



Sigurður Reynir Gíslason er vísindamaður við Jarðvísindastofnun Háskólans. Hann er fæddur í Reykjavík 1957. Hann útskrifaðist sem jarðfræðingur frá Háskóla Íslands í júní 1980 og lauk doktorsprófi í jarðefnafræði frá Johns Hopkins háskólanum í Bandaríkjunum 1985. Sigurður og framhaldsnemar hans hafa á undanförunum árum rannsakað efnaskipti vatns, bergs, lofts og lífvera í náttúrunni og á tilraunastofu, með sérstaka áherslu á hringrás kolefnis á jörðinni. Sigurður situr í ritstjórn Chemical Geology, sem er vísindatímarit Evrópusambands jarðefnafræðinga, og hann hefur setið í stjórn sambandsins. Hann var forseti Geochemistry of the Earth's Surface, sem er ein af sjö vinnunefndum Alþjóðasambands jarðefnafræðinga. Alþjóðasambandið hefur veitt honum viðurkenningu fyrir rannsóknir á veðrun basalts og mikilvægi hennar fyrir hringrás kolefnis á jörðinni. Sigurður er formaður vísindaráðs CarbFix, sem er alþjóðlegt vísindaverkefni um bindingu kolefnis í bergi.

Dr. Halldór Björnsson verkefnisstjóri loftslagsrannsókna hjá Veðurstofu Íslands. Mannlíkaminn er að stórum hluta byggður úr kolefnasamböndum. Hringrás kolefnis kemur því við okkur öll. Bókstaflega. Frá upphafi iðnbyltingar hefur aukin losun kolefnasambanda út í lofthjúpin þegar breytt loftslagi á jörðinni. Hversu hratt loftslag mun breytast í framtíðinni ræðst m.a. af kolefnishringrásinni. Skilningur á henni er því mjög mikilvægur til þess að skilja hvernig mannkynið hefur áhrif á lífsskilyrði á jörðinni. Hér er á ferðinni greinargóð bók, skrifuð á aðgengilegu máli, um vísindi sem ekki hefur verið fjallað ítarlega um á íslensku hingað til.

Dr. Jón Örn Bragason, eðlisefnafræðingur hjá Íslenskum orkurannsóknum. Hér er að finna aðgengilegt yfirlit um hringrás kolefnis á jörðinni, frá árdaga til okkar tíma. Það veitir góða innsýn í samleik tillífunar, bruna, veðrunar og bindingar kolefnis, sem nauðsynlegt er að skilja ef bregðast á við gríðarlegri losun mannkyns á kolefni til andrúmsloftsins. Holl lesning öllum og einkum þeim sem móta stefnu og stýra löndum.

Dr. Halldór Ármannsson, jarðefnafræðingur hjá Íslenskum orkurannsóknum. Hver eru örlög og hvert er magn þess kolefnis sem annars vegar er brennt í lífrænum orkugjöfum eða þess sem losnar í eldgosum? Svör við því er að finna í þessari bók. Bókin á erindi til allra.

Dr. Stefán Einarsson, sérfræðingur í umhverfis- og auðlindaráðuneytinu. Hér er yfirgripsmikil þekking sameinuð í einni bók um náttúrulega hringrás kolefnis, áhrif mannsins, milliríkjasamninga um loftslagsmál og um leiðir til að binda kolefni. Bókin veitir innsýn í lykilhætti sem varða loftslag á jörðinni.



Hið íslenska bókmenntafélag



Ólafur Páll Jónsson, *Náttúra, vald og verðmæti*, 2007
 Halldór Björnsson, *Gróðurhúsaáhrif og loftslagsbreytingar*, 2008
 Unnur Birna Karlsdóttir, *Par sem fossarnir falla*, 2010
 Sigurður Reynir Gíslason, *Kolefnishringrásin*, 2012

KOLEFNISHRINGRÁSIN

SIGURÐUR REYNIR GÍSLASON



Mynd á kápu: *Dansinn* eftir franska listmálarann Henri Matisse.
 © Succession H. Matisse

Sigurður Reynir Gíslason

Kolefnishringrásin



HÍÐ ÍSLENSKA BÓKMENNTAFÉLAG

UMHVERFISRIT BÓKMENNTAFÉLAGSINS

Kolefnisbringrásin

© Sigurður Reynir Gíslason 2012

Ritstjóri: Trausti Jónsson

Hið íslenska bókmenntafélag



er sérstakur bakhjarl Umhverfisrita Bókmenntafélagsins.

