

KRISTAPS LAMSTERS

MŪSDIENU LEDĀJI



KRISTAPS LAMSTERS

MŪSDIENU LEDĀJI

LU Akadēmiskais apgāds

UDK 551
La384

Kristaps Lamsters. *Mūsdienu ledāji*. Rīga: Latvijas Universitātes Akadēmiskais apgāds, 2021. 264 lpp.



NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Grāmata “Mūsdienu ledāji” izstrādāta un izdota K. Lamstera pētniecības projektā saskaņā ar pieteikumu “Zemledāja un ledāja malas veidojumu un procesu salīdzinājums Skandināvijas ledus vairoga dienvidu sektora ārējā zonā un mūsdienu ledājos Grenlandē, Islandē un Antarktīkā”, Nr. 1.1.1.2/VIAA/1/16/118, kas tiek finansēts no specifiskā atbalsta mērķa 1.1.1.2. pasākuma “Pēcdoktorantūras pētniecības atbalsts” ERAF projekta 1.1.1.2/16/1/001.



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE

Monogrāfija apstiprināta izdošanai Latvijas Universitātes Eksakto, dabas un dzīvības zinātņu padomes sēdē 2020. gada 4. novembrī (protokols Nr. 8).

Recenzenti:

Vitālijs Zelčs, *Dr. geol.*, emer. prof., Latvijas Universitāte
Juris Soms, *Dr. geol.*, asoc. prof., Daugavpils Universitāte
Jānis Karušs, *Dr. geol.*, doc., Latvijas Universitāte

Paldies kolēģiem un draugiem – Inesei Grīnbaumai, Jurijam Ješkinam, Editai Kalinskai, Ievai Kalkai, Jānim Karušam, Mārim Krievānam, Reinim PāvilamĶ, Agnim Rečam, Ireneušam Sobotam, Normundam Stivriņam, Ivanam Oleičenko, Dmitrijam Poršņovam – par fotogrāfijām un attēliem.

Paldies valodniekam, tulkam un tulkotājam Denam Dimiņam par islandiešu vietvārdu atveidi latviešu valodā.

Vāka attēlā grāmatas autors uz Grenlandes ledus vairoga. Foto: Reinis Pāvils, 2016.

Redaktore Ieva Zarāne
Kopsavilkumu angļu valodā rediģējusi Andra Damberga
Vāka dizainu un maketu veidojusi Baiba Lazdiņa

© Kristaps Lamsters, 2021
© Latvijas Universitāte, 2021

ISBN 978-9934-18-662-2 (PDF)

SATURS

Priekšvārds	5
1. NODAĻA	
Ieskats ledāju attīstībā, uzbūvē un dinamikā	7
Ledāju veidošanās	7
Ledāju klasifikācija	11
Ledāju plūsma un deformācija	21
Ledāju termika	30
Ledāju hidroloģija	33
2. NODAĻA	
Ledāji pagātnē un to veidošanās cēloņi	49
Leduslaikmeti	49
Glaciālās teorijas attīstība	52
Leduslaikmetu cēloņi	54
3. NODAĻA	
Mūsdienu ledāju raksturojums	61
Arktikas salu ledāji	65
Skandināvijas pussalas ledāji	83
Centrāleiropas ledāji	86
Centrālāzijas un Ziemeļāzijas ledāji	88
Āfrikas ledāji	90
Jaungvinejas ledāji	92
Jaunzēlandes ledāji	92
Dienvidamerikas ledāji	95
Ziemeļamerikas ledāji	97
4. NODAĻA	
Mūsdienu ledus vairogu raksturojums	100
Grenlande	100
Antarktika	111
5. NODAĻA	
Ledāji ārpus Zemes	140
Marsa ledāji	146
Ūdens uz Marsa pagātnē	150

6. NODAĻA	
Nozīmīgākie mūsdienu ledus vairogu atklājēji un pētnieki	153
7. NODAĻA	
Latvijas zinātnieku mūsdienu ledāju pētījumi	167
Islande – 2014	167
Islande – 2015	174
Grenlande – 2016	180
Islande – 2017	192
Antarktika – 2018	198
Islande – 2018	223
Svalbāra – 2019	230
Kopsavilkums	250
Summary	251
Izmantotie saīsinājumi	252
Svarīgāko lietoto terminu skaidrojums	253
Literatūras saraksts	257

PRIEKŠVārds

Mūsdienās ledāji aizņem gandrīz 10% no Zemes sauszemes platības, bet pēdējā vēlā pleistocēna apledošanas maksimālās izplatības laikā pirms aptuveni 20 000 gadu tie aizņēma gandrīz 30% platības. Fenoskandijas ledus vairogs pārklāja visu Ziemeļeiropu, tai skaitā arī Latviju, bet Laurentīdu ledus vairogu komplekss aizņēma 60% Ziemeļamerikas. Šo segledāju darbības sekas visā plašajā to izplatības teritorijā ir novērojamas vēl šodien. Pēdējā ledāja atstātie veidojumi dominē Latvijas ainavā un sniedz liecības par tā darbību. Savukārt vairāk nekā 99% mūsdienu ledus masas koncentrēta Grenlandē un Antarktīkās ledus vairogos, tādēļ šiem ledus vairogiem monogrāfijā veltīta pastiprināta uzmanība. Mūsdienu ledus vairogu izpēti ļauj labāk izprast arī seno ledus vairogu veidošanās un atkāpšanās dinamiku, tostarp Latvijā.

Izzūdot senajiem ledus vairogiem, Zeme piedzīvoja dramatiskas vides apstākļu un klimata pārmaiņas, kas vairākkārt pārsniedza mūsdienās novērotās globālās dabas apstākļu svārstības. Tomēr mēs dzīvojam tagadnē, un pēdējo gadu desmitu zinātniskie pētījumi parliecinoši norāda, ka ledāji sarūk arvien straujāk visā pasaulē. Daudzi kalnu ledāji mērenajos un mazajos platuma grādos ir izzuduši pilnībā. Modelēšanas rezultāti paredz, ka šī gadsimta beigās izzudīs lielākā daļa Eiropas

ledāju un būtiski saruks ledāji arī citos pasaules reģionos. Tas radīs traģiskas sekas, jo miljardiem cilvēku gan Himalaju pakājē, gan Islandē un Eiropas Alpu valstīs paļaujas uz ledāju kušanas ūdeņiem, kas ir nozīmīgs dzeramā ūdens, irigācijas, rūpniecības un elektroenerģijas avots. Savukārt Antarktikas un Grenlandes segledāju sarūkšana Pasaules okeānā nogādā vairākus simtus gigatonnu ledus katru gadu, līdz ar to līdz 2100. gadam globālais jūras līmenis var paaugstināties līdz pat 40 cm tikai šo ledus vairogu kušanas dēļ. Kopumā ledus vairogos esošais ūdens var paaugstināt jūras līmeni par aptuveni 65 m, bet jautājumi, cik daudz no tā patiešām nokļūs okeānā un cik drīz tas notiks, ir vieni no būtiskākajiem glacioloģijā.

Ir zināms, ka Antarktikas ledus vairogi sāka veidoties jau pirms 35 miljoniem gadu, kad uz Zemes nemaz nebija iestājies lielais pleistocēna leduslaikmets, un tie ir pārdzīvojuši vairākus desmitus leduslaikmetu un starpleduslaikmetu. Visticamāk, ka mūsdienu ledus vairogi pārdzīvos arī pašreizējo starpleduslaikmetu, lai gan pastāv iespēja, ka ledāju kušanas un ilglaicīgā sasaluma degradācijas izsauktā Zemes dzīlēs iesprostoto gāzu izplūde kopā ar cilvēces radīto siltumnīcefekta gāzu emisiju var šo starpleduslaikmetu būtiski pagarināt.

Mūsdienās zinātniekiem ir pieejams liels apjoms datu no satelītiem un aizvien tiek uzlaboti skaitliskie modeļi, tomēr daudzi ar ledājiem saistītie procesi joprojām ir nepietiekami izzināti. To nosaka tas, ka nokļūšana un pētījumu veikšana mūsdienu ledājos ir visnotaļ sarežģīta. Glaciālā vide ir arī viena no visnepieejamākajām pasaulē, tādēļ pētījumi par iekšledāja un zemledāja veidojumiem balstās uz netiešām, piemēram, ģeofizikālām, metodēm.

Savu ieguldījumu mūsdienu ledāju pētniecībā ir devuši arī Latvijas ģeologi, kuri kopš 2014. gada īstenojuši zinātniskās ekspedīcijas Islandē, Grenlandē, Svalbārā un Antarktikā. Šo ekspedīciju norises un zinātnisko rezultātu izklāsts ir nozīmīga šīs monogrāfijas daļa, un autors cer, ka līdzšinējie pētījumi iedvesmos arī nākamo pētnieku paaudzi Latvijā, nostiprinot polāro pētījumu jomu mūsu valstī.

1. NODAĻA

IESKATS LEDĀJU ATTĪSTĪBĀ, UZBŪVĒ UN DINAMIKĀ

LEDĀJU VEIDOŠANĀS

Ledājus un ar tiem saistītos procesus pēta zinātņu nozare – glacioloģija. Glacioloģija ir zinātne par visiem dabiskā ledus veidiem atmosfērā, hidrosfērā un litosfērā un īpaši par ledājiem, to ietekmēto vidi un procesiem (Lamsters, 2020c). Plašākajā nozīmē glacioloģiju var uzskatīt par sinonīmu krioloģijai, kura ietver visus kriosfēras komponentus, it īpaši atmosfēras, jūras un pazemes ledu. Glacioloģija ir izteikti starpdisciplināra Zemes zinātņu apakšnozare, kuras saskarzinātnes ir glaciālā ģeoloģija, glaciālā ģeomorfoloģija, kvartārģeoloģija, hidroģeoloģija, paleoģeogrāfija, stratigrāfija, fizikālā ģeogrāfija, hidroloģija, klimatoloģija, ģeofizika, ģeoķīmija, bioloģija, ekoloģija un daudzas citas. Glacioloģijai tuvākā nozare ir glaciālā ģeoloģija, kura galvenokārt ietver ledāja erozijas, akumulācijas un deformācijas procesu un to radīto veidojumu pētniecību. Gan mūsdienā, gan pagātnes ledāju jeb glaciālo vidi pēta zinātnieki no visdažādākajām zinātņu nozarēm, jo ledājos atrodamas liecības ne tikai par pašu ledāju attīstību, bet arī par, piemēram, klimata pārmaiņām, vulkānu izvirdumiem, mikroorganismiem un tamlīdzīgi.

Ledāju veidošanās galvenokārt ir saistīta ar sniega uzkrāšanos, ko būtiski ietekmē teritorijas attālums no okeāna, respektīvi, klimata kontinentalitāte *versus* okeāniskums, un novietojums virs jūras līmeņa. Ledāji var veidoties tikai tur, kur sniegs uzkrājas, t. i., saglabājas visu gadu, un tā saglabāšanās apakšējo galējo robežu sauc par sniega līniju. Pakāpeniski sniega pārsļas pārvēršas sniega graudos, savukārt tie – firnā, firnam sablīvējoties vairākos gados, veidojas ledus masa, kura veido ledāja ķermeni. Apgabals, kur ledus masa uzkrājas vairāk nekā nokūst, veido ledāja akumulācijas zonu. Tā atrodas virs sniega līnijas. Ledāja akumulācijas zonas apakšējā robeža aptuveni sakrīt ar teorētisku līniju – ledāja neitrālās bilances līniju. Tā atdala ledāja akumulācijas zonu no ablācijas zonas. Ablācijas zonā ledāja masa pakāpeniski samazinās tā malas virzienā.

Sniega līnijas augstums samazinās ģeogrāfisko polu virzienā, līdz ar ģeogrāfiskā platuma palielināšanos. Tā cēlonis ir gaisa temperatūras pazemināšanās. Piemēram, ekvatora tuvumā sniega līnija atrodas aptuveni 5,5 km augstumā, tādējādi augstāko vulkānu kalderās, piemēram, Kilimandžāro vulkānā, var eksistēt ledāji. Eiropas Alpos sniega līnija atrodas aptuveni 3,5 km augstumā, savukārt Grenlandes ziemeļos un Antarktīkā tā bieži vien ir pat jūras līmenī. Globālā skatījumā ziemeļu puslodē sniega līnija atrodas zemāk nekā dienvidu puslodē, jo ziemeļu puslode, kur sauszeme aizņem salīdzinoši lielāku platību, kopumā absorbē mazāku Saules siltuma daudzumu. Sniega līnija atrodas zemāk pret ziemeļiem vērstajās nogāzēs (1. att.), kuras saņem mazāku Saules radiācijas daudzumu nekā dienvidu ekspozīcijas nogāzes. Lokāli nogāžu ekspozīcija attiecībā pret Sauli būtiski ietekmē sniega līnijas augstumu. Ja nogāze ir ilglaicīgāk Saules apspīdēta, ievērojami palielinās sniega kušana un samazinās ledāja veidošanās iespējamība. Sniega līnijas augstumu būtiski ietekmē arī nokrišņu daudzuma atšķirības. Piemēram, Islandes dienvidaustrumos sniega līnija atrodas 1000 metru augstumā un pat zemāk, savukārt centrālajās kalnienēs tā izvietojas 1400 m virs jūras līmeņa. Šīs atšķirības nosaka izteikti palielinātais nokrišņu daudzums Islandes dienvidaustrumos (Björnsson, 2016).

Galvenie faktori, kas nosaka ledāju veidošanos, ir nokrišņi, temperatūra, ģeogrāfiskais platums jeb ģeogrāfiskā zonalitāte,



1. att. Skats uz Valdemarbrēna ledāja ziemeļu nogāzi Svalbārā. Šajā nogāzē ir izveidojies ledājs, lai gan nogāze ir diezgan stāva. Pretējā nogāzē ledāja nav, un tajā vasaras laikā nokūst viss ziemā uzkrājušais sniegs. Foto: K. Lamsters, 2019.



hipsometriskais novietojums (augstums virs jūras līmeņa), nogāžu ekspozīcija, kontinentalitāte *versus* okeāniskums (azonalitāte). Attiecībā uz nokrišņiem būtisks faktors ir nivometriskais koeficients, ko izsaka gada sniega nokrišņu daudzuma un kopējās nokrišņu summas attiecība. Aazonalitāte saistīta ar teritorijas attālumu no okeāna, respektīvi, no mitruma avota. Kopumā sniega līnijas augstums palielinās līdz ar attālināšanos no mitruma avota. Kalnu reģionos nozīmīgs faktors, kas ietekmē sniega līnijas lokālo izvietojumu, ir vējš, kas var pārpūst sniegu uz aizvēja nogāzēm.

Ledājus galvenokārt ir veidojis ledus, kurš radies sniega pārveidošanās rezultātā, pretēji, piemēram, ledum uz ezeriem un upēm. Sniega transformācija ledū notiek



sablīvēšanās un atkārtotas atkušanas un sasalšanas ciklu rezultātā, kad samazinās ar gaisu pildīto poru tilpums un palielinās sniega blīvums, tam pārveidojoties firnā. Ledāja ledus no firna izveidojas tad, kad gaisa poras vairs nav savstarpēji savienotas. Tādējādi ledāja ledus veidošanās secība ir šāda: sniegs (sniegpārsļāks), graudains sniegs, firns, netīrs ledāja ledus, tīrs (blīvs ledāja ledus). Šādā secībā mainās arī blīvums. Sniega blīvums variē no 50 kg/m^3 svaigam sniegam līdz aptuveni 400 kg/m^3 graudainam sniegam.

Vislielākā nozīme ir tieši firna un ledus blīvumam. Firna blīvumam sasniedzot 830 kg/m^3 , tajā esošās gaisa poras vairs nav savstarpēji savienotas, tādējādi ir izveidojies ledāja ledus, kura blīvums var sasniegt 923 kg/m^3 (Cuffey & Paterson, 2010). Firnā atšķirībā no ledus var notikt gaisa migrācija, tādēļ brīdī, kad firns ir pārveidojies par ledu, tā porās iekapsulētās atmosfēras sastāvs atbilst esošajam brīdim, lai gan pats ledus var būt pat vairākus

2. att. Ledus krāsas izmaiņas plaisā uz Rasela izvadledāja Grenlandē. Plaisas dziļumā samazinās ledus poru tilpums, tādēļ blīvāks ledus vairāk atstaro isākos (zilos) gaismas spektra viļņus.
Foto: R. Pāvils, 2016.

simtus līdz tūkstošus gadu vecs. Piemēram, Antarktīdas centrālajos reģionos firns pārveidojas ledū tikai 100 līdz 160 m dziļumā. Lai tas notiktu, ir jāpaiet pat vairākiem tūkstošiem gadu, jo šis reģions ir polārais tuksnesis, kas saņem niecīgu nokrišņu daudzumu. Kalnu ledājos Eiropā savukārt ledāja ledus var izveidoties jau dažu gadu laikā.

Sniega transformācija ledū ir aukstā metamorfisma process, kura ilgumu nosaka vietējie klimatiskie apstākļi. Vietās, kur sniega kušana ir reta vai nenotiek nekad, principiālie sniega metamorfisma mehānismi ir pārveidošana ar vēju, kristālu savstarpējā pārvietošanās, kristālu formas un izmēra izmaiņas, kristālu iekšējā deformācija.

Pirmā sniega transformācija notiek, sniegpārslām tiekot atkārtoti pārvietotām ar vēju. Tā rezultātā sniegpārslas tiek drupinātas, un tās var tikt ciešāk sablīvētas. Sniega sablīvēšanos ievērojami paātrina tā sublimācija (ledus iztvaikošana), kušana un atkārtota sasaldāšana. Tādējādi ūdens tvaiki un ledājūdeņi var iesūkties leju sniegā un aizvietot porās gaisu, kurš migrē augšup. Līdzīgs process notiek arī firnā. Palielinošies uzkrātā sniega un firna biezumam un masai, to svars izraisa gaisa poru tilpuma samazināšanos un arvien lielāku firna sablīvēšanos. Gaisa burbuļu (poru) īpatsvaram ir galvenā nozīme sniega un ledus krāsas atšķirībās. Piemēram, sniegš izskatās gandrīz balts, jo tas atstaro vai visu redzamās gaismas spektru. Jo ledū ir vairāk gaisa burbuļu, jo lielāka Saules gaismas daļa tiek atstarota. Saules gaismai iespiežoties dziļāk ledū, kā tas var notikt, piemēram, plaisās, kur samazinās gaisa burbuļu daudzums, garākie redzamās gaismas spektra viļņi tiek absorbēti aizvien vairāk. Piemēram, sarkanās krāsas gaismas viļņi ledū tiek absorbēti gandrīz sešas reizes vairāk nekā zilās krāsas. Līdz novērotāja acīm galvenokārt tiek atstaroti īsākie (zilie) redzamās gaismas viļņi, tādēļ ledus plaisa dziļumā izskatās aizvien zilāka (2. att.).

LEDĀJU KLASIFIKĀCIJA

Ledājus var klasificēt pēc daudziem faktoriem, piemēram, pēc izmēriem un morfoloģijas, termiskā režīma (aukstie, siltie un politermālie ledāji), masas bilances un klimata rakstura (piejūras, pārejas, kontinentālie ledāji), barošanās tipa (vēja atnestie nokrišņi, lavīnas) un pēc ledāju malas dinamikas (transgresīvie, stacionārie, sarūkošie, stagnējošie jeb aprīmušie ledāji).

Parasti, norādot uz kādu ledāju, tiek izmantota klasifikācija pēc morfoloģijas. Pēc šīs klasifikācijas ledāji tiek iedalīti divās galvenajās grupās – topogrāfiski atkarīgajos ledājos un topogrāfiski neatkarīgajos ledājos (Benn & Evans, 2010) (1. tabula). Dažkārt ieleju un kalnu ledājus latviešu valodā sauc par šļūdoņiem.

1. tabula. Ledāju klasifikācija pēc morfoloģijas (pēc Rau et al., 2005 un Benn & Evans, 2010, ar K. Lamstera pārveidojumiem)

Topogrāfiski atkarīgie ledāji		Topogrāfiski neatkarīgie ledāji jeb segledāji
Ieleju ledāji		Ledus vairogi
Kalnu ledāji	Cirka (kares) ledāji	Ledus kupoli
	Virsoņu ledāji	
	Nišu ledāji	
	Krātera ledāji	
	Nogāžu ledāji	
Šļūdoniņi un sniega lauki jeb sniegāji		
Ledus lauki		
Izvadledāji	Sauszemē bāzētie	
	Jūrā bāzētie	
Ledus lielplūsmas		
Akmeņu ledāji (iežledāji)		
Šelfa ledāji		

Topogrāfiski neatkarīgie ledāji iedalās divās apakšgrupās – ledus vairogi un ledus kupoli, savukārt topogrāfiski atkarīgos ledājus veido ieleju ledāji, kalnu ledāji, izvadledāji un ledus lielplūsmas, ledus lauki, šļūdoniņi vai sniegāji un akmeņu ledāji. Vēl sīkāk mēdz iedalīt kalnu ledājus (3. att.). To galvenie apakštipi ir cirka jeb kares, virsoņu, nišu, krātera un nogāžu ledāji. Ledus lielplūsmas mūsdienās tiek izdalītas kā atsevišķs ledāju tips, jo tās ir nozīmīgākais ledus vairogu komponents. Lai gan lielākā daļa ledus lielplūsmu ir topogrāfiski ierobežotas, Rietumantarktikā sastopamas arī topogrāfiski neierobežotas (tūrās) ledus lielplūsmas.

Ledus lielplūsmas, izvadledājus un ielejas ledājus, ja tie ieplūst ūdenī, mēdz dēvēt arī par ūdenī bāzētiem ledājiem. Ja šie ledāji ieplūst jūrā un to malas dinamiku ietekmē plūdmaiņas, tos var raksturot kā plūdmaiņu ietekmētus ledājus. Ja ledāja mēle ir uzpeldējusi virs ūdens, ledāju var dēvēt par peldošu. Jūrā saplūstot kopā vairākiem izvadledājiem vai ledus lielplūsmām, veidojas šelfa ledāji. Tie ir uzpeldējuši virs ūdens nogruntēšanās līnijas priekšā.

Ieleju ledājus, kuri plūst šaurās kalnu ielejās un tad sasniedz lēzenos priekškalnu līdzenumus, izplūst un veido plašus leduslobus, sauc par priekškalnu jeb pjedmonta ledājiem. Pasaulē lielākais pjedmonta ledājs ir Malaspina šļūdonis (4. att.), kas izplūst ap 65 km plašā frontē pie Jakutatas liča Aļaskā. Ledāja garums ir īsāks par platumu un sasniedz 45 km. 20. gadsimta beigās Malaspina ledājs nebija atdalījies



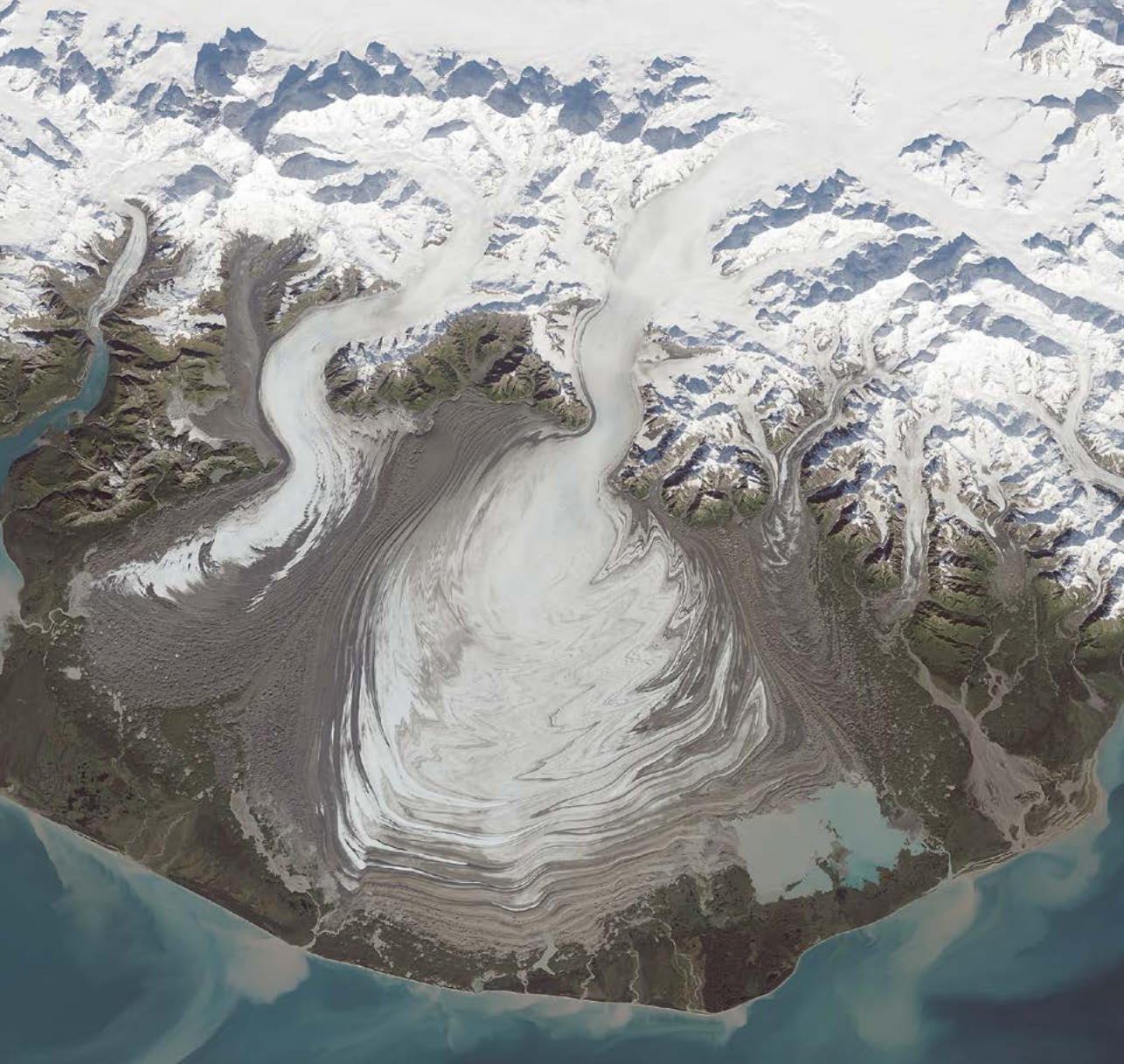


3. att. Kalnu ledāji pie Austrumalpu augstākās virsotnes – Bernina kalna (4048,6 m v.j.l.).
Foto: I. Kalka, 2019.

no blakusesošā Agasī ledāja un tā platums sasniedza pat 100 km. Pjedmonta ledāji bija plaši izplatīti Patagonijā mazajā leduslaikmetā (14.–19. gs.), bet mūsdienās liela daļa šo ledāju vairs nesaasniedz priekškalnu līdzenumus.

Dažviet ledājiem tiek piešķirti arī lokāli vai reģionāli apzīmējumi, piemēram, mēdz izdalīt Skandināvijas ledājus. Tie ir plankanvirsoņu ledāji, kurus bieži vien dēvē arī par ledus plato vai arī fjeldu (fjellu) ledājiem.

Akmeņu ledāji ir ar ledu sacementētu iežu atlūzu masa ar lēnu plūsmas ātrumu. Nelielo kustību (ap dažiem metriem gadā)



galvenokārt nodrošina iekšējā ledus deformācija. Akmeņu ledāju izplatība ir cieši saistīta ar ilglaicīgā sasaluma izplatību, lai gan lielākie ledāji mēdz noplūst arī tādā augstumā, kur grunts sasalums vairs neeksistē. Akmeņu ledāji izplatīti galvenokārt kalnainos reģionos, īpaši Tjanšanā un Alpos. Ledus un atlūzu materiāla attiecība šajos ledājos var būt visai atšķirīga, mainoties no

4. att. Malaspina ledājs Aļaskā. Tas ir pasaulē lielākais pjedmonta tipa ledājs jeb priekškalnu šļūdonis. Pa kreisi no tā atrodas Agasī pjedmonta ledājs. Avots: NASA.

ar atlūzām pārklātiem ledājiem līdz galvenokārt no iežu atlūzām sastāvošiem ledājiem. Tādējādi daļa no šiem akmeņu ledājiem dabā var līdzināties atlūzu materiāla plūsmām vai koncentrētām atlūzu materiālam, kurā nekas neliecina par tā plūsmu. Uz ļoti lēnas plūsmas akmeņu ledājiem var pat veidoties veģetācija un uz ledāja malas var uzaugt koki. Akmeņu ledāju virsējā daļā (aktīvais slānis) mēdz būt koncentrēts rupjatlūzu materiāls. Zem tā atrodas ar ledu cementētas atlūzas un/vai ledus. Pēc morfoloģijas akmeņu ledājus var iedalīt mēlesveida, lobveida un komplicētas morfoloģijas. Mēlesveida akmeņu ledāju (5. att.) garums ir lielāks par platumu, savukārt lobveida ledājiem platumu ir lielāks par garumu.

5. att. Akmeņu ledāji
Kanādas Klinšu kalnos.
Avots: <https://www.kananaskis.org/rock-glaciers/>

Atkarībā no izcelsmes akmeņu ledājus iedala nobiru ledājos, lavīnu ledājos un glaciālo sanešu ledājos. Šis iedalījums balstās uz atlūzu materiāla izcelsmi. Nobiru un lavīnu tipa akmeņu ledāju atlūzu materiāla piegādi veicina tādi procesi kā dēdēšana,





stipras lietusgāzes un sniega kušana, kā arī zemestrīces. Šādi ledāji nesatur ledāja ledu, un to attīstībai nepieciešams ilglaicīgs sasalums. Akmeņu ledāju salīdzinoši plašā izplatība un dimensijas Tjanšana apkārtnē ir, piemēram, tieši saistītas ar zemestrīču izraisītām akmeņu lavīnām un nogruvumiem, kā arī ar intensīvu dēdēšanu. Savukārt glaciālo sanešu akmeņu ledāju veidošanos nodrošina, piemēram, ar atlūzām pārklātu ledāju sarukšana.

Akmeņu ledājiem ir svarīga nozīme ne tikai atlūzu materiāla transportā periglaciālajā vai paraglaciālajā apgabalā (šo apgabalu raksturīgākā pazīme ir ilglaicīgais sasalums un grunts virsējā slāņa atkušanas un sasalšanas cikli), bet arī hidroloģiskajā ciklā, īpaši arī da un semiarīda klimata kalnu apgabalos. Akmeņu ledāju destabilizācija, tā gultnē uzkrājoties ledājūdeņiem, var izraisīt katastrofālu akmeņu–ledus masas pārvietošanos.

Akmeņu ledāju garums un platums parasti nepārsniedz 1 km, un to biezums parasti ir vairāki desmiti metru, savukārt platība

6. att. Svínafellsjokula izvadledājs Islandē. Ar atlūzām pārklātā ledāja sānu daļa (attēla vidusdaļā) pietuvinājumā redzama nākamajā attēlā.

Foto: K. Lamsters, 2017.

7. att. Svínafellsjokula ledāja ar atlūzām pārklātā daļa. Atlūzu slāņa biezums kopumā nepārsniedz 1 m, un zem atlūzām atrodas vairāk nekā 100 m biezs ledus. Mēroga apjaušanai noder cilvēks attēla vidusdaļā. Foto: K. Lamsters, 2017.

reti pārsniedz 1 km². Kā novērots Tjanšanā, kur akmeņu ledājiem kopumā raksturīgas salīdzinoši lielākas dimensijas un ātrums, ledāja virsas kustības ātrums ir tikai daži centimetri līdz 10 m gadā. Alpos akmeņu ledāji ir vien līdz dažiem simtiem metru gari, 50 līdz 200 m plati, to platība nepārsniedz 0,2 km². Viens no lielākajiem akmeņu ledājiem Reichenkar (*Reichenkar*) Rietumalpos ir 1400 m garš.

Reizēm ledāji var būt pārklāti ar atlūzām, bet tie netiek uzskatīti par akmeņu ledājiem, jo zem virsledāja (supraglaciālajām) atlūzām atsedzas tīrs ledāja ledus. Pilnībā ar atlūzām klāti ieleju ledāji atrodami augstkalnu apgabalos, piemēram, Himalajos. Tomēr parasti ar atlūzām ir pārklāta tikai ieleju ledāja vai izvadledāja daļa tā mēles galā vai sānos, kur koncentrētas atlūzas no nobiru plūsmām. Piemēram, Islandē Svínafellsjokula (*Svínafellsjökull*) izvadledāja sānu malā atrodas vairākus simtus metru bieza josla, kurā ledāju pārklāj līdz 1 m biezs atlūzu slānis (6, 7. att.), kas varētu būt nobiru materiāls no kalna nogāzes. Šāds atlūzu slānis ievērojami samazina apakšējā ledus absorbēto Saules radiācijas





daudzumu, un tīra ledāja ledus virsma atrodas 30 m zemāk. Tādējādi ar atlūzām pārklātās ledāju daļas kūst būtiski lēnāk, piemēram, ar atlūzām pārklāta ledāja mala var atkāpties pat trīs reizes lēnāk nekā ar atlūzām nepārklātā daļa.

