefði við Noregshaf á fyrri hluta 20. aldar, raki og úrkoma hefðu aukist, einkum að vetri, þótt þess hafi reyndar nokkuð gætt á öllum árstíðum (Hesselberg, Birkeland, 1940–3). Hlýir suðlægir vindar hefðu aukist og hrært upp í hafi, svo að varmaskipti milli andrúmslofts og sjávar jukust. Svíinn Backa E. Eriksson (1943) lýsti því einnig, hvernig loftþrýstingsmunur hefði aukist að vetri yfir nyrsta hluta Atlantshafs, svo að hert hefði á varmaflutningi með sunnanvindum til norðlægra slóða. Lág-

þrýstingssvæði á Atlantshafi hefðu náð æ meira til norðurslóða. Norðmaðurinn Sverre Petterssen (1898–1974, 6. mynd) bar einnig saman veðurathuganir við Norður-Atlantshaf á árunum 1900–1919 og 1920–1939, og sá samanburður staðfesti, að á þriðja áratug aldarinnar hefði hlýnað og raki aukist á heimskautasvæðum Evrópu (Petterssen, 1949). Á það var reyndar einnig bent, að aukinn straumur hlýs lofts úr suðri til norðurhvels um Norður-Atlantshaf myndi óhjákvæmilega leiða til þess, að annars staðar streymdi loft suður með norðlægum áttum.

Ýmsar tilgátur komu fram um orsakir breytinga í loftslagi. Lengi var spurt, hvort þær tengdust sveiflum í styrk sólarorku, sem bærast til jarðar. Bent var á ellefu ára sveiflur í sólblettum, en þegar nánar var að gáð, sást, að þær gætu aðeins valdið litlum sveiflum í styrk sólgeislunar. Þá gætu breytingar á ríkjandi vindáttum vegna mismunar í hita í hafi og á landi aukið lóðrétta blöndun sjávar, svo að varmaskipti ykust milli hafs og lofts. Af stað gæti farið víxlverkun (keðjuverkun), sem ýtti undir breytingar á lofthringrás og hafstraumum, ýmist magnaði þær eða drægi úr þeim. Allar slíkar sveiflur í veðurfari yrðu að teljast náttúrulegar.

Skammvinnar sveiflur í veðurfari og stærð jökla

Hlýnunin, sem hófst um 1920, náði hámarki á fjórða áratugi aldarinnar, en síðan hélst veður kalt til loka áttunda áratugarins, svo að margir jöklafræðingur fram.

Ahlmann lýsti því svo, að veðurfar hefði sótt aftur til aukinna meginlandseinkenna. Þetta þótti styðja hugmyndir um, að áratugalangar sveiflur gætu verið í loft-hringrás og hafstraumum. Jöklafræðingar urðu tregir til þess að styðja kenningar um varanlega hlýnun andrúmslofts, og að hún væri hafin. Um miðja 20. öld komu jafnvel fram tilgátur um, að komið væri varanlegt kuldaskið. Minnt var á, að samkvæmt útreikningum serbneska stærðfræðingsins Milutins Milan-kovitch, hefði dregið úr styrk sólgeislunar til jarðar síðastliðin 7.000 ár, og vænta mætti kaldara veðurfars á norðurhveli jarðar á næstu öldum.

En sú kuldatíð, sem hófst eftir 1940, stóð ekki lengur en til loka áttunda áratugarins, því þá tók að hlýna á ný. Nú telja veðurfræðingar, að kólnun andrúmslofts á fimmta áratugi 20. aldarinnar hafi stafað af mikilli mengun andrúmslofts vegna aukins iðnaðar um og eftir seinni heimsstyrjöld. Sót og aska og örsmáar agnir, ryk í andrúmslofti og súlfatagnir frá bruna kola og annarra lífrænna efna og vegna eldgosa hafi dregið úr styrk sólgeislunar og valdið kólnun andrúmslofts, jafnvel svo að snævi hulið land stækkaði og hafís ykist. Svo næmt sé loftslag jarðar fyrir mengun manna. Gjóska frá eldgosum hefur þó aðeins áhrif á veðurfar í nokkur ár eftir gos og ryk, og sótt falla til jarðar á nokkrum árum. Þegar markvisst tókst að draga úr þeirri loftmengun hefði svo hlýnað á ný.