Þetta rit er styrkt af Bókmenntasjóði
og Náttúruverndarsjóði Pálma Jónssonar.

Mynd á kápu: *Dansinn* eftir Henri Matisse

© Succession H. Matisse

Ljósmynd af höfundi: Kristinn Ingvarsson

Kápugerð og myndir: Marijo Murillo

Umbrot: Egill Baldursson ehf.

Útlitshönnun: Einar Örn Sigurdórsson

Prentun: Leturprent ehf.

Bókin er sett með 11 pt Caslon lettri á 14 pt fæti
og prentuð á Munken Lynx pappír sem
uppfyllir allar kröfur Nordic Swan
umhverfismerkisins.

Bók þessa má ekki afrita með neinum hætti,
svo sem ljósmyndun, prentun, hljóðritun
eða á annan sambærilegan hátt, að
hluta eða í heild, án skriflegs leyfis
höfundar og útgefanda.

ISBN 978-9979-66-303-4

Efni

<i>Formáli</i>	11
1. HRINGRÁS EFNANNA Á JÖRÐINNI	15
2. KOLEFNI	25
3. FERÐASAGA KOLEFNIS Á LANDI	29
4. UNDIRSTAÐA LÍFS Á JÖRÐINNI	35
5. HRINGRÁS LÍFRÆNS KOLEFNIS	39
5.1 Hringrás lífræns kolefnis á landi	39
5.2 Hringrás lífræns kolefnis í sjó	42
5.3 Hin hæga hringrás lífræns kolefnis og súrefnis	46
5.4 Myndun og bruni lífræns eldsneytis (kolefnis)	47
6. HRINGRÁS ÓLÍFRÆNS KOLEFNIS	49
6.1 Ferðalag ólífræns kolefnis á milli sjávar og andrúmslofts	49
6.2 Veðrun bergs og binding koltvíoxíðs í vatni og bergi	56
6.2.1 Helstu bergtegundir á jörðinni og stöðugleiki þeirra	57
6.2.2 Veðrun og rof	59
6.2.3 Binding koltvíoxíðs við veðrun sílíkata	63
6.2.4 Binding koltvíoxíðs við veðrun kalksteins	64
6.2.5 Myndun kalksteins í sjó	65
6.2.5 Hringrás ólífræns kolefnis á jörðinni	66
6.3 Hin hæga hringrás ólífræns kolefnis	69
6.4 Hitastjórnun á jörðinni á jarðfræðilegum tímakvarða	71

6.5	Áhrif loftslags á bindingu kolefnis við veðrun bergs	72
6.5.1	Leysnihraði steinda, glers og bergs	73
6.5.2	Hraði efnaveðrunar og efnarofs	75
6.5.3	Efnarof á Austurlandi	78
6.6	Tenging milli lífrænu hringrásarinnar og hinnar ólífrænu	86
7.	STYRKUR KOLTVÍOXÍÐS Í ANDRÚMS-LOFTI SÍÐUSTU 550 MILLJÓN ÁR	89
8.	ÁHRIF MANNSINS Á KOLEFNIS-HRINGRÁSINA	99
8.1	Saga losunar mannsins á koltvíoxíði til andrúmslofts	101
8.2	Mælingar á styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti	111
8.3	Kolefnisbúskapur andrúmslofts frá iðnbyltingu til ársins 2010	117
8.4	Spár um kolefnisbúskap andrúmslofts næstu milljón árin	121
8.5	Spár um kolefnisbúskap andrúmslofts næstu áratugina	127
9.	LOFTSLAGSSAMNINGURINN. RAMMASAMNINGUR SAMEINUÐU ÞJÓÐANNA UM LOFTSLAGSBREYTINGAR OG KYOTO-BÓKUNIN	139
9.1	Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar	140
9.2	Kyoto-bókunin	141
9.2.1	„Íslenska ákvæðið“ (ákvörðun 14/CP.7)	143
9.2.2	Framtíð Kyoto-bókunarinnar	145
10.	LOSUN ÍSLENDINGA Á GRÓÐURHÚSA-LOFTTEGUNDUM	147
10.1	Losun Íslendinga á gróðurhúsalofttegundum frá árinu 1990 til 2009	149