Izvadledāji vai ieleju ledāji, kuri ieplūst jūrā, tiek dēvēti par jūrā bāzētiem ledājiem. Daļa no to mēles pamatnes var būt uzpeldējusi virs ūdens. Līniju, kur ledājs vēl savienots ar gultni, dēvē par nogruntēšanās līniju, un tai ir būtiska loma ledāja dinamikā. Mūsdienās bieži vērojama jūrā bāzētu ledāju un šelfa ledāju nogruntēšanās līnijas atkāpšanās. Saplūstot vairākiem izvadledājiem vai ledus lielplūsmām, jūrā var veidoties šelfa ledājs. Ja ledāja mala beidzas ūdenī (8. att.), pieaug ledāja masas zudums, jo no ledāja malas atdalās aisbergi. Šo procesu sauc par kalvingu, un tas bieži vien ir cēlonis vairāk nekā 50% jūrā bāzētu ledāju masas zudumam. Ja ledāja mēle ieplūst jūrā un uzpeld, ledāja plūsmas ātrums pieaug vairākkārt saistībā ar samazināto berzi starp ledāja pamatni un ūdens virsu.

8. att. Ovatsmarkbrēna (*Aavatsmarkbreen*) ledājs Rietumsvālbārā. Tas ir viens no Svalbāras jūrā bāzētajiem ledājiem, kam raksturīgas straujas uzplūdu fāzes. Foto: K. Lamsters, 2019.

Mūsdienās tiek novērota jūrā bāzētu ledāju atkāpšanās, un tas ir saistīts ne tikai ar atmosfēras temperatūras, bet arī ar jūras ūdens temperatūras paaugstināšanos. Pētījumā par 210 jūrā bāzētiem ledājiem Grenlandē, piemēram, tika secināts, ka 90% no tiem ir atkāpušies no 2000. līdz 2010. gadam. Salīdzinot ar atkāpšanās epizodi 20. gadsimta sākumā, jūrā bāzēto ledāju atkāpšanās pēdējos gadu desmitos nepārprotami ir daudz plašāka un straujāka (Howat & Eddy, 2011). Jūrā bāzēto ledāju uzpeldējušās mēles var būtiski ietekmēt plūdmaiņas, kuru dēļ ledāja mēle tiek pacelta augstākā līmenī paisuma laikā. Plūdmaiņas ir cieši saistītas ar aisbergu veidošanās intensitāti. Šādus ledājus mēdz dēvēt par plūdmaiņu ietekmētiem ledājiem, un jaunākie pētījumi liecina, ka šādu ledāju zemūdens pamatnes kušanas ātrums var būt pat simt reižu lielāks nekā teorētiski paredzētais (Sutherland et al., 2019). Šie atklājumi būtu jāņem vērā, modelējot ledāju kušanu un tās ietekmi uz jūras līmeņa celšanos. Problēmas sagādā tas, ka kopumā plūdmaiņu ledāju zemūdens kušana ir ļoti vāji izziņāta, lai gan šiem ledājiem raksturīgas ievērojamas malas pozīciju svārstības, kuras ne vienmēr ir sinhronas ar globālajām klimata pārmaiņām. Ir arī zināms, ka plūdmaiņu ledājiem raksturīgi īpaši cikli, kuru laikā tie piedzīvo nozīmīgu masas zudumu un pieaugumu.

Topogrāfiski neatkarīgie ledāji veido atsevišķu segledāju grupu. Tajā ietilpst ledus kupoli un ledus vairogī. Ledus kupoli mūsdienās sastopami Islandē un daudzās Arktikas salās. To klātā teritorija mūsdienās nepārsniedz 50 000 km². Ledus kupoli ir neatkarīgi no gultnes topogrāfijas, respektīvi, tie pārklāj plašus reljefa pazeminājumus un vēlāk savas attīstības gaitā – arī zemes virsmas paaugstinājumus. Tomēr malas zonā ledus kupoli nelielā ledus biezuma dēļ var būt atkarīgi no zemledāja reljefa. No tiem uz visām pusēm parasti izplūst izvadledāji, kuri koncentrējas lielākajos zemes virsās pazeminājumos.

Ledus vairogī mūsdienās sastopami tikai Grenlandē (9. att.) un Antarktīkā. Tie ir vislielākie ledus masu sakopojumi uz zemeslodes. Stikāk tie ir apskatīti turpmākajās grāmatas nodaļās. Ledus vairogī sastāv no ātri plūstošu ledus masu koridoriem – ledus lielplūsmām – un salīdzinoši mazkustīgiem reģioniem, kur dominē lēna ledus klājplūsma. Augstākos ledus vairoga apgabalus sauc par ledus kupoliem, bet tos nevajadzētu jaukt ar ledus kupoliem, kas ir atsevišķs topogrāfiski neatkarīgo ledāju veids. Pleistocēna leduslaikmetu laikā ledus vairogī klāja plašu teritoriju Ziemeļamerikā, gandrīz līdz 40° paralēlei. Skandināvijas jeb Fenoskandijas ledus vairoga nogāze un perifērijas daļa pārklāja arī visu Latvijas teritoriju, bet plašāko apledojumu laikā ledāja mala atradās tālu dienvidos. Pēdējo reizi ledājs pārklāja Latviju pirms 21 000 gadu. Ledus vairogam izzūdot, no tā atdalījās ātri plūstoša ledus lobi, kas deglaciācijas (ledus izzušana no teritorijas, kuru agrāk klāja ledus) laikā aizpildīja lielākās Latvijas zemienes. Lielākie lobi bija: Kursas un Usmas lobs Rietumlatvijā,



tie atdalījās no Baltijas ledus lielplūsmas; Zemgales un Burtnieka lobs, tie atdalījās no Rīgas ledus lielplūsmas Centrāllatvijā; Vidusgaujas, Lubāna, Mudavas un Polockas lobs, tie atdalījās no Peipusa ledus lielplūsmas Austrumlatvijā (Zelčs, 2018).

Šelfa ledāji ir sauszemes ledāju turpinājums jūrā, uzpel-dējušas ledus masas. Tie izplatīti gar Antarktikas un Grenlan-des ledus vairogiem. Antarktikas šelfa ledāju aizņemtā platība (1,56 miljoni km²) gandrīz sasniedz visa Grenlandes ledus vairo-ga platību. Tie veidojas no jūrā ieplūstošām ledus lielplūsmām un izvadledājiem. Daļu no šelfa ledāju ledus masas rada sniega aku-mulācija tieši uz ledus virsas un jūras ūdens piesalšana pie šelfa ledāja pamatnes. Atšķirībā no jūras ledus šelfa ledāji ir savienoti ar sauszemes ledus masām un neveidojas katru gada no jauna. To biezums Antarktikā mainās no 1000 m nogruntēšanās līnijas tuvumā, kur ledājs atkabinās no cietzemes, līdz dažiem simtiem un mazāk metru kalvinga frontes malā. Projām no nogruntēšanās

9. att. Grenlandes ledus vairoga līdzenā virsma no 11 km augstuma. Tumšāka ledus apgabalu attēla labajā pusē veido kriokonīts – minerālās un organiskās daļiņas ledus virsmā. Zīlie plankumi ir virsledāja ezeri. Foto: K. Lamsters, 2019.

līnijas šelfa ledāja biezums strauji samazinās. Virs ūdens atrodas tikai 1/9 daļa šelfa ledāja ledus.

Šelfa ledāji nav viengabalaini, jo tos veido ledus lielplūsmas vai izvadledāji ar atšķirīgu plūsmas ātrumu. Starp ledus plūsmas vienībām ar atšķirīgu kustības ātrumu var veidoties izteikti plaisainas bīdes zonas, no kurām attīstās garas, šķērseniskas plaisas, kas var atdalīt milzīgu šelfa ledāja daļu, radot lielākos aisbergus pasaulē. Šelfa ledāji jau atrodas ūdenī, tādēļ to kušana nepaaugstina jūras līmeni, bet tie var strauji sabrukt, tādējādi ievērojami ietekmējot tos veidojošo ledāju dinamiku. Šelfa ledāju sabrukšanu izraisa to pastiprināta kušana gan no pamatnes, gan no virsas, gan aisbergu atdalīšanās no to frontes līnijas. Tiem sabrūkot, palielinās ledāju plūsmas ātrums aiz šelfa ledājiem, sekmējot okeānā ieplūstošo ledus masu apjomu. Lielākie šelfa ledāji sastopami Antarktīkā.

LEDĀJU PLŪSMA UN DEFORMĀCIJA

Jau kopš 19. gadsimta vidus, kad radās glaciālā teorija, nozīmīga loma zinātnes attīstībā bija ledāja kustības mehānisma izpratnei. Jebkuram ledājam, ja tas nav pilnībā aprimis un vairs nav saistīts ar barošanās apgabalu, ir raksturīga ledus plūšana. Tā ne tikai pārvieto ledus masas uz priekšu, bet arī veic nozīmīgu ģeoloģisku darbību – ledāja gultnes eroziju, sanešu pārvietošanu un akumulāciju zem ledāja un ledāja priekšā.

Ledājs nav nevainojams plastisks ķermenis, jo tam ir raksturīga gan traušana, gan plastiska deformācija, kuru rada ledus plūsma un sprieguma atšķirības ledājā. Trauslu deformāciju izraisa straujas pieliktā sprieguma izmaiņas, un palielināta deformācijas ātruma dēļ ledū veidojas dažādas plaisas – šķērseniskas, gareniskas, radiālas un krusteniskas. Plastiskas deformācijas gadījumā ledus tiek pakļauts lēnām pieliktā sprieguma izmaiņām. Tādējādi ledājā tiek deformēts tā primārais slāņojums (stratifikācija), kurš veidojies no katra gada ziemas un vasaras ledus slāņiem.

Primāro slāņojumu veido baltu, lielkristālisku, ar gaisa burbuļiem bagātu, biezu ziemas ledus slāņu un tumšu, plānāku vasaras ledus slāņu mija. Ledājiem izšķir primāro un sekundāro stratifikāciju, kas izpaužas kā joslainība un plaisainība. Primārā stratifikācija veidojas sniega akumulācijas rezultātā, kad katru gadu rodas jauns ledāja ledus slānis. Sākotnēji šis slāņojums ir paralēls ledāja virsmai, bet vēlāk deformējas ledus plūsmas dēļ. Slāņu biezums variē no milimetriem līdz pat metriem. Sekundārā stratifikācija veidojas ledus deformācijas rezultātā, un tiek izšķirtas traušanas un plastiskas deformācijas struktūras.



Kopumā ledāja ledum piemīt ievērojama viskozitāte, tāpēc tas tiek uzlūkots kā viskozi plastisks materiāls. Ārējam spriegumam pieaugot un tam pārsniedzot materiāla iekšējā elastīguma (arī tecējuma) robežu, sākas plastiskā deformācija. Tās gaitā ledus viendabība nezūd. Savukārt, ja spriegums palielinās un tiek pārsniegta materiāla iekšējā izturīguma (stiprības) robeža, plastiskā deformācija pāriet trauslajā deformācijā, kas izpaužas kā materiāla viendabības zaudēšana. Tā rezultātā notiek materiāla dezintegrācija – ledū veidojas plaisas. Izteikta plaisainība raksturīga ledājiem, kuru ātrums strauji palielinās, piemēram, tiem ieplūstot jūrā (10. att.) vai sākoties ātras plūsmas jeb uzplūdu fāzei pulsējošiem ledājiem.

Ledāja iekšējo deformāciju rada kompresijas plūsma vai bīdes procesi, un tā rezultātā rodas ledāja joslainība. Tā veidojas, pirmkārt, tādēļ, ka ledus piesātinājums ar atlūzu materiālu ir nevienmērīgs. Otrkārt, joslainība veidojas ledāja deformācijas un rekristalizācijas ietekmē, piemēram, ledus stiepes un spiedes plūsmas iecirkņu mijas rezultātā. Treškārt, lielizmēra joslainība rodas, saplūstot ledus plūsmām vai vairākiem ieleju šļūdoņiem. Izplatītākā ir gareniskā joslainība, bet sastopama arī šķērseniskā

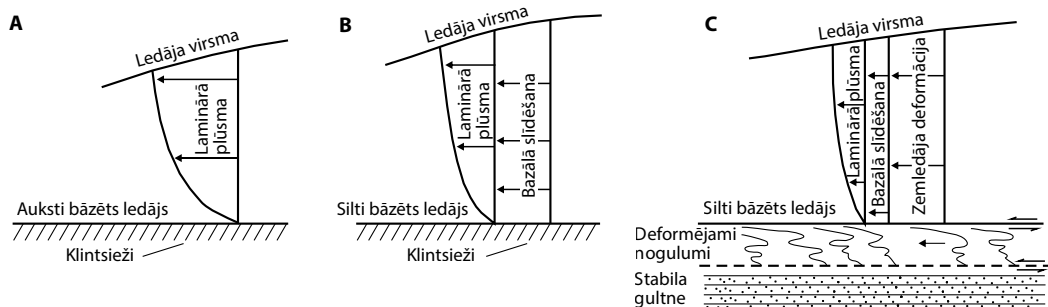
10. att. Ovatsmarkbræna ledāja plaisainā mala. Šis ir pulsējošs ledājs (šobrīd tam ir stabilizācijas periods), kurš ieplūst jūrā Rietumsvalbārā. Foto: K. Lamsters, 2019.

un lokveida joslainība. Šķērseniskā joslainība rodas no deformētas (rotētas) primārās stratifikācijas vai aizvērtām plaisām leļpus leduskritumiem vai šķērsenisko plaisu zonām. Lokveida jeb izliektā joslainība attīstās ieleju ledājos, kur ledus plūsma izraisa progresīvu šķērseniskās joslainības deformāciju. Gareniskā joslainība jeb gareniskās virsmas struktūras ir bieži sastopamas uz aktīviem ledājiem un veidojas, deformējoties galvenokārt primārajai ledus stratifikācijai, kā arī atlūzu joslām un aizvērtajām plaisām. Struktūras ir izteiktākas ledāja malas zonā vai saplūdes zonā starp ledus plūsmām. Ledāja virsmā ledus joslainība parādās ledus nevienmērīgā piesārņojuma ar atlūzām un neviendabīgās struktūras dēļ.

11. att. Gareniskās virsmas struktūras Tjorsārjokula izvadledāja virsmā Islandē. Tās sastopamas vietā, kur saplūst divas ledus plūsmas vienības, tām apliecoties ap nunataku. Augšā pa labi redzama daļa no vidusmorēnas un 2017. gada Islandes ekspedīcijas dalībnieki. Foto: K. Lamsters, 2017.

Viršējais ledus slānis parasti sastāv no dažāda tipa ledus – ar gaisa burbuļiem vai atlūzām bagāts ledus mījas ar ledu, kas satur maz gaisa burbuļu un atlūzu. Tas nosaka uz ledus virsas notiekošo dēdēšanas, virsledus kušanas, sublimācijas un citu procesu norisi atšķirīgā ātrumā. Minēto procesu rezultātā veidojas izvagota virsma, kas raksturīga, piemēram, Tjorsārjokula (*Þjorsárjökull*) izvadledājam (11. att.) Islandē. Antarktīkā ledus lielplūsmu virsmā mēdz veidoties arī lielizmēra ledus joslainība.





Ledāja plūsmu var uzlūkot kā funkciju no ledāja iekšējās deformācijas, bazālās (pamatnes) slīdēšanas un ledāja gultnes deformācijas (12. att.), tie ir trīs galvenie ledāja plūsmas mehānismi (Cuffey & Paterson, 2010). Ļoti nozīmīgs process, kura atklāšana mainīja zinātnieku izpratni par ledāja ietekmi uz tā gultnes nogulumiem, ir gultnes deformācija. Vienkāršākajā gadījumā, ja ledāja gultni veido masīvi klintsieži, tā plūsma galvenokārt norisinās divos veidos. Ja ledājs ir piesalis tā gultnei, kas raksturīgi ledājiem polārajos apgabalos (neskaitot ātras ledus lielplūsmas Antarktikā un Grenlandē), ledāja kustību galvenokārt nosaka iekšējā ledus deformācija (krīps) jeb laminārā plūsma.

Ledāja kustība kā iekšējā laminārā plūsma jeb ledus deformācija norisinās galvenokārt pa iekšējo nošķēlumu plaknēm. Šis nošķēlumu plaknes veidojas pavājinājuma zonās ledājā vai starp ledus kristāliem, kuri vispirms tiek orientēti galvenokārt paralēli galvenajam deformējošajam spriegumam. Ja pieņemam, ka sākotnēji ledus kristālu asis ir orientētas haotiski, tad ārējā sprieguma ietekmē tās tiek orientētas noteiktā virzienā, un, spriegumam turpinot pieaugt, notiek kustība starp atsevišķiem ledus kristāliem un ledus masa sāk pārvietoties. Protams, sprieguma apstākļi ledājā ir mainīgi, tādēļ ledāja kustības ātrums atšķiras gan vertikālā, gan horizontālā virzienā.

Kalnu ledājos jeb šļūdoņos ledus plūsma galvenokārt rodas gravitācijas spēka ietekmē (gravitācijas plūsma). Plūsma sākas brīdī, kad tiek pārsniegta ledāja iekšējās berzes vai berzes ar gultni (bazālā slīdēšana) radītā pretestība. Savukārt segledājos ledus plūšanu izraisa ledus masu spiediena radītais horizontālais gradients (gradienta plūsma), kura ietekmē notiek ledus plūšana no

12. att. Ledāja plūsmas galvenie komponenti un vertikālā ātruma sadalījuma profili: A) auksti bāzētā ledājā uz klintsiežiem; B) silti bāzētā ledājā uz klintsiežiem; C) silti bāzētā ledājā uz irdeņiem, viegli deformējamām nogulumiem. Sagatavojis K. Lamsters pēc Boulton, 1996.

ledus vairoga vai ledus kupola centrālās daļas visos virzienos. Šo gradientu aprēķina kā divu vertikālu ledus kolonnu svara starpību, ar kādu tās spiež uz ledāja gultni, izdalot to ar attālumu, kādā šīs kolonnas atrodas viena no otras. Tādējādi lielākais ledus plūsmas (šajā gadījumā – iekšējās laminārās plūsmas) ātrums būs apgabalos, kur ir vislielākās ledus biezuma atšķirības.

Ja ledus gultnē atrodas ūdens (ledus ir pietiekami biezs, lai tiktu sasniegts spiedienkušanas punkts, vai virsledāja kušanas ūdeņi sasniedz ledāja gultni), ledus plūsma var paātrināties un plūšana norit kā bazālā slīdēšana pa ūdens kārtiņu. Parasti šāda ledus kustība ir ļoti nevienmērīga laikā un telpā. Tā īpaši izpaužas kušanas sezonas beigu posmā, piemēram, Grenlandē noplūst virsledāja ezeri un īslaicīgi liels ūdens apjoms sasniedz ledāja gultni.

Bazālo slīdēšanu ietekmē gan sezonālas, gan diennakts ledus kušanas svārstības. Nozīmīgs faktors bazālajā slīdēšanā ir ledāja gultnes raupjums. Respektīvi, ledāja gultne ir nelīdzena, tādēļ ūdens izvietojums ledāja gultnē ir nevienmērīgs. Tikai ļoti augsta porūdens spiediena gadījumā visa ledus pamatne var atkabināties no gultnes, piemēram, kad notiek zemledāja plūdi. Citos gadījumos ledāja gultnē var veidoties plāna ūdens kārtiņa, bet ledājs ir sakabināts ar gultni vietās, kur atrodas lielākas iežu atlūzas.

Lielāku šķēršļu priekšā ledāja gultnē var norisināties ledus spiedienkušana (spiediena izraisīta ledus kušana), kas rada ledājūdeņus. Tie plūdis prom no apgabala, kur ir palielināts ledus spiediens (pirms šķēršļa), savukārt aiz šķēršļa, kur ledus spiediens ir samazināts, norisināsies atkārtota sasalšana. Šo procesu dēvē par reželāciju, un tas arī ir viens no mehānismiem, kā ledāja gultnē norisinās iežu atlūzu atraušana un to inkorporācija bazālajā ledū.

Ledājūdeņiem plūstot ap šķērslī, tie var iesūkties nelielajās plaisās šķēršļa otrā pusē un sasalt tajās. Ūdens tilpums sasilstot palielinās, tādēļ katrs šāds sasalšanas cikls izraisa plaisu paplašināšanos. Galu galā no šķēršļa var tikt atšķelta iežu atlūza. Tā kā ledus plūsmas ātrums ir samazināts tieši aiz šķēršļa, tur var veidoties tukšums jeb dobums. Šādi dobumi var veidoties pat aiz nelieliem ledāja gultnes pacēlumiem vai iežu atlūzām, kuras ledājs vairs nespēj pārvietot uz priekšu. Ledāja gultnes nogulumu tiecas aizpildīt dobumu, jo tur ir samazināts ledus spiediens. Tādējādi, dobumam pamazām aizpildoties, notiek tā migrācija ledāja plūsmas virzienā un veidojas vairākus simtus metru līdz kilometrus gari, parasti 1–2 metrus augsti un plati cits citam paralēli vaļņi, kurus dēvē par flūtingiem. Flūtingi bieži sastopami pie aktīviem mūsdienu ledājiem (13. att.)

Trešajā gadījumā, ja ledāja gultni veido irdeni un viegli deformējami nogulumu (12. att.), nozīmīgākā ledāja kustība var būt tā pārvietošanās kopā ar deformējamu gultnes nogulumu slāni. Arī šis ledāja kustības veids ir atkarīgs no ūdens daudzuma



zem ledāja. Jo nogulumi būs piesātinātāki ar ūdeni, jo ātrāk tie tiks pakļauti deformācijai. Nozīmīgs lielums šajā procesā ir porūdens spiediens, kura svārstības regulēs to, vai ledājs būs sakabināts ar gultni un deformēs tās nogulumus vai arī atkabināsies no gultnes un slīdēs tai pāri, ja porūdens spiediens būs paaugstināts. Bieži vien visi šie kustības mehānismi ietekmē ledus plūsmu un ir laiktelpiski mainīgi. Šos zemledāja procesus iespējams rekonstruēt pēc noteiktām pazīmēm.

Par ledāja gultnes deformāciju liecina deformēti nogulumi. Ja tie ir paša ledāja veidotie morēnas jeb glaciģēnie nogulumi, tie var būt deformēti pat tādā pakāpē, ka nesatur makroskopiskas liecības par notikušo deformāciju. Citos gadījumos morēna var saturēt ledāja gultnes materiāla (bieži smilšaino nogulumu) ievilkumus, kas liecina par ledāja daudzkārtīgu sakabināšanos ar gultni un pagulošā materiāla ievilkšanu ledāja bazālajā daļā (14. att. A).

13. att. Flūtings pie Elisbrēena ledāja Svalbārā. Tas stiepjas diagonāli pāri attēlam no kreisā apakšējā stūra. Priekšplānā Svalbāras ekspedīcijas dalībnieks Pēteris Džeriņš. Virzienā uz ledāja malu flūtinga priekšā atrodas laukakmens, aiz kura zem ledāja bija izveidojies dobums. Foto: K. Lamsters, 2019.

Par bazālās slīdēšanas epizodēm liecina ledāja skrambas nogulumos esošo iežu atlūzu virsmā (14. att. B). Skrambas liecina par ledāja bazālo slīdēšanu un ledāja gultnē iesalušās atlūzas virsmas pulēšanu un skrambāšanu ar ledāja pamatni.

Par to, kā tieši un cik dziļi ledāja gultne tiek deformēta, zinātniekiem ir dažādi viedokļi. Pārsvārā eksistē divi pieņēmumi. Pirmais – pastāv izteikta sakabināšanās starp ledāju un viskozu nogulumu gultni, un tā pakļauta plašai deformācijai vairāku metru dziļumā. Otrais – deformācija norisinās tikai zemledāja nogulumu slāņa pašā virsējā daļā. Turklāt brīžos, kad ūdens spiediens nogulumos ir tuvs vai pārsniedz pārsedzošā ledus spiedienu, norisinās bazālā slīdēšana. Ledāja gultnes nogulumu deformāciju ietekmē daudzi faktori, no tiem nozīmīgākie ir atlūzu daļiņu izmērs ledāja gultnē, ledus bazālās daļas temperatūra, porūdens spiediens un nogulumu ūdenscaurlaidība.

Mūsdienu pētījumi zem Antarktikas ledus vairogu lielplūsmām sniedz jaunus pierādījumus par ledāja gultnes nogulumu deformācijas norisi. Piemēram, seismiskie un ģeoradara dati atklāja, ka aktīvās Ratforda ledus lielplūsmas (*Rutford Ice Stream*) sākuma zona Antarktikā ir aktīva sedimentācijas sistēma, kas iekļauj gan akumulācijas, gan erozijas un deformācijas apgabalus. Nogulumi zem šīs lielplūsmas ir sakārtoti garās un paralēlās plūdlīnijas formās, kas tiek dēvētas par lielizmēra glaciālajiem lineamentiem. Tie ir identificēti zem vairuma mūsdienu un paleoledus lielplūsmu, tostarp Latvijā (Lamsters, 2015), liecinot par ātru ledus plūsmu. Zem Ratforda ledus lielplūsmas nogulumu erozijas

14. att. Liecības ledāja kustībai pa gultni Latvijā: A) deformēti morēnas nogulumi ar smilts materiāla ievilkumiem; B) ledāja skrambas karbonātiskas iežu atlūzas virspusē. Foto: K. Lamsters, 2015.





un akumulācijas procesi ir ievērojami un mainīgi laikā un telpā, tāpat kā bazālās slīdēšanas un deformācijas apgabali (Smith et al., 2007).

Teritorijā, kur dominē bazālā slīdēšana, atrodas vairāki apgabali, kuros turpinās deformācija un kuri reljefā izpaužas kā iegareni pauguri, ko veido deformējami nogulumi. Tādējādi mūsdienās tiek pieņemts, ka silti bāzēta ledāja gultne ir kā mozaīka, kas sastāv no deformācijas un stabiliem apgabaliem. Noteikts apgabals var tikt pakļauts atkārtotām deformācijas epizodēm, ko atdala epizodes, kad notiek bazālā atkabināšanās un ledus slīdēšana. Labvēlīgos apstākļos deformācijas apgabals izpletīsies un ietekmēs aizvien lielāku gultnes daļu. Tas var arī sarukt, liekot iepriekš deformējamiem apgabaliem kļūt stabiliem, vai arī mainīt savu ģeometriju,



15. att. Ledus uzbīdījumi uz Rasela izvadledāja Grenlandes dienvidrietumos. Foto: K. Lamsters, 2016.

iesniedzoties dziļāk, bet sarūkot laterāli. Kopumā var pieņemt, ka ledāja gultne var nebūt pakļauta dziļai un plaši izplatītai deformācijai, tā var notikt īslaicīgi atsevišķos ledāja gultnes apgabalos. Tādējādi vienā laika posmā deformācijai tiek pakļauta tikai daļa no ledāja gultnes.

Ledus plūsmas un iekšējās deformācijas ātrums ledājā ir mainīgs laikā un telpā. Vietās, kur ledāja gultne ir nelīdzena vai slīpa, notiek sprieguma izmaiņas. Kopumā var izdalīt apgabalus, kur dominē stiepes un spiedes (kompresijas) plūsma. Stiepes plūsma raksturīga apgabaliem, kur palielinās ledāja gultnes slīpums ledāja malas virzienā, savukārt spiedes plūsma raksturīga apgabaliem, kur gultnes kritums ir vērsts pretējā virzienā, kā arī pirms ledāja gultnes pacēlumiem un uz sauszemes bāzētu ledāja mēļu malas zonā.

Stiepes plūsmas vietās ledāja ķermenī uzkrājas stiepes spriegumi. Lielākoties tie ir orientēti paralēli ledāja plūsmas virzienam, tādējādi ledājā veidojas stiepes (atrāvuma) plaisas, kas gar ledāja centrālo daļu ir orientētas perpendikulāri ledāja ass līnijai, bet, piemēram, ielejas ledāja sānos – šaurā leņķī pret ledāja ass līniju. Plaisas ilgstoši saglabājas tikai virsējā trauslajā ledus slānī, bet apakšējā plastiskajā ledus slānī tās var tikt aizvērtas. Šķērseniskās plaisas parasti tiek aizspiestas ledāja priekšējās malas virzienā, jo tur dominē gareniskas spiedes režīms.

Ledāja malas tuvumā nereti dominē gareniska spiede, jo ledāja ātrums samazinās, tādēļ tur atvērtās plaisas izzūd arī augšējā trauslajā ledus slānī. Ja ledājs malas zonā izplūst uz sāniem, kā, piemēram, pļedmonta tipa ledājos, tajā veidojas radiālas plaisas, kas ir aptuveni paralēlas lokālajiem ledāja plūsmas virzieniem. Ledāja malā, spiedes spriegumam pieaugot (ekstremālās spiedes apstākļos), ja ledāja kustības ātrums ievērojami samazinās (tas sastopas ar šķērsli vai piesalst pie gultnes), ledāja piegultnes daļā var rasties iekšējās nošķēluma plaknes, pa kurām notiek ledus blāķu zvīņveida uzbīdīšanās (15. att.). Ja šāda ledus zvīņa pirms tam ir bijusi saskarē ar gultni, pa šo nošķēluma plakni līdz pat ledāja virspusei var nokļūt ledāja gultnes materiāls. Šādi var izskaidrot, piemēram, kādēļ arī Latvijas ledāja reljefa formās reizēm var sastapt dažāda vecuma ledāja gultnes iežu atrautus blokus, kurus dēvē par atrauteņiem.

LEDĀJU TERMIKA

Ledāji sastāv no sasaluša ūdens jeb ledus, tādēļ ledāja ledus saglabājas cietā stāvoklī, ja tas nerasniedz kušanas punkta temperatūru (0°C uz ledāja virsas vai zemāka temperatūra ledāja pamatnes daļā). Ledāja temperatūra ir nozīmīgs faktors, kas kontrolē ledāja plūsmas ātrumu, potenciālo ledājūdeņu daudzumu un ledāja ģeoloģisko darbību. Jo ledus temperatūra ir augstāka, jo ledus ir plastiskāks un tā iekšējās deformācijas ātrums potenciāli ir lielāks. No ledus temperatūras ir atkarīga zemledāja erozija, drupu materiāla transportēšanas spēja un ledāja sanešu nogulsnešana. Paaugstināta bazālā ledus temperatūra nodrošina ūdens esamību ledāja gultnē, kas savukārt veicina ledāja gultnes eroziju un nogulumu deformāciju. Ja ūdens spiediens pārsniedz pārsedzošā ledus spiedienu, ledāja kustība paātrinās un norisinās bazālā slīdēšana, jo ūdens ledāja gultnē stipri samazina berzi starp ledāja pamatni un gultni. Ledāji, kam ir zema bazālā ledus temperatūra, ir piesaluši pie gultnes, un tas būtiski mazina to erozijas spēju. Lai gan temperatūra ledāja iekšienē ir mainīga, auksti bāzēti ledāji (piesaluši pie gultnes) parasti ir izplatīti lielajos platuma grādos, bet silti bāzēti ledāji ir raksturīgi mēreno vai mazo platuma grādu apgabaliem. Ledāja ledus temperatūru nosaka trīs galvenie faktori: Saules radiācija, ģeotermālais siltumstarojums un ledāja iekšējā berze (Benn & Evans, 2010).

Saules radiācija ir nesalīdzināmi nozīmīgāks faktors ledāja virsas termisko apstākļu veidošanā nekā ģeotermālā siltuma plūsma un iekšējā berze. Lai gan ledāja virsā absorbētais siltums tiešā veidā ietekmē tikai ledāja pašu augšējo daļu, siltums ar ledājūdeņiem no virsas tiek nodots ledāja pamatnes virzienā. Noteicoši lielākā ledājūdeņu daļa ledāja pamatnē nonāk no ledāja virsas. Virsas siltuma starojums izriet no atmosfēras siltumvadītspējas, sniega vai firna temperatūras un latentā siltuma nonākšanas vidē kušanas ūdens sasalšanas rezultātā. Latentais siltums ir apslēptais siltums, kas nonāk vidē ūdens fāžu pārejas laikā, bet tiek paņemts no vides pretēja virziena fāžu pārejās. Piemēram, ledājūdeņiem atkārtoti sasilstot ledāja plaisās, atbrīvojas latentais siltums un apkārtējā ledus temperatūra paaugstinās. Uz ledāja virsas ir vislielākās temperatūras svārstības, tās mainās gada, sezonas un diennakts laikā. Vasaras dienās ablācijas zonā uz ledāju virsas norisinās intensīva kušana un ūdens koncentrējas sīkās straumēs (16. att.). Ledāja virsa intensīvas kušanas laikā var pazemināties pat par 10 cm dienā. Naktī kušana parasti beidzas un sīkās nepastāvīgās virsledāja ūdens straumes aizsalst.

Ģeotermālais siltumstarojums ir viens no faktoriem, kas izsauc ledāja ledus temperatūras paaugstināšanos ledāja un gultnes kontaktzonā. Tomēr ģeotermālais siltums ietekmē bazālā ledus temperatūru tikai lokāli. Zemes dziļu siltums var



16. att. Sekla ūdens straume Rasela izvadledāja ablācijas zonā netālu no ledāja malas. Foto: K. Lamsters, 2016.

sasildīt ledājus karsto punktu izplatības apgabalos, piemēram, Islandē, Rietumantarktikā un citos vulkānisma vai paaugstināta ģeotermālā siltumstarojuma izplatības rajonos. Mūsdienu pētījumi liecina par ģeotermālā siltuma būtisku ietekmi uz atsevišķu ledus lielplūsmu un izvadledāju plūsmas ātrumu, piemēram, uz Ziemeļaustrumu Grenlandes lielplūsmu vai Tveitsa (*Thwaites*) lielplūsmu Rietumantarktidā (Schroeder et al., 2014). Ģeotermālā siltuma ietekmē var sākties ledāja pamatnes kušana. Tā ietekmē savukārt var sākties vai pieaugt ledāja bazālās slīdēšanas ātrums. Ģeotermālais siltums var izraisīt ledus kušanu un ledājūdeņu uzkrāšanos zemledāja ezeros, kā novērojams daudzviet Islandē (Björnsson, 2016) un Rietumantarktidā, kur palielināta ģeotermālā siltuma plūsma identificēta, piemēram, zem Vilansa (*Whillans*) ezera (Fisher et al., 2015). Zemledāja ezeru noplūšana var savukārt izraisīt megaplūdus.