Torræð viðbrögð jökla við afkomu

Ahlmann og samstarfsmenn töldu vissulega, að sveiflur í stærð og stöðu jökla væru háðar loftslagsbreytingum (Ahlmann, 1948a,b, 1949, 1953; Eriksson, 1943). En margt væri óljóst um tengsl jökla- og loftslagsbreytinga, sem kanna yrði nánar. Bentu þeir á, að nokkrir jöklar hefðu gengið fram, þótt ætla mætti, að afkoma þeirra væri neikvæð. Til skilnings á tengslum jökla- og breytinga í veðurfari töldu þeir að auka þyrfti kerfisbundnar mælingar á afkomu og stöðu jökulsporða. Síðan hefur þekking jöklafræðinga á viðbrögðum jökla við afkomu reyndar aukist mjög.

Eðlisfræðingum hefur verið ljóst allt frá 19. öld, að skilning skorti á, hvernig afkoma á yfirborði jökuls kæmi fram í jökulsporði þeirra. Huga þyrfti að því, að jöklar hreyfast mishratt frá einum árstíma til ann-

ars, hraði þeirra breytist með dýpi, og þeir geta runnið fram eftir botni. Tíma tæki fyrir afkomu á safnsvæðum að berast fram að jökulsporði, og væntanlega flyttist afkoman fram í bylgjum. Um miðja 20. öld hafði eðlisfræðingum tekist allvel að beita affræði, efnisfræði og straumfræði til þess að lýsa hreyfingu jökla við aflögun íss og skrið eftir botni (Nye, 1952, 1959; Glen, 1955; Weertman, 1958). Líkön komu fram, sem lýstu hreyfingu og viðbrögðum jökla við breytingum í afkomu, og bentu þau til þess, að tekið gæti is á safnsvæðum jökla áratugi að berast niður að jökulsporðum, jafnvel hundruð ára á stærstu ísbreiðum jarðar. Með tölfræðilegum útreikningum í öflugum tölum hermdu flæðilíkönin eftir breytingum í stærð og lögun jöklanna. Síðan hafa jöklafræðingar annars vegar beitt líkanreikningum til þess að lýsa loftslagi fyrir á tíð út frá þekktum jöklabreytingum og hins vegar metið sennilegar jöklabreytingar út frá spám um líklegar breytingar í veðurfari á komandi tímum. Einnig varð jöklafræðingum ljóst, að hreyfing jökla gæti orðið óstöðug og þeir skyndilega hlaupið fram eftir sleipum botni, án þess að séð væri, að það tengdist loftslagsbreytingum.

Lokaorð

Jökla- og veðurfræðingar bentu á staðreyndir um hlýnun loftslags á norðurslóðum, en settu ekki fram orsakaskýringar. Þó hölluðust þeir að því, að orsakirnar væru ekki af mannavöldum heldur náttúrulegar og enn torskildar. Ahlmann hvatti til gagnaöflunar og kerfisbundinna mælinga á jökklum og veðri, trúr stefnu frumherjanna, að með mælingum og lýsingu á sögu náttúrunnar fengist skilningur á loftslagsbreytingum. Þessir menn voru raunhyggjumenn (empiristar), sem töldu, að skilningur á náttúrunni næðist með því að auka reynslu sína af henni á þann hátt, sem fæst með því að safnað sé gögnum um hana, þau greind og settar fram og prófaðar tilgátur og dregnar ályktanir, sem allt hljómar kunnuglega nú til dags. Og nútímaskilningur á hnattrænum loftslagsbreytingum kom fyrst fram, þegar farið var að beita rökhyggju (skynsemishyggju, rationalisma) auk fyrri raunhyggju og bent var á að innsæi í eðli náttúrunnar þyrfti til skilnings á loftslagsbreytingunum. Sú saga yrði efnisgreinar.

Pakkir

Höfundur þakkar Ólafi Grími Björnssyni og Sveinbirni Björnssyni fyrir yfirlestur greinarinnar og gagnlegar ábendingar um efni og málfar.

Summary: Glaciological studies of Hans Ahlmann and his collaborators in the early 20th century.