10.2	Skuldbindingar Íslendinga samkvæmt Kyoto-bókuninni	155
10.3	Spá um losun gróðurhúsalofttegunda Íslendinga frá 2008 til 2050	155
11.	KOLEFNISBÚSKAPUR ÍSLANDS	161
12.	LEIÐIR TIL ÞESS AÐ BINDA KOLEFNI	169
12.1	Binding koltvíoxíðs í sjó	171
12.2	Binding koltvíoxíðs í bergi djúpt í jörðu	177
12.2.1	Hvernig binst koltvíoxíð í jarðlögum?	182
12.2.2	Binding koltvíoxíðs í yfirkrítískum fasa í jarðlögum undir Sleipnissvæðinu í Norðursjó	183
12.2.3	Binding koltvíoxíðs í steindum — stein- renning — djúpt í jörðu á Hellsisheiði	186
12.3	Binding kolefnis í gróðri og jarðvegi	192
12.3.1	Landgræðsla	194
12.3.2	Skógrækt	194
	<i>Eftirmáli</i>	197
	<i>Litmyndir</i>	201
	<i>Efnahvörf</i>	209
	<i>Aftanmálgreinar</i>	215
	<i>Heimildaskrá</i>	239
	<i>Mannanöfn, stadanöfn og atríðisorð</i>	255
	<i>Eftirmáli ritstjóra</i>	269

Bók þessi er tileinkuð:

Foreldrum mínum,

Þórönnu Brynjólfsdóttur og Gísla Brynjólfssyni,

konu minni, Málfríði Klöru Kristiansen,

og börnum mínum,

Önnu Diljá Sigurðardóttur og Birni Jóni Sigurðssyni,

sem öll hafa kennt mér, hvert á sinn hátt,

að meta fegurð náttúrunnar.

Formáli

Kápu þessarar bókar prýðir einhver frægasti hringdans listasögunnar, málaður af franska listmálaranum Henri Matisse í byrjun síðustu aldar. Hraðinn í dansinum er orðinn svo mikill að farið er að strekkjast á handleggjum dansaranna og er einn þeirra við það að losna úr keðjunni. Þetta er táknræn lýsing á kolefnishringrás jarðarinnar. Eftir meira en 100.000 ára dvöl mannsins á jörðinni hefur hann hraðað hluta hringrásarinnar svo mikið, með landnotkun og bruna lífrænna orkugjafa, að farið er að „strekkjast á handleggjunum“. Hröðunin hefur verið mest síðastliðin 50 ár. Styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti er orðinn meiri en hann hefur verið undanfarin 800.000 ár. Loftslag hlýnar vegna gróðurhúsaáhrifa sem koltvíoxíð veldur, úthöfin sýrast og sjávarborð hækkar. Spurningin er einungis hvort hækkun sjávarborðs á þessari öld verður talin í sentimetrum eða metrum.

Jarðarbúar eru nú sjö þúsund milljónir. Um helmingur þeirra býr í borgum og margar borganna eru við sjávarsíðuna. Þessir sjö milljarðar manna nota tæplega 40% þurrlandis jarðar, sem ekki er hulið jökli, til búsetu og ræktunar, og búast má við að fólksfjöldinn verði kominn upp í níu milljarða um miðja þessa öld.¹ Ef loftslags- og sjávarborðsbreytingar leiða til þess að stór hluti þessara níu milljarða þurfi að færa sig um set og breyta um orkugjafa getur það valið glundroða, svo ekki sé meira sagt. Flest bendir til þess veðurfar breytist með þeim afleiðingum að þurru svæðin á jörðinni verði þurrari og röku svæðin rakari, og að aftakaveður og flóð verði algengari. Gangi þetta eftir mun matvælaframleiðsla einnig raskast með ófyrirsjáanlegum afleiðingum.