Trešais galvenais faktors, kas nosaka ledāja temperatūru, ir iekšējā berze. Aktīvos, ātri plūstošos ledājos berzes spēka rezultātā, kas rodas, ledum plūstot (iekšējā deformācija), izdalās siltums. Tā ietekmē notiek ledāja temperatūras relatīva paaugstināšanās. Ledāja temperatūras ietekmi raksturo ledus spiedienkušanas punkts. Tas pazeminās līdz ar attālināšanos dziļumā no ledāja virsas, līdz ar to bazālā ledus temperatūrai nav jābūt 0 °C, lai sāktos tā kušana. Ledus kušanas punkts pazeminās par aptuveni 0,7 °C uz katriem 1000 m. Tādējādi, piemēram, Antarktikā bazālā ledus kušana bieži var sākties, ja temperatūra ir no –1 līdz –3 °C.

Ledājus pēc to termiskās struktūras iedala siltos, aukstos un politermālos ledājos (Benn & Evans, 2010). Reizēm tiek lietota arī klasifikācija pēc ledāju virsas temperatūras, un tad tos iedala polāros, subpolāros un mērenos ledājos. Siltajos ledājos ledus temperatūra viscaur ir sasniegusi kušanas punktu, izņemot dažus virsējā slāņa metrus, kur temperatūru ietekmē sezonālās variācijas. Tā sauktais “aukstais vilnis” (auksts virsējā ledus slānis, kurš rodas ziemā) sasniedz tikai augšējā ledus slāņa virsējo daļu mērenajos ledājos ziemā, savukārt vasarā tas izzūd un virsējā ledus temperatūra sasniedz 0 °C. Aukstajos ledājos ledus temperatūra visur ir zemāka par kušanas punktu, un tie ir piesaluši gultnei. Tikai vasarā ledāja pati augšējā daļa sasniedz kušanas temperatūru. Politermālie ledāji sastāv no silta un auksta ledus visdažādākajās proporcijās. Atšķirība starp siltu un aukstu ledu ir ne tikai temperatūrā, bet arī ūdens daudzumā. Silts ledus satur ūdeni, kas atrodas porās starp ledus kristāliem. Šī ūdens daudzums ir neliels, un bieži tas ir tikai daži procenti no ledus tilpuma. Lielākā daļa kušanas ūdeņu koncentrējas galvenajos ledāja hidroloģiskās sistēmas komponentos, kas tiks izskaidroti nākamajā nodaļā.

Siltie ledāji ir izplatīti galvenokārt reģionos ar lielu nokrišņu daudzumu un vasaras kušanu, kā, piemēram, Islandē, Rietumnorvēģijā, Ziemeļamerikas rietumu daļas kalnu grēdās, Jaunzēlandē un Čīles Patagonijā. Siltajos ledājos ziemas “aukstais vilnis” vasarā pilnībā izzūd. Tas notiek apgabalos, kam raksturīgs gan palielināts sniega daudzums ziemā, gan kušana vasarā, jo, pirmkārt, biežā sniega sega izolē pagulošo ledu no zemajām ziemas temperatūrām. Otrkārt – latentais siltums no ledājūdeņu atkārtotas sasaldēšanas efektīvi paaugstina sniega un ledus temperatūru ledāja akumulācijas zonā. Treškārt – atdzisušo virsējā ledus slāni ablācijas (kušanas) zonā efektīvi izkausē ledājūdeņi kušanas sezonas laikā.

Aukstie ledāji ir izplatīti arīdos reģionos ar zemu nokrišņu daudzumu un zemu gaisa temperatūru. Zināmākie piemēri ir ledāji Antarktikas sausajās ielejās, kur vidējā gaisa temperatūra ir –20 °C un nokrišņu daudzums ir tikai daži desmiti milimetru. Atsevišķos apgabalos sausajās ielejās nokrišņu nav bijis miljoniem gadu. Sausās ielejas veido trīs galvenajās ielejas (Viktorijas, Raita un Teilora) un vairākas mazākas ielejas. Tajās atrodas arī tādi unikāli dabas objekti kā Oniksu upe (garākā

Antarktīdā, 32 km) un Dona Huana dīķis (otra sāļākā ūdenstilpe uz Zemes), kurš ir tik sāļš, ka ūdens tajā nesasalst. Sausās ielejas ir arī lielākā no ledus brīvā teritorija Antarktīkā (4800 km²). Sniega un ledus segas neesamība sausajās ielejās ir arī līdz 320 km/h ātro, sauso un auksto (katabatisko) vēju darbības rezultāts, šie vēji aizpūš un iztvaicē nelielo mitruma daudzumu ielejās.

Politermiešie ledāji ir pasaulē izplatītākais ledāju tips. Tos primāri var iedalīt pārsvarā aukstos un pārsvarā siltos ledājos, bet kopumā to termiskā struktūra var būt ļoti complicēta. Antarktīkas ledus vairogā kopumā ir politermieši, lai gan to lielākā daļa nekūst no virsas negatīvo gaisa temperatūru dēļ. Vairāk nekā puse bazālā ledus Antarktīkā, iespējams, sasniedz spiedienkušanas punktu. Silti bāzēti apgabali atrodas zem Antarktīkas lielplūsmām un virs zemledāja ezeriem. Silta ledus veidošanos galvenokārt nodrošina siltums, kas rodas ledus iekšējās deformācijas rezultātā (berze starp ledus kristāliem), kā arī ģeotermālais siltums – īpaši Rietumantarktīkā. Centrālie reģioni zem ledusšķirtnēm (apgabali, no kuriem ledus plūst pretējos virzienos) ir pilnībā auksti. Politermiešie ledāji plaši izplatīti Svalbāras arhipelāgā (Björnsson et al., 1996). Mazākie ledāji Svalbārā var būt pārsvarā auksti, savukārt lielākie un aktīvākie – pārsvarā silti (Sevestre et al., 2015). Svalbāras ledāju termiskā režīma izmaiņām ir būtiska ietekme uz ledāju uzplūdiem. Liela nozīme silta ledus slāņa radišanai ir ledājūdeņu sasalšanai ledāju akumulācijas zonā, kurā atbrīvojas latentais siltums. Politermiešie ledāji sastopami arī daudzviet Eiropā – Alpos un Skandināvijas kalnos.

LEDĀJU HIDROLOĢIJA

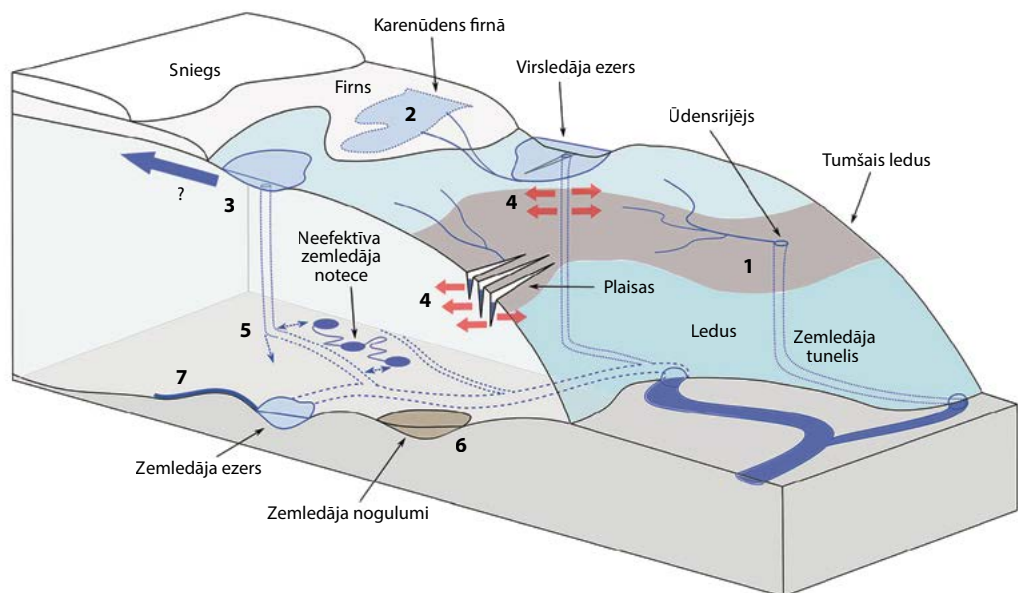
Ledāju hidroloģiju pēta tāda paša nosaukuma zinātnes apakšnozare, kurā galvenokārt tiek apskatīta ūdens notece ledājos, kas ietver ūdens uzkrāšanos un plūsmu. Ledāju hidroloģijas izpratne ir nozīmīga daudzu iemeslu dēļ, īpaši ņemot vērā to, ka globālo klimata pārmaiņu rezultātā notece no ledājiem palielinās. Ledāju hidroloģija nosaka ledāju dinamiku, būtiski ietekmē ledus plūsmu, bazālo slīdēšanu un zemledāja nogulumu deformāciju. Nozīmīgs ledāju hidroloģijas izpētes faktors ir ekonomiskās intereses, jo ledājūdeņi baro upes, kuru ūdeņi tiek izmantoti kā dzeramā ūdens avots, noder irīgācijai, hidroelektroenerģijas ieguvei u. c. Ledājūdeņi veic ledāja gultnes eroziju, sanešu transportu un akumulāciju, radot glaciofluviālos nogulumus, kas ir nozīmīgākais smilts un grants avots. Ar ledājūdeņiem ir saistīti arī vairāki ģeoloģiskie riski, piemēram, ledājūdeņu uzkrāšanās iekšledāja, zemledāja vai pieledāja sistēmās, un tad pēkšņa noplūde var izraisīt katastrofālus plūdus un ietekmēt arī cilvēku apdzīvotās vietas un tautsaimniecības infrastruktūru (Bennett & Glasser, 2009).

Iespējas pētīt iekšledāja un zemledāja hidroloģiju ir visai ierobežotas, jo šī vide ir gandrīz nepieejama tiešiem novērojumiem. Vienīgā tiešo pētījumu metode ir glacioloģiskie novērojumi un mērījumi, piemēram, ūdensriņējos un zemledāja tuneļos. Netiešās pētījumu metodes ir treisereksperimenti (tiek veikti, izmantojot fluorescentas krāsvielas), ledājūdeņu kvalitātes pētījumi (tiek noteiktas šo ūdeņu ķīmiskās īpašības, mikroorganismi, suspendēto sāļu koncentrācija), ģeofizikālie pētījumi (galvenokārt ar ģeoradaru, arī seismiskā izpēte) un ledājūdeņu veidoto reljefa formu pētījumi. Tiešus mērījumus iespējams veikt arī urbumos, ievietojot tur sensorus, kas mēra, piemēram, ūdens līmeni, spiedienu un temperatūru (Hubbard & Glasser, 2005).

Ledājūdeņus nosacīti var iedalīt trīs atsevišķās grupās: virsledāja, iekšledāja un zemledāja ledājūdeņos. Tie kopā veido arī pieledāja noteci. Virsledāja ūdeņus galvenokārt veido sniega, firna un ledus kušanas ūdeņi (kušanu nodrošina solārā radiācija), kā arī lietus ūdeņi un atsevišķos gadījumos notece uz ledāju no piegulošās teritorijas. Iekšledāja ūdeņi rodas no kušanas ledāja ūdensriņējos, plaisās un tuneļos virsledāja ūdens atnestā siltuma ietekmē, kā arī no ūdens plūsmas radītā berzes siltuma izraisītās kušanas. Zemledāja ūdeņi rodas spiedienkušanas dēļ, kušanas ledus berzes un/vai ūdens plūsmas izdalītā siltuma ietekmē, kā arī ģeotermālā siltuma ietekmē. Lielākā daļa ledāja kušanas ūdeņu ir radušies no virsledāja avotiem, kas pēc tam iekļuvuši iekšledāja un zemledāja noteces sistēmā.

Ledājūdeņu notece veido trīsdimensionālu noteces tīklu (17. att.), kura galvenie komponenti ir 1) virsledāja ezeri, ūdens straumes (upes) un ūdens firna slāņi; 2) ūdensriņēji un plaisas, pa kurām ūdens ieplūst ledājā; 3) iekšledāja un zemledāja tuneļi, dobumi un ezeri. Turklāt visi ledājūdeņi uzreiz neaizplūst prom no ledāja. Par ledājūdeņu ilglaicīgu uzkrājēju uzskatāms sniegs un ledus. Ledājūdeņu noplūšana sākas, kad firnā vai sniegā izveidojas ar ūdeni piesātināts slānis – karenūdens. Šī slāņa ūdens līmeņa dziļums ir atšķirīgs, bet bieži tas sasniedz arī sniega vai firna virsmu, veidojot ar ūdeni piesātinātu slāni. To var dēvēt arī par šķīdoni. Nereti ledājūdeņi iesūcas firnā un tur sasalst dažādos līmeņos. Šādas ledus lēcas kavē tālāku ledājūdeņu iesūkšanos firnā un veicina to tālāku noteci, un tas ir labi novērojams, piemēram, Grenlandes ledus vairogā. Virsledāja ledājūdeņi var uzkrāties arī virsledāja ezeros un plaisās. Iekšledāja ledājūdeņi var uzkrāties tuneļos un dažāda lieluma tukšumos (dobumos) ledājā. Līdzīgi ir ar zemledāja ledājūdeņiem, bet tie var uzkrāties arī ezeros un kā porūdens nogulumos. Nereti zemledāja kušanas ūdeņi baro arī pazemes ūdeņus. Pieledāja ledājūdeņu uzkrāšanās notiek pieledāja distālajos ezeros.

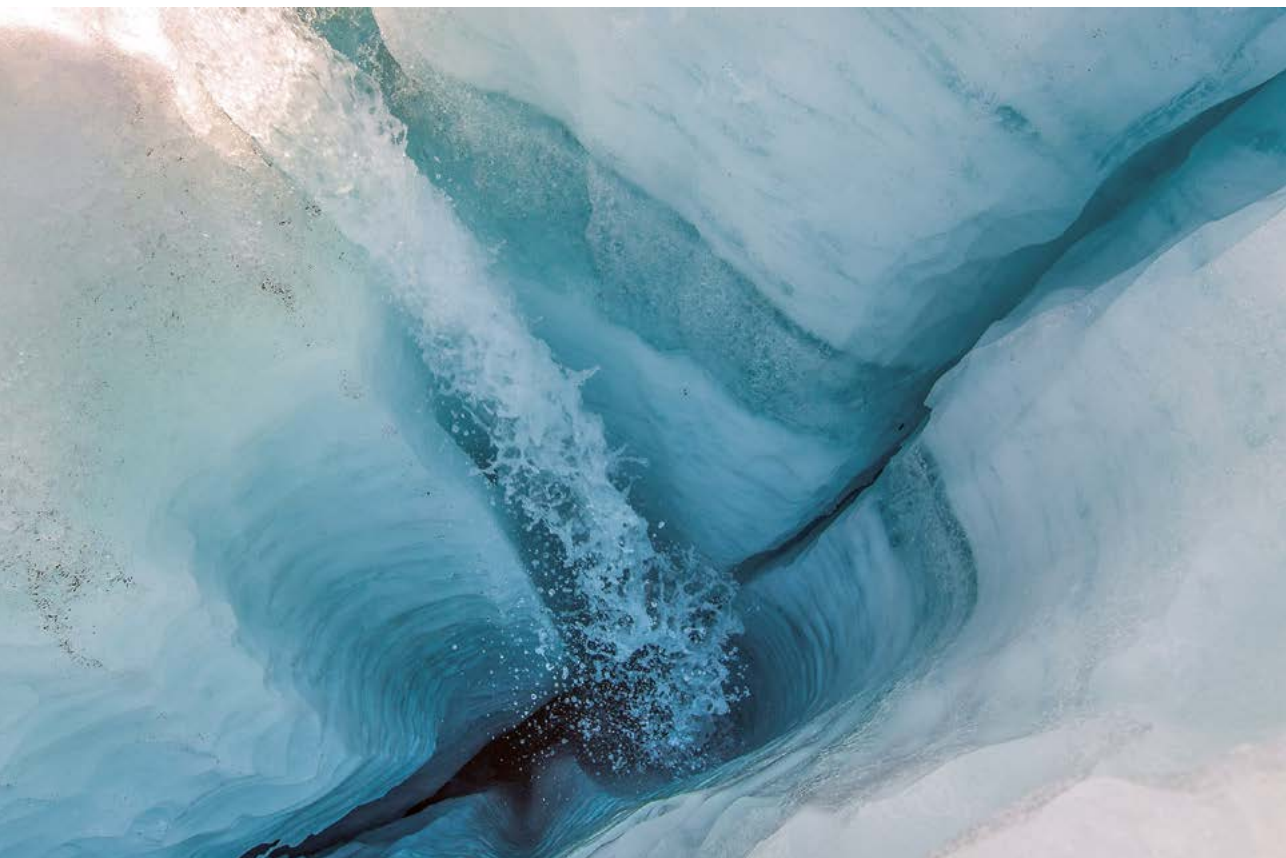
Virsledāja kušanas ūdeņu tīkls veidojas, jo ledum ir zema ūdenscaurlaidība. Tā rezultātā rodas virsledāja peļķes, dīķi un ezeri, ūdens straumju gultnes, ūdensriņēji



17. att. Grenlandes ledus vairoga noteces sistēmas ilustrācija. Ar cipariem apzīmēti kritiskie noteces sistēmas komponenti un procesi, kuru izpratnei nepieciešams pievērst papildu uzmanību:
 1 – ledus virsas aptumšošanās;
 2 – firna sablīvēšanās;
 3 – ledus virsas un gultnes saistība augstākajos ledus vairoga apgabalos;
 4 – kriohidroloģiskā sasīlšana plaisās;
 5 – tunelu veidošanās ledāja gultnē; 6 – zemledāja nogulumu deformācija;
 7 – bazālā kušana.
 Pēc Nienow et al. (2017), ar K. Lamstera papildinājumiem.

un padziļinātas ledus plaisas. Virsledāja ledājūdeņi var būt aplēpti zem sniega vai firna slānī, tādējādi virsledāja noteces tīkls strauji attīstās ablācijas zonā, kur ledāja virskārtā atsedzas mazcaurlaidīgs ledāja ledus. Hidroloģiskais transports starp ledus kristālu porām ir maznozīmīgs, jo aktīvs (plastisks) ledus, kuram ablācijas zonā raksturīga augšupejoša plūsma, ir salīdzinoši blīvs. Ūdens var iesūkties tikai aprimušā ledū, kam ir lielāka porainība. Virsledāja noteces tīkls ir savienots ar iekšledāja ūdens tīklu ar plaisām un ūdensrijējiem. Lielākā daļa virsledāja kušanas ūdeņu ieplūst ledājā un netiek novadīti līdz ledāja malai pa ledāja virsmu.

Novērojumi liecina, ka gandrīz visas virsledāja upes, piemēram, uz Grenlandes ledus vairoga, ieplūst ūdensrijējos (18, 19. att.). To veidošanās ir cieši saistīta ar plaisu izplatību. Sākotnēji virsledāja ūdeņi ieplūst plaisā, un to koncentrētā plūsma plaisu padziļina, izveidojot vertikālu aku ledājā, kura var stiepties līdz pat ledāja gultnei vai arī turpinās kā ieslīps iekšledāja tunelis. Virsledāja ūdeņu uzkrāšanās notiek virsledāja ezeros, bet kušanas sezonas beigās lielākā daļa ezeru noplūst caur plaisām un ūdensrijējiem, kuru izveidošanos izraisa strauja plaisu



18. att. Ūdensrijējs uz Grenlandes ledus vairoga Rasela izvadledāja. Kušanas sezonas beigās (augustā) tajā ieplūst tikai neliela virsledāja ūdens straume. Foto: R. Pāvils, 2016.

19. att. Ūdensrijējs uz Grenlandes ledus vairoga Rasela izvadledāja. Uz abām pusēm no ūdensrijēja ir plaisa, kurā tas izveidojies. Foto: R. Pāvils, 2016.

padziļināšanās pieaugoša hidrostatiskā spiediena dēļ. Ezeru noplūšana parasti ir ļoti strauja, jo, kad plaisa sasniedz ledāja gultni, ūdens noplūšanai vairs nav nekādu šķēršļu. Pat daudzus kvadrātkilometrus lieli Grenlandes ledus vairoga ezeri var noplūst mazāk nekā 24 stundās. Nenoplūst tikai tie virsledāja ezeri, kuri izveidojušies apgabalos, kur plaisas neveidojas.

Ledāja ledus ūdenscaurlaidība ir atkarīga no ledus temperatūras. Auksts ledus ir gandrīz pilnībā ūdensnecaurļaidīgs, tādējādi aukstā ledū praktiski nenotiek ledājūdeņu infiltrēšanās. Šādā ledū ūdens infiltrējas tikai caur plaisām, ūdensrijējiem un iegrauzoties virsledāja ūdens straumju gultnēm (20. att.). Siltā un mazaktīvā ledū ledājūdeņi var nelielā daudzumā infiltrēties caur tukšumiem gar graudu robežām, kā to paredz 1972. gadā izstrādātais Šrēva modelis (Shreve, 1972). Tas balstās uz vairākiem pieņēmumiem: 1) siltā ledū ūdens kanāliņi izveidojas vietās, kur saskaras trīs ledus kristāli; 2) ledāja tuneļu stabilā forma ir apaļa; 3) spiedienu tuneļos galvenokārt nosaka pārsedzošā ledus spiediens; 4) iekšledāja noteces sistēma ir līdzsvara stāvoklī – notece nemainās un tuneļu kušana ir līdzsvarā ar to aizvēršanos ledus iekšējās deformācijas dēļ; 5) iekšledāja ūdens ledājā plūst gar stāvāko hidro-lisko gradientu.

Lai gan Šrēva modelis ir nozīmīgs iekšledāja noteces izpratnei, nav pierādījumu, ka tas ir pareizs, jo novērojumi liecina, ka kanāli nav perpendikulāri ekvipotenciālajām līnijām. Lai gan modelis paredz, ka tuneļu formai jābūt apaļai, realitātē to forma mēdz būt dažāda. Nereti tuneļi ir dažādas morfoloģijas, arī ar stāvām kāplēm un vertikāli izstiepti. Šrēva modelis paredz, ka ūdens var brīvi plūst ledājā gar stāvāko potenciālo gradientu, bet tā lielākoties nenotiek, jo ledum ir zema ūdenscaurlaidība. Ir pierādījumi, ka siltajos ledājos iekšledāja notece pa nelieliem tuneļiem (dažu milimetru līdz centimetru diametrā), kas varētu būt radušies ūdens infiltrācijas dēļ, ir iespējama, bet ļoti neliela.

Iekšledāja kušanas ūdeņu noteces tīklu galvenokārt veido iekšledāja tuneļi (21. att.). To ūdens avots ir ledājūdeņi, kas ieplūst caur ūdensrijējiem un ledus plaisām. Ūdensrijēji augšdaļā ir salīdzinoši taisni un vertikāli, bet apakšējā daļā izliecas ledāja kustības virzienā un kļūst par iekšledāja tuneļiem. Ūdens plūsmu ledāja tuneļos, ja tos neietekmē atmosfēras spiediens,

nosaka hidrauliskais potenciāls. Tā atšķirības rada hidrauliskā potenciāla gradientu, kurš ir funkcija no ūdens blīvuma, ūdens spiediena, gravitācijas spēka paātrinājuma un ledus biezuma. Tādējādi ūdens plūdis no augstāka hidrauliskā potenciāla apgabala uz zemāku. Šeit gan jāņem vērā, ka hidrauliskais potenciāls tiek definēts tuneļos, kas ir pilnībā aizpildīti ar ledājūdeņiem, un tiek pieņemts arī, ka ūdens spiediens visur ir vienāds ar pārsedzošā ledus spiedienu.

Šrēva vienādojums (Shreve, 1985) nosaka to, ka ūdens ledājā plūst virzienā, kas ir perpendikulārs virsmām, ko definē konstants hidrauliskais potenciāls, – tās sauc par ekvipotenciālajām līnijām jeb virsmām (22. att.). Potenciāla gradients uz līnijas virsmas ir vienāds ar nulli. Pēc šī teorētiskā modeļa, iekšledāja tuneļiem vajadzētu būt perpendikulāriem ekvipotenciālajām līnijām, bet realitātē ūdensriņķu un iekšledāja tuneļu slīpumu galvenokārt nosaka plaisu ģeometrija, kurās tie ir izveidojušies, un ledāja plūsmas ātruma sadalījuma atšķirības ledājā. Iekšledāja deformācija samazina ūdensriņķu un plaisu slīpumu. Ūdensriņķu slīpumu

20. att. Virsledāja upe uz Valdemarbrēena ledāja Svalbārā šķērso aizvērtas, šķērseniskas plaisas. Ledus mazās ūdenscaurlaidības dēļ virsledāja ūdeņi ledājā var ieplūst, tikai iegrauzoties virsledāja upēm vai ledājūdeņiem ieplūstot plaisās. Foto: K. Lamsters, 2019.

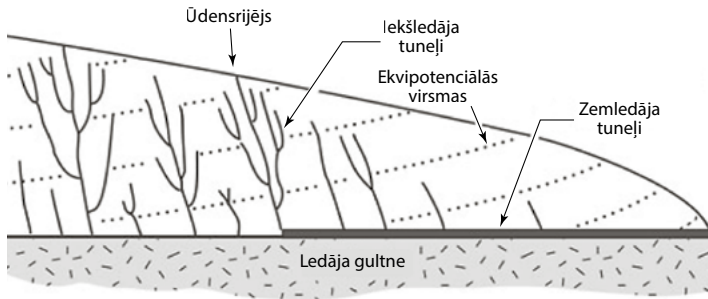




21. att. Iekšledāja tunelis
Tjorsárjokula ledājā Islandē.
Foto: K. Lamsters, 2017.

izmaina arī nevienmērīga sienu kušana. Tāpat arī ledājūdeņi var plūst dažādas orientācijas plaisās. Ja ledājūdeņus ietekmē atmosfēras spiediens, ūdens plūdis no augstākas vietas uz zemāku.

Kopumā iekšledāja noteces sistēmai ir slīps kokveida tipa tīklojums, kā to paredz teorētiskie vienādojumi, bet tuneļu ģeometriju un izvietojumu nosaka dažādi glacioloģiskie apstākļi. Šrēva modelī (Shreve, 1985) tiek paredzēts, ka daļa iekšledāja tuneļu veidosies no ūdensrijējiem, bet lielākā daļa mazāko tuneļu vienkārši sāksies ledājā, kur koncentrēsies infiltrētā ūdens plūsma. Novērojumi šādu iespēju neapstiprina. Iekšledāja tuneļu formu un izvietojumu ledājos nosaka kāds no galvenajiem tuneļu veidošanās mehānismiem – iegraušanās un aizvēršanās mehānisms (Gulley et al., 2009), hidroplaisāšana (Naegeli et al., 2014) vai ūdens plūsma pavājinājuma zonās ledājā, piemēram, plaisās.



Iegraušanās un aizvēršanās procesā virsledāja ūdens straumju gultnes iegraužas aizvien dziļāk ledājā (23. att.), jo ūdens ir sil-tāks par ledu, un pamazām kausē straumes gultni. Izgrauztā ka-nāla augšējā daļa tiek aizspiesta ciet ledus iekšējās deformācijas dēļ, līdz saglabājas tikai kanāla zemākā daļa, kurā plūst ūdens. Ledus plūsma tiecas aizvērt iekšledāja tuneļus, tādēļ to pastāvē-šana ir saistīta ar apkārtējā ledus spiedienu un tuneļa sienu papla-šināšanos ūdens un tā plūsmas radītā berzes siltuma ietekmē. Lai kanālam izveidotos ideāla cauruļvada morfoloģija, tam vajadzētu būt piepildītam ar ledājūdeņiem.

Tipiski iegraušanās rezultātā izveidotiem tuneļiem raksturī-gas garas un salīdzinoši lēzenas daļas, kuras pārtrauc stāvi pa-kāpieni. Tuneļi var iegrauzties līdz ledāja gultnei, bet aukstajā sezonā to apakšējās daļas visdrīzāk tiks aizvērtas ledus iekšējās deformācijas un ledājūdeņu sasalšanas dēļ, tādēļ nākamajā vai pat tajā pašā sezonā aktīvais tuneļis var attīstīties vairākus desmi-tus metrus augstāk, veidojot sarežģītu noteces tīklu ar aktīviem un aprimušiem tuneļiem dažādos līmeņos.

Iegraušanās mehānisms nav efektīvs veids, kā novadīt virs-ledāja ūdeņus līdz ledāja gultnei, pretstatā hidroplaisāšanai, kas var norisināties ļoti ātri (stundas līdz dienas). Hidroplaisāšana ir otrs galvenais mehānisms, kā strauji attīstās ūdensrijēji un iekš-ledāja tuneļi. To izraisa hidrostatiskais (ūdens) spiediens plaisā, kas veicina ar ūdeni pildītas plaisas padziļināšanos, ūdens no-plūšanu un tuneļa attīstību. Protams, lai veidotos iekšledāja tu-nelis, obligāti nav nepieciešama hidroplaisāšana. Jau 2005. gadā žurnālā "Nature" tika publicēts pētījums, kura autori (Fountain et al., 2005) apgalvoja, ka pat siltā ledājā lielāko daļu iekšledāja

22. att. Iekšledāja tuneļu shematiskais teorētiskais izvietojums ledājā. Tuneļiem teorētiski ir jābūt perpendikulāriem ekvipotenciālajām virsmām. Pēc Shreve (1985), ar K. Lamstera papildinājumiem.



23. att. Grenlandē Rasela izvadledājā iegrauzusies virsledāja straumes gultne. Foto: R. Pāvils, 2016.

noteces sistēmas veido hidrauliski saistītas plaisas dažādos līmeņos līdz pat ledāja gultnei, un tās lēnām novada iekšledāja ūdeņus. Šajā pētījumā kādā Zviedrijas ledājā tika veikti 48 urbumi, un 79% gadījumu katrā urbumā tika identificēts vismaz viens tukšums. Daļu no tiem vismaz daļēji aizpildīja lēni plūstošs ūdens. 80% gadījumu identificētie tukšumi bija saistīti ar stāvām iekšledāja plaisām, kuru vidējais platums bija vien 4 cm. Tikai vienā urbumā pētnieki identificēja cauruļveida formas tuneli 10 cm diametrā. Pētījuma autori secināja, ka šī ledāja iekšledāja noteces sistēmu galvenokārt veido hidrauliski savienotu iekšledāja plaisu tīkls. Šādas plaisas var veidoties vai nu jau iepriekš eksistējošu virsledāja plaisu padziļināšanās rezultātā, vai arī tām attīstoties uzreiz ledāja iekšējā daļā.

Virsledāja un iekšledāja kušanas ūdeņi galu galā nokļūst zemledāja noteces sistēmā. Zemledāja kušanas ūdeņi ir ļoti nozīmīgs faktors, kas ietekmē ledus plūsmas ātrumu, it īpaši bazālo slīdēšanu un ledāju uzplūdus, kā arī ledāja gultnes eroziju, atlūzu transportu, nogulsnešanu un deformēšanu. Zemledāja kušanas ūdeņu avots galvenokārt ir virsledāja un iekšledāja kušanas ūdeņu pieplūde, bet daļa no zemledāja kušanas ūdeņiem rodas virsledāja un iekšledāja ūdeņu atnestā siltuma un berzes, spiedienkušanas, ledus plūsmas berzes (iekšējās deformācijas) un lokāli arī ģeotermālā siltuma ietekmē. Silti bāzētos ledājos piegultnes ledus slāņa temperatūra sasniedz spiedienkušanas punktu, tāpēc šādi ledāji ir bagātīgi ar zemledāja kušanas ūdeņiem, pretstatā auksti bāzētiem ledājiem. Ieguldījumu kopējā zemledāja kušanas ūdeņu sistēmā var dot arī pazemes ūdeņi.

Zemledāja noteces sistēmu veido divi galvenie komponenti – neefektīva dalītā (izkliedētā) notece un efektīva notece tuneļos. Efektivitāte šajā gadījumā apzīmē sistēmas spēju pastāvīgi novadīt lielu ūdens apjomu no ledāja un gultnes kontaktzonas. Dalīto noteci veido plāna ūdens plēve, savienoti zemledāja dobumi, nelielas zemledāja ūdens straumes, zemledāja ūdenstilpes un zemledāja nogulumu, kas veido ierobežotu ūdens nesējslāni ar Darsī plūsmu.

Notece plānā ūdens slānī jeb ūdens plēvē ir mazsvarīgs kušanas ūdeņu komponents, kas liecina par nestabilu ledāja gultnes stāvokli, tādējādi pastāv maza varbūtība, ka šāda ūdens plēve (līdz dažu milimetru biezumam) var eksistēt ilgstoši plašā ledāja gultnes apgabalā. Skaitliskie modeļi liecina, ka ūdens plēve tiecas attīstīties par dažus desmitus centimetru dziļām ūdens straumēm un/vai dobumiem.