The Swedish geomorphologist Hans W: son Ahlmann (1889–1974) was a pioneer in introducing systematic mass balance measurements of glaciers to specify climatic conditions for their existence and in applying such information to describe climatic variations. His methodology has since then been a significant part of glaciology. Ahlmann was a product of the 19th century school of Swedish Quaternary geologists, a student of the stratigraphist Professor Gerald de Geer (1859–1943) who advanced the annual glacial clay varve-chronology for the last deglaciation in Nordic countries and Professor Otto Torell (1828–1900), the pioneer in glacial geology who developed the ice age theory and convinced fellow geologists about its validity. Moreover, Torell initiated geological expeditions to arctic regions. Ahlmann was stimulated by the pioneers in geoscience like Charles Lyell (1794–1875) and Alexander von Humboldt (1769–1859) that considered studies of the present nature to be the key to the past.

Ahlmann began his carrier as a geomorphologist studying landforms shaped by glaciers in Sweden and Norway but gradually became a glaciologist, focusing on the physical characteristics of glaciers: accumulation, ablation, firn line elevation, meltwater runoff, ice flow, temperature, and the processes transforming snow to firn and solid ice. Further, he proposed a classification of glaciers according to their temperature, into polar (cold), sub-polar and temperate. Moreover, he categorised glaciers according to their size and shape into ice sheets, ice caps, valley glaciers and cirque glaciers.

Ahlmann started his glaciological work on the valley glacier Styggedalsbreen in Jötunheimen in Norway and led several expeditions to glaciers around the North-Atlantic Ocean, to arctic Svalbard in 1931 and 1934 and Eastern Greenland in 1939 and to the

maritime Vatnajökull in Iceland (1936). His expeditions explored the mass balance of glaciers around the North-Atlantic and the elevation of the firn line, which varied from 100 m in the Arctic to 1100 m in maritime Vatnajökull. Further Ahlmann initiated and planned an expedition to Antarctica in 1952, the first one conducted as an international collaboration of scientists. In 1946, Ahlmann took the initiative to establish a research station in Tarfala in Lappland in Norther-Sweden which is still in operation. Stor-glaciaren in Tarfala has the longest continuous record of annual mass balance.

From their measurements, Ahlmann and his team concluded that the mass balance for all the observed glaciers was negative and that they had been losing mass for decades. The climate had become warmer in the northern hemisphere during the first decades of the 20th century, and this had had most impact on temperate and sub-polar glaciers that were close to 0°C. In the northernmost arctic glaciers, temperatures were far below melting point, so they did not melt much even though they became slightly warmer. The mass balance of the large cold ice caps of Greenland and Antarctica had not changed significantly. In 1940, Sigurdur Thorarinsson (1912–1983), then a student of Ahlmann's, published an overview of available glacier change measurements and concluded that the global sea level might have risen by 0.03 mm/yr. over the last decades.

The smaller low-lying glaciers had become increasingly maritime, their melting had increased but winter precipitation had not decreased. The autumns and springs became warmer, snow melted earlier in spring and fell later during autumn, so the melting season was longer, the mass balance had decreased, and the glaciers retreated. Melting had mainly increased at the lowest elevations of glaciers close to the ocean but diminished with altitude on the domes of the larger ice caps. Ahlmann and his collaborators concluded that a rise in sea level would mainly be due shrinking small glaciers located close to the ocean in the northern hemisphere and large the ice fields of Greenland and Antarctica would not have contributed much to sea level rise.

The meteorologists Anders Ångström (1888–1981), Backa Eriksson (1905–1958) and Harald Sverdrup (1888–1957) estimated the energy fluxes melting the glaciers. Ångström measured the solar radiation and Sverdrup derived heat flux from the atmosphere by measuring the vertical gradients of wind, temperature, and humidity with elevation in the atmospheric boundary layer over the glaciers. The heat from warm and humid air that blew over the glaciers melted more than solar radiation, in many cases two times faster. The relative contribution of warm and humid air increased during the summer as solar radiation was reduced, even though albedo decreased. They concluded that at the lower elevations of the glaciers, latent and sensible heat was the main energy component causing the melting of the glaciers, however this contribution decreased with elevation. The impact of climatic fluctuations was small on the highest ice caps. There was no indication of higher total radiation in the northern hemisphere. The three meteorologists also examined the general atmospheric circulation in the northern hemisphere. Eriksson described the large-scale atmospheric circulation and compared the meteorological observations with the climatological records available from Svalbard (back to about 1920). Theodor Hesselberg (1885–1966), Bernt Johannes Birkeland (1879–1955) and Sverre Pettersen (1898–1974) revealed from meteorological of the first decades of the 20th century that warming was taking place over the Norwegian Ocean, warm southerly winds had increased heat transport, as well as humidity and precipitation, mainly during the winter, although it had taken place in all seasons. Warm and humid southerly winds had amplified the vertical circulation in the ocean increasing heat exchange between the atmosphere and the ocean. Branches from the Gulfstream and low-pressure depressions in the Atlantic reached further north than they had done during the Little Ice Age.