Orkan og koltvíoxíðið, sem losnar við bruna lífrænna orkugjafa eins og kola og olíu, bast í plöntur fyrir milljónum ára. Þessi orka, sem upprunalega var sólarorka, hefur varðveist í jarðlögum í um 200 milljónir ára að meðaltali. Miðað við bruna þessara orkugjafa undanfarin ár

verða þeir uppnir á innan við 500 árum, og ef ekkert verður gert til þess að binda koltvíoxíðið verður styrkur þess í andrúmslofti hátt í 2000 milljónustu hlutar (ppm) þegar hann verður mestur. Fyrir iðnbyltingu um miðja átjándu öld var styrkurinn um 280 ppm og hafði sveiflast milli hlýskeyða og kuldaskeyða síðustu 800.000 árin, frá um 280 ppm niður í um 180 ppm. Árið 2010 var ársmeðalstyrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti kominn í 390 ppm og fer ört vaxandi. Megnið af koltvíoxíðinu er upprunnið úr jarðlögum og það er mögulegt að koma því þangað aftur eftir bruna lífrænu orkugjafanna, þar sem það getur varðveist í árpúsundir. Á þennan hátt er talið að unnt sé að binda í jarðlögum stóran hluta þess koltvíoxíðs sem losna mun við bruna lífrænna orkugjafa í framtíðinni. Það tekur hins vegar tíma og kostar peninga að þróa aðferðir til þessa, og það verður ekki gert af alvöru nema alþjóðlegir samningar skuldbindi þjóðir heims til að takmarka losun koltvíoxíðs. Takist það, þurfa þjóðir heims að koma sér saman um hver styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti skuli verða í framtíðinni. Það getur reynst erfitt því sumir myndu vilja hafa hann háan og aðrir lágan, allt eftir því hvar þeir búa á jörðinni.

Hringrás kolefnis er flókin, og helsti áhrifavaldurinn í hringrásinni, koltvíoxíð, er ósýnilegur og lyktarlaus. Vestræn iðnríki hafa losað mest af koltvíoxíðinu til andrúmslofts allt frá iðnbyltingu um 1750, en vöxturinn í losuninni er nú mestur í fyrrverandi þróunarlöndum, eins og Kína og Indlandi, sem nú iðnvæðast af kappi. Vegna alls þessa er erfitt að taka á vandanum og hætt er við að það verði um seinan. Það er því mikilvægt að upplýsa almenning, hvar sem er í heiminum, um kolefnishringrásina. Til þessa hefur vantað bók um kolefnishringrásina á íslensku og er tilgangur þessarar bókar að bæta úr brýnni þörf. Í henni er fyrst sagt frá hringrás kolefnis á jörðinni. Hringrásin er rakin eins og hún er nú og aftur í árdaga jarðarinnar. Hringrás kolefnis á Íslandi eru einnig gerð sérstök skil. Áhrifum mannsins á kolefnishringrásina er lýst og hvernig hægt er að bregðast við þeim. Fyrstu kaflar bókarinnar byggja að hluta á erlendum kennslubókum, en seinni kaflarnir mest á nýjum erlendum og íslenskum rannsóknum.

Undanfarin 25 ár hef ég starfað sem vísindamaður við Háskóla Íslands. Á þeim tíma hafa íslenskir og erlendir samstarfsmenn mennt-

að mig, ekki hvað síst framhaldsnemar mínir. Rannsóknir þeirra hafa leitt mig inn á hina ýmsu stigu kolefnishringrásarinnar, oft á tíðum ævintýrlega, og allan þennan tíma hefur fjölskylda mín hvatt mig til dáða. Ég vil loks þakka ritstjóra mínum, Trausta Jónssyni, fyrir hjálpinu; Marijo Murillo fyrir hönnun kápu og mynda; Agli Baldurssyni fyrir endurbætur mynda, atriðisorðaskrá og umbrot bókarinnar; yfirlesurunum Halldóri Ármannssyni, Jóni Erni Bjarnasyni, Stefáni Einarssyni, Halldóri Björnssyni, Ingrid Markan og Pétri Ástvaldsyni fyrir að bæta bókina; Tómasi Jóhannessyni og Páli Einarssyni fyrir yfirlestur kafla um sjávarstöðubreytingar og; Bókmenntasjóði, Náttúruverndarsjóði Pálma Jónssonar og Landsvirkjun fyrir fjárhagslega aðstoð við útgáfuna.