Pieaugot ledājūdeņu pieplūdei vai koncentrējoties ūdens straumēm un ledājūdeņu plūsmai savienotos dobumos, ledāja malas virzienā attīstās efektīva noteces sistēma, kuru veido zemledāja tuneļi. Tie veido dendrītisku tīklu, un to skaits pieaug ledāja malas virzienā. Galvenokārt tiek izdalīti divi zemledāja tuneļu tipi – Rētlisbergera jeb R tuneļi un Naja jeb N tuneļi (atbilstoši zinātnieku uzvārdiem, kuri pirmo reizi aprakstīja ūdens plūsmu šādos tuneļos). R tuneļi veidojas ledāja bazālajā daļā, savukārt N tuneļi ir zemledāja iežos iegrauztas ūdens straumju gultnes. Reizēm N tuneļi var tikt vēlāk aizpildīti ar sanešiem un virs tiem izveidojas ledāja pamatnē iegrauzts tunelis. Ja ledāja pamatni veido irdeni nogulumu, kušanas ūdeņi var izskalot tajos platus un sekļus kanālus, kurus dēvē par tuneļkanāliem vai tuneļielejām. No šīm zemledāja iejām izskalotie nogulumu var uzkrāties ledāja malas priekšā kā iznesu konusi. Bieži R tuneļi vēlākā attīstības stadijā arī tiek daļēji aizpildīti ar sanešiem – glaciofluviālajiem jeb ledājkušanas ūdeņu nogulumiem, ko veido šķirota smilts, grants vai oļi un pat dažāda izmēra akmeņi. Ledum nokūstot, ar sanešiem aizpildītie R tuneļi atklāsies ainavā kā likumoti vaļņi un grēdas, kurus pazīst kā osus. Šīs reljefa formas ir liecības par kādreizējo ledāju noteces





24. att. Neliels oss aprimušā iekšledāja tuneli pie Mūljokula izvadledāja Islandē. Foto: K. Lamsters, 2013.

sistēmām, un tās ir izplatītas arī Latvijas zemienēs (Lamsters, 2015; Zelčs et al., 2018). Osi Latvijā reizēm tiek dēvēti par kangariem, piemēram, Ogres Kangari un Lielie Kangari Suntažu apkārtnē. Osi veidojas arī, atkāpjoties mūsdienu ledājiem, un tie var veidoties gan virsledāja kanālos, gan iekšledāja (24. att.) un zemledāja tuneļos.

Par zemledāja tuneļu eksistenci zem mūsdienu ledājiem liecina šo tuneļu izplūdes vietas jeb portāli ledāja malā (25. att.). Nelielais tuneļu skaits pie mūsdienu ledāju malām norāda uz iepriekš minēto pieņēmumu, ka noteces sistēma veido dendrītisku tīklu – mazākie tuneļi baro lielākos tuneļus, kuri vienīgie attīstās līdz pat ledāja malai. Zemledāja tuneļu aktīva paplašināšanās parasti notiek tieši kušanas sezonas sākumā, bet vēlāk ledājūdeņi



neaizpilda lielākos tuneļus pilnībā. Tādējādi lielākajos tuneļos ūdens spiediens ir mazāks nekā pārējos. Tas izskaidro to, kādēļ zemledāja ūdeņi no mazākajiem tuneļiem tiecas plūst lielāko tuneļu virzienā. Kopumā ledājūdeņu notece tuneļos var dramatiski atšķirties diennakts ciklā un sezonāli. Diennakts izmaiņas lielākoties nosaka gaisa temperatūras atšķirības, kas kontrolē ledus ablāciju. Parasti vismazākā notece ir agri no rīta (pirms saullēkta) un vislielākā – vēlā pēcpusdienā vai vakarā. Noteces maksimums atpaliek no kušanas maksimuma par dažām stundām.

Kušanas sezona sākas pavasarī, kad norisinās ziemā uzsnigušā sniega kušana, palielinās notece caur tuneļiem, pieaug to izmērs, attīstās iekšledāja noteces sistēma, pieaug ūdens spiediens un vietām lēnām sākas bazālā slīdēšana. Kušanas sezonas sākumā tuneļu tīkls ir vāji attīstīts, tādēļ ūdens uzkrājas ledajā un potenciālā notece ir lielāka par reālo. Kušanas sezonas laikā pieaug tuneļu efektivitāte un potenciālā notece kļūst līdzīga reālajai vai mazāka par to, jo tiek atbrīvoti uzkrātie ledājūdeņi. Labi savienota noteces sistēma attīstās agrā vasarā. Tiek atbrīvoti uzkrātie

25. att. Zemledāja tuneļa izplūdes vieta Gepačfernera ledāja malā Kaunertāles ielejā Austrijā. Priekšplānā – grāmatas autors 2015. gadā.

ledājūdeņi, tādēļ dienas notece var pārsniegt dienas ablāciju. Dažu nedēļu laikā var noplūst lielākā daļa ledājūdeņu gada griezumā, un šo notikumu dēvē par nivālajiem plūdiem. Šie plūdi var izraisīt pēkšņu ledus plūsmas pieaugumu, jo bazālā slīdēšana sasniedz maksimumu. Vēlā vasarā noteces tīkls sasniedz tā optimālo efektivitāti, viss ledājā uzkrātais ūdens ir novadīts, bazālās slīdēšanas ātrums samazinās, dienas kušana ir līdzvērtīga dienas notecei un ūdens plūst zema spiediena tuneļos (ūdens spiediens tajos sasniedz minimumu). Rudenī ledus kušanas pārtraukšanās izraisa dramatisku noteces samazināšanos, tādēļ tuneļu tīkls sāk zaudēt efektivitāti un sākas tuneļu aizvēšanās ledus iekšējās deformācijas dēļ, jo tuneļos ledus spiediens kļūst lielāks par ūdens spiedienu. Ziemā kušanas ūdeņu ir ļoti maz, tuneļos spiediens ir ļoti zems un daudzviet zemledāja tuneļi aizveras. Tuneļu aizvēšanos nosaka klimats un konkrētās ziemas bardzība. Noteci, ja tāda vēl eksistē, lielākoties nodrošina kušana ledus iekšējās deformācijas rezultātā. Lielākos ledajos un īpaši ledus vairogos noteces sistēmas tīkls ziemā saglabājas labāk, savukārt nelielos ledajos noteces tīkls var tikt pārstrukturēts katru gadu.

Zemledāja ūdeņi var uzkrāties zemledāja ezeros. Mūsdienās tiek atklāts arvien vairāk zemledāja ezeru, un lielākā daļa no tiem atrodas Antarktīdā. Tie ir plašāk aprakstīti grāmatas nodaļā “Mūsdienu ledus vairogu raksturojums” apakšnodaļā “Antarktīka”.

Ledājūdeņi, atskaitot tos, kuri papildina pazemes ūdeņus, noplūst pieledāja teritorijā un uzkrājas ledājkušanas ūdeņu baseinos jeb ezeros. To veidošanos galvenokārt nosaka topogrāfiskie apstākļi, respektīvi, zemes virsas kritums attiecībā pret ledāju. Tas var būt ledāja kustības (distālā) virzienā, pretēji ledāja kustības virzienam (proksimālā virzienā) vai diagonālā virzienā. Citi apstākļi ir ledājkušanas ūdeņu pieplūdes intensitāte un ledāja malas pozīcija.

Ezeri kopumā var veidoties virs, iekš, zem un pie ledāja, un tos klasificē šādi:

- virsledāja jeb supraglaciālie ezeri;
- iekšledāja ezeri;
- zemledāja jeb subglaciālie ezeri;
- ledus caurkusuma ezeri;
- pieledāja ezeri:
 - ledāja sprostezeri,
 - morēnas vai pamatiežu sprostezeri;
- distālie ezeri;
- paliku ezeri.

Zemledāja jeb subglaciālie, iekšledāja un virsledāja jeb supraglaciālie, caurkusuma un pieledāja ezeri ir uzskatāmi par ledus kontakta ezeriem atšķirībā no distālajiem ezeriem, kuri barojas tikai ar ledājūdeņiem. Paliku ezeri vairs nebarojas no



ledājūdeņiem, un to pastāvēšanu nodrošina nokrišņi un iespējamā pazemes ūdeņu pieplūde.

Izplatītākais ezeru tips pie mūsdienu ledājiem ir pieledāja ezeri. Ja zemes virsas kritums ir ledāja virzienā un ezera ūdens noplūšanu kavē ledāja mala, to dēvē par ledāja sprostezeru (26. att.). Mūsdienu ledājiem atkāpjoties, to malas priekšā nereti atklājas pārmērīgi padziļināta ledāja gultne. Šādi padziļinājumi īpaši raksturīgi Islandes ledājiem, kuri mazā leduslaikmeta uzvirzīšanās laikā ievērojami erodēja gultni. Iespaidīgākais šāda veida ezers Islandē ir Jokulsārlons (*Jökulsárlón*), kurš izveidojies pie Breidamerkurjokula (*Breiðamerkurjökull*) ledāja Dienvidislandē. Tas ir arī dziļākais ezers Islandē (gandrīz 300 m), un tā platība pārsniedz 18 km². Ezers ir ievērojams tūrisma objekts, jo tajā vērojama liela aisbergu koncentrācija (27. att.). Ezeru mēdz dēvēt arī par lagūnu, jo tas ir savienots ar okeānu. Bēguma laikā aisbergi plūst okeāna virzienā un tiek izskaloti tā krastos.

Daļa ledājūdeņu plūst gar pašu ledāja malu, veidojot marginālos kanālus. Tie parasti veidojas, ja ledāja malā atsedzas cieti kristāliskie ieži (28. att.). Plašāki veidojumi ir ledājkušanas ūdeņu

26. att. Ledāja sprostezers pie Rasela izvadledāja Grenlandē. Foto: R. Pāvils, 2016.

noteces ielejas, kuras var veidoties gan paralēli, gan projām no ledāja malas. Tādā veidā radās daudzas Latvijas upju ielejas, pirms 14–15 tūkstošiem gadu noplūstot ledāju kušanas ūdeņiem. Ledāju kušanas ūdeņi pieledāja teritorijā var veidot arī pozitīvas (akumulatīvas) reljefa formas.

Izplatītākās reljefa formas ir sandru iznesu konusi un līdzenumi. Tie ir smilšaini glaciofluviālo nogulumu līdzenumi, ko veidojušas no ledāja izplūstošās ūdens straumes (29. att.). Tās visbiežāk ir zarotas straumes, kuru pārvietoto nogulumu graudu izmērs samazinās distālā virzienā (prom no ledāja). Sandru līdzenumiem nereti raksturīga topogrāfija ar nelielām ieapaļām ieplakām, kuras dēvē par glaciokarsta ieplakām. Tās veidojas, jo ar ātrām ledāju ūdeņu straumēm tiek pārvietoti arī ledus blāķi, kurus vēlāk pārklāj glaciofluviālie nogulumumi. Ledus blāķim izkūstot, zemes virskārta iebrūk, izveidojot ieplaku.

27. att. Jokulsárlona ezers Islandē. Tas ir ledāja sprostezers un dziļākais Islandes ezers. Fonā Breidamerkurjokula izvadledājs. Foto: K. Lamsters, 2013.





28. att. Marginālais ledājūdeņu kanāls gar Rasela izvadledāja malu Grenlandē. Priekšplānā redzami ieži ir gneisi.
Foto: R. Pāvils, 2016.

29. att. Aktīvs sandru līdzenums Dienvidrietumgrenlandē pie Rasela izvadledāja.
Foto: K. Lamsters, 2016.

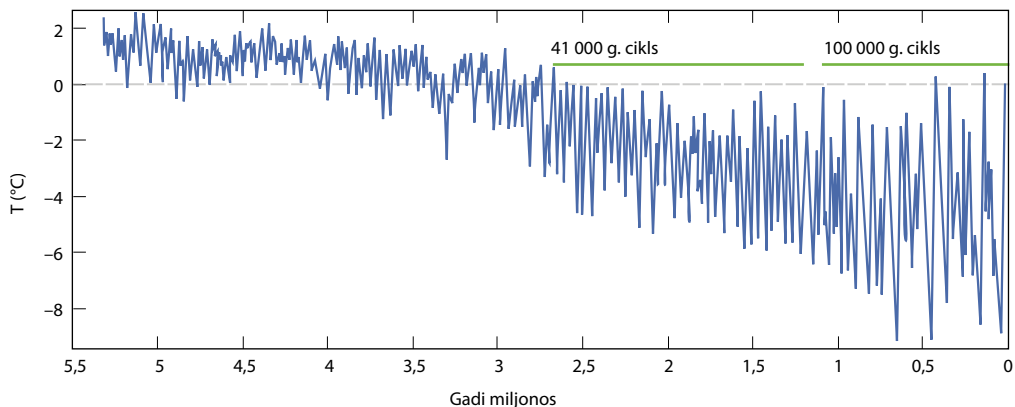
2. NODAĻA

LEDĀJI PAGĀTNĒ UN TO VEIDOŠANĀS CĒĻOŅI

LEDUSLAIKMETI

Ledāji uz Zemes ir eksistējuši jau vairākus miljardus gadu. Periodus, kad segledāji sasniedz plašu izplatību, sauc par leduslaikmetiem. Zemes vēsturē bijuši vismaz pieci leduslaikmeti, lai gan šobrīd ir zināms jau vismaz sestais leduslaikmets, un zinātnieki iegūst aizvien jaunus datus par atsevišķiem leduslaikmetiem arī citos laika posmos. Leduslaikmets kopumā var ilgt pat 100 un vairākus miljonus gadu, bet tam ir raksturīgi siltāka un aukstāka klimata laika posmi, kurus dēvē par glaciāliem un interglaciāliem vai arī par leduslaikmetiem un starpleduslaikmetiem. Piemēram, pēdējais, tā sauktais lielais leduslaikmets, sākās kvartāra periodā pirms 2,588 miljoniem gadu un turpinās joprojām, lai gan patlaban uz Zemes ir starpleduslaikmets.

Atkārtota leduslaikmeta iestāšanās laiku nākotnē var būtiski ietekmēt mūsdienu globālā sasilšana, tādēļ to patlaban nav iespējams ticami paredzēt. Pēdējam lielajam leduslaikmetam bija raksturīga vairāku desmitu leduslaikmetu un starpleduslaikmetu mija ar noteiktu intervālu. No laika pirms 2,588 līdz vienam miljonam gadu šis intervāls bija aptuveni 41 000 gadu, savukārt pēc viena miliona gadu visi



leduslaikmeti ilga aptuveni 100 000 gadu (30. att.). Šis leduslaikmetu cikliskums tiek saistīts ar Zemes orbitālajiem cikliem.

Senākais patlaban zināmais leduslaikmets pastāvēja pirms 2,9 miljardiem gadu arhaja eonā (Menzies, 2018). Segledāju atstātie nogulumi (tillīti) ir atrasti Dienvidāfrikā. Šajā laikā ogļskābās gāzes daudzums Zemes atmosfērā bija palielināts vulkāniskās aktivitātes dēļ, tāpēc segledāji nebija plaši izplatīti. Nākamais leduslaikmets iestājās pirms 2,4 miljardiem gadu agrajā proterozojā, un tas tiek dēvēts par Hūrona leduslaikmetu, jo ledāju nogulumi atrasti Kanādā, Hūrona ezera apkārtnē. Jaunākā nogulumu slāņkopa sastopama vismaz 120 000 km² lielā platībā. Vēlajā proterozojā leduslaikmets varēja iestāties pirms 850 miljoniem gadu un ilgt līdz gandrīz 600 miljoniem gadu. Šajā laikā segledāji pastāvēja vismaz polārajos, mērenajos un tropiskajos platuma grādos. Leduslaikmetā tiek izšķirtas vismaz divas apledojuumu epizodes: Stērtas (*Sturtian*) pirms 727–654 miljoniem gadu un Merino (*Marinoan*) pirms 660 un 635 miljoniem gadu. Kopā šie apledojuumi tiek dēvēti par kriogēna apledojuumiem. Tie bija visplašāk izplatītie Zemes vēsturē, un šis laiks tiek apzīmēts arī ar vārdu salikumu – sniegbumbas Zeme (*Snowball Earth*). Nākamais leduslaikmets, kurā bija vismaz trīs atsevišķas segledāju attīstības epizodes, izveidojās ediakarā pirms 635 līdz 541 miljoniem gadu.

Fanerozoja eonā, kura sākās pirms 541 miljona gadu un turpinās šobrīd, zināmi vismaz trīs izteikti leduslaikmeti. Senākais

30. att. Pēdējo piecu miljonu gadu atmosfēras temperatūras rekonstrukcija. Vertikālā skala parāda relatīvās atmosfēras temperatūras izmaiņas (tā nav absolūtā temperatūra) polārstacijas Vostok apkārtnē Antarktīdā. Nulle atbilst mūsdienu temperatūrai. Dati iegūti pēc astoņpadsmitā skābekļa izotopa koncentrācijas izmaiņām bentiskajās foraminiferās 57 dziļjūras nogulumu serdeņos un pielīdzināti no Vostoka ledus serdeņa rekonstruētajiem temperatūras izmaiņu datiem. Avots: *Wikimedia Commons (Robert A. Rohde, pēc Lisiecki, Raymo, 2005)*.

no tiem sākās pirms 500 miljoniem gadu un noslēdzās pirms 420 miljoniem gadu. Tas bija izplatīts galvenokārt Āfrikā un maksimālo izplatību sasniedza vēlajā ordovikā. Šī ordovika leduslaikmeta nogulumi (tillīti) atrasti Ahagara masīvā Sahārā. Apledojums izplatījās dažādās Gondvanas superkontinenta daļās: Dienvidamerikā, Ziemeļāfrikā, Arābijā un mūsdienu Dienvidrietumu Eiropā. Ordovika leduslaikmeta liecības veido ledāja eksarētā virsma ar izvagojumiem un skrambām, bazālie tillīti, glaciomarīnie nogulumi ar tā dēvētajiem pilienakmeņiem, sauktiem arī par dropstouniem, kā arī aleirolīti, smilšakmeņi un konglomerāti, kas atbilst glaciofluviālajiem nogulumiem.

Nākamais leduslaikmets eksistēja karbonā un permā un bija izplatīts Pangejas superkontinentā. Tas ilga no aptuveni 350 līdz 250 miljoniem gadu. Segledāji bija plaši izplatīti Dienvidāfrikā, Dienvidamerikā, Indijā, Austrālijā un Antarktīkā. Leduslaikmetam bija raksturīgi daudzi glaciālu–interglaciālu cikli, piemēram, Dienvidamerikā 320 līdz 370 miljonu gadu periodā vien izdalīti 17 cikli.

Pēc karbona–perma leduslaikmeta nav liecību par lieliem leduslaikmetiem, tomēr ir zināmi vairāki nelieli leduslaikmeti jura un pat krīta periodā (pirms 145–66 miljoniem gadu), lai gan šim laikam kopumā bija raksturīgas siltas temperatūras. Šajā gadījumā ledāju izplatība bija galvenokārt saistīta ar lielajiem platuma grādiem, piemēram, Dienvidaustrāliju. Krīta perioda dinosaurus fosilijas ir atrastas pat Antarktīdā, lai gan, piemēram, pirms aptuveni 90 miljoniem gadu Antarktīdā bija izveidojies segledājs.

Jaunākais leduslaikmets uz Zemes, kā minēts iepriekš, izveidojās kvartāra periodā pirms 2,588 miljoniem gadu. Reizēm gan tiek uzskatīts, ka šis leduslaikmets iestājās jau pirms 34 miljoniem gadu, un tas tiek dēvēts par vēlā kainozoja leduslaikmetu vai par Antarktīkas apledojumu, jo Antarktīkā izveidojās segledāji. Tomēr to nevar uzskatīt par globālu leduslaikmetu, tāds sākās vēlāk – kvartāra periodā.

Kainozoja ērā, kura sākās pirms 65 miljoniem gadu, klimats uz Zemes bija ļoti silts. Īpaši tas izpaudās paleocēna–eocēna termālajā maksimumā pirms 55,5 miljoniem gadu, kad zemeslodes vidējā gaisa temperatūra bija aptuveni 30 °C (tas ir divreiz vairāk nekā mūsdienās). Pēc šī termālā maksimuma, kurā pat Antarktīdā auga koki, globālais klimats kļuva vēsāks, izraisot Antarktīkas apledojumu pirms 34 miljoniem gadu. Siltākas temperatūras bija raksturīgas pirms 15 miljoniem gadu, kad Antarktīkas ledāju apjoms ievērojami samazinājās, bet pirms 14 miljoniem gadu to apjoms bija līdzīgs kā mūsdienās.

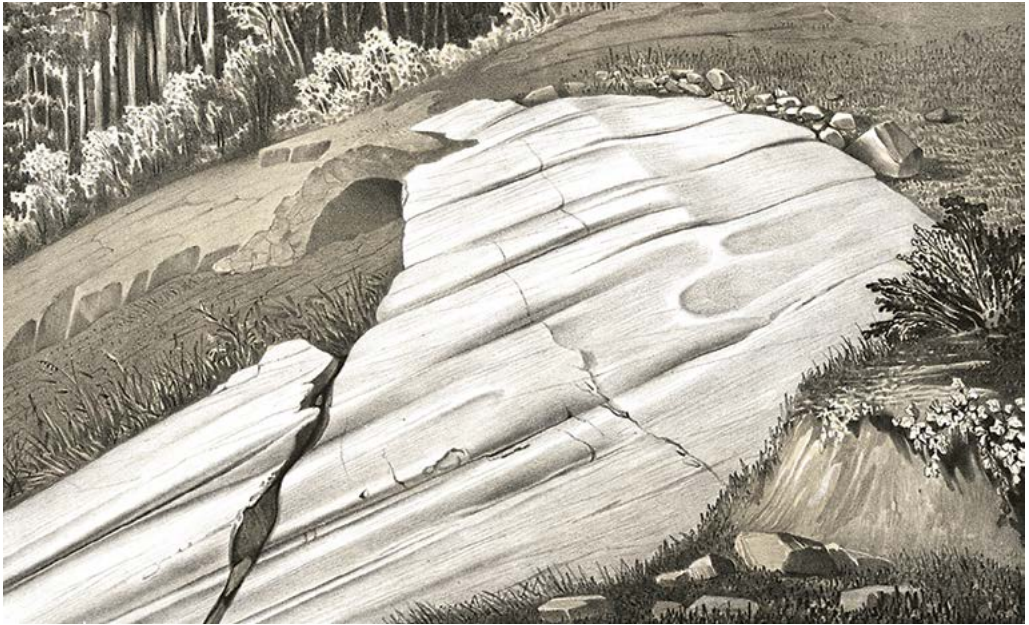
Lielais leduslaikmets, kas izpaudās abās Zemes puslodēs, gan iestājās tikai pleistocēna epohā. Tad senie segledāji kļuva aptuveni 40 miljonu km² lielu platību, pārsežot aptuveni 27% zemeslodes platības. Segledāji aizņēma ap 60% Ziemeļamerikas un 40% Eirāzijas sauszemes platības. Pleistocēna lielā leduslaikmeta

pēdējais apledojums ilga aptuveni no 110 līdz 11,7 tūkstošiem gadu pirms mūsdienām, kad iestājās starpleduslaikmets. Latvijas teritorijā urbemos atrasti nogulumi no vismaz trīs apledojumiem – Latvijas, Kurzemes un Lētižas (Vislas, Zāles un Elsteres pēc Ziemeļrietumeiropas klasifikācijas). Pēdējā apledojumā Latvijas teritoriju pilnībā ledus pārklāja Skandināvijas ledus vairogs maksimālās attīstības fāzē pirms aptuveni 21 000 gadu. Ledus vairoga atkāpšanās jeb deglaciācija norisinājās daudzu tūkstošu gadu laikā, ledus lobiem un mēlēm vairākkārt aktivizējoties un uzvirzoties galvenokārt Latvijas zemienēs (Āboltiņš, 2010).

GLACIĀLĀS TEORIJAS ATTĪSTĪBA

Leduslaikmetu cēloņu noskaidrošana ir nozīmīgākā problēma zinātnieku izpratnē par klimata mainību uz Zemes. Leduslaikmetu cēloņu meklējumu pirmsākumi saistāmi ar glaciālās teorijas attīstību (Lamsters, 2020b). Tā ir teorija par segledāju attīstību un plašu izplatību leduslaikmetos, arī ledāju sanešu pārvietošanu un uzkrāšanos. Glaciālās teorijas pamatlicējs ir dabaszinātnieks Luijs Agasī (*Louis Agassiz*), kurš 1840. gadā publicēja teoriju par kontinentālajiem apledojumiem (*Études sur les glaciers* – “Ledāju pētījumi”). Interesanti, ka tikai dažus gadus pirms grāmatas publicēšanas L. Agasī apšaubīja ledāju izplatību senatnē ārpus Alpiem un organizēja ekspedīciju uz Alpu ledājiem, lai pārlicinātu Žanu de Šarpentjē (*Jean de Charpentier*) par viņa kļūdainajiem uzskatiem. Tomēr pēc vairāku nedēļu pētījumiem pats L. Agasī ne tikai atzina Šarpentjē idejas, bet arī attīstīja leduslaikmeta koncepciju. Pētījumi Alpos L. Agasī sniedza skaidras liecības, ka šie ledāji pagātnē bijuši izplatīti plašāk. Par to liecināja, piemēram, laukakmeņu un klintsiežu virsmas, kuras ledājs bija nopulējis vai saskrāmbājis (31. att.).

Daudzi zinātnieki un L. Agasī laikabiedri deva būtisku ieguldījumu glaciālās teorijas attīstībā un izpratnē par ledājiem (Krüger, 2013). Šveices alpīnists Žans Pjērs Perodēns (*Jean-Pierre Perraudin*), piemēram, viens no pirmajiem aprakstīja ledāju skrambas uz iežu virsmām un skaidroja to ar ledāju uzvirzīšanos pagātnē. Savukārt šveiciešu inženieris Ignācijs Venecs (*Ignaz Venetz*) pētīja erātisko materiālu un rosināja tā izcelsmi saistīt ar ledāju plašāku izplatību senāk. Viens no dedzīgākajiem L. Agasī teorijas aizstāvjiem bija Džeims Forbss (*James Forbes*), kurš sniedza nozīmīgu ieguldījumu ledāju kustības mehānisma pētījumos un idejā par ledāju viskozo plūsmu. 1843. gadā viņš publicēja grāmatu “Ceļojumi pa Savoijas Alpiem” (*Travels through the Alps of Savoy*), kurā izskaidroja daudzus glaciālās teorijas aspektus, papildinot stāstījumu ar elegantām vizualizācijām, kuras zīmēja pats. Grāmatas titullapā viņš attēloja pats sevi, stāvot zem tā sauktā ledāja

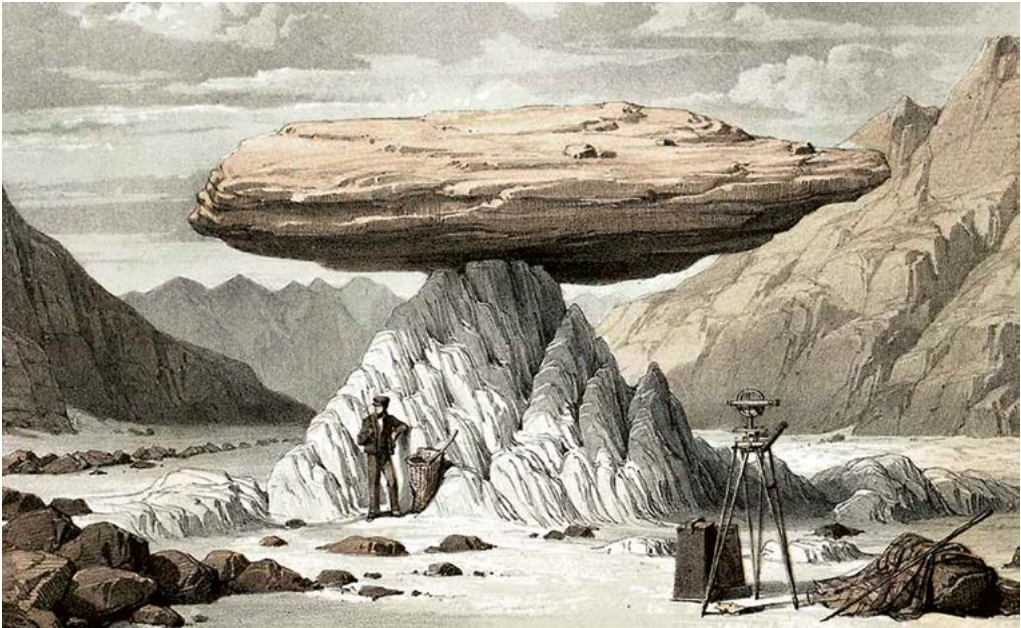


31. att. Kalnu ledāju
abradēta laukakmens virsa
ar ledāja radītām skrumbām
un citām erozijas zīmēm.
Avots: L. Agasī grāmata
"Ledāju pētījumi" (*Études sur
les glaciers*, 1840).

galda jeb iespaidīga izmēra iežu atlūzas uz ledus konusa pamatnes (32. att.). Šādi veidojumi ir novērojami arī mūsdienu ledājos, un tie rodas, iežu atlūzai samazinot zem tās esošā ledus kušanu.

Pirms un arī gandrīz pusgadsimtu pēc glaciālās teorijas izveidošanās laukakmeņu un irdenu un nešķirotu nogulumu jeb erātiskā materiāla (sanešu materiāls, kura cilmes vieta ir kaut kur citur) izplatību ārpus mūsdienu ledāju klātajām teritorijām skaidroja ar dažādām hipotēzēm. Tās var apvienot vienā vārdā – antiglaciālisms (Lamsters, 2020a). Antiglaciālisma hipotēzes bija atzītas zinātnieku vidū līdz pat 19. gadsimta beigām. Savukārt 19. gadsimta sākumā lielākā daļa zinātnieku joprojām uzskatīja, ka erātiskais materiāls ir izgulsnējies Pasaules plūdu laikā. Šis uzskats balstījās uz Bībelē aprakstītajiem grēku plūdiem un tika zinātniski dēvēts par diluviālo teoriju. Uz tās bāzes attīstījās arī dažādas citas hipotēzes, kas skaidroja sanešu materiāla pārvietošanu pagātnē ar plūdu ūdeņiem un dubļu plūsmām.

Kā viena no pēdējām antiglaciālisma hipotēzēm eksistēja aisbergu drifta teorija. Reliģisku apsvērumu dēļ šī teorija bija atzīta laikā, kad aizvien vairāk zinātnieku pieņēma glaciālo teoriju.



Drifta teorijas pamatideja ir sanešu materiāla un laukakmeņu pārvietošana ar aisbergiem, un šo teoriju 1833. gadā vienā no pasaules vēsturē nozīmīgākajām mācību grāmatām “Ģeoloģijas principi” (*The principles of geology*) skaidro britu ģeologs Čārlzs Laiels (*Charles Lyell*). Kopā ar Č. Laielu drifta teoriju atbalsta arī dabaszinātnieks Čārlzs Darvins (*Charles Darwin*), kurš aisberģus novēro savā ceļojumā ar kuģi “Bīģls” (*Beagle*).

Mūsdienās par glaciālās teorijas oponentiem (antiglaciālistiem) mēdz būt kreacionisti (bieži – evaņģēliskie kristieši), kuri uzskata, ka pasaule izveidojusies dievišķās radīšanas rezultātā salīdzinoši nesēnā pagātnē. Mūsdienu kreacionisma paveids un aktīvs daudzu zinātnisko teoriju noliedzējs ir neokreacionisms.

32. att. Ledāja galds uz kāda Šveices Alpu ledāja. Tā ir iežu atlūza, kuru pārvietojis ledājs, un vēlāk samazinātas Saules radiācijas absorbcijas dēļ zem atlūzas esošais ledus ir kuisis lēnāk nekā apkārtējais ledāja ledus. Džeimsa Forbsa ilustrācija no viņa grāmatas “Ceļojumi pa Savoņas Alpiem” (*Travels through the Alps of Savoy*, 1843)

LEDUSLAIKMETU CĒĻOŅI

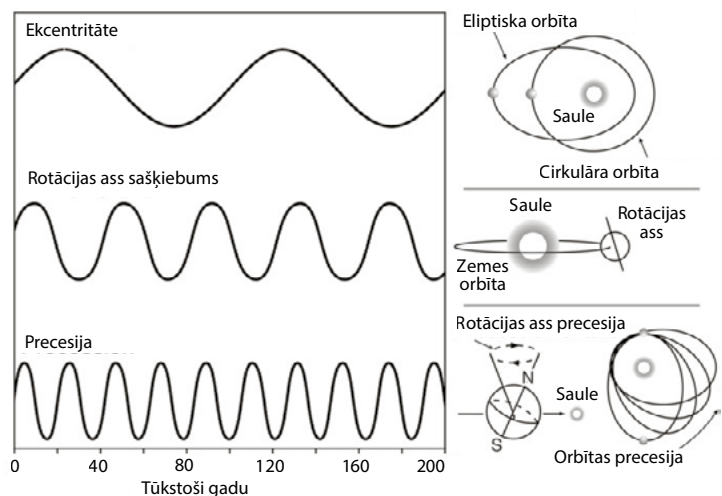
Mūsdienās ir zināms, ka leduslaikmetus izraisa daudzu faktoru kopums, no kuriem būtiskākā sākotnējā nozīme ir Zemes orbitālajiem cikliem (Lamsters, 2019). Lai gan pastāv cieša saistība

starp orbitālajiem cikliem un leduslaikmetu–starpleduslaikmetu secību, šī saistība nav vienkārša, un leduslaikmetu iestāšanos un izbeigšanos kopumā regulē daudzu faktoru mijiedarbība. Tāpat arī īstermiņa klimatisko izmaiņu specifiskie cēloņi joprojām nav pilnībā pierādīti.