The warming in the northern hemisphere from 1920 to 1940 indicated climate warming which Ahlmann and his collaborators considered connected to slow changes in air circulation and transport of heat by ocean currents, warm and humid southerly air masses had been transported further to northern

regions. The glaciologists thought the warming was limited to northern regions because it had not been observed in the tropics.

The researchers of glaciology and meteorology, mentioned above, described facts about the warming of the Arctic and shrinking glaciers. They did not advance theories about the causes of the warming but considered them to be natural, not man-made. Faithful to the realistic (empirical) pioneers in geoscience, they advocated that further collection of data and recordings of geological processes would lead to a definitive understanding of nature. Nonetheless they were familiar with the suggestions that warming might be due to increased concentrations of greenhouse gases in the atmosphere, which we now know forced climate change, but they considered these ideas questionable. Hence, present understanding of climate change was first advanced by scientists who applied rationalism together with realism to obtain insight into processes of the nature of climate change.

HEIMILDIR

- Ahlmann, H. W: son 1919. Geomorphological Studies in Norway. *Geografiska Annaler* 1, 1–148, 193–252.
- Ahlmann, H. W: son 1922. Glaciers in Jotunheim and Their Physiography. *Geografiska Annaler* 4, 1–57.
- Ahlmann, H. W: son 1923. Physico-geographical research in the Horung Massif, Jotunheim: The Recrystallization of Snow into Firn and the Glaciation of the Latter. *Geografiska Annaler* 5, 51–58.
- Ahlmann, H. W: son 1927. Physico-geographical research in the Horung Massif, Jotunheim. *Geografiska Annaler* 9, 9–66.
- Ahlmann, H. W: son and J. Eythorsson 1927. Introductory survey of the temperature conditions in the Hornung massif during the summers of 1923–1926. *Geografiska Annaler* 9, 9–66.
- Ahlmann, H. W: son 1928. The Flow of the Ice of the Styggedal Glacier. *Geografiska Annaler* 10, 339–371.
- Ahlmann, H. W: son 1935b. Contribution to the physics of glaciers. *Geographical Journal* 86, 2, 97–113.
- Ahlmann, H. W: son 1940. The Styggedal Glacier in Jotunheim, Norway. Its Regime, Its Variations in Size and Their Climatological Causes, and Some General Remarks on These. *Geografiska Annaler* 22, 95–130.