Austurríki og Íslandi 2009–2012
Sigurður Reynir Gíslason

1. kafli

HRINGRÁS EFNANNA Á JÖRÐINNI

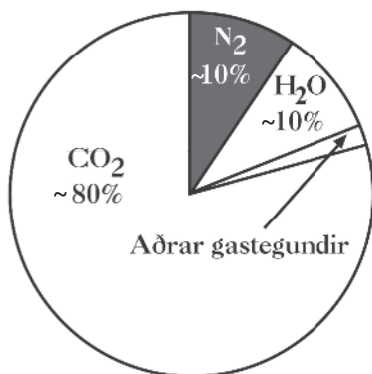
Flest efni í manninum eru ættuð úr bergi. Vatnið sem við drekkum og kolefnið sem við borðum daglega og öndum síðar frá okkur hafa einhvern tíman verið föst í bergi. Efnin á jörðinni ferðast úr einum stað í annan og þau dvelja mislengi á hverjum stað, lengi í bergi og sjó en stutt í lífverum og andrúmslofti. Þörf mannsins fyrir orku og næringu er orðin svo mikil að hann hefur haft áhrif á hringrás margra efna á jörðinni með ófyrirséðum afleiðingum.

Jörðin myndaðist fyrir um 4600 milljónum ára. Þyngri efnin hnigu inn að kjarna í árdaga, en léttari efnin urðu eftir við yfirborð. Gastegundir losnuðu úr bergi við eldgos og mynduðu fyrsta lofthjúpinn um jörðu — andrúmsloftið. Fyrstu 800 milljónir ára í sögu jarðarinnar varð hún fyrir árekstrum fjölda loftsteina, halastjarna og lítilla reikistjarna. Engin ummerki eru lengur um þessa árekstra, því að jarðskorpan er í sífelldri endurnýjun við landrek, en þau eru glögg á tunglinu og sjást með venjulegum sjónaukum. Gígarnir á tunglinu eru taldir hafa myndast við slíka árekstra og þeir eru engin smásmíði. Hæsti tindur á tunglinu er 10.790 m yfir meðalhæð yfirborðs tunglsins, töluvert hærri en hæsti tindur jarðar ef miðað er við sjávarborð hennar.¹ Geimfararnir í Appollo-leiðöngrunum komu með berg úr gígörmum til jarðar og reyndist bergið vera eldra en 3800 milljón ára, og elsta tunglbergið hefur mælst allt að 4460 milljón ára gamalt.² Hafi tunglið orðið fyrir árekstrum loftsteina og halastjarna hefur jörðin einnig