Klimatu uz Zemes galvenokārt nosaka Zemes un Saules savstarpējā novietojuma cikliskas svārstības, kas ietekmē saņemtās Saules radiācijas daudzumu. Būtiska ir arī Saules radiācijas absorbcijas un atstarošanas mainība, kā arī siltuma cirkulācijas fluktuācijas uz Zemes. Saules radiācijas absorbciju un atstarošanu būtiski ietekmē atmosfēras sastāvs, siltumnīcefektu izraisošo gāzu koncentrācija, atmosfēras duļķainība un aerosolu daļiņu koncentrācija, kā arī ūdens tvaika daudzums un pat mākoņu tips. Galvenie leduslaikmetu cēloņi ir trīs orbitālie faktori – Zemes orbītas ekscentritāte, Zemes rotācijas ass sašķiebums un precesija (33. att.). Šie faktori nosaka Saules radiācijas sadalījumu Zemes puslodēs dažādos gadalaikos, un tiem ir raksturīgs noteikts cikliskums.

33. att. Trīs orbitālo faktoru (Zemes orbītas ekscentritāte, Zemes rotācijas ass sašķiebums, precesija) ciklu salīdzinājums. Sagatavojis K. Lamsters.

Ekscentritātes ciklā (100 000 gadi) Zemes orbīta mainās no eliptiskas līdz gandrīz ideāli apļveida orbītai, tādējādi ekscentritātes koeficients mainās no 0,00005 līdz 0,07. Ciklu izraisa galvenokārt Saturna un Jupitera gravitācija. Šo planētu gravitācijas



spēka ietekmē Zemes orbītas ekscentritātes izmaiņas svārstās no 0 līdz 5%. Ekscentritātei raksturīgi arī salikti 405 000 gadu cikli, kuru ietekme uz Zemes klimatu ir pierādīta 59 miljonus gadu senā pagātnē un pat pirms 215 miljoniem gadu. Žurnālā “Science” publicētā rakstā 2019. gadā (Zeebe & Lourens, 2019) prezentēta absolūtā astrohronoloģija līdz 58 miljonus gadu senai pagātnē un parādīts, ka paleocēna–eocēna termālais maksimums, kad globālā temperatūra pārsniedza 30 C°, sakrīt ar 405 000 gadu cikla ekscentritātes maksimumu. Ja ekscentritāte ir izteikta, Zemes virsma saņem vairāk siltuma, kad Zeme atrodas perihēlijā, respektīvi, orbītas punktā vistuvāk Saulei.

Mūsdienās starpība starp Zemes orbītas perihēlija un afēlija punktiem (Zemes attālumu no Saules, kad tā atrodas tai vistuvāk (perihēlijā) un vistālāk (afēlijā)) ir 3%. 2020. gadā Zeme atradās perihēlijā 5. janvārī, bet afēlijā 4. jūlijā. 3% atšķirība nozīmē to, ka Zemes virsma saņem par 6% vairāk siltuma Ziemeļu puslodes ziemā nekā vasarā. Savukārt, ja Zeme atrastos perihēlijā maksimālās ekscentritātes gadījumā, viena no Zeme puslodēm lielajos platuma grādos saņemtu par 20–30% vairāk solārās radiācijas salīdzinājumā ar atrašanos afēlijā. Mūsdienās ekscentritāte ir 0,017, un tā samazināsies līdz nullei 30 000 gadu laikā. Pēc šī laika cikls sāks virzību uz maksimālo ekscentritāti, kas varētu radīt labvēlīgus apstākļus jaunam kontinentālajam apledojumam Ziemeļu puslodē, ja neņem vērā citus faktoros.

Zemes sašķiebums ir Zemes rotācijas ass sašķiebuma leņķis pret tās orbītas plakni, un tas mainās no aptuveni 22° līdz 24,5°. Mūsdienās tas ir aptuveni 23,4° un turpina samazināties. Sašķiebuma izmaiņu pilns periods ilgst 41 000 gadu. Rotācijas ass sašķiebums neietekmē kopējo solārās radiācijas daudzumu, kuru saņem Zeme, bet gan nosaka, kura Zemes puslode saņems vairāk vai mazāk Saules radiācijas dažādos gadalaikos. Tādējādi rotācijas ass sašķiebums rada gadalaikus uz Zemes. Lielāks sašķiebums izraisa kontrastaināku sezonālītāti (gadalaikus). Mazāks rotācijas sašķiebums rada vienmērīgāku siltuma sadalījumu vasaras un ziemas sezonā lielajos platuma grādos, tādējādi tiek veicināta ledāju veidošanās siltāku un nokrišņiem bagātāku ziemu dēļ. Savukārt zemākas temperatūras vasarā pasargā sniegu no kušanas.

Kopumā neliels Zemes ass sašķiebums samazina Saules radiācijas daudzumu lielajos platuma grādos, kur veidojas segledāji, un palielina to zemajos platuma grādos (tuvāk ekvatoram). Šo efektu pierāda arī daži mūsdienu modeļi, kur zems sašķiebums kopumā pazemina Zemes vidējo temperatūru par 0,5 līdz 1 °C, neskatoties uz to, ka kopējais Saules radiācijas daudzums uz Zemes nemainās ass sašķiebuma ciklu laikā. Rotācijas ass sašķiebuma pieaugums atkal palielina Saules radiācijas daudzumu vasarā lielajos platuma grādos un samazina ziemā, veicinot siltākas vasaras un aukstākas ziemas, jo vasarā lielajos platuma grādos dienas ilgums

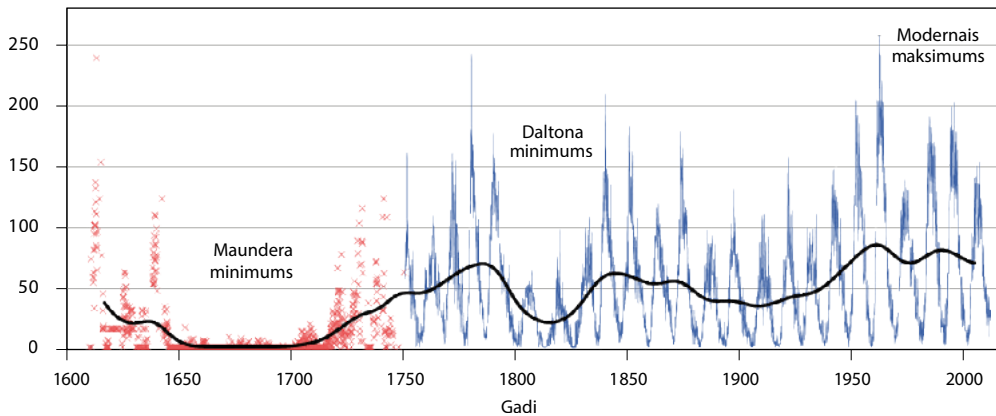
ir daudz ilgāks, bet ziemā – īsāks nekā tad, ja Zemes ass nebūtu sašķiebta. Karstas vasaras lielajos platuma grādos veicina sniega un ledāju kušanu, bet aukstās ziemās nokrišņu daudzums, kurš nepieciešams, lai veidotos ledāji, ir samazināts. Kopumā Zemes ass sašķiebums būtiskāk ietekmē klimatu lielajos platuma grādos.

Precesija ir Zemes rotācijas ass virziena periodiska maiņa, kuras cēlonis ir Mēness, Saules un planētu gravitācijas lauku iedarbība uz Zemes ekvatoriālo pāresnīnājumu. Precesijas ciklā Zemes rotācijas ass veic riņķveida kustību 25 700 gadu laikā. Precesija izsauc perihēlija sezonas pārbīdi. Tādējādi pavasara un rudens ekvinokcija (laika moments, kad Saule šķērso debess ekvatoru un dienas un nakts ilgumi ir aptuveni vienādi) pārbīdās par 90° katrā precesijas cikla ceturtdaļā. Ja patlaban Zeme perihēlijā atrodas 5. janvārī, tad pēc apmēram 14 000 gadiem tas notiks 4. jūlijā.

Precesijas efekts pretēji Zemes ass sašķiebuma efektam īpaši izpaužas tropos. Kad ekscentritāte sasniedz maksimumu, Ziemeļu puslodē iestājas labvēlīgi apstākļi apledošanas attīstībai, ja Ziemeļu puslodes vasarā Zeme atrodas afēlijā. Tādējādi Arktikā vasaras laikā ir pietiekami auksts, lai saglabātos sniegs. Precesijas cikli ir raksturīgi ne tikai Zemes rotācijas asij, bet arī orbītai, un to sauc par orbītas jeb apsideiālo precesiju (33. att.). Tā nedaudz ietekmē sezonālītāti un gadalaiku garumu. Kopumā, lai iestātos leduslaikmeta attīstībai labvēlīgi apstākļi, svarīga ir visu orbītālo faktoru kombinēta ietekme, ka arī neorbitālie faktori.

Leduslaikmeta iestāšanās un ledāju izplatību uz Zemes ietekmē daudzi neorbitālie faktori, piemēram, sauszemes un okeānu izvietojuma sakarības un atšķirības, nokrišņu daudzums, ledāju un okeānu, un atmosfēras mijiedarbība, atmosfēras sastāvs, vulkānisms, okeāna temperatūras un sāļuma izmaiņas, dzīvo organismu ietekme un citi faktori. Potenciāla ietekme ir arī solārās radiācijas un kosmiskā starojuma intensitātes izmaiņām, piemēram, Saules aktivitātes cikliskajām izmaiņām, kurām raksturīgi dažāda garuma cikli. No tiem īsākais un zināmākais ir Švābes 11 gadu cikls, kura laikā uz Saules palielinās un samazinās plankumu daudzums. Saules virsmas aktivitāte pieaug līdz ar plankumu skaita palielināšanos. Ciklam iesākoties, plankumus skaits ir ļoti mazs vai tie praktiski gandrīz nav novērojami. Tad plankumu skaits palielinās, līdz sasniedz maksimumu aptuveni cikla vidusdaļā un tad atkal samazinās līdz minimumam. Saules plankumu skaits cikla maksimumā var variēt no 50 līdz 260 plankumiem. Maksimums var tikt sasniegts 80 mēnešos vai spēcīga cikla gadījumā pat 40 mēnešos no cikla sākuma.

Patlaban ir sācies 25. cikls, kurā tiek prognozēts vēl zemāks plankumu skaits nekā iepriekšējā ciklā. Vairākos pētījumos tiek prognozēts, ka 25. vai 26. ciklā magnētiskie lauki var būt tik vāji, ka neveidosies neviens redzams Saules plankums un līdz 2100. gadam iestāsies Maundera minimumam līdzīgs periods. Maundera



minimums (34. att.) bija viens no periodiem mazajā leduslaikmetā no aptuveni 1645. līdz 1715. gadam, kad klimats ziemeļu puslodē bija salīdzinoši vēsāks. Pēc tā iestājās Daltona minimums, un starp 1950. un 2000. gadu – modernais maksimums, kuru mūsdienās jau ir pārtraucis nākamais minimums. Lai gan vairāki Saules aktivitātes minimumi sakrīt ar mazo leduslaikmetu (tas nav leduslaikmets tradicionālā izpratnē), tā iestāšanās iemesli nav pilnībā noskaidroti, un, visticamāk, tādi ir vairāki, ieskaitot pastiprinātu vulkānisko aktivitāti, okeānu termohalīnās cirkulācijas pavājināšanos un pat, iespējams, samazinātu cilvēku populāciju Eiropā “melnās nāves” jeb mēra dēļ.

Saules ciklu cēloņi joprojām nav izzināti, un zinātnieku izpratne par procesiem, kas ietekmē plankumu veidošanos, ir vāja. Tādējādi prognozēt Saules plankumu skaita variācijas nākotnē ir neiespējami. Šādas prognozes tiek balstītas tikai uz statistiku par novērotajiem Saules cikliem pagātnē. Tomēr, lai gan ir pierādījumi solārās radiācijas fluktuāciju ietekmei uz klimatu (tā gan ir ļoti neliela), nav iegūti pārliecinoši pierādījumi, ka leduslaikmetu iestāšanos varētu izraisīt solārās radiācijas absolūtā daudzuma fluktuācijas. Mūsdienās klimatu nozīmīgi ietekmē arī cilvēka (antropogēnā) darbība, tomēr tās ilgtermiņa sekas vēl ir pārāgrī precīzi prognozēt. Daži zinātnieku aprēķini liecina, ka cilvēces radīto siltumnīcefektu izraisošo gāzu palielinātās koncentrācijas dēļ nākamais leduslaikmets uz Zemes varētu neiestāties vēl vismaz pusmiljonu gadu tuvā nākotnē.

34. att. Saules plankumu skaits pēdējos 400 000 gadu. Dati pēc 1749. gada ir pieejami Solārās ietekmes datu analīzes centrā no nepārtrauktiem Saules plankumu novērojumiem dažādās observatorijās visā pasaulē. Pirms 1749. gada pieejami tikai sporādiski Saules plankumu novērojumi. Avots: *Wikimedia Commons (Robert A. Rohde), ar K. Lamstera papildinājumiem.*

Ideja, ka leduslaikmetus galvenokārt izraisa orbitālie faktori, pirmo reizi zinātnē parādās 19. gadsimta 30. gados, un to izvirza angļu astronoms Džons Heršels (*John Herschel*). Viņa teoriju vēlāk attīsta Džons Dovs (*John Dove*), franču matemātiķis Žozefs Ademārs (*Joseph Adhémar*) un skotu zinātnieks Džeims Krolls (*James Croll*). Dž. Krolls izveido Krolla astronomisko (orbitālo) teoriju, kura skaidro saistību starp leduslaikmetiem un Zemes orbītas izmaiņu variācijām. Šī teorija balstās uz empīriskiem pierādījumiem, pretstatā iepriekšējām teorijām, un pamato pakāpeniskas Zemes klimata fluktuācijas. Dž. Krolls pirmais saista leduslaikmetu izcelsmi ar trīs orbitālajiem faktoriem – Zemes orbītas ekscentritāti, rotācijas ass sašķiebumu un precesijas cikliskām izmaiņām. Viņš aprēķina Zemes orbītas ekscentritāti trīs miljonu gadu laikā, konstatē tās cikliskumu un pamato saistību starp orbītas ekscentritāti un solārās radiācijas daudzumu uz Zemes atšķirīgos gadalaikos. Solārās radiācijas sadalījuma atšķirības ir izteiktākās tad, kad Zemes orbītai ir lielāka ekscentritāte (tā ir maksimāli izstiepta). Zemes orbītas izmaiņas, kuras papildzina ziemas sezonu, izraisa lielāku sniega akumulāciju lielajos ģeogrāfiskā platuma grādos, un tas savukārt palielina solārās radiācijas atstarošanas no baltās sniega virsas, pastiprinot sākotnējo orbitālo ietekmi (Lamsters, 2019).

Nozīmīgākais zinātnieks, kurš pilnveido Krolla teoriju, ir serbu matemātiķis Milutins Milankovičs (*Милутин Миланковић*). Viņš 1941. gadā izstrādā Milankoviča teoriju – matemātisku klimata izmaiņu teoriju –, uz kuras balstās arī mūsdienu zinātniskās teorijas. Milankoviča teorija ietver visus trīs Zemes orbītas ciklisko variāciju faktorus (33. att.). Viņš pieņem, ka leduslaikmetu–starpleduslaikmetu ciklus galvenokārt ietekmē vasaras insolācijas izmaiņu ietekme uz sniega kušanas ātrumu. Tādējādi M. Milankovičs uzskatīja, ka solārās radiācijas izmaiņas ir galvenais faktors, kas izraisa leduslaikmetus.

20. gadsimta 70. gados tiek atrasti pierādījumi no dziļjūras nogulumu serdeņiem, kas apliecina, ka M. Milankoviča prognozes un orbitālie cikli lielākoties sakrīt ar zināmajiem klimata pārmaiņu cikliem uz Zemes. Pierādījumi tiek publicēti 1976. gadā žurnālā “Science” (Hays et al., 1976), un tā joprojām tiek uzskatīta par nozīmīgāko publikāciju, kas pierāda orbitālo ciklu un Milankoviča teorijas saistību ar leduslaikmetu–starpleduslaikmetu veidošanos uz Zemes. Tomēr, lai gan liela daļa zinātnieku uzskata, ka šī astronomiskā teorija ir pierādīta un orbitālie cikli neapšaubāmi var iniciēt klimatiskās izmaiņas, patlaban joprojām nav detalizēta skaidrojuma, kā tieši šīs nelielās izmaiņas orbitālajos ciklos rada tik nozīmīgas klimata pārmaiņas. Daudzi procesi, kā, piemēram, ledus vairogu dinamika, gāzu, īpaši ogļskābās gāzes un metāna, sastāva izmaiņas dažādos okeāna dziļumos, putekļu daļiņu transports atmosfērā, oglekļa un citu ķīmisko elementu bioģeoķīmiskie cikli, joprojām nav fundamentāli izzināti. Turklāt vēl aizvien ir neizprotams, kādēļ

pēdējo miljons gadu laikā dominē 100 000 gadu ilgu leduslaikmetu cikli, bet pirms tam – 41 000 gadu cikli.

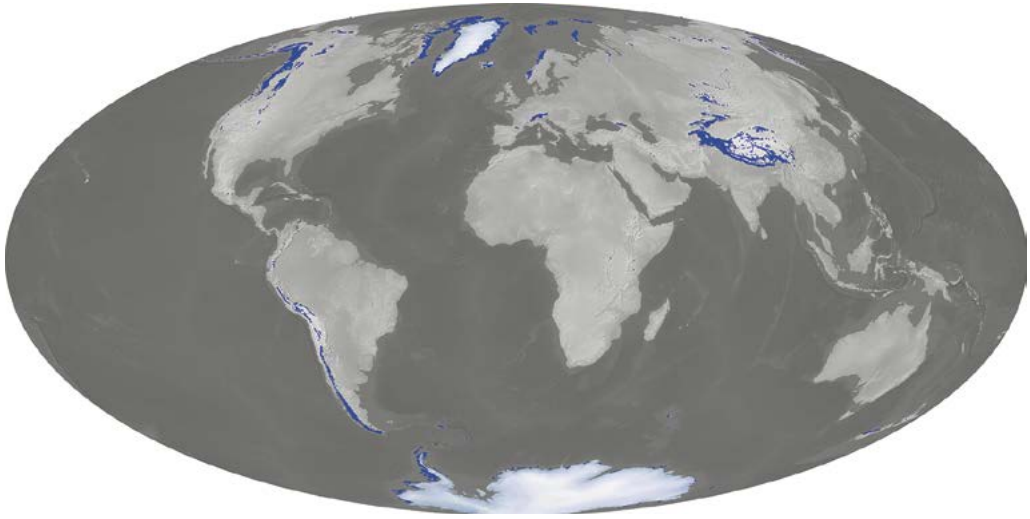
Mūsdienās tiek attīstīti modeļi, kas mēģina precīzi skaidrot leduslaikmetu–starpleduslaikmetu cikliskumu, ņemot vērā gan orbitālos, gan arī neorbitālos faktorus un nelineāru mijiedarbību starp dažādiem klimata sistēmas komponentiem, bet tie vēl aizvien ir nepilnīgi. Nesenā publikācijā žurnālā “Science” (Hodell, 2016), kur analizēti mūsdienās pieejamie pierādījumi par klimata izmaiņu cikliskumu, tiek secināts, ka mūsdienās trūkst vienota mehānisma, kas pilnībā izskaidrotu orbitālo ciklu saistību ar leduslaikmetu–starpleduslaikmetu cikliem.

3. NODAĻA

MŪSDIENU LEDĀJU RAKSTUROJUMS

Ledāji mūsdienās klāj aptuveni 10% jeb 16 miljonus km² sauszemes virsas. Lielākā ledus masas daļa atrodas polārajos apgabalos – Grenlandes (1,7 milj. km²) un Antarktikas (13,9 milj. km²) ledus vairogos. Arī pārējā atlikusī ledāju klātā teritorija galvenokārt atrodas polārajos un subpolārajos apgabalos, kā arī piekrastes kalnu grēdās un ievērojamā augstumā kalnos kontinentu vidienē. Procentuāli no visas ledāju klātās teritorijas (35. att.) 91% atrodas Antarktīkā, 8% – Grenlandē, mazāk nekā 0,5% – Ziemeļamerikā, ap 0,25% – Āzijā un mazāk nekā 0,1% – Dienvidamerikā, Eiropā, Āfrikā, Jaunzēlandē un Jaungvinejā. Precīzs pasaules ledāju skaits nav zināms, jo daudzi ir pārāk mazi, lai būtu iespējams tos izšķirt no sniega sakopojumiem un iezīmēt to robežas pēc satelītattēliem. Pilnīgākā ledāju robežu datubāze pasaulē ir Randolfa ledāju inventarizācija (*Randolph Glacier Inventory*). Pasaules ledāju robežas ir brīvi pieejami dati, kam var piekļūt vietnē <http://www.glims.org/maps/glims>.

No minētās datubāzes izriet, ka aptuvenais pasaules ledāju skaits varētu būt 200 000 un to aizņemtā platība – aptuveni 750 000 km², neieskaitot Grenlandes un Antarktikas ledus vairogus. Datubāzē nav iekļauti ledāji, kuru platība ir mazāka par 0,1 km², un daudzi nelielie ledāji ir apvienoti ar lielāko ledāju, tādējādi,



ja pieskaitītu visus potenciālos maza izmēra ledājus, to skaits varētu būt vismaz divreiz lielāks. Izkūstot visiem šiem atsevišķajiem ledājiem, Pasaules okeāna līmenis celtos par 15 līdz pat 47 cm. Tas, protams, irniecīgs devums, salīdzinot ar Grenlandes un Antarktīkas ledus vairogos ieslēgtās ledus masas ūdens ekvivalentu (65 m), tomēr tieši šie ledāji pēdējos gadu desmitos atkāpjas visstraujāk, un līdz 2100. gadam aptuveni puse pasaules ledāju varētu būt izzuduši. Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes (*Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*) piektajā novērtējuma ziņojumā apkopotie klimata mainības modeļi paredz, ka līdz 2100. gadam Pasaules okeāna jūras līmenis varētu pieaugt, visticamāk, līdz 0,5 m vai pat 1 m, ja piepildās vispesimistiskākās prognozes (IPCC, 2014).

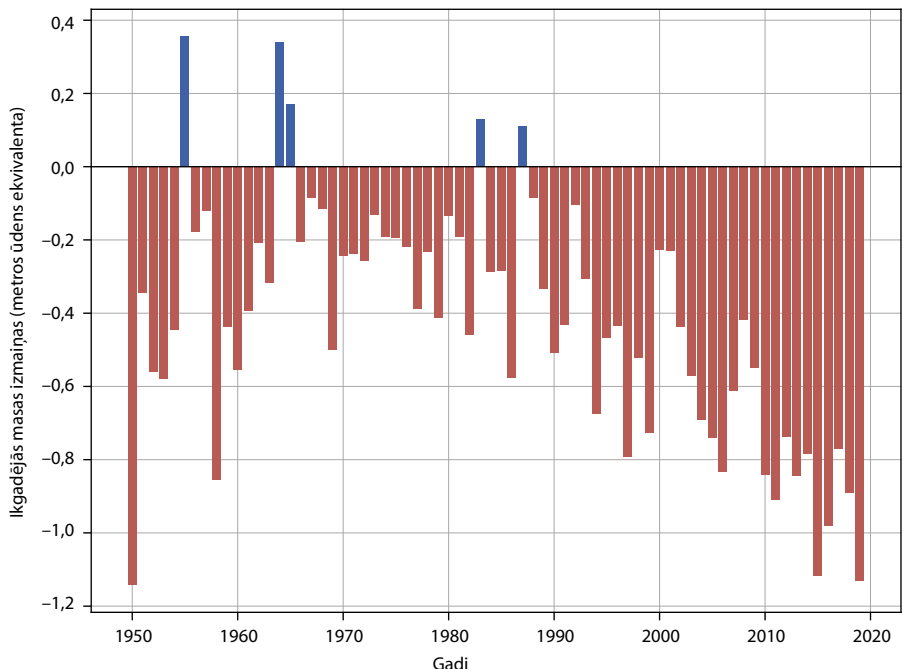
Pasaules ledāju izmaiņas mūsdienās pēta daudzas pētniecības organizācijas, un šos datus uzkrāj un apvieno Pasaules Ledāju monitoringa dienests (*World Glacier Monitoring Service, WGMS*). Šie dati ir pieejami mājaslapā <https://wgms.ch/global-glacier-state>. Antarktīkas un Grenlandes ledus vairogu izmaiņas ir analizētas turpmākajās grāmatas nodaļās. Globāli ledāju ledus masa 21. gadsimtā samazinās, un vairumam ledāju ir negatīva masas bilance (ledus akumulācija ir mazāka par ablāciju) (WGMS, 2020).

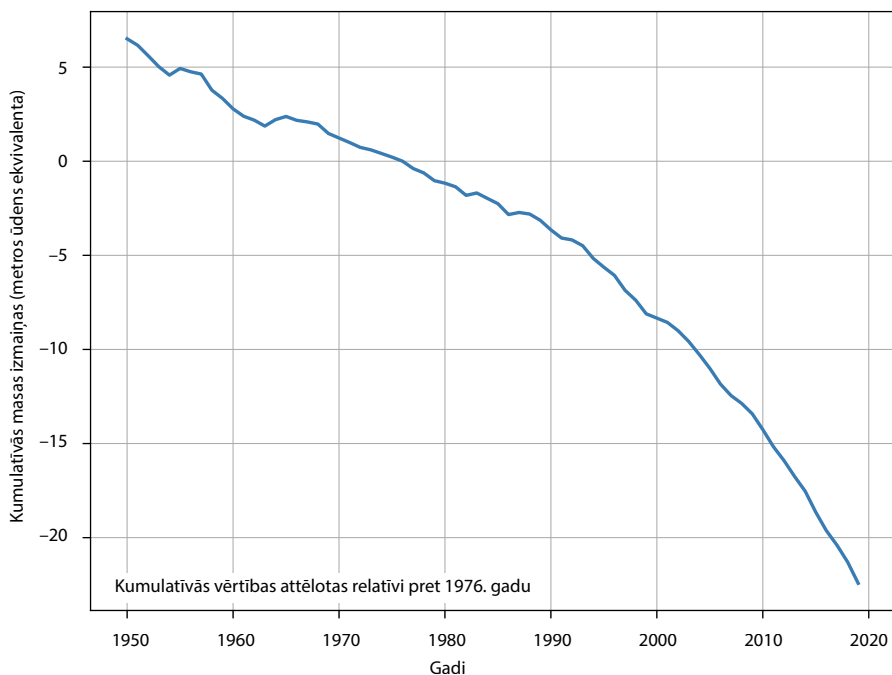
35. att. Pasaules ledāju izplatības karte no Randolfa ledāju inventarizācijas datubāzes. Ledāji, izņemot Grenlandes un Antarktīkas ledus vairogus, attēloti zilā krāsā. Attēls: *NASA Earth Observatory*, 2014.

36. attēlā redzamas references ledāju ikgadējās masas bilances izmaiņas kopš 1950. gada, tās izteiktas metros ūdens ekvivalenta (vertikālā ass) jeb tonnas uz kvadrātmetru. Dati ir apkopoti no masas bilances tiešiem mērījumiem, kas šajos references ledājos visā pasaulē tiek veikti vairākus desmitus gadu. Globālās vērtības ir aprēķinātas kā viena vērtība katram no 19 kalnu reģioniem visā pasaulē. Grafiks parāda, ka references ledājiem jau kopš 1950. gada raksturīga lielākoties negatīva masas bilance, un pēdējos trīsdesmit gados nav bijis neviens gads ar pozitīvu masas bilanci. Kopš 2000. gada kopumā vērojams negatīvu masas bilances vērtību pieaugums. 2018./2019. gada masas bilances gada ledus masas zudums jau ir lielāks par -1 m ūdens ekvivalenta. Viena metra ūdens ekvivalents atbilst masas zudumam 1000 kg uz kvadrātmetru vai aptuveni gada vidējām visa ledāja virsas izmaiņām par 1,1 m, jo ledus blīvums ir aptuveni 0,9 no ūdens blīvuma.

36. att. Globāli vidējās references ledāju masas bilances izmaiņas kopš 1950. gada, izteiktas metros ūdens ekvivalenta. Sagatavojis K. Lamsters pēc WGMS (2020) datiem.

Globāli pasaules ledāji kopš 1976. gada ir zaudējuši vairāk nekā 22 m ledus biezuma (izteikts ūdens ekvivalentā) (37. att.).

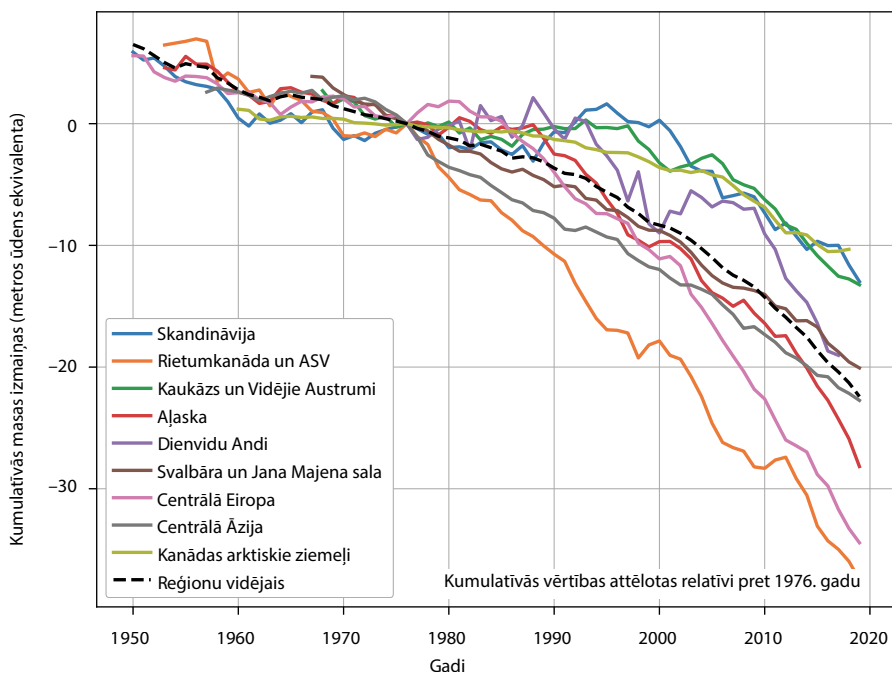




Līdz tam references ledāju masas bilance bija pozitīva, bet mūsdienās vērojams negatīvas masas bilances arvien straujāks pieaugums. Turklāt pēdējos gadu desmitos masas bilances zudums ir gandrīz dubultojies katrus desmit gadus. Šie novērojumi sniedz neapšaubāmu priekšstatu par klimata pārmaiņām un to paātrināšanos. 38. attēlā redzamas references ledāju masas kumulatīvās bilances izmaiņas atsevišķos pasaules reģionos. Reģionālās vērtības izrēķinātas kā aritmētiski vidējās. Vērtības pirms 1960. gada jāuzlūko ar piesardzību, jo tās reprezentē tikai atsevišķus ledājus, kur tolaik tika veikti tieši masas bilances mērījumi. Atšķirīgās vērtības pasaules reģionos ir daudzu faktoru kopsumma, kas saistīta ar reģionālo klimatu un īpaši – ar nokrišņu daudzuma un gaisa temperatūras variācijām, ko nosaka reģionālā topogrāfija (augstums virs jūras līmeņa) un attālums no okeāna.

Kopumā pasaules ledāju izvietojumu var iedalīt 11 makroreģionos: Antarktīka, Arktikas salas, Dienvidamerika, Ziemeļamerika, Skandināvija, Centrāleiropa, Centrālāzija, Ziemeļāzija, Āfrika, Jaungvineja un Jaunzēlande (Roer et al., 2008).

37. att. Globāli kumulatīvās references ledāju masas bilances izmaiņas kopš 1950. gada, izteiktas metros ūdens ekvivalenta. Sagatavojis K. Lamsters pēc WGMS (2020) datiem.



38. att. Reģionāli kumulatīvās references ledāju masas bilances izmaiņas kopš 1950. gada, izteiktas metros ūdens ekvivalenta. Sagatavojis K. Lamsters pēc WGMS (2020) datiem.

Turpmākajās lappusēs sniegta īsa pamatinformācija par šo reģionu ledāju īpatnībām, bet smalkāk tiks aplūkoti ledus vairogu aizņemtie reģioni Antarktīkā un Grenlandē, raksturojot arī šo reģionu pētniecības vēsturi un citas ģeoloģiskās īpatnības, kas nozīmīgas ledāju kontekstā.