- Ahlmann, H. W: son, B. E. Eriksson, A. Ångström, J. E. Fjeldstad, L. Rosenbaum, O. Kulling, H. Mosby and P. F. Scholander 1933, 1934, 1936. Scientific Results of the Swedish-Norwegian Arctic Expedition in the Summer of 1931. *Geografiska Annaler* 1933, 15, 1–216, 261–348; – 1934 16, 161–254; – 1936, 1, 1–33.
- Ahlmann, H. W: son, H. U. Sverdrup and H. Olsson 1935, 1936. Scientific Results of the Norwegian-Swedish Spitsbergen Expedition in 1934. *Geografiska Annaler* 1935, 17, 22–88, 145–218; – 1936, 34–73, 225–244.
- Ahlmann, H. W: son and S. Thorarinsson 1937–1943. Vatnajökull, Scientific Results of the Swedish-Icelandic Investigations 1936–37–38. *Geografiska Annaler* 1937, 19, 146–231; –1938, 20, 171–233; – 1939, 21, 39–66, 171–242; – 1940, 188–205; – 1943a, 25, 1–54.
- Ahlmann, H. W: son and S. Thorarinsson 1943. Vatnajökull. Scientific Results of the Swedish-Icelandic Investigations 1936–37–38. *Geografiska Annaler* ES-SELTE, Stockholm, 306 p.
- Ahlmann H. W: son, B. E. Eriksson and N. E. Odell 1941, 1942, 1943, 1946. Studies in North-East Greenland. *Geografiska Annaler* 1939–1940. –1941, 23, 145–209; –1942, 24, 1–50; –1946 28, 227–257.
- Ahlmann, H. W: son 1948a. Glaciological research on the North Atlantic coasts. *London. Royal Geographical Society*, Series, No. 1, 83 pp.
- Ahlmann, H. W: son 1948b. The present climatic fluctuation. *The Geographical Journal* 112, 165–193.
- Ahlmann, H. W: son 1949. The contribution of polar expeditions to the science of glaciology. *Polar Record* 5, 324–331.
- Ahlmann, H. W: son 1953. Glacier variations and climatic fluctuations. *Bowman memorial lectures. The American Geographical Society*, New York, 51 pp.
- Ångström, A. 1933. On the dependence of ablation on air Temperature, radiation and wind. Scientific results of the Swedish-Norwegian Arctic Expedition in 1931. *Geografiska Annaler* 15, 264–295.
- Björnsson, H. 2009. *Jöklar á Íslandi*. Opna (Mál og Menning), Reykjavík, 479 bls.
- Eriksson, B. E. 1942. Meteorological records and the ablation on the Fröya Glacier in relation to radiation and meteorological conditions. *Geografiska Annaler* 24, 23–50.
- Eriksson, B. E. 1943. Till kännedom om den nutida klimatändringen inom omradena kring nordligaste Atlanten. *Geografiska Annaler* 25, 170–201.
- Forel, F.-A. 1895. Les variations périodiques des glaciers. Discours préliminaire. *Archives des sciences physiques et naturelles*, Genève, XXXN, 209–29
- Finsterwalder, S. 1907. Die Theorie der Gletscherschwankungen. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 2, 2, 81–103.
- De Geer, B. 1912. A geochronology of the last 12,000 years. *International Geological Congress. 11th, Stockholm, 1910*. Compte rendu de la XI: e session du Congrès géologique international. C. R. 241–253. Stockholm, Kungl. boktryckeriet, P. A. Norstedt & söner.
- Glen, J. W. 1955. The creep of polycrystalline ice. *Proceedings of the Royal Society A*, 228, Issue 1175, 519–538.
- Gutenberg, B. 1941. Changes in sea level, post-glacial uplift and mobility of the Earth's interior. *Geological Soc. Am. Bull.* 52, 721–772.
- Hamberg, A. 1930. Anleitung zur Messung der periodischen Grössenveränderungen der Gletscher. *Geografiska Annaler* 12, 125–129. 1930.
- Hamberg, A., C. Rabot and P.-L. Mercanton 1930. *Commission des Glaciers: Rapport sur les variations de longueur des glaciers de 1913 à 1928* (Chaîne des Alpes; Scandinavie), IASH Publ. No. 14.
- Helland, A. 1882. Om Islands jökler og om jøkelelvenes vandmængde og slamgehalt. *Kristiania, Extract from Archiv for Matematik og Naturvidenskab* 7. 200–232.
- Helland, A. 1883. Islændingen Sveinn Pálsson's Beskrivelser af Islandske Vulkaner og Bræer; Meddelte av Amund Helland. *Den norske Turistforeningens Årbog for 1882*, 19–79.
- Hesselberg, T. and K. Birkeland 1940–43. Säkulare schwankungen des klima von Norwegen. Teil 1 Die Lufttemperatur; Teil 2. Der Nederschlag; Teil 3. Luftdruck und Wind. *Geofysiske Publikasjoner (Geophysics Norvegica)*. 14, 4–6.
- Holmlund, P., W. Karlén and H. Grudd 1996. Fifty years of mass balance and glacier front observations at the Tarfala Research Station. *Geografiska Annaler Series A*, 79, 2–3, 105–114.
- Hughes, T. P. and G. Seligman 1939. The Temperature, Melt Water Movement and Density Increase in the Névé of an Alpine Glacier. *Royal Astronomical Society. Monthly Notices*, Geophysical Supplement, 4, 616–647.
- Huss, M., A. Baude, A. Linsbauer, J. Gabbi, G. Kappenberger, U. Steinegger and D. Farinotti 2021. More than a century of direct glacier mass-balance observations on Clariden firn, Switzerland. *J. Glaciology* 67(264), 697–713.