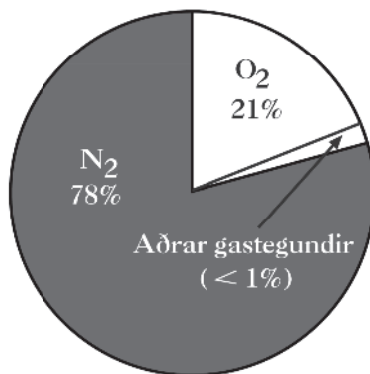
orðið fyrir þeim. Sumir telja meira að segja að tunglið hafi myndast við árekstur reikistjörnu við jörðina. Höggbylgjur frá árekstrum loftsteina og halastjarna losuðu um reikul efni á yfirborði jarðar í árdaga, og hafa líklega að auki flutt inn reikul efni sem hafa gufað upp við árekstrana. Styrkur gastegunda í lofthjúpi jarðarinnar á meðan hún varð fyrir árekstrum loftsteina og halastjarna var frábrugðinn þeim sem er í dag. Ekkert súrefni var í þessum lofthjúpi, því að tillifun frumbjarga lífvera eins og baktería og plantna var ekki hafin. Talið er að koltvíoxíð hafi verið algengasta gastegundin en einnig að nokkuð hafi verið af vatnsgufu og köfnunarefni (mynd 1-1). Koltvíoxíð er eðlisþyngra en köfnunarefni og súrefni, sem nú eru aðalgastegundirnar í andrúmslofti. Loftþrýstingur hefur því verið meiri í árdaga jarðar en nú, e.t.v. tífaldur, og styrkur koltvíoxíðs um 30.000 sinnum meiri en nú. Koltvíoxíðið hefur þá einnig valdið gróðurhúsaáhrifum, rétt eins og nú, og loftslagslíkön benda til að lofthiti hafi verið nálægt 80–90°C.³ Fyrstu úthöfin hafa þó ekki horfið við suðu, m.a. vegna hás loftþrýstings. Hins vegar hefur árekstur loftsteins, sem er 450 km að

Efnasamsetning andrúmslofts

Fyrir 4,6 þúsund milljónum ára



Í dag



Mynd 1-1 Möguleg efnasamsetning andrúmslofts í árdaga jarðarinnar og nú. Styrkur CO₂ í andrúmslofti árið 2010 var 0,039% (Kump o.fl. 1999; Boden og Blasin 2011).

Eftirmáli

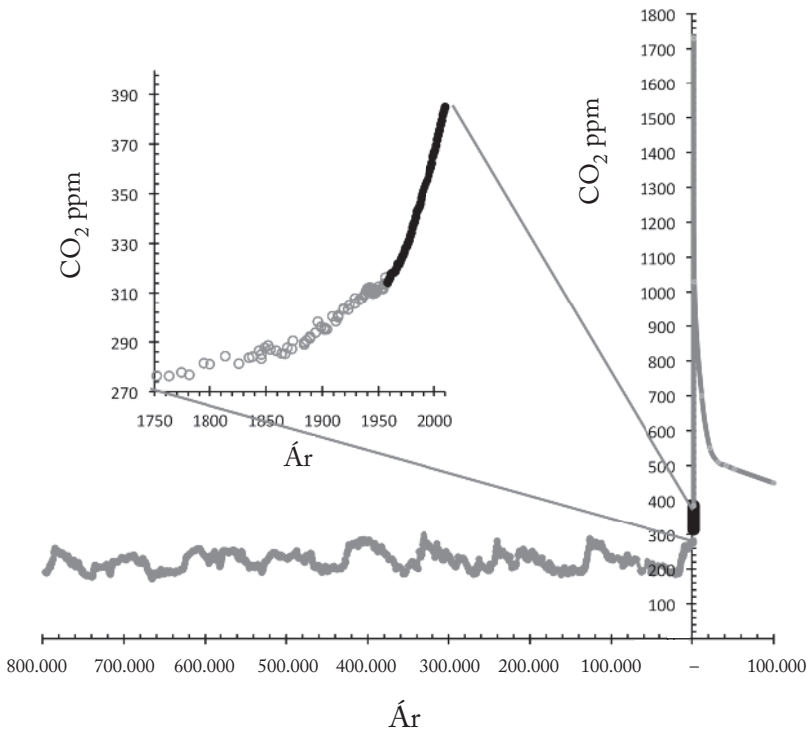
Það er rétt að halda því til haga að ef ekkert koltvíoxíð væri í andrúmslofti væri meðalhiti á jörðinni mínus 18°C en ekki plús 15°C, eins og hann er í dag. Hringrás kolefnis á jörðinni er margslungin, en þrátt fyrir það hafa vísindamenn áætlað styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti frá fornlífsöld til okkar daga, og svo milljón ár fram í tímann. Áður en maðurinn kom til sögunnar, fyrir meira en 100.000 árum, réðist styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti af gagnvirku en hægu samspili loftslags, gróðurs og veðrunar bergs, sem og af landreki og tíðni og stærð eldgosa. Maðurinn byrjaði að hafa áhrif á styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti með því að ryðja skógana, en frá miðri 20. öld hefur brunni lífrænna orkugjafa valdið mestu um styrk aukningu koltvíoxíðs í andrúmslofti. Styrk aukningin sýrir höfin og hækkar lofthita vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa. Hita aukningin veldur hækkuð sjávarborðs, vegna þess að sjórinn þenst út þegar hann hitnar og jöklar á landi bráðna. Ef ekkert verður að gert mun þetta valda byggðaröskun, en mörg þéttbýlustu svæði jarðarinnar eru við sjávarsíðuna.