ARKTIKAS SALU LEDĀJI

Arktikā ledāji galvenokārt sastopami Arktikas salās. Nozīmīgākais ledus apjoms ir ieslēgts Grenlandes ledus vairogā. Arktikā atrodas arī pasaulē lielākais ledus apjoms ārpus Grenlandes un Antarktīkas ledus vairogiem, tas kopumā aizņem 275 000 km² (Roer et al., 2008). Lielākā daļa arktisko salu ledāju, neskaitot Grenlandi, atrodami Kanādas Arktiskajā arhipelāgā, kur tie aizņem aptuveni 150 000 km² lielu platību Karalienes Elizabetes salās, Bafina, Elsmīra, Devona, Aksela Heiberģa, Bailota un citās salās. Kopumā tās ir aptuveni 36 000 salas. Pārējā daļa ietver

galvenokārt Svalbāras arhipelāga un Ziemeļāzijas salu ledājus. Arktisko salu ledājiem, ņemot vērā to atšķirīgo novietojumu, raksturīgs dažāds ledus biežums, dinamika un reakcija uz klimata pārmaiņām. Kanādas Arktiskajā arhipelāgā atrodas gan ledus lauki (piemēram, Velsas Prinča), ledus kupoli (piemēram, Devona un Agasī) un pat šelfa ledāji (piemēram, Elsmīra salā), gan ļoti daudzi nelieli ledāji, kuri pēdējos divdesmit gadus zaudē vairāk nekā 20 gigatonnu ledus masas gadā. Lielākie ledus kupoli, iespējams, eksistē jau kopš pēdējā leduslaikmeta, bet mazākie sākuši veidoties tikai pirms 4000–5000 gadiem.

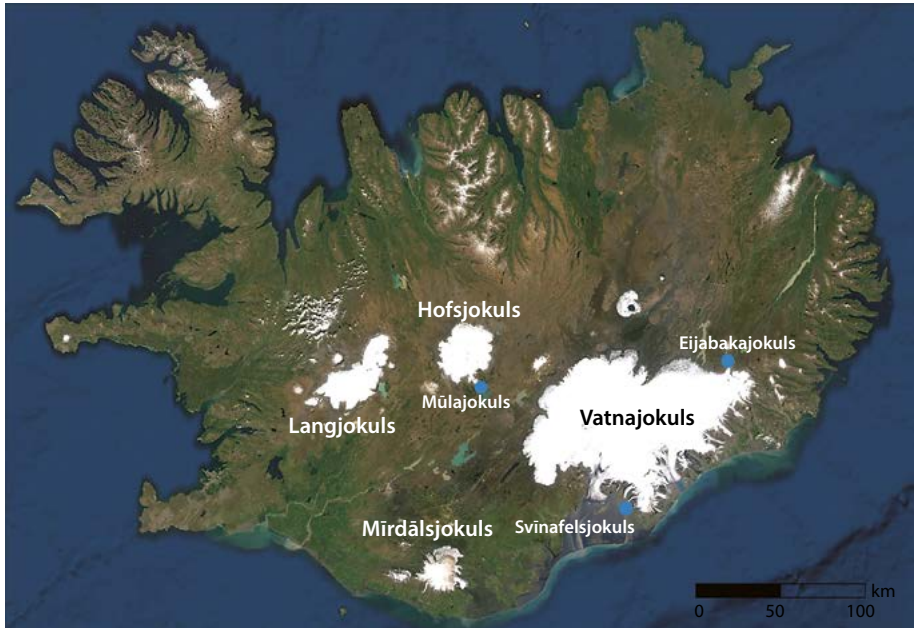
Kanādas Arktiskajā arhipelāgā atrodas vieni no vislielākajiem ledus kupoliem pasaulē. Lielākais no tiem ir Agasī ledus kupols, kurš aizņem 21 000 km², savukārt Devona ledus kupols aizņem 12 000 km² lielu platību, un tajā atrodas 3980 km³ ledus. Salīdzinājumam – Devona ledus kupola apjoms ir nedaudz lielāks par visiem Islandes ledājiem kopā. Nokūstot šādam ledus apjomam, globālais jūras līmenis celtos par 1 cm. Devona ledus kupola atkāpšanās ziemeļdaļā jau ir izmainījusi pasaules ģeogrāfiju, jo 2018. gadā, ledum nokūstot, atklājās trīs jaunas salas.

Turpmākajā tekstā no Arktiskajām salām sīkāk iztirzāti Islandes ledāji, bet specifiski Islandes ledāju pētījumi aplūkoti grāmatas beigās nodaļās par latviešu ģeologu polārajām ekspedīcijām. Grenlandes ledāji aplūkoti atsevišķā apakšnodaļā Grenlandes ledus vairoga kontekstā.

Islande (39. att.) atrodas Atlantijas okeāna ziemeļu daļā tieši zem ziemeļu polārā loka, tādēļ to visprecīzāk var apzīmēt kā subarktisko reģionu. Polārais loks šķērso tikai Islandei piederošo Grīmsejas salu. Islande ir Eiropas otrā lielākā sala aiz Lielbritānijas (Īrija ir trešā), un Islandes valsts kopējā platība, iekļaujot nelielās salas, ir 103 000 km². Lielāko daļu no salas platības aizņem tundra, kurā galvenokārt aug ķērpji, sūnas un sīkkrūmi. Veģetācija klāj tikai 23% no Islandes. Lai gan Islande asociējas galvenokārt ar vulkāniem un ledājiem, pēdējie aizņem tikai 10% no tās platības. Islandes iekšzemē atrodas kalnienes. Tās sākas 400–500 m v.j.l. un atrodas vulkāniskajās zonās (Björnsson, 2016).

Islandes novietojums ir unikāls no ģeoloģiskā skatpunkta, jo tā vienlaicīgi atrodas gan uz Vidusatlantijas grēdas, gan zem tās esošā mantijas karstā punkta. Šie faktori nosaka to, ka Islande ir ģeoloģiski ļoti aktīva un tai raksturīgs vulkānisms, kurš turklāt mijiedarbojas ar glaciālo vidi (ledājiem). Islandē norisinājies ne tikai eksplozīvs vulkānisms, bet arī plaisveida vulkānisms, kas radījis lavas segveida izlijumus. Šādi lavas izlijumi rodas no magmas, kura izplūst Zemes virspusē pa garām (vairāki desmiti kilometru) plaisām.

Islandē ir norisinājušies pasaulē lielākie lavas segveida izlijumi mūsu ērā. Zināmākais no tiem ir Lakes izvirdums 1783. gadā, kad 600 km² platībā izlija 15 km³ lavas. Izvirdums radīja būtiskus laikapstākļu un cilvēku veselības traucējumus visā



39. att. Islande (satelītattēlu mozaika). Trīs lielākie Islandes ledus kupoli tās centrālajā un dienvidu daļā ir (no labās puses): Vatnajokuls, Hofsjokuls un Langjokuls. Pašos dienvidos atrodas Mirdālsjokuls. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot *ESRI World Imagery*.

pasaulē. Piemēram, 1783. gada vasara Eiropā bija līdz tam laikam karstākā, ar spēcīgām vētrām, un vulkāniskie pelni radīja tik biezu miglu, ka kuģiem nācās palikt ostās. Savukārt ziema bija daudz aukstāka, nekā ierasts, un izraisīja daudzu tūkstošu cilvēku nāvi. Lakes izvirduma meteoroloģiskās sekas bija jūtamas vēl vairākus gadus, kad Eiropu ietekmēja ekstrēmu laikapstākļu notikumi, daudzviet izraisot badu un veicinot nabadzību.

Pirmais dokumentētais plaisveida vulkānisms pasaulē norisinājās 939. gadā. Eldgjavas (*Eldgjá*) lavas izlijums bija lielāks par Lakes izvirdumu, 800 km² platībā izlija vairāk nekā 18 km³ lavas. Pēc vairākiem tūkstošiem gadu Eldgjavas lavas izlijuma skartā platība joprojām ir pilnībā neapdzīvojama. To veido lavas sega, kuru klāj tikai ķērpji un sūnas (40. att.).

Islandes vēsturiskie vulkānu izvirdumi lieliski demonstrē lokālās vulkāniskās aktivitātes ietekmi uz klimatu visā Eiropā.

Vidusatlantijas grēda ir vidusokeāniskā grēda Atlantijas okeānā, kur Ziemeļamerikas un Eirāzijas plātnes atdalās viena no otras. Šo procesu sauc par spreadingu, un tur veidojas jauna okeāniskā Zemes garoza. Šādu robežu starp litosfēras plātnēm, kuras



atdalās viena no otras, dēvē par diverģentu. Ziemeļamerikas un Eirāzijas plātnes Islandē attālinās viena no otras ar ātrumu, kas sasniedz aptuveni 1 līdz 2 cm gadā. Starp šīm plātnēm Islandes dienviddaļā atrodas Hrepara (*Hreppar*) mikroplātne, tādēļ populārais tūristu pieņēmums, ka Islandē var nostāties ar vienu kāju uz Ziemeļamerikas plātnes un ar otru kāju uz Eirāzijas plātnes, pēc būtības ir maldīgs. Spreddinga rezultātā Islandē ir izveidojušies rifti, kuri stiepjas aptuveni no ziemeļaustrumiem uz dienvidrietumiem. Riftinga veidojas Zemes garozas pārrāvums un rodas jauna okeāniskā Zemes garoza. Citi zināmākie rifti mūsdienās atrodas Austrumāfrikā un Sarkanajā jūrā.

Galvenās Islandes rifta zonas dēvē arī par vulkāniskajām zonām, un tās ir Ziemeļu vulkāniskā zona, Austrumu vulkāniskā zona un Rietumu vulkāniskā zona. Spreddings Islandē nav vienmērīgs, un tam raksturīgas saraustītas epizodes ik pēc 100–1000 gadiem, kad notiek spreddinga aktivizācija. Viena gada laikā

40. att. Eldgjavas lavas izlijuma klātā platība Dienvīdīslāndē. Fonā Mirdālsjokula ledus kupols. Foto: K. Lamsters, 2017.

rifts var atvērties pat par vairākiem metriem. Šādas pēkšņas spreadinga epizodes rada magmas daikveida injekcijas, kuru cēlonis ir magmas augšupejošā plūsma zem Islandes.

Zināmākais rifts Islandē ir Tingvellirs (*Þingvellir*) (41. att.), jo tur kopš 930. gada līdz pat 18. gadsimta beigām tika sasaukts Islandes parlaments – Altings. Rifts atrodas Rietumu vulkāniskajā zonā, kas nav īpaši aktīva. Vienā rifta pusē atrodas Ziemeļamerikas plātne, bet otrā pusē ir Hrepara mikroplātne, kurai raksturīgas rotācijas kustības. Tingvellira rifts ir 5 km plats grābens (iegrimis Zemes garozas bloks) ar stāviem lūzumiem, un tas grimst par 1,5 mm gadā. Holocēnā (kvartāra perioda epoha, kura sākās pirms 11,7 tūkstošiem gadu) tas ir iegrimis par 40 m. Rifts ir unikāls, jo to atšķirībā no citiem riftiem nav aizpildījusi lava, bet tas var notikt nākotnē.

41. att. Tingvellira rifts Islandē. Attēlā redzamā struktūra ir iegrimis Zemes garozas bloks – grābens.
Foto: K. Lamsters, 2017.

Ledāji Islandē aizņem tikai 10% no tās platības, un kopējais ledus tilpums sasniedz apmēram 3400 km³ (Björnsson, 2016), kas atbilst 34 m biežam ledus slānim pāri visai Islandei. Ja izzustu visi Islandes ledāji, globālais jūras līmenis celtos par aptuveni



1 cm. Galvenokārt Islandes ledāji atbilst topogrāfiski neatkarīgo ledāju grupai – ledus kupoliem. Pēdējā apledošanas laikā visu Islandi, ieskaitot tās zemūdens šelfu, klāja Islandes ledus vairogs. Mūsdienās lielākie ledus kupoli ir Vatnajokuls (*Vatnajökull*), Hofsjokuls (*Hofsjökull*), Langjokuls (*Langjökull*) un Mirdālsjokuls (*Mýrdalsjökull*) (skat. 39. att.).

No ledus kupoliem izplūst izvadledāji. Nereti tie noplūst pa stāvām kalnu nogāzēm, veidojot gandrīz vertikālus leduskritumus (42. att.). Šādi leduskritumi nozīmīgi ietekmē zemāk esošo izvadledāju dinamiku. Leduskritumā ledājs sašķeļas ledus blokos, kurus mēdz dēvēt par serakiem. Lejpus leduskrituma ledus bloki tiek saspiesti cieši kopā, un tur ledājam ir raksturīga spiedes jeb kompresijas plūsma. Ledāja iekšējā uzbūve šajā apgabalā ir ļoti komplicēta. To veido lūzumu un kroku sistēmas, līdzīgi kā kalnu grēdās. Ja ledāja gultnes reljefam ledāja malas virzienā raksturīgs slīpums, ledāja plūsmas ātrums paātrinās un ledāja ķermenī rodas garenisks stiepes spriegums, kas izsauc šķērse-nisku plaisu veidošanos (43. att.). Savukārt pašā ledāja malā, ja izbeidzas ieļņas nogāzes un ledājam nav šķēršļu, lai tas varētu netraucēti izplūst līdzenumā, veidojas gareniskas stiepes plaisas.

Islandes ledāji nepastāv kopš pēdējā apledošanas, bet, vistiešāk, ir izzuduši pirms apmēram 9–5 tūkstošiem gadu, tā sauktajā



42. att. Svínafelsjokula izvadledājs Islandē vietā, kur tas noplūst no Vatnajokula ledus kupola. Gandrīz vertikālā ledus siena ir leduskritums. Labajā pusē uz ledāja redzami Latvijas Universitātes ģeologi. Foto: K. Lamsters, 2017.





43. att. Skats uz Svínafelsjökula izvadledāja malas daļu Islandē. Ledus plūsmas virziens ir vērsts uz attēla kreiso pusi. Ledāja plaisainās virskārtas dēļ pa to praktiski nav iespējams pārvietoties. Foto: K. Lamsters, 2017.

holocēna termālajā maksimumā. Tikai pirms aptuveni 4 tūkstošiem gadu ledāji Islandē izveidojās atkal. Kopumā tiem ir bijušas raksturīgas ievērojamas fluktuācijas. Kopš 14. gadsimta, kad beidzās viduslaiku siltais periods un sākās mazais leduslaikmets, Islandes ledāji uzvirzījās un sasniedza savu maksimālo izplatību. Daži izvadledāji uzvirzījās pat par 10 līdz 15 km, iznīcinot kultivēto zemi un apdzīvotās vietas.

Ledāju uzvirzīšanās maksimālo pozīciju ainavā parasti iespējams identificēt samērā vienkārši, jo mazajā leduslaikmetā ledāju priekšā parasti izveidojās ievērojama izmēra terminālā morēna (44. att.). Tā ir ledāja priekšā sabīdīta un sastumta materiāla grēda vai to sistēma, kuras augstums var sasniegt vairākus desmitus metru. Iekšējā uzbūvē dominē glaciotekoniskās deformācijas (cita citai uzbīdītas nogulumu zvīņas un sakrokoti slāņi) un sastopami visi tie nogulumi, kuri bija uzkrājušies ledāja priekšā – morēna, smilts, grants, pat kūdra un vulkāniskie pelni. Atšķirībā no jaunākām gala morēnām mazā leduslaikmeta morēnu parasti klāj veģetācija, jo ir pagājis pietiekami ilgs laiks tās attīstībai. Šīs galamorēnas izveidojās no 18. gadsimta vidus līdz 19. gadsimta vidum.

Mūsdienu ledāju atkāpšanās sākās kopš 19. gadsimta beigām un 20. gadsimta sākuma. Tā rezultātā Islandes ledāji jau ir zaudējuši aptuveni 10% ledus tilpuma. Tomēr arī 20. gadsimtā bija periods (no 1970. līdz 1985. gadam), kad vairāk nekā puse Islandes



ledāju atkal sāka uzvirzīties. Visaptveroša Islandes ledāju atkāpšanās sākās kopš 1995. gada.

Mūsdienās Islandes ledāju masas bilance parasti ir negatīva. Tikai atsevišķos gados, kad ziemas ir nokrišņiem bagātas un vasaras aukstas, atsevišķu ledāju masas bilance var būt pozitīva. No Vatnajokula ledus kupola dienvidu daļas izvadledāji izplūst tikai 100 m augstumā virs jūras līmeņa. Tur nokrišņi lielākoties izkrīt kā lietus, un šo izvadledāju masas bilance mēdz būt negatīva pat ziemā. Vasarās šie izvadledāji (piemēram, Breidamerkurjokuls un Skeidarārjokuls (*Skeiðarárjökull*)) tipiski zaudē 9 m ūdens ekvivalenta. Šo ledāju eksistence neatbilst Islandes mūsdienu klimatam, un to izzušana ir tikai likumsakarīga. Daži Islandes ledāji jau ir izzuduši. Okjokuls (*Okjökull*) jeb saīsināti Ok ledājs (45. att.) ir izteikts piemērs, kas raksturo Islandes ledāju atkāpšanos 20. un 21. gadsimtā. 2014. gadā Ok ledāju pasludināja par izzudušu, un 2019. gadā kādreizējā ledāja vietā tika uzstādīta memoriālā plāksne. 1901. gadā ledājs aizņēma 38 km² platību, savukārt 1978. gadā – vien 3 km² un kļuva

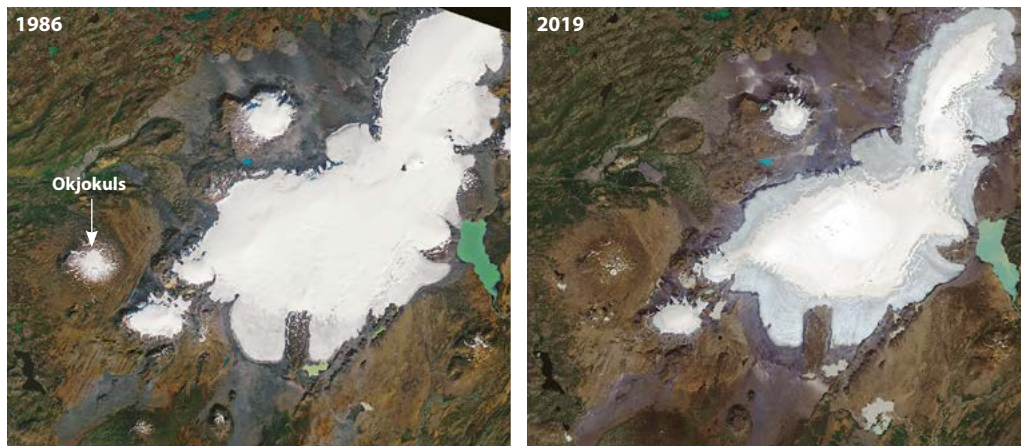
44. att. Mazā leduslaikmeta terminālā gala morēna pie Virkisjokula izvadledāja Islandē. Gala morēna ir vairākus simtus metrus plata, un tās virskārtu klāj veģetācija. Cauri gala morēnai izgrauzusies ledājudeņu straume (kreisajā pusē). Līdzienā teritorija aiz gala morēnas ir sandru līdzenums. Foto: K. Lamsters, 2017.

stagnants. Respektīvi, ledāja masa bija nepietiekama, lai nodrošinātu ledāja plūšanu.

Viens no Islandes nākotnes klimata scenārijiem paredz 25–35% ledus tilpuma zudumu pusgadsimta laikā. Savukārt pēc 150–200 gadiem lielākā Islandes ledāju daļa varētu būt izzudusi. Tas gan ir tikai viens no scenārijiem, un patlaban šādas lokālas ilgtermiņa klimata prognozes ir diezgan neprecīzas. Tomēr, ņemot vērā aizvien straujāku ledāju atkāpšanos Arktikā pēdējos gadu desmitos, ir visai ticams, ka Islandes ledāju nākotne ir mērāma vien dažos simtos gadu. Islandes ekonomikai ledāju izzušana ilgtermiņā ir nelabvēlīgs faktors, jo lielākā elektroenerģijas daļa Islandē tiek ražota hidroelektrostacijās. Islandes upes galvenokārt barojas ar ledājūdeņiem. Izzūdot šim ūdens rezervuāram, upju caurplūdums ievērojami samazināsies. Ledājos atrodas arī 99% no visa Islandes saldūdens.

Islandes ledāji galvenokārt atrodas tās centrālajās un dienvidu augstienēs (vulkāniskajos apgabalos) un ir cieši saistīti ar vulkāniskajām zonām. Ledāju veidošanās, protams, nav saistīta ar vulkānisko aktivitāti, bet ar to, ka vulkāniskie apgabali atrodas augstāk virs jūras līmeņa un saņem vislielāko nokrišņu daudzumu. Tomēr vairāk nekā 60% Islandes ledāju pārklāj aktīvus vulkānus, tādēļ Islandē bieži norisinās glaciovulkānisms (vulkāniskā aktivitāte zem ledājiem) un jokulhlaupi (ledājūdeņu megaplūdi). Ledāju eksistence Islandē ir cieši saistīta ar lielo

45. att. Langjokula ledus kupols un izzudušais Okjokuls Islandē. Pa kreisi: 1986. gada 14. septembris; pa labi: 2019. gada 1. augusts. Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-5 un Landsat-8 satelītattēli.



nokrišņu daudzumu, kas nodrošina ledus akumulāciju. Vidējais nokrišņu daudzums virs lielākajiem ledus kupoliem gadā ir 4400–5000 mm (maksimāli pat 7000 mm).

Glaciovulkānisms tiek definēts kā magmas un ledus mijiedarbība visos iespējamajos veidos, iekļaujot magmas un sniega, firna, ledājūdeņu savstarpējo mijiedarbību (Menzies, 2018). Ja Zemes virspusē izplūdušā lava ir bagāta ar silīciju, tai ir augsta viskozitāte un lava strauji atdziest, piemēram, saskarē ar ledājūdeņiem. No šādas lavas mēdz veidoties īpatnējs magmatiskais iezis, kurš Islandē bieži sastopams. Tas ir obsidiāns jeb vulkāniskais stikls, kurš atšķirībā no citiem iežiem ar kristālisku struktūru ir amorfs. Neskatoties uz augsto silīcija dioksīda saturu (līdz pat 80%), obsidiānam parasti ir tumša, pat melna krāsa, ko nosaka dzelzs oksīdu un magnija piemaisījumi. Obsidiānam raksturīga īpašība – tas veido nošķēlumus ar asām malām, tādēļ tas plaši ticis izmantots senatnē nažu, šķēpu un bultu uzgaļu veidošanai, kā arī reizēm pat mūsdienās ķirurģisko asmeņu izgatavošanai.

Galvenā ledāju loma attiecībā uz zemledāja vulkāniem ir to izvirdumu ierobežošana. Lai izvirdušais materiāls nonāktu virs ledāja, tam ir jāizkausē virs tā esošais ledus. Jo biezāks ledājs, jo spēcīgāks vulkāna izvirdums nepieciešams, lai izkausētu virs tā esošo ledus kārtu. Ledus biezumam virs zemledāja vulkāniem ir ļoti liela nozīme, jo pat nelielas ledus biezuma izmaiņas var radīt spiediena izmaiņas uz magmu un iniciēt izvirdumu. Potenciālais izvirdums var tikt apspiests, ja ledus biezums palielinās. Savukārt, ja ledus biezums samazinās, izvirdums var tik ierosināts, jo samazinās glaciostatiskais (ledāja svara radītais) spiediens uz Zemes garozu. Ja izvirdums norisinās arī supraglaciāli (virs ledāja), uz ledāja virsas nosēžas vulkāniskie pelni un lielākas tefras jeb fragmentētu vulkāna izvirdumproduktu daļas, kā, piemēram, vulkāniskās bumbas vai lapilli.

Vulkānisko pelnu kārtā var ietekmēt ledāju divējādi. Ja pelnu kārtā ir tikai dažus milimetrus bieza, tā palielina absorbētās Saules radiācijas daudzumu, jo pelniem ir zemāks albedo (virsmas atstarotājspēja) nekā sniegam un ledum. Savukārt, ja pelnu kārtā ir vairākus centimetrus un decimetrus bieza, efekts ir pretējs – tā samazina Saules radiācijas daudzumu, kas var nokļūt līdz ledum, tādējādi samazinot arī ledāja virsmas kušanu. Lielākoties vulkāniskā aktivitāte zem ledājiem tikai izkausē daļu ledus, radot ievērojamu apjomu ledājūdeņu. To uzkrāšanās zemledāja ezeros un to noplūšana bieži vien ir lielākie glaciovulkānisma izraisītie draudi. Islandes zemledāja ezeri galvenokārt atrodas zem Vatnajokula un Mīrdālsjokula ledus kupoliem.

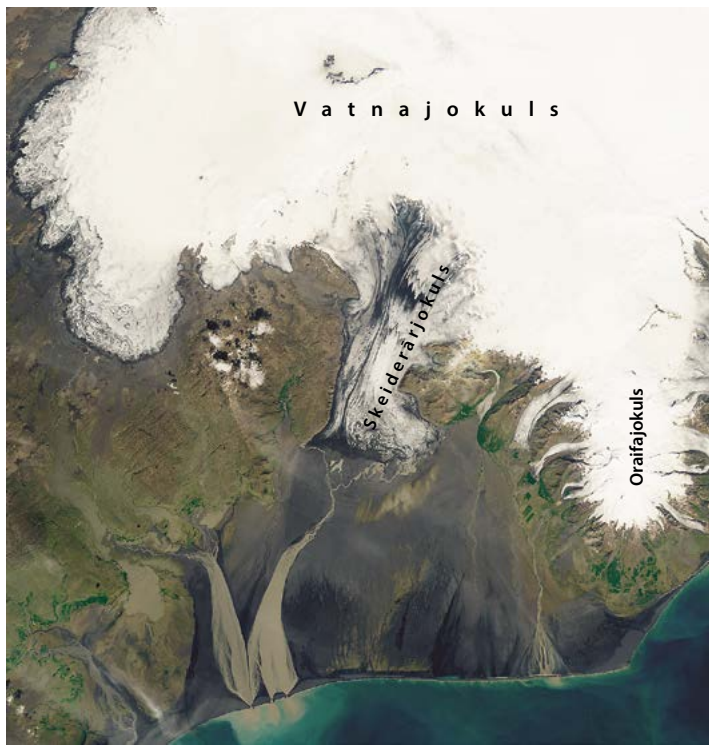
Lai gan zemledāja ezeru veidošanās nereti ir saistīta ar vulkānismu, tie var veidoties arī ģeotermālā siltuma ietekmē. Zemledāja ezeram noplūstot, ledāja virsmā mēdz izveidoties pazeminājums, ko dēvē par ledus kaldronu. To nevajadzētu jaukt ar terminu “kaldera”, kas ir vulkāniskas izcelsmes ieplaka vulkāna augšējā daļā. Kaldronu raksturīga īpatnība ir, ka to izplatība bieži sakrīt zemledāja vulkānu kalderu

novietojumu. Piemēram, virs Mīrdālsjokula ledus kupola veidojošās kaldronas parasti sastopamas virs Katlas vulkāna kalderas iekšējās daļas. Kaldronu izvietojums sakrīt arī ar zemledāja tuneļu sākumu, jo tie novada ledājūdeņus no zemledāja ezeriem, virs kuriem ledus virsmā izveidojas kaldrona. Viens no zināmākajiem zemledāja ezeriem ir Grīmsvotni (*Grímsvötn*) jeb Grīmsvetns, kurš atrodas tāda paša nosaukuma vulkāna kalderā zem Vatnajokula ledus kupola. Grīmsvetns ir saistīts ar plaisu sistēmu, kura izraisīja iepriekš aprakstīto Lakes izvirdumu.

Ledājūdeņu strauja izplūšana pieledāja teritorijā rada plūdus, ko islandieši dēvē par jokulhlaupiem. Ar Grīmsvetna zemledāja vulkānu saistīti vieni no lielākajiem dokumentētajiem jokulhlaupiem mūsdienu Islandē 1996. gadā. Lai šādi katastrofāli plūdi norisinātos, vulkāna kalderai ir pilnībā jāpiepildās ar ledājūdeņiem un ūdens spiedienam jābūt pietiekamam, lai virs ezera esošais ledus paceltos un zemledāja ezers varētu noplūst. 1996. gada jokulhlaupi norisinājās vairākas nedēļas pēc Grīmsvetna izvirduma beigām, un zinātnieki spēja paredzēt šo plūdu kulmināciju – laikus tika aizvērts ceļa posms uz Islandes lielākās šosejas, kas stiepjas apkārt visai salai. Daļa no šosejas – posms pāri Skeidarārsandra (*Skeiðarársandur*) sandru līdzenumam – plūdu laikā tika iznīcināta. Plūdi ilga vairākas dienas, un maksimālais ūdens caurplūdums sasniedza 50 000 m³/s. Salīdzinājumam jokulhlaupu caurplūdums, ko izraisīja Eijafjallajokula (*Eyjafjallajökull*) vulkāna izvirdums 2010. gadā, paralizējot lielākās Eiropas daļas gaisa satiksmi, sasniedza tikai 3000 m³/s.

Skeidarārsandrs ir lielākais šāda tipa līdzenums Islandē (46. att.). Tā tumšā virskārta ir veidota no lavas smiltīm un pelniem, ko vietām šķērso pieledāja upes. Sandru līdzenums ir ledājūdeņu straumju veidots, un tajā izgulsnēti glaciofluviālie (tekošu ledājūdeņu) nogulumi. Skeidarārsandrs stiepjas gandrīz 50 km garumā, un no Skeidarārijokula (*Skeiðarárjökull*) izvadledāja līdz okeānam ir gandrīz 30 km. No Skeidarārijokula izplūst 30 km garā Skeidaravas upe, kas novada Grīmsvetna izvirdumu radītos plūdu ūdeņus. Sandru līdzenumā holocēna laikā nogulsnēto nogulumu apjoms, ieskaitot vulkānisko izvirdumu materiālu, sasniedz 100 līdz 200 km³. Nogulsnēšanās ātrums pēdējo 10 000 gadu laikā bijis vismaz 1 km³ gad-simtā (Björnsson, 2016).

Katastrofālu ledājūdeņu plūdu laikā Islandē var veidoties arī negatīvas reljefa formas. Izteiksmīgākā šāda veida reljefa forma ir Jokulsārgljūfa (*Jökulsárgljúfur*) kanjons (47. att.), kurš veidojies plūdus no otra lielākā zemledāja vulkāna kalderas zem Vatnajokula ledus kupola – Bārdarbungas (*Bárðarbunga*). Kanjons ir 28 km garš un līdz 100 m dziļš, un tajā atrodas arī viens no Eiropas jaudīgākajiem ūdenskritumiem – Detifoss (48. att.), kura augstums sasniedz 44 m. Jokulsārgljūfa kanjona erozija galvenokārt notiek, iekšzemes virzienā atkāpjoties Detifosa ūdenskrituma veidotām un līdzīgām kāplēm. Kanjons ir daļa no plūdu kanālu sistēmas, kura



kopumā stiepjas 170 km garumā līdz okeānam Islandes ziemeļos. Jaunākie pētījumi liecina, ka kanjons veidojies trīs katastrofālu plūdu rezultātā pirms deviņiem, pieciem un diviem tūkstošiem gadu. Šo jokulhlaupu laikā ūdens caurplūdumam vajadzēja būt ap 500 000 m³ sekundē, un tas ir 10 reīzu vairāk nekā 1996. gada plūdus no Grimsvetna vulkāna kalderas. Jokulsárgljūfa kanjons radies tikai ledājūdeņu erozijas rezultātā. Tas ir izgrauzts bazalta iežos, kuri veidoti no dažāda vecuma lavas segveida izlijumiem. Šīs lavas segas atrodas cita virs citas, tādējādi spēcīgām ledājūdeņu straumēm ir iespējams atraut iežu blokus un pārvietot tos prom no cilmes vietas.

Salīdzinājumā ar ledājūdeņiem vēl lielāks erozijas potenciāls ir tikai pašiem ledājiem. Piemēram, Vatnajökula dienvidu daļas izvadledāju gultne bieži vien atrodas zem jūras līmeņa, maksimāli sasniedz pat 300 m zem jūras līmeņa. Šādi dziļi pazeminājumi labi apliecina ledāju spēju no to gultnes evakuēt milzīgu

46. att. Islandes lielākā ledus kupola Vatnajökula dienvidu daļas izvadledāji. Ledājs ar tumšajiem vulkānisko pelnu plankumiem attēlā centrā ir Skeidarárjökuls. Zemāk redzams Islandes lielākais sandru līdzenums (tumšais apgabals), kur nereti norisinās megaplūdi – jokulhlaupi. Attēla apakšējā labajā pusē atrodas Oraifajökuls (*Öraefajökull*) – lielākais aktīvais stratovulkāns Islandē, tā augstākā virsotne ir Hvannadalshnúkur (*Hvannadalshnúkur*) 2110 m v.j.l. Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-8 satelītattēls, 2019. gada 2. jūlijs.



47. att. Jokulsárgljúfa kanjons Islandes ziemeļaustrumos. Kanjons veidojies ledājkušanas ūdeņu erozijas rezultātā ledāja megaplūdos. Foto: K. Lamsters, 2013.



48. att. Detifoss – 44 m augsts ūdenskritums Jokulsárgljúfa kanjonā Islandē. Foto: K. Lamsters, 2013.



daudzumu iežu materiāla. Arī ieplaka, kurā atrodas Baltijas jūra, galvenokārt ir pleistocēna ledāju erozijas radīts pazeminājums.

Ledāju un vulkānu mijiedarbības rezultātā veidojas īpatnējas reljefa formas. Visizteiksmīgākie veidojumi ir tujas (*tuya*), kas plaši sastopamas Islandē. Iespaidīgākā tuja jeb galdveida kalns Islandē ir Herdubreids (*Herðubreið*) (49. att.). Tā augstums sasniedz 1682 m, un tas ir Islandes nacionālais kalns. Tujas ir vulkāni ar plakānu virsmu un stāvām nogāzēm. Tie veidojušies, lavai izvirstot zem biezas ledus kārtas. Tā kā lava zem ledus atdziest ātri, tā nespēj tālu aizplūst, un daudzos izvirdumos dažāda vecuma lavas plūsmu veidoti slāņi uzkrājas cits virs cita, un parasti to sagulums ir horizontāls. Tujas pasaulē ir reti sastopamas.