- Lyell, C. 1990–1991. *Principles of Geology*. Chicago. University of Chicago Press.
- Marchi, L. de. 1895. Le variazioni periodiche dei ghiacciai. *Rendiconti Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere* 2, 28, 1018–31.
- Marchi, L. de. 1897. L'attrito interno nel movimento dei ghiacciai. *Rendiconti Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere* 2, 30, 284–303.
- Marchi, L. de. 1911. La propagation des ondes dans les glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde* 5, 3, 207–11.
- Mercaton, P. L. 1905. Forages glaciaires. *Archives de Sciences Physiques et Naturelles, Tom 19*, 367–79.
- Mercaton, P. L. 1916. Vermessungen am Rhonengletscher. *Mensurations au Glacier du Rohne 1874–1915. Geleitet und herausgegeben von der Gletscher-Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* 52, 190 s.
- Nye, J. F. 1952. The mechanics of glacier flow. *J. Glaciology* 2(12), 82–93.
- Nye, J. F. 1959. The motion of ice sheets and glaciers. *J. Glaciology* 3(26), 493–507.
- Ohlsson-Gadde, N. O. A. 1857. *En färd till Island sommaren 1857 efter anteckningar och brev av Nils O: Son Gadde*. Redigering och inledning av Einar Fors Bergström. Efterskrift av Olov Isaksson.
- Ohlsson-Gadde, N. O. A. 1983. *Íslandsferð sumarið 1857. Hörpuútgáfan, Akranes*.
- Perutz, M. F. and G. Seligman 1939. A crystallographic investigation of glacier structure and the mechanism of glacier flow. *Royal Society of London Proceedings Ser. A*, 950, 172, 335–360.
- Perutz, M. F. 1940. Mechanism of Glacier Flow. 1940. *Proceedings of the Physical Society* 52, 132–135.
- Petterssen, S. 1949. Changes in the general circulation associated with the recent climatic variation. *Geografiska Annaler* 31, 212–221.
- Schytt, V. and G. de Q. Robin 1953. The Norwegian–British–Swedish Antarctic Expedition, 1949–52. 1. Summary of the glaciological work: preliminary report, by Valter Schytt. 2. Summary of seismic shooting investigations in Dronning Maud Land, by G. de Q. Robin, *J. Glaciology* 2, 13, 204–2011.
- Seligman, G. 1941. The structure of a temperate glacier. *Geographical J.* 97, 205–317.
- Seligman, G. 1948. Growth of glacier crystals. *Nature* 161, 4091, 485.
- Sundmann, P. O. 1967. *Ingenjör Andréés luftfärd,– (Engineer Andrée’s Flight)*. Norstedts förlag. Stockholm.
- Sverdrup, H. U. 1931. Scientific results of the Andrée expedition. Drift-ice and ice-drift. *Geografiska Annaler* 2/3, 121–40.
- Sverdrup, H. U. 1935a. Varmeutvekslingen mellem en sneflate og luften. *Chr. Michelsens Institutt for Videnskap og Åndsfrihet* vol. 5.
- Sverdrup, H. U. 1935b. Wärmehaushalt der Gletscher auf West-Spitzbergen. *Meteorologische Zeitschrift* 12, 495.
- Sverdrup, H. U. 1935c. Temperaturen i Vest-Spitsbergens breer. *Naturen* 7/8, 239–48.
- Sverdrup, H. U. 1936a. The eddy conductivity of the air over a smooth snow field. Results of the Norwegian-Swedish Spitsbergen expedition in 1934. *Geofysiske Publikasjoner (Geophysica Norvegica)* 11, 7, 5–69.
- Sverdrup, H. U. 1936b. Results of the Meteorological Observations on Isachsen’s Plateau. Scientific Results of the Norwegian-Swedish Spitsbergen expedition in 1934. *Geografiska. Annaler*, 18,1, 34–47.
- Thorarinsson, S. 1940. *Geografiska Annaler* 22, 3–4, 131–159. <https://doi.org/10.2307/519980>
<https://www.jstor.org/stable/51998>
- Tinkler, K. J. 1985, 2020. *A short history of geomorphology*. Routledge, 338 p.
- Weertman, J. 1958. Traveling waves on glaciers. *Union Géodésique en Géophysique Internationale. Association Internationale d’Hydrologie Scientifique. Symposium de Chamonix*. 16–24 Sept. 1958, 162–168.