Það er erfitt að gera sér grein fyrir jarðfræðilegum tímakvarða. Ég hef því á mynd 13-1 dregið saman gögn úr 7. og 8. kafla, um styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti 800.000 ár aftur í tímann og 100.000 fram í tímann. Þetta er í raun síðasta „augnablik“ í jarðsögunni, því að ég sleppi nánast allri 4.600 milljón ára sögunni þar á undan (mynd 1-2 og 7-2). Eftir því sem lengra er horft frá nútíma, aftur og fram í tímann, eykst óvissa um styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti, en beinar mælingar á honum hófust 1957. Nú er fjöldi slíkra mælinga gerður um allan heim, meðal annars á Stórhöfða í Vestmannaeyjum. Í lok hvers árs er gögnunum skeytt saman og opinber tala um meðalstyrk koltvíoxíðs hvers árs er gefin út árið eftir. Frá 1958 og allt að 800.000 ár aftur í tímann er unnt að áætla styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti með því að mæla styrk þess í lofti sem lokast hefur í ís á Suðurskautslandinu. Fyrir

þennan tíma er styrkur koltvíoxíðs áætlaður með reikningum, sem síðan má bera saman við samsætuhlutföll kolefnis í fornum jarðvegi allt að 550 milljón ár aftur í tímann. Ekki er tekið tillit til einstakra atburða eins og risaeldgosa, því hvert reikniskref er ein milljón ára. Mikil óvissa er hinsvegar um hver styrkur koltvíoxíðs var fyrir þann tíma.

Spár um styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti í framtíðinni eru uggvænlegar. Ef við höldum áfram að auka losun þess með bruna lífrænna orkugjafa, og gerum ekkert til að binda koltvíoxíðið, margfaldast styrkur þess í andrúmslofti. Talið er að við og afkomendur okkar brennum alla lífræna orkugjafa á jörðinni á næstu fimm öldum, og mest af þeim á næstu 200 árum. Áætlað er að styrkurinn verði hátt í 2000 ppm eftir 250 ár ef við breytum ekki háttum okkar, en talið er að hiti hækki um 3°C við tvöföldun þess styrks sem var fyrir iðnbyltingu. Það mun síðar taka veðrun bergs um milljón ár að koma styrknum niður í það sem hann áður var. Styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti hefur líklega einnig verið þetta hár á stórum hluta miðlífsaldar og fornlífsaldar (mynd 7-2). Því hafa allar þessar breytingar orðið áður í sögu jarðar; loftslag og sjávarborð hefur breyst og lífverurnar lagað sig smám saman að breyttum aðstæðum — þær sem gátu færðu sig frá sökkvandi strönd og í hentugra loftslag. Breytingarnar sem maðurinn veldur núna eru svo hraðar og miklar (mynd 13-1) að aðlögun lífvera verður erfið. Ef við viljum koma í veg fyrir súrnun sjávar og breytingar á loftslagi og sjávarstöðu verðum við að taka okkur á. Vera sjálfbærari og þróa aðferðir til að binda koltvíoxíð, sem losnar við bruna lífrænna orkugjafa, í a.m.k. þúsund ár. Það verður best gert með því að binda það í bergi.