Daudziem Islandes izvadledājiem ir raksturīgi uzplūdi jeb sērdži (*surge*) (Björnsson et al., 2003), kuru laikā tie uzvirzās no vairākiem simtiem metru līdz pat vairākiem kilometriem. Ledāja malas uzvirzīšanās parasti notiek tikai dažu mēnešu laikā, lai gan kopējais uzplūdu ilgums var būt līdz pat trim gadiem. Tiem sākoties, ledus plūsma sākotnēji paātrinās ledāja akumulācijas zonā, kur ledāja virsmā veidojas šķērsenisks paaugstinājums – ledus valnis. Šim valnim pārvietojoties zemākā augstumā, sākas

49. att. Islandes nacionālais kalns Herdubreids (1682 m) ir zem ledāja veidojies galdveida kalns – tuja. Foto: K. Lamsters, 2019.

strauja ledāja malas uzvirzīšanās. Pulsējošiem ledājiem ir raksturīgas periodiskas plūsmas ātruma fluktuācijas. Ātras plūsmas fāze ilgst dažus mēnešus līdz gadus, un tajā ledāja kustības ātrums var palielināties pat vairākus simtus reižu. Lēnas plūsmas jeb stabilizācijas fāze ilgst 10 līdz 100 gadus. Islandes ledājiem, kuri ir silti bāzēti, lēnās plūsmas fāze ir īsāka, piemēram, Svalbāras politermālajiem ledājiem. Kopumā Islandē ir 26 pulsējoši ledāji. Visvairāk to ir Islandes lielākajam ledus kupolam – Vatnajokulam. 20. gadsimta 90. gados Vatnajokula kupola ledāju uzplūdi ietekmēja 38% no šī ledus kupola platības, aptuveni 40 km³ ledus tika pārvietoti no akumulācijas zonas uz ablācijas zonu.

Pulsējošo ledāju izplatība pasaulē nav nejauša. To, pirmkārt, nosaka klimatiskie apstākļi, otrkārt, zemledāja reljefs. Tādējādi ledāju pulsācijai nepieciešama noteikta temperatūras un nokrišņu attiecība. Visoptimālākā vidējā temperatūra pulsējošiem ledājiem ir starp 0 un –10 °C, savukārt vidējais nokrišņu daudzums gadā – no 300 mm līdz 1000 mm. Pulsējoši ledāji parasti ir salīdzinoši lielāki, garāki un ar lēzenākām nogāzēm. Lai gan pastāv cieša saistība starp pulsējošo ledāju izplatību un klimatiskajiem apstākļiem, uzplūdu biežums parasti nav regulārs. Uzplūdiem ir nozīmīga loma ledus, nogulumu un ledājūdeņu pārvietošanā.

Uzplūdu laikā veidojas noteiktas ledāja reljefa formas, piemēram, glaciotektoniskas izcelsmes gala morēnas, paugurotās morēnas, flūtingi, plaisu aizpildījuma grēdas, atsevišķi drumlini un zigzagveida osi (Evans & Rea, 1999; Ingolfsson et al., 2016). Plaisu aizpildījuma grēdas (50.–53. att.) pārsvarā veidojas zem pulsējošiem ledājiem, tādēļ tās tiek izmantotas, lai identificētu šādus ledājus, kuri vismaz kādreiz ir pulsējuši. Mūsdienās augstas izšķirtspējas Zemes virsmas modeļu pieejamība ir ļāvusi identificēt plaisu aizpildījuma grēdas arī zem paleoledus lielplūsmām un lobiem, kas liecina par to aktivitāti un ātro ledus plūsmu (Evans et al., 2016). Šādas reljefa formas ir nesen identificētas arī Kursas un Austrumlatvijas zemienēs Latvijā.

Plaisu aizpildījuma grēdas parasti ir līdz vienam vai diviem metriem augstas grēdas, kuras stieejas šķērseniski vai ieslīpi pret ledāja kustības virzienu. Pulsējošu ledāju pieledāja teritorijā grēdu skaits var būt pat vairāki tūkstoši. Tā kā grēdas ir veidojušās pēc aktīvas ledāja kustības apstāšanās, tās parasti ir uzguldītas citām reljefa formām, piemēram, flūtingiem un drumliniem, kuri veidojas zem ledāja. Plaisu aizpildījuma grēdas veidojas, jo uzplūdu laikā ledāja ātrās kustības dēļ ledus pastiprināti plaisā. Uzplūdos ledāja ķermenī galvenokārt dominē gareniskas stiepes režīms, kas izsauc šķērsenisku plaisu veidošanos attiecībā pret ledus plūsmu. Ekstremālas stiepes apstākļos ledājs tā malas daļā mēdz pat sašķelties atsevišķos ledus blokos. Pēc ātras plūsmas norimšanas bazālajās plaisās no ledāja gultnes tiek iespiests tajā esošais materiāls, visbiežāk – glaciģēnie nogulumu jeb morēna.



50. att. Plaisu aizpildījuma grēdas Eijabakajokula izvadledāja malas priekšā. Grēdas orientētas šķērseniski ledāja plūsmas virzienam. Foto: M. Krievāns, 2018.

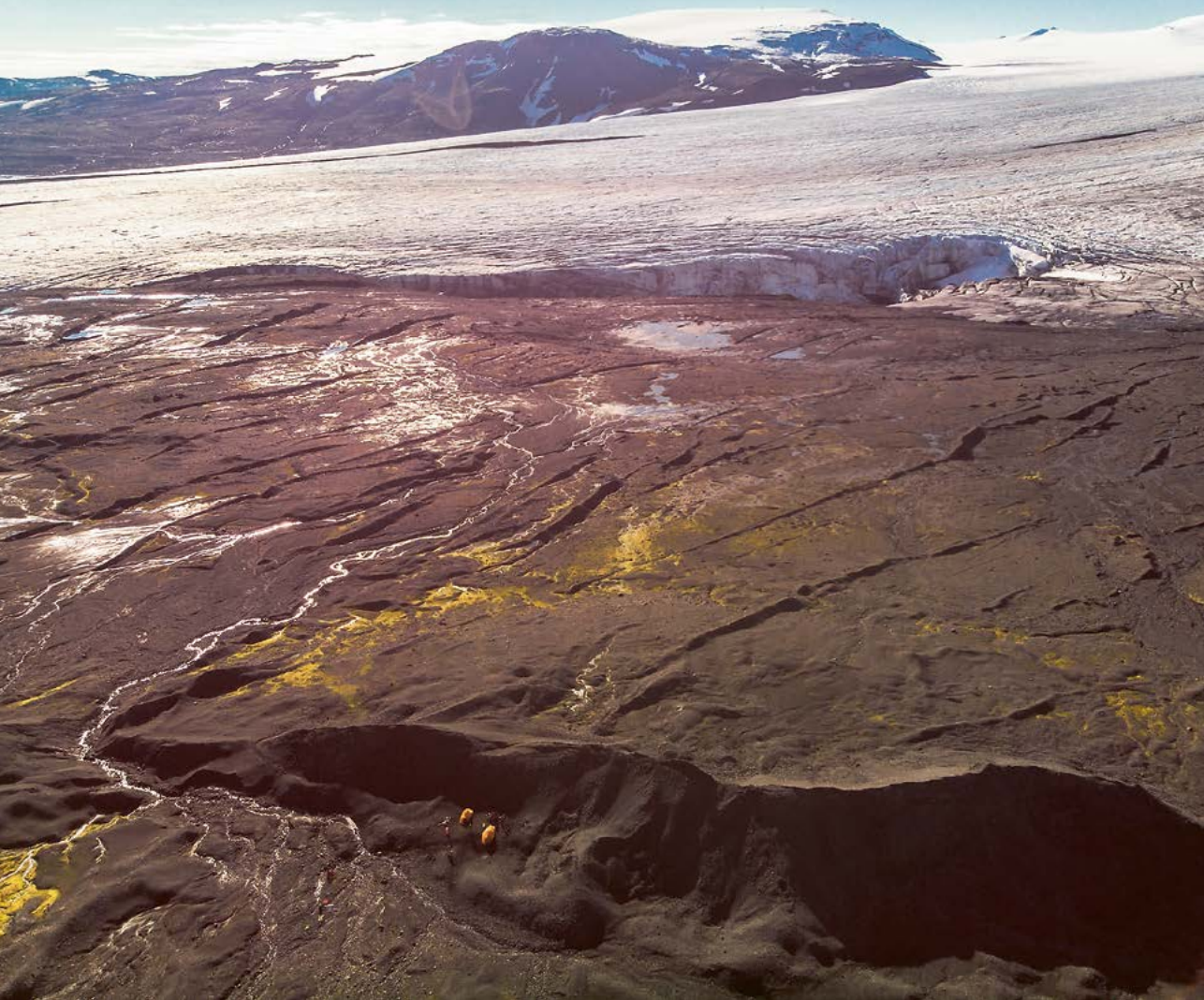
51. att. Plaisu aizpildījuma grēda pie Tjorsárjokula izvadledāja Islandē. Šī grēda izveidojusies pavisam nesen, un tās kodolā atrodas ledus. Priekšplānā – K. Lamsters. Foto: J. Karušs, 2015.



52. att. Plaisu aizpildījuma grēdas pie Eijabakajokula izvadledāja sānu malas.
Foto: M. Krievāns, 2018.



53. att. Plaisu aizpildījuma grēdas pie Tjorsārjokula izvadledāja. Šis ir senākas grēdas, tādēļ to kores daļa ir lēzena. Grēdu augstums, iespējams, ir samazinājies pēc ledus kodola izkušanas.
Foto: K. Lamsters, 2015.



Tas notiek tādēļ, ka statiskais spiediens uz gultni ir daudzkārt lielāks tur, kur ledāja ķermenī nav plaisu, tādējādi gultnes materiāls migrē no augsta spiediena apgabaliem uz zema spiediena apgabaliem, kas atrodas zem plaisām. Gultnes materiāla migrāciju sekmē tas, ka nogulumu ir piesātināti ar ledājūdeņiem.

Uzplūdu laikā tipiski ledāja gultnē un nogulumos ir palielināts ūdens spiediens, kas savukārt veicina ātru ledus plūsmu. To rada ledāja hidroloģiskās sistēmas pārkārtošanās, kas ir viens no faktoriem, kas iniciē uzplūdus. Uzplūdu laikā iepriekš eksistējošie ledāja tuneļi tiek iznīcināti, tādējādi tajos plūdušie ledājūdeņi

54. att. Zigzagveida osa fragments pie Eijabakajokula izvadledāja Islandē. Mēroga apjaušanai noder oranžās teltis pie osa. Foto: J. Ješkins, 2018.



tiek koncentrēti starp ledāju un tā gultni vai infiltrējas nogulumos, samazinot to pretestību deformācijai. Ātra ledus plūsma notiek, ledājam deformējot tā gultnes nogulumus (jo tajos ir lielāks ūdens spiediens, jo tie vieglāk pakļaujas deformācijai) vai slīdot pa plānu ūdens kārtiņu. Atsevišķos gadījumos ledājs var sakabināties ar tā gultnē esošajiem irdenajiem nogulumiem un kopā ar tiem slīdēt pa apūdeņotu cieto iežu gultni. Šāds pārvietošanās mehānisms ir zināms no Islandes ledāju pētījumiem (Kjær et al., 2006).

Otra reljefa forma, kas arī tiek saistīta tieši ar pulsējošiem ledājiem un sastopama galvenokārt Islandē, ir zigzagveida osi (54. att.). Šī ir neparasta reljefa forma, un tā ir identificēta tikai pie diviem Islandes pulsējošajiem izvadledājiem – Eijabakkajokula (*Eyjabakkajökull*) un blakus esošā Brúarjokula (*Brúarjökull*) (Kjær et al., 2008; Ingólfsson et al., 2016). Zigzagveida osiem atšķirībā no parastiem osiem, kuri veidojas, ledājūdeņiem nogulsnējot smilts un grants materiālu ledāja tuneļos, nav līkumota, bet gan zigzagveida forma. Tie sastāv no atsevišķiem osa vaļņiem, kuri izkārtoti cits aiz cita un reizēm daļēji blakus cits citam. Kādreiz zigzagveida osu veidošanas skaidroja ar iekšledāja osu, kuri veidojušies pirms uzplūdiem, kompresiju un deformāciju uzplūdu laikā, kad kādreizējais līkumotais osa valnis tiek saspiests un sašķelts vairākos segmentos. Mūsdienās zinātnieki dod priekšroku citam izskaidrojumam: zigzagveida osi, visticamāk, veidojas virsledāja ledājūdeņiem nogulsnējot to nesto materiālu savstarpēji savienotu plaisu sistēmā uzplūdu noslēguma fāzē vai uzreiz pēc tiem.

SKANDINĀVIJAS PUSSALAS LEDĀJI

Lielākā Skandināvijas pussalas ledāju daļa atrodas Norvēģijas dienvidos, piemēram, Justedālsbrēna (*Jostedalsgreen*) un Hardangerjökulena (*Hardangerjøkulen*) ledus kupoli. Uz Ziemeļiem vistālākais ledājs kontinentālajā Eiropā atrodas Seilannes salā. Norvēģijā kopumā ir aptuveni 2500 ledāju, kas aizņem 2595 km² lielu teritoriju. Lielākoties tie ir ledus kupoli, izvadledāji, cirka un ieleju ledāji. Citi Skandināvijas pussalas ledāji atrodas Norvēģijas un Zviedrijas ziemeļos.

Norvēģijas lielākais ledājs ir Justedālsbrēns – 60 km garš, līdz 600 m biezs un aizņem 474 km² lielu platību. Justedālsbrēna ledus kupols ir arī lielākā ledus masa kontinentālajā Eiropā. Tā pastāvēšanu galvenokārt nodrošina lielais nokrišņu daudzums reģionā, nevis zemās temperatūras. Ledus kupolam ir aptuveni 50 izvadledāju, no tiem lielākā daļa pēdējos gadu desmitos atkāpjas (Winkler et al., 2009). Justedālsbrēns tāpat kā citi Norvēģijas ledāji nav saglabāties no pēdējā pleistocēna apledošanas, kad segledājs pārklāja gan Skandināvijas pussalu, gan arī Latviju. Tas

holocēna epochā ir piedzīvojis ievērojamas fluktuācijas, tostarp pilnībā izzudis holocēna klimatiskā optimuma laikā pirms aptuveni 7000 gadiem. Atkārtoti Justedālsbrēens sācis veidoties tikai pirms 5300 gadiem, un arī pēc tam ledājs piedzīvojis ievērojamas fluktuācijas, savu maksimālo izplatību sasniedzot mazā leduslaikmeta beigās 18. gadsimta vidū. Pēc mazā leduslaikmeta Norvēģijas ledāju masa pamazām sāka samazināties, bet straujākā ledāju atkāpšanās sākās 20. gadsimta vidū. Šo atkāpšanos pārtrauca vairāku ledāju īslaicīga uzvirzīšanās starp 1990. un 2000. gadu, pēc tam lielākā daļa ledāju atkal strauji atkāpjas. No vairākiem Justedālsbrēena izvadledājiem mūsdienās saglabājušās vairs tikai nelielas daļas. Piemēram, viens no pieejamākajiem Norvēģijas ledājiem – Briksdālsbrēens – tūristiem vairs nav sasniedzams, jo no tā saglabājusies tikai stāva ledus mēle, bet vēl 2003. gadā uz tā kāpa tūristu pūļi.

Viens no straujāk izzūdošiem Norvēģijas ledājiem ir Nigardsbrēens (*Nigardsbreen*) (55. att.), kura mala, piemēram, 2019. gadā atkāpās vairāk nekā par 80 m. Par šī ledāja malas fluktuācijām ir pieejami dati jau no 18. gadsimta sākuma, un ir zināms, ka starp 1700. un 1748. gadu ledāja mala uzvirzījās par 4 km, pilnībā iznīcinot Nigarda fermu, kura bija izveidota ledāja tuvumā (Nussbaumer et al., 2011). Nigardsbrēens ir arī piemērs, ka pie izzūdošajiem Norvēģijas ledājiem tūristiem jābūt īpaši uzmanīgiem. Šo ledāju malas bieži ir ļoti stāvas un plaisainas, un no tām mēdz pēkšņi atdalīties ledus gabali. Arī no blakusesošajām kalnu nogāzēm, kuras ir nestabilas, jo tās nesēn vēl klājis

55. att. Nigardsbrēena ledājs Norvēģijā. Pa kreisi: norvēģu gleznotāja Johana Kristiāna Dāla (1788–1857), 1847. gadā gleznotā ainava ar ledāju (Nussbaumer et al., 2011). Pa labi: ledājs 2016. gadā. Būtiski, ka fotoattēlā ledus mēle ir pilnībā izzudusi, tās vietā mūsdienās atrodas pieledāja ezers. Foto: K. Lamsters, 2016.





56. att. Ledājs
Sealggaglaciären
Kebnekajses masīvā
Zviedrijā. Foto: D. Poršņovs,
2018.

ledus, mēdz ripot atsevišķi akmeņi un var veidoties nogrūvumi. Cilvēki pie Nigardsbræna iet bojā regulāri, un pēdējais negadījums notika 2018. gadā – kāds cilvēks noslīka pēc tam, kad no ledāja atšķēlies aisbergs radīja lielus viļņus pieledāja ezerā.

Zviedrijā ledāji izplatīti galvenokārt ziemeļos, piemēram, Kebnekajses masīvā (56. att.), kur atrodas arī divas augstākās kalnu virsotnes Zviedrijā. No tām augstāko – dienvidu virsotni klāj ledājs. Dienvidu virsotnes ledāja kušanas dēļ 2018. gadā tā kļuva par otru augstāko virsotni Zviedrijā. Ziemeļu virsotne, kuru neklāj ledājs, šobrīd ir augstāka un sasniedz 2096,8 m v.j.l.

Kopumā Zviedrijā ir ap 300 ledāju, kas aizņem aptuveni 300 km² lielu platību (Williams & Ferrigno, 1993). Vairāk nekā puse no šiem ledājiem ir cirka ledāji, bet trešdaļa – nelieli ledus kupoli. Ar ledājiem viens no bagātākajiem reģioniem Ziemeļzviedrijā atrodas Sareka nacionālajā parkā. Šis ir Eiropas vecākais nacionālais parks, kurš izveidots jau 1909. gadā. Teritorijā, kuras diametrs ir aptuveni 50 km, atrodas 13 kalnu virsotnes augstumā virs 2000 m v.j.l., kā arī vairāk nekā 100 ledāju. Sareka

ledājiem pēdējo 100 gadu laikā bijušas raksturīgas vairākas uzvirzīšanās un atkāpšanās epizodes. 19. gadsimta beigās šo ledāju malas lielākoties atkāpās, savukārt 20. gadsimta pirmajos divos gadu desmitos tās uzvirzījās, bet pēc tam atkal atkāpās. 20. gadsimta beigās ledāju atkāpšanās stabilizējās saistībā ar globālās sasilšanas izraisīto nokrišņu daudzuma pieaugumu ziemās. 21. gadsimtā ledājiem raksturīga strauja atkāpšanās. Mūsdienu prognozes paredz, ka jau pēc 100 gadiem liela daļa Norvēģijas un Zviedrijas ledāju, ieskaitot ledus kupolus, būs izzuduši, ja piepildīsies pesimistiskākie globālās sasilšanas scenāriji.

CENTRĀLEIROPAS LEDĀJI

Centrāleiropas ledāji atrodas Alpu kalnos, bet citi Eiropas ledāji ārpus Skandināvijas – galvenokārt Kaukāza kalnos un Pirenejos. Nelieli ledāji sastopami arī Itālijas Apenīnos, kā arī Slovēnijā un Polijā. Kaukāza kalnu augstākā virsotne ir Elbruss (5642 m v.j.l.), un to mēdz uzskatīt par Eiropas augstāko virsotni.



57. att. Latviešu alpīnisti ceļā uz Elbrusa virsotni pa ledāju augstā. Priekšplānā – leva Kalka. Foto: I. Oleičenko, 2017.





58. att. Gepačfernera ledājs Kaunertāles ielejā Austrijas Alpos. Foto: K. Lamsters, 2015.

Elbruss ir aprimis stratovulkāns, kura virsotni klāj ledus kupols. No tā savukārt izplūst 24 ieleju ledāji (57. att.), pa kuriem alpīnisti nokļūst Elbrusa virsotnē. Kopējā ledus un ilglaicīgā sniega klātā platība Elbrusā sasniedz 110 km², un ledus tilpums ir aptuveni 5 km³. Pēdējos divdesmit gados Elbrusa ledāju klātā platība ir samazinājusies par 11%, bet tilpums pat par 23%, turklāt ledus masas zudums ir trīskāršojies, ja salīdzina ar periodu no 20. gadsimta vidus līdz beigām (Kutuzov et al., 2019). Līdz ar to nav nekāda pamata uzskatīt, ka šos kalnu ledājus klimata pārmaiņas neietekmē.

Kaukāza reģionā novērotā vasaras gaisa temperatūras paaugstināšanās ir noteicošais ledāju sarūkšanas cēlonis. Daudzi Elbrusa ledāji tāpat kā Kaukāza kalnu ledāji ir pulsējošie ledāji, un tiem raksturīgas straujas uzvirzīšanās epizodes. Novērotā ledāju atkāpšanās noteikti ietekmēs arī šo ledāju iespējamās uzplūdus nākotnē – negatīva ledāju masas bilance ledāju uzplūdu iespējamību samazina.

Vissenāk apkopotās ziņas par ledājiem ir saistītas tieši ar Centrāleiropas ledājiem, un šo ledāju pētījumi radīja priekšnoteikumus glaciālās teorijas attīstībai. Alpu kalnos sastopami vienkārši ieleju ledāji, no kuriem lielākais ir Alečglečers (*Aletschgletscher*). Šis ielejas šļūdonis atrodas Šveicē, stiepjas vairāk nekā 20 km garumā un aizņem 83 km² lielu platību. Ledāja plūsmas ātrums sasniedz 200 m, un kopš 1980. gada ledājs ir atkāpies par vairāk

nekā 1,3 km. Savukārt kopš mazā ledus laikmeta beigām 19. gadsimta vidū ledājs ir atkāpies par 3,2 km un zaudējis aptuveni 20% ledus masas (Bauder et al., 2007). Salīdzinājumam citi mazāki Alpu ledāji ir zaudējuši pat 50% ledus masas. Pēdējos divdesmit gados Alečglečera malas atkāpšanās ātrums reizēm ir pārsniedzis 100 m gada laikā.

Austrijas Alpos lielākais ledājs ir Pasterze, kurš stiepjas zem Austrijas augstākās virsotnes – Grosgloknera (3798 m). Pasterze ledājs ir 8 km garš, un kopš 19. gadsimta vidus tā tilpums ir samazinājies uz pusi. Gandrīz tikpat garš ir otrs Austrijas Alpu garākais ledājs – Gepačferners (*Gepatschferner*), tas stiepjas Kautertāles ielejā (58. att.). Arī šis ledājs ir krietni sarucis kopš mazā ledus laikmeta, un tā kādreizējo izplatības areālu ir viegli novērtēt, jo noteiktā augstumā ielejas nogāzēs, līdz kurienei reiz sniedzās ledus, sākas nobiru plūsmas. Virs šī augstuma ielejas nogāzi lielākoties klāj veģetācija, skaidri iezīmējot ledāja neskarto teritoriju arī mazajā leduslaikmetā.

CENTRĀLĀZIJAS UN ZIEMEĻĀZIJAS LEDĀJI

Āzijā ledāji lielākoties sastopami centrālajā daļā – augstkalnos. Pārējā Āzijas daļā tie ir reti izplatīti, jo tur valda kontinentāls klimats. Ziemeļāzijas kontinentālajā daļā ledāji sastopami tikai kalnainajos Kamčatkas, Urālu un Altaja kalnu reģionos. Pārējā Ziemeļāzijā ledāji koncentrēti Arktikas salās – Novaja Zemļa, Severnaja Zemļa un Franča Jozefa Zemes arhipelāgā. Šo ledāju aizņemtā platība ir 56 000 km², no tiem 23 645 km² atrodas Novaja Zemļa, 18 325 km² – Severnaja Zemļa un 13 735 km² – Franča Jozefa Zemē (Roer et al., 2018). Šo ledāju novietojuma dēļ tie ir mazpētīti, bet ir zināms, ka tos īpaši ietekmē Ziemeļatlantijas svārstības jeb oscilācijas. Tās ir atmosfēras spiediena svārstības Atlantijas okeānā, kuras atkarīgas no Azoru salu augstā spiediena apgabala un Islandes zemā spiediena apgabala savstarpējām attiecībām. Respektīvi, ja virs Azoru salām veidojas spēcīgs augsta spiediena apgabals, tad virs Islandes esošais zema spiediena apgabals būs vājāks. Jo lielāka būs atmosfēras spiedienu starpība starp šiem apgabaliem, jo spēcīgāka būs rietumvēju gaisa plūsma, kas savukārt veicinās siltu un mitru (okeānisko) gaisa masu nokļūšanu Ziemeļeiropā un Ziemeļrietumu Āzijā, būtiski ietekmējot arī Āzijas arktisko salu ledājus.

Kamčatkas pussalas ledāju dinamiku būtiski ietekmē vulkāniskā aktivitāte. Reģionā kopumā atrodas aptuveni 600 ledāji un 29 aktīvi vulkāni. No 1950. līdz 2000. gadam Kamčatkas pussalas ledāju aizņemtā platība ir samazinājusies par 11%, bet no 2000. līdz 2014. gadam – jau par 24%. Lai gan lielākā daļa Kamčatkas

ledāju pēdējos gadu desmitos ir atkāpušies, daži ir stabili un citi pat uzvirzījušies. Šāda anomāla uzvirzīšanās raksturīga, piemēram, Kamčatkas centrālās daļas ledājiem, kuri atrodas Kļuču vulkāniskās grupas reģionā (Barr et al., 2018). Trīs no Kļuču vulkāniskās grupas reģiona 15 ledājiem savukārt ir uzvirzījušies pētītajā laika posmā, starp 2012. un 2016. gadu. Reģiona ledāju īpatnība ir, ka 65% no ledus virsas pārklāj drupu materiāls, kuru galvenokārt veido vulkāniskie pelni. Trīs ledāji ne tikai uzvirzījās, bet arī palielinājās to virsmas augstums. Tas izskaidrojams ar Kļuču sopkas un citu vulkānu izvirdumiem, kuru rezultātā vulkānisko pelnu materiāls pārklāja ledājus, samazinot ledus albedo. Respektīvi, vulkānisko pelnu kārtā samazināja ledāju absorbētās Saules radiācijas daudzumu, samazinot to ablāciju. Iespējams, pozitīvas masas bilances dēļ norisinājās arī ledāju uzvirzīšanās.

Centrālajā Āzijā ledāji atrodas visās lielākajās kalnu grēdās – Himalajos, Karakorumā, Tjanšanā, Kuņluņā, Pamirā un citās. Šo ledāju aizņemtā platība ir 114 800 km² (Roer et al., 2018), kas atbilst sestajai daļai no visas pasaules ledāju un ledus kupolu aizņemtās platības (neskaitot Grenlandes un Antarktikas ledus vairogu). Ledāju atkāpšanās kalnos palielina atlūzu materiāla koncentrāciju ledāju malas zonās un veicina pieledāja

59. att. Everesta reģiona ledāji Himalajos. Attēla kreisajā pusē atrodas Khumbu ledājs, kura veidotais leduskritums ir viens no bīstamākajiem posmiem, kāpjot Everestā. Redzams, ka lielākā daļa ledāju ir pārklāti ar atlūzām, kas nedaudz samazina to kušanas ātrumu. Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-8 satelītattēls (J. Allen, R. Simmon).



ezeru veidošanos. Šādi kalnu ezeri rada potenciālu apdraudējumu, jo, tiem noplūstot, var tikt skartas apdzīvotās vietas zemākā augstumā. Kopumā Centrālāzijas kalnu ledāji kopš 19. gadsimta vidus ir zaudējuši 25 līdz 50% ledus masas. Lielākā daļa Himalaju un Karakoruma ledāju mūsdienās atkāpjas, bet daudzi Karakoruma un Himalaju ziemeļrietumu daļas ledāji 20. un 21. gadsimtā ir uzvirzījušies, un šo ledāju uzvirzīšanos dēvē par Karakoruma anomāliju (Bolch et al., 2012). Reģionā ir arī liela pulsējošu ledāju koncentrācija.

Himalaju ledāji atšķiras no ledājiem citviet. Piemēram, sniega akumulāciju reģionā nosaka galvenokārt musonu aktivitāte, tādējādi ledāji saņem sniegu nevis ziemā, bet vasaras musonu periodā. Daudziem ledājiem nozīmīgs sniega avots ir lavīnas, savukārt to mēles no kušanas pasargā biežais atlūzu materiāla slānis (59. att.). Kopumā par Himalaju un Karakoruma ledājiem nav pietiekami daudz informācijas, lai varētu izskaidrot Karakoruma ledāju anomāliju un precīzi paredzēt ledāju atkāpšanās ātrumu turpmāk. Šādi pētījumi ir ļoti nozīmīgi, jo Himalaju ledāju un sniega kušana nodrošina ar ūdeni vairāk nekā miljardu cilvēku. Datu trūkums par Himalaju ledājiem izraisīja pārsteidzošu paziņojumu Klimata pārmaiņu starpvaldību padomes ziņojumu ceturtajā novērtējuma atskaitē, ka Himalaju ledāji būs nokusuši jau 2035. gadā. Jaunākie pētījumi pilnībā apgāž šo paziņojumu, bet atkarībā no klimata scenārijiem tiek paredzēts, ka līdz 2100. gadam nokūsīs viena vai divas trešdaļas no visiem Himalaju ledājiem (Wester et al., 2019).

ĀFRIKAS LEDĀJI

Nedaudzi Āfrikas ledāji atrodas Ruvenzori kalnos (augstākais ir Stenlija kalns – 5109 m), Kenijas kalnā (5199 m) un Kilimandžāro (5895 m). Ledāji atrodas tropiskajā klimata joslā, lai gan ekvators ir pavisam netālu. Ledāji šajos kalnos ir būtiski atkāpušies, un mūsdienās ir saglabājušies tikai nelieli to fragmenti. Astoņi no 18 ledājiem Kenijas kalnā izzuda jau 20. gadsimtā. Kilimandžāro ledāju aizņemtā teritorija ir samazinājusies no 20 kvadrātkilometriem 1880. gadā līdz 2,5 kvadrātkilometriem 2003. gadā. No 1912. līdz 2000. gadam izzuda 82% ledāju aizņemtās platības (Thompson et al., 2009). Lielākais Kilimandžāro ledājs mūsdienās ir Ziemeļu ledus lauks, kura platība 2007. gadā bija 0,95 km². Kopš 2000. gada tas ir zaudējis jau 30% ledus tilpuma.

Ir zināms, ka Kilimandžāro ledāji ir sākuši veidoties aptuveni pirms 11 000 gadu, bet vēlāk par agro driasu (12 800–11 500), kad bija raksturīgas zemas gaisa temperatūras un sauss klimats, kas kavēja ledāju attīstību. Lai gan tika prognozēts, ka Kilimandžāro Ziemeļu ledus lauks izzudīs jau 2020. gadā, šobrīd tas vēl ir saglabājies



60. att. Kilimandžāro ledāji 2004. gada 28. jūnijā. Vulkāna kalderas centrālo daļu aizņem sniega sega. Avots: *NASA Earth Observations Laboratory, Johnson Space Center, astronautu fotogrāfija.*

(60. att.), un tā izzušana tiek prognozēta līdz 2030. gadam. Mūsdienu Kilimandžāro ledāju izmaiņas galvenokārt ir saistītas ar atmosfēras mitruma daudzumu, jo virsmas kušana šajos ledājos gandrīz nenotiek. Tie ir pakļauti sublimācijai, ko veicina sausās gaisa masas.

Ne visi zinātnieki atzīst, ka globālā sasilšana ir Kilimandžāro ledāju sarukšanas galvenais iemesls. Piemēram, 2000. gadā, veicot ledus urbšanu, zinātnieki novēroja, ka ledus serdenis bija piesātināts ar ūdeni, lai gan uz ledāja ledus sienām kušana nenorisinājās. Daži zinātnieki potenciālo ledāja iekšienes un pamatnes kušanu saista ar siltumu no vulkāna (precīzāk – fumarolām). Citi uzsver mežu izciršanas būtisko lomu, tā samazina atmosfēras mitruma daudzumu, mākoņainību un nokrišņu daudzumu, tādējādi veicinot ledus sublimāciju. Kopumā Kilimandžāro ledāju atkāpšanos ietekmē vairāki faktori, bet ir skaidrs, ka to izzušana sagaidāma jau tuvā nākotnē.