Hugmyndin að þessari bók kviknaði fyrir rúmlega þremur árum. Ég byrjaði að skrifa hana í skíðapörpinu María Alm í Austurríki í janúar 2009. Ég var þar vikulangt á fundum og notaði kvöldin til að skrifa. Ég var uppfullur af hugmyndum sem ég varð að koma á blað. Ég framlengdi dvölinu og skrifaði af kappi án þess að hafa nokkurt samband heim til Íslands. Mér brá því þegar ég keyrði heim frá Keflavík og sá hvíta borða um allt. Hvað hafði gerst? Jú, búsáhalda- byltingin! Skömmu síðar varð ég af heilsufarsástæðum að hafa hægt



Mynd 13-1 Styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti 800.000 ár aftur í tíma og 100.000 ár fram á við. Styrkur koltvíoxíðs í andrúmslofti frá iðnbyltingu til ársins 2010 er dreginn út á innfellaðu myndinni (Archer 2005; Keeling o.fl. 2012; MacFarling Meure o.fl. 2006; Lüthi o.fl. 2008).

um mig í nokkrar vikur og var þá heima og skrifaði. Þetta var tími breytinga á Íslandi og víða annars staðar. Bókin er því að stærstum hluta skrifuð á útmánuðum 2009. Eftir það fór umtalsverður tími í að sinna framhaldsnemum mínum og bjarga fjárhag kolefnisbindingarverkefnisins CarbFix, sem fjallað var um í 12. kafla. Fjárhagur helstu styrktaraðilanna þrengdist við efnahagshrunið og sumir heltust úr lestinni. Það tók rúm tvö ár að fjármagna verkefnið á ný með styrkjum frá Evrópusambandinu, Bandaríska orkuráðuneytinu, Norrænu ráðherranefndinni, Rannís og Orkuveitu Reykjavíkur. Síðar tóku Eyjafjallajökull, Grímsvötn og Katla að bæra á sér, og má segja að

handritið að þessari bók hafi fylgt mér á ferðum mínum um eldstöðvarnar og á ráðstefnur og fundi um allan heim undanfarin þrjú ár. Ég man t.d. eftir því að hafa gramsað í bakpokanum mínum inni í snjóbil uppi á Eyjafjallajökli í miðju gosi, og hvað kom upp úr pokanum? Jú, auðvitað skrambans handritið! Efnahagshrunið haustið 2008, og sá samdráttur í umsvifum mannsins sem fylgdi í kjölfarið, minnkaði losun koltvíoxíðs til andrúmslofts í eitt ár. Þetta var í raun merkileg tilraun á viðbragðstíma andrúmsloftsins. Staðfestar tölur um losun og styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti fyrir árið 2010 birtust í desember 2011. Af þessum sökum varð ég að endurskrifa hluta bókarinnar, en fyrir vikið varð hún betri og áhugaverðari.

Tilgangur kolefnisbindingarverkefnisins CarbFix, sem minnst var á hér að framan, er að þróa iðnaðarferli til bindingar koltvíoxíðs í bergi í þúsundir ára og þjálfu unga vísindamenn til þess að þekkingin berist hratt til komandi kynslóða. Verkefnið hefur gengið misvel undanfarin ár. Fyrstu árin voru ævintýrleg, því með hjálp forseta Íslands, sem er einn af frumkvöðlum verkefnisins, komumst við í kynni við og kynntum verkefni okkar fyrir fjölda einstaklinga, fjölmiðla og rannsóknarstofnana. Hópur vísindamanna verkfræðinga og tólf framhaldsnemar hafa komið að því með tilraunum á rannsóknarstofu, þróun reiknilíkana, mælingum á Helligheiði, smíði háþrýstibúnaðar til mælinga á rannsóknarstofu og mælinga í borholum djúpt í jörðu, og loks með rannsóknum á náttúrulegum hliðstæðum. Flestir nemanna eru doktorsnemar við Háskóla Íslands og þrír þeirra eru Íslendingar. Nú eru tveir meistaranemar og fjórir doktorsnemar útskrifaðir. Við erum búin að hanna og smíða niðurdælingarbúnað og fyrstu tilraunir eru hafnar á Helligheiðinni — við sjáum hvað setur.

Reykjavík á útmánuðum 2012.
Sigurður Reynir Gíslason