JAUNGVINEJAS LEDĀJI

Jaungvinejā atrodas Āzijas vienīgie tropiskie ledāji (pārējie 99% pasaules tropisko ledāju ir Andos). To ledus masa strauji samazinās, un tie varētu būt izzuduši jau tuvāko desmit gadu laikā. Ledāji ir saglabājušies vairāk nekā 4 km augstumā Maokes kalnu grēdā (Mandalas kalnā (*Puncak Mandala*), Nga Pilimsit kalnā (*Ngga Pilimsit*) un Džaja kalnā (*Puncak Jaya*), ko agrāk sauca par Karstensa piramīdu) un trīs virsotnēs Papua Rietumkordiljeru grēdā. Vairāki Džaja kalna ledāji izzuda jau pirms 2000. gada, un mūsdienās saglabājušies tikai trīs ledāji – Karstens, Austrumu Ziemeļsienas un Rietumu Ziemeļsienas firna ledāji. Kopš mazā ledus laikmeta Džaja kalna ledāju platība ir sarukusi no 20 km² ap 1850. gadu līdz mazāk par 3 km² 2002. gadā (Roer et al., 2008). Ledāju atkāpšanās iemesli ir gaisa temperatūras palielināšanās, kas izraisa straujāku sublimāciju. Gaisa temperatūra šajā reģionā gada griezumā ir gandrīz nemainīga, tādēļ ledājiem nav raksturīgas sezonālas fluktuācijas. Nozīmīgi ledāju sarūkšanas faktori ir arī mitruma līmenis, nokrišņu izmaiņas un mākoņainība. Džaja kalna ledāju (61. att.) biezums samazinās par 7 m gadā kopš 2010. gada, tādēļ tiek prognozēta to izzušana jau tuvākajos gados.

JAUNZĒLANDES LEDĀJI

Jaunzēlandē atrodas aptuveni 3000 ledāju, un lielākā to daļa ir Dienvidalpos. Ledāju izplatību nosaka ne tikai to augstums virs jūras līmeņa, bet arī lielais nokrišņu daudzums, kas var sasniegt

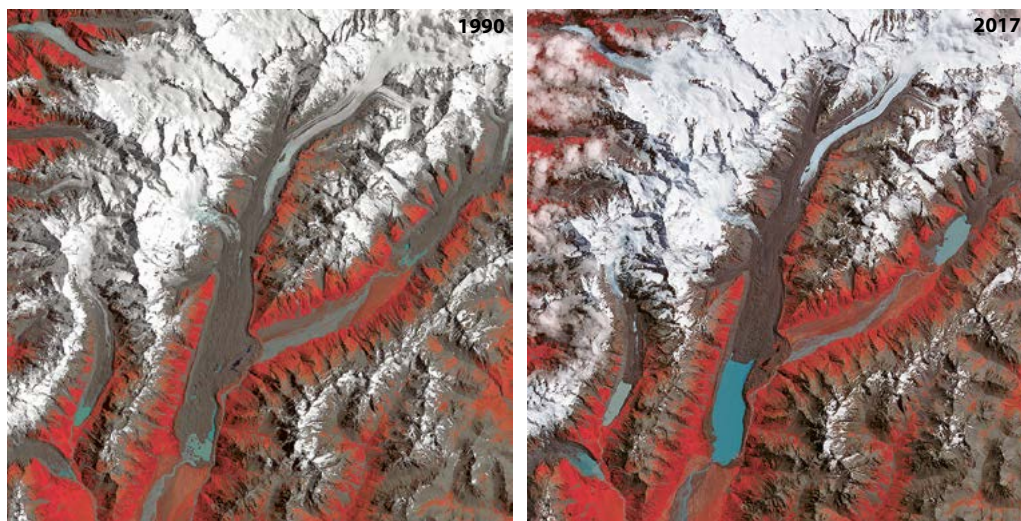
61. att. Džaja kalna ledāji Jaungvinejā 1989. un 2009. gadā. Tumšais plankums 2009. gada attēlā ir Grasberga zelta raktuves (slēgtas 2019. gadā). Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-4 un Landsat-5 satelītattēli (kombinācija no īsviļņu infrasarkanā, tuvā infrasarkanā un zaļā gaismas spektra daļas, kurā ledus attēlojas gaiši zilā krāsā).

15 000 mm gadā. Kopš ledāju maksimālās izplatības mazajā leduslaikmetā 18. gadsimta beigās to aizņemtā platība līdz 1970. gadam samazinājās uz pusi. Rietumkrastā 20. gadsimta astoņdesmito gadu vidū daudzi ledāji uzvirzījās. Savukārt 21. gadsimtā ledāju atkāpšanās strauji pieauga (Roer et al., 2008).

Lielāko daļu Jaunzēlandes ledāju masas zuduma nodrošināja tikai 12 lielākie ledāji. Lielākais Jaunzēlandes ledājs ir Tasmana ledājs, kurš stiepjas 23 km garumā un ir līdz pat 600 m biezs. Tas atrodas ielejā pie augstākās Jaunzēlandes virsotnes – Kuka kalna (3754 m v.j.l.). Strauja Tasmana ledāja atkāpšanās sākās 20. gadsimta 90. gados, un vidēji ledāja mala atkāpās par 180 m. No 2000. līdz 2008. gadam ledāja mala atkāpās par 3,7 km. Patlaban ledāja malas atkāpšanās jau sasniedz 0,5 līdz 0,8 km gadā.

Tasmana ledāja atkāpšanos labi ilustrē pieledāja ezera parādīšanās (62. att.). 1973. gadā ledāja priekšā ezera nebija, savukārt mūsdienās pie ledāja jau izveidojies 7 km garš, 2 km plats un 245 m dziļš ledāja sprostezers (63. att.). Līdzīgi ir noticis arī ar blakusesošajiem ledājiem, piemēram, Hūkera (*Hooker*) ledāju, kurš arī ieplūst pieledāja ezerā (64. att.). Ezers sāka veidoties iepriekšējā gadsimta 70. gados, un no 1990. līdz 2013. gadam tā garums dubultojās no 1,2 līdz 2,3 km, ledāja malai atkāpjoties vairāk par 50 m katru gadu. Patlaban ezera garums sasniedz

62. att. Tasmana ledāja (attēlu centrā) izmaiņas Jaunzēlandē starp 1990. un 2017. gadu. Redzams, ka 2017. gadā ledāja priekšā izveidojies 7 km garš pieledāja ezers. Infrasarkanā spektra satelītattēlos ledus un sniegs ir baltā krāsā, bet ūdens – gaiši zilā. Ledāja tumšo krāsu rada atlūzu materiāls. Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-4 un Terra satelītattēli.





63. att. Skats uz Tasmana ledāju Jaunzēlandē un uz sprostezeru tā priekšā.
Foto: I. Grīnbauma, 2015.

4 km, un tiek prognozēts, ka nākotnē tā garums dubultosies, jo ledāja mēle atkāpjas, un tāpēc ledāja gultne atradīsies augstāk par ezera ūdens līmeni.

Gan Tasmana, gan Hūkera un blakusesošos ledājus pārklāj virsledāja atlūzu materiāls, kas samazina ledus virsmas absorbēto Saules radiācijas daudzumu, tomēr ledāju straujo atkāpšanos tas ietekmē tikai nedaudz.

DIENVIDAMERIKAS LEDĀJI

64. att. Jaunzēlandes Hūkera ledāja ar atlūzām pārklātā mēle. Tās priekšā izveidojies garš ledāja sprostezers.
Foto: I. Grīnbauma, 2015.

Dienvidamerikā ledāji ir plaši izplatīti Andu kalnos. Tur sastopami gan tropiskie ledāji (Andu ziemeļdaļā), gan arī lieli ledus lauki Patagonijā. Lielākā ledus masa, kas aizņem aptuveni 23 000 km² lielu platību, atrodas Čīlē un Argentīnā. 85% šīs ledus masas ir Patagonijas ziemeļu un dienvidu ledus laukos, kā arī Kordiljeru Darvina ledus laukā (Roer et al., 2008). Dienvidpatagonijas ledus lauks aizņem aptuveni 12 000 km² lielu platību, un tas ir pasaules otrs lielākais ekstrapolārais (neatrodas polārajos reģionos) ledus lauks aiz ledus lauka Aļaskā. No šī ledus lauka izplūst 48 atsevišķi ledāji, no kuriem lielākie sasniedz vairāku desmitu kilometru garumu. Šis Patagonijas reģions (65. att.) ir īpašs arī ar to, ka tas ir dienvidu puslodes otrs reģions, kur pēdējā leduslaikmetā ārpus Antarktikas bija izveidojies ledus vairogs. Tā tilpums varēja būt aptuveni 525 000 km³. Deviņu tūkstošu gadu laikā pēc pēdējā apledošanas maksimuma ledus vairogs zaudēja vairāk nekā 500 000 km³ ledus masas, paaugstinot globālo jūras līmeni par 1,2 m.

Viens no Dienvidpatagonijas ledus lauka izplūstošajiem ledājiem ir Greja ledājs (*Glacier Grey*) (66. att.). Tā garums ir 28 km un platums 6 km, bet aizņemtā platība – 243 km². Šis ledājs ir lielāks par jebkuru ledāju Alpos, un tas nebūt nav lielākais ledājs Patagonijā. Līdzīgi citiem Patagonijas ledājiem tas ir atkāpies par 2 km kopš 1980. gada. Ledājs ieplūst tāda paša nosaukuma pieledāja ezerā, kura dziļums ledāja malas priekšā sasniedz 300 m. Greja ledājs tāpat kā liela daļa citu ledāju, kas izplūst no Dienvidpatagonijas ledus lauka, zaudē savu masu kalvinga procesā, kad no ledāja malas atšķēļas aisbergi (67. att.). Pēdējos gados



65. att. Skats uz Andu kalniem Patagonijā. Priekšplānā – Greja ezers ar aisbergiem, kas atšķēlušies no pretējā ezera pusē iepļūstošā Greja ledāja. Šo teritoriju pirms 20 000 gadiem klāja Patagonijas ledus vairogs. Foto: K. Lamsters, 2018.

66. att. Skats uz piededāja ezerā iepļūstošā Greja ledāja malu Patagonijā. Foto: K. Lamsters, 2018.



67. att. Īpatnējas piramīdas formas aisbergs pie Greja ledāja Patagonijā. Foto: K. Lamsters, 2018.

ledājs kļuvis zināms īpaši intensīvu kalvinga notikumu dēļ. 2017. un 2019. gadā no ledāja atšķēlās milzīgi aisbergi daudzu hektāru platībā. Aisbergu veidošanās intensifikācija norāda uz pieaugošo globālās sasilšanas ietekmi uz Patagonijas ledāju dinamiku.

ZIEMEĻAMERIKAS LEDĀJI

Ziemeļamerikas ledāji galvenokārt atrodas divos apgabalos. Pirmkārt, kontinenta rietumdaļā – Ziemeļamerikas Kordiljeros, kas vairāk nekā 7000 km garumā stiepjas ziemeļu–dienvidu virzienā. Otrkārt, Kanādas Arktiskajā arhipelāgā, kurš aprakstīts nākamajā nodaļā, jo iekļaujas Arktiskajā apgabalā. Vairums Ziemeļamerikas kontinenta ledāju atrodas Aļaskā un Jukonā. Liela daļa Kordiljeru ledāju ir Klinšu kalnos, kuri ziemeļu virzienā turpinās kā Aļaskas grēda. Tajā atrodas kontinenta augstākā



virсотne – Denali (līdz 2015. gadam zināma kā Makinlija kalns; 6190 m v.j.l.). Kanādas augstākā virсотne Logans (5959 m v.j.l.) atrodas Klueina nacionālajā parkā, kur ledāji aizņem 83% visas teritorijas.

Kopš 1948. gada Dienvidrietumu Jukonas reģiona gaisa temperatūra ir paaugstinājusies par vairāk nekā 2 °C, un tiek prognozēts, ka līdz 2100. gadam temperatūra palielināsies par 3–3,5 °C. Lai gan tas, neapšaubāmi, nozīmē ledāju straujāku atkāpšanos, ir jāņem vērā, ka temperatūras palielināšanās dēļ šajā reģionā pieaugs arī nokrišņu daudzums, īpaši ziemā. Nokrišņu daudzuma (sniega) palielināšanās ziemā uzlabo ledāju masas bilanci, bet siltākas vasaras temperatūras to, protams, samazina. Šīs nianšes ir jāņem vērā, modelējot ledāju masas bilances izmaiņas nākotnē.

Viens no lielākajiem Klueina nacionālā parka ledājiem Jukonā ir Kaskavulšas (*Kaskawulsh*) ledājs, kurš noplūst no Klueina

68. att. Kaskavulšas ledājs Jukonā 2011. gadā. Vairākas tumšās grēdas ledāja vidusdaļā ir vidusmorēnas, kas atdala ledāja plūsmas vienības. Attēls: Flickr (*S. Chilibeck*).

ledus laukiem, kas atrodas Sentelias kalnos. Ledājs aizņem nedaudz vairāk par 1000 km² lielu platību, un tā garums sasniedz gandrīz 70 km. Ledāju galvenokārt veido divi atsevišķi ledāji, kas saplūst kopā, kā arī daudzi mazāki, tādēļ ledāja malas zonā tā virskārtā izveidojušās vairākas vidusmorēnas (68. att.). Tās ir līdz pat vairākiem desmitiem metru augstas ledus grēdas, kuras pārklāj virsledāja atlūzas. Vidusmorēnas veidojas, saplūstot diviem ledājiem vai ledus plūsmas vienībām, jo atlūzu materiāls gar to sāniem nokļūst ledāja centrālajā daļā. Šī lielā Jukonas ledāja izmaiņas ir reģistrētas, izmantojot virsmas modeļus, kas izveidoti gan no vēsturiskām aerofotogrāfijām, gan jaunākajiem lāzerskenēšanas datiem (Foy et al., 2011). No 1977. līdz 2007. gadam Kaskavulšas ledāja platība samazinājās par 1,53%. No 1977. līdz 1995. gadam ledus tilpums praktiski nemainījās, bet pēc 1995. gada ledājs zaudē aptuveni 0,5 m ūdens ekvivalenta gadā un ledāja virsas pazemināšanās un malas atkāpšanās ātrums pieaug. Līdzīga situācija raksturīga arī citiem Jukonas un Aļaskas ledājiem.

Pie Kaskavulšas ledāja 2016. gadā pirmo reizi tika dokumentēts ģeoloģisks fenomens – upes pārtveršana. Tādi notikumi līdz šim bija zināmi tikai no senas pagātnes, bet nebija novēroti mūsdienās. Upe, kura iepļūda lielākajā Jukonas ezerā – Klueina ezerā – un tālāk nogādāja ledājūdeņus līdz Beringa jūrai, 2016. gadā izzuda. Ledāja malas atkāpšanās dēļ tagad ledājūdeņi plūst pilnīgi citā virzienā un baro Kaskavulšas upi.

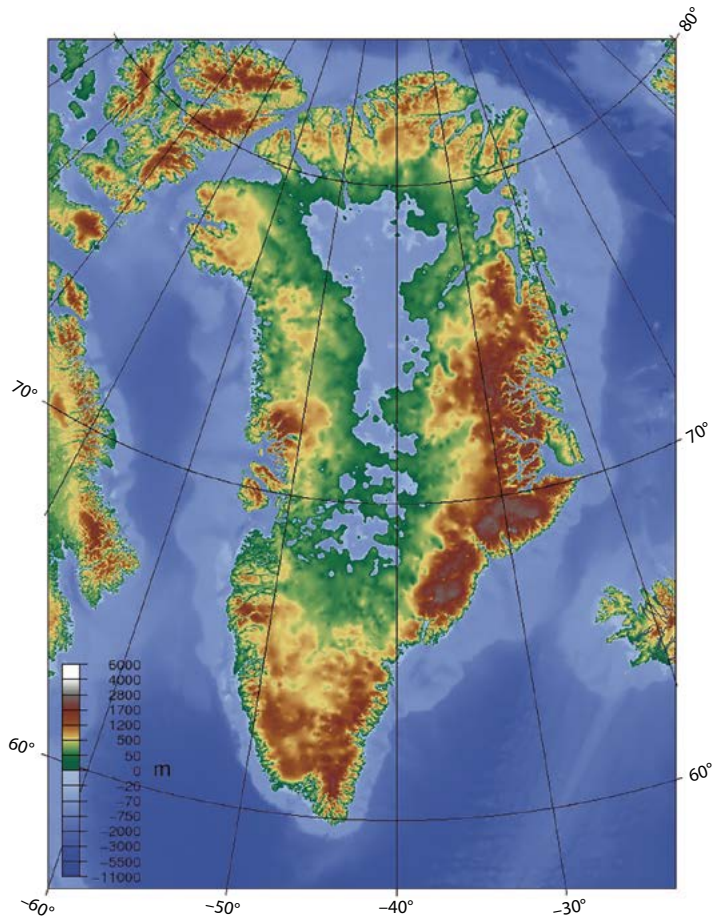
4. NODAĻA

MŪSDIENU LEDUS VAIROGU RAKSTUROJUMS

GRENLANDE

Grenlande ir pasaulē lielākā sala ar kopējo platību – 2,17 miljoni kvadrātkilometru. Aptuveni 80% no tās jeb 1,7 miljoni kvadrātkilometru aizņem Grenlandes ledus vairogs. Tā ir lielākā ledus masa ziemeļu puslodē un otra lielākā pasaulē aiz Antarktikas. Maksimālais ledus biezums sasniedz 3367 m, un dziļākā vieta zem ledus vairoga atrodas 555 m zem jūras līmeņa. Ja iztēlojas Grenlandi bez ledus vairoga, tās centrālā daļa ir iegrimusi un atrodas zem jūras līmeņa ledus svara dēļ (69. att.), savukārt Grenlandes perifērijā, galvenokārt austrumdaļā, atrodas pat 3 km augsti kalni. Vecākais apstiprinātais ledus ir gandrīz vienu miljonu gadu vecs, bet modelēšanas rezultāti ļauj secināt, ka esošais ledus vairogs sācis veidoties vismaz pirms aptuveni 2,4 miljoniem gadu, respektīvi – neilgi pēc pleistocēna sākuma. Tādējādi arī šis ledus vairogs ir eksistējis visu pleistocēna apledojumu un starpleduslaikmetu laikā.

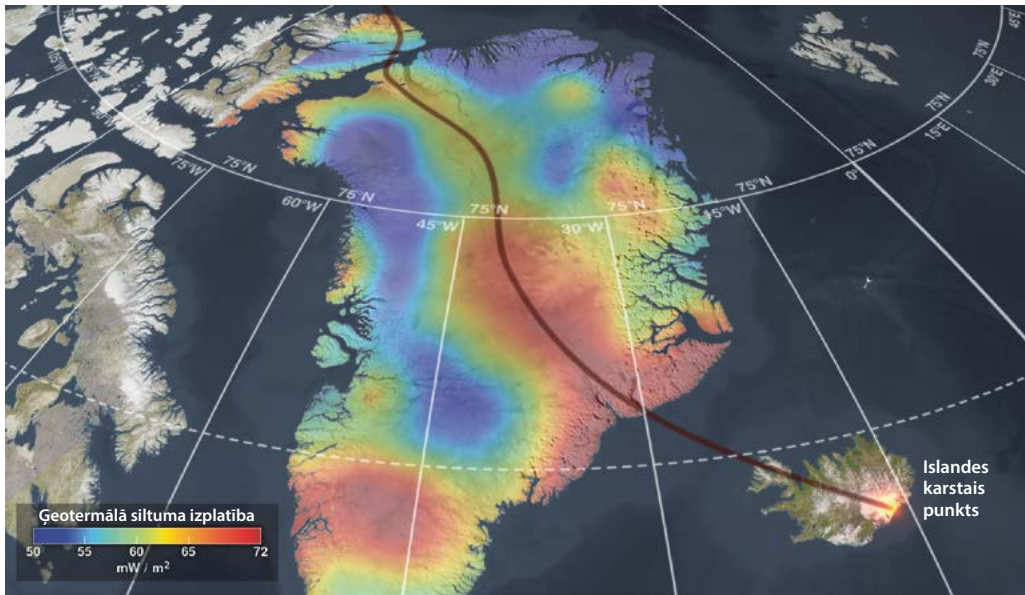
Zemledāja reljefa pazeminājumu Grenlandes centrālajā daļā aizpilda ledus, kurš saglabājies no iepriekšējā (Ēmas) starpledus laikmeta pirms 130 000–115 000 gadu. Grenlandes ledus vairogs stiepjas 2500 km ziemeļu–dienvidu virzienā pāri visai



69. att. Grenlandes topogrāfija bez ledus vairoga. Teritorijas, kas redzamas gaiši zilā krāsā, atrodas zem jūras līmeņa. Avots: *Wikimedia Commons*.

Grenlandei, un tā platums sasniedz 1000 km rietumu–austrumu virzienā. Kopējais ledus vairoga ledus tilpums ir 2 600 000 m³, kas atbilst 10% no visa uz Zemes esošā saldūdens. Tam nonākot okeānā, ūdens līmenis celtos par gandrīz 7 m (Benn & Evans, 2010).

Nepārtraukta ledus vairoga eksistenci Grenlandē pirmo reizi pierādīja norvēģu polārpētnieks Fritjofs Nansens, kurš pirmais 1888. gadā šķērsoja Grenlandes ledus vairogu. Pirms tam eksistēja idejas, ka Grenlandes centrālajā daļā atrodas no ledus brīvas platības, līdzīgi kā Alpu kalnos. F. Nansens arī bija pirmais prezidents starptautiskajai polāro pētījumu biedrībai *Aeroarctic Society* (*The International Society for the Study of the Arctic by*



Means of Airship), kura tika nodibināta 1924. gadā. Tā organizēja gaisa lidojumus polārajos apgabalos, un viens no organizācijas galvenajiem mērķiem bija organizēt transpolāru lidojumu ar cepelīnu no Eiropas uz Ameriku, lai vienlaikus veiktu arī dažādus ģeofizikālus mērījumus. Ar šo cepelīnu (*LZ 127 Graf Zeppelin*) īstenoti ne tikai lidojumi visā pasaulē, bet arī lidojums pāri Arktikai 1931. gadā, vienlaikus veicot Zemes magnētiskā lauka mērījumus.

Lai gan mūsdienās Grenlande ir viena no sauszemes teritorijām, kas atrodas vistālāk uz ziemeļiem, no ģeoloģiskā skatpunkta situācija nesēnā pagātnē bija atšķirīga. Pirms 65 miljoniem gadu polārais loks šķērsoja tikai Grenlandes pašu ziemeļu daļu un zem Grenlandes atradās tas, ko mūsdienās dēvē par Islandes karsto punktu (Mordret, 2018). Tas ir samērā stacionārs mantiņas apgabals, kur magmas temperatūra ir pietiekami augsta, lai uzturētu augšupejošu plūsmu (mūsdienās šāds apgabals nodrošina vulkānisko aktivitāti Islandē). NASA zinātniekiem, veicot magnētisko iežu ķīmiskos pētījumus, ir izdevies radīt karti, kur attēlota potenciālā ģeotermālā siltuma enerģija zem Grenlandes ledus vairoga (70. att.).

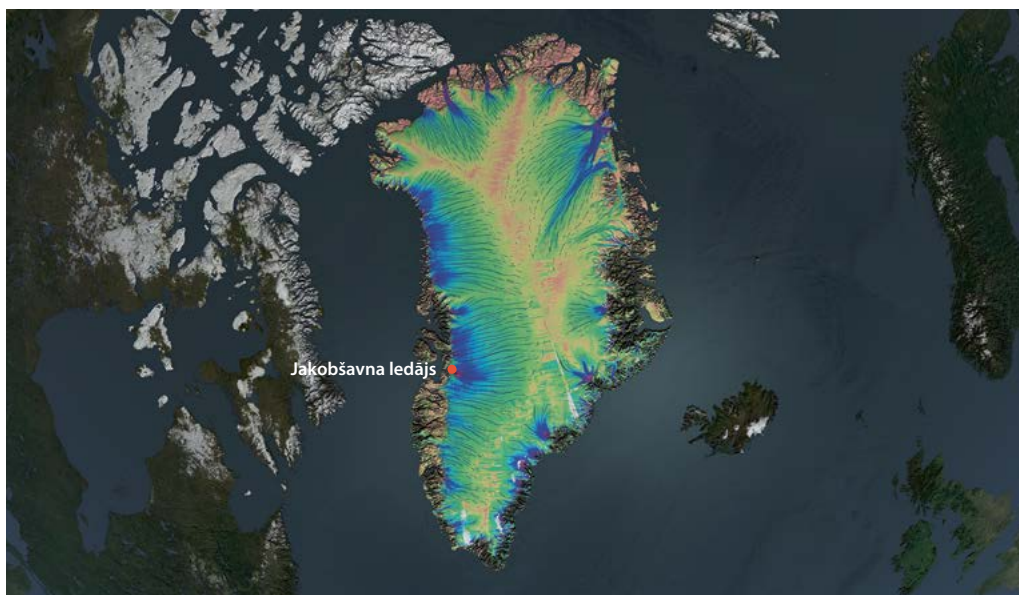
70. att. Ģeotermālā siltuma izplatība zem Grenlandes ledus vairoga. Krāsu skala attēlo milivatus uz kvadrātmetru. Sarkanā līnija attēlo iespējamo Grenlandes kustību pāri Islandes karstajam punktam. Avots: GSFC SVS.

Ģeotermālā siltuma avots ir siltāks mantijas apgabals, kas saglabājies, Grenlandei pārvietojoties pāri karstajam punktam ziemeļrietumu virzienā. Tādējādi Grenlandes centrālajā un dienvidaustrumu daļā ģeotermālā siltuma plūsma ir vislielākā. Kārtējā mantijas karstā punkta pulsācija (augšupejoša magmas plūsma) aptuveni pirms 5 miljoniem gadu izraisīja Austrumgrenlandes pacelšanos (patlaban kalni tur pārsniedz 3 km augstumu) un Grenlandes pārvietošanos ziemeļu virzienā. Šim ģeotermālā siltuma apgabalam var būt potenciāla ietekme uz Grenlandes ledus vairoga masas bilanci, bet ir nepieciešami turpmāki pētījumi. Iespējams, ka paaugstināta ģeotermālā siltuma plūsma Grenlandes vidienē ir viens no cēloņiem, kas rada Grenlandes lielāko ledus lielplūsmu, kas virzās uz ziemeļaustrumiem. Bazālā ledus kušanas ātrums šīs ledus lielplūsmas gultnē ir izteikti palielināts, un daži pētījumi liecina, ka bazālā ledus kušanai būtu vajadzīga pat 970 milivati uz kvadrātmtru liela ģeotermālā siltuma enerģija, kas septiņpadsmit reišu pārsniedz Grenlandes ģeotermālā siltuma fona lielumu (70. att.). Šīs ledus lielplūsmas sākums arī sakrīt ar konstatēto gravitācijas anomāliju, kas apstiprina zemledāja vulkāniskā apgabala eksistenci.

Arī Grenlandes ledus vairogu, līdzīgi kā Antarktīkas vairogu, drenē ātri plūstošas ledus lielplūsmas un izvadledāji. Tomēr pastāv būtiskas atšķirības. Lielā daļā Grenlandes iekšzemes dominē tā sauktā klājplūsma (*sheet flow*), kur ledus kustības ātrums sasniedz vien dažus desmitus līdz simtus metru gadā. Savukārt lielplūsmu vai izvadledāju ledus plūsmas ātrums var sasniegt vairākus kilometrus gadā (71. att.) un atsevišķos gadījumos pat vairāk nekā desmit kilometrus gadā. Šo ledus plūsmas ātruma sadalījumu lielā mērā nosaka zemledāja reljefs, jo Grenlandes centrālā daļa ir samērā līdzena (ieliekta zem ledus svara), bet tuvāk krasta zonai atrodas kalni, kuru ielejās ievērojami pieaug koncentrētas ledus plūsmas ātrums. Tādējādi Grenlandes ledus vairoga masas zudumu galvenokārt ietekmē salīdzinoši nelielais skaits izvadledāju. Lielākie no tiem ieplūst okeānā un tiek dēvēti par plūdmaiņu ietekmētiem ledājiem (piemēram, Jakobšavna (*Jakobshavn*) ledājs rietumos un Helheima (*Helheim*) un Kangerdlugsuakas (*Kangerdlugssuaq*) ledājs dienvidaustrumos. No šiem izvadledājiem atšķēļas aisbergi (kalvings), nodrošinot vairāk par pusi no visas Grenlandes ledus vairoga masas zuduma. Līdz ar to jebkādas ledus plūsmas ātruma izmaiņas būtiski ietekmē ledus vairoga masas bilanci.

Grenlandes ledus vairogu drenējošie izvadledāji ir ļoti atšķirīgi pēc to izmēra, plūsmas ātruma un ledus noteces. Lēnākie ir tikai uz sauszemes bāzētie ledāji, savukārt ātrākie ieplūst okeānā, kur pretestība ledus plūsmai ir vismazākā. Lielāko ledus apjomu Ziemeļgrenlandē okeānā novada Ziemeļaustrumu Grenlandes ledus lielplūsma.

Jakobšavna ledājs (71. att.) ir ne tikai lielākais Rietumgrenlandes izvadledājs (tas drenē 110 000 kvadrātkilometrus jeb 6% no visa ledus vairoga), bet arī,



iespējams, ātrākais ledājs pasaulē. Jakobšavna izvadledāja mala bija relatīvi stabila 1950.–1990. gada periodā. 1998. gadā sākās dramatiska ledāja malas atkāpšanās par 5 km, izraisot plūsmas pieaugumu no 5 līdz 9 km gadā. Starp 2001. un 2003. gadu lielākā daļa no uzpeldējušās mēles sabruka (72. att.), un ātrums pieauga līdz 13 km gadā. Vislielākais novērotais Jakobšavna izvadledāja plūsmas ātrums vasarā ir sasniedzis 45 m dienā. Radīto aisbergu apjoms no 24 km³ 1996. gadā pieauga līdz 46 km³ 2005. gadā. Jakobšavna ledāja drastiskā atkāpšanās ir plaši apspriesta masu medijos un izmantota kā globālo klimata pārmaiņu piemērs. Tomēr jāatzīmē, ka šis ledājs daudzējādā ziņā ir unikāls un nevar tikt izmantots kā labs un analogs piemērs attiecībā uz citiem Grenlandes izvadledājiem.

Līdzīgs ledus plūsmas ātruma pieaugums kā Jakobšavna ledājā norisinājās arī ar Kangerdlugsuakas un Helheima ledājā, bet to plūsmas ātrums drīz vien samazinājās līdz agrākajam.

Zinātnieki ir mēģinājuši izprast, kas izraisījis tik strauju Jakobšavna ledāja plūsmas ātruma pieaugumu un ledāja atkāpšanos. Galvenie faktori ir vairāki. Piemēram, liela loma bija uzpeldējušajai ledāja mēlei, kas ierobežoja tālāk iekšzemē esošā

71. att. Grenlandes ledus vairoga ledus plūsmas ātrums. Violetā krāsā ir apgabali, kur ledus plūsmas ātrums sasniedz vairākus kilometrus gadā. Ledus galvenokārt plūst no centrālās ledusšķirtnes (bēšā krāsā) uz Grenlandes piekrastēm. Avots: GSFC SVS.

ledāja plūsmas ātrumu. Uzpeldējušās ledāja mēles sabrukšana veicināja ledus plūsmas ātruma palielināšanos. Sākotnējo ledāja mēles sabrukšanu stipri ietekmēja tās bazālās kušanas pastiprināšanās saistībā ar relatīvi silta ūdens ieplūdi fjordā. Vēl viens iespējamais faktors bija siltākas vasaras, kuru laikā veidojās virs-
ledāja ezeri. Kad tie noplūda, liels ūdens apjoms pa ūdensriņņiem un plaisām nokļuva zem ledāja un paātrināja ledus plūsmu. Vēl viens faktors kopumā ātrajai ledus plūsmai ir zemledāja kanjons, kas atrodas zem Jakobšavna ledāja un kura pamatne atrodas gandrīz 1,5 km zem jūras līmeņa. Tādējādi liels ledus apjoms tiek koncentrēts šaurā un dziļā kanjonā, kas veicina ledus plūšanu.

1986. gadā, lai izskaidrotu šī ledāja ātro plūsmu (tad tā bija krietni lēnāka nekā vēlākos gados), tika ieviests termins “Jakobšavna efekts” (Hughes, 1986). Būtībā tolaik zinātnieki vēl nevarēja rast skaidrojumu ledāja ātrajai plūsmai, tādēļ tika spriests, ka Jakobšavna efektu rada nelielas perturbācijas (traucējumi), kas izraisa līdzsvara stāvokļa zudumu un ievērojamas nelineāras atbildes reakcijas. Jakobšavna ledāja gadījumā iespējams, ka spēku nelīdzsvarotība tā kalvinga frontes malā izplatījās arī pārējā ledāja ķermeņī, veicinot plūsmas ātruma pieaugumu. No 2016. līdz 2019. gadam ledāja plūsmas ātrums ir samazinājies un ledāja mala atkal ir pat virzījies uz priekšu.

Grenlandes ledus vairogs 21. gadsimtā zaudē ledus masu aizvien pieaugošā ātrumā, tādējādi radot vislielāko ietekmi uz globālā jūras līmeņa celšanos. Citi faktori, kas nosaka jūras līmeņa celšanos, ir saistīti ar Antarktikas ledus vairogu, bet visu pārējo pasaules ledāju sarūkšana rada tikai nelielu ietekmi. Grenlandes

72. att. Jakobšavna ledāja atkāpšanās Rietumgrenlandē. Pa kreisi – 2001. gada 14. jūlijs, pa labi – 2010. gada 10. jūlijs. Dzeltēnā līnija norāda ledāja malas pozīciju 2010. gadā, kad ledājs bija atkāpies jau par 10 km. Avots: NASA Earth Observatory (*Observing-1*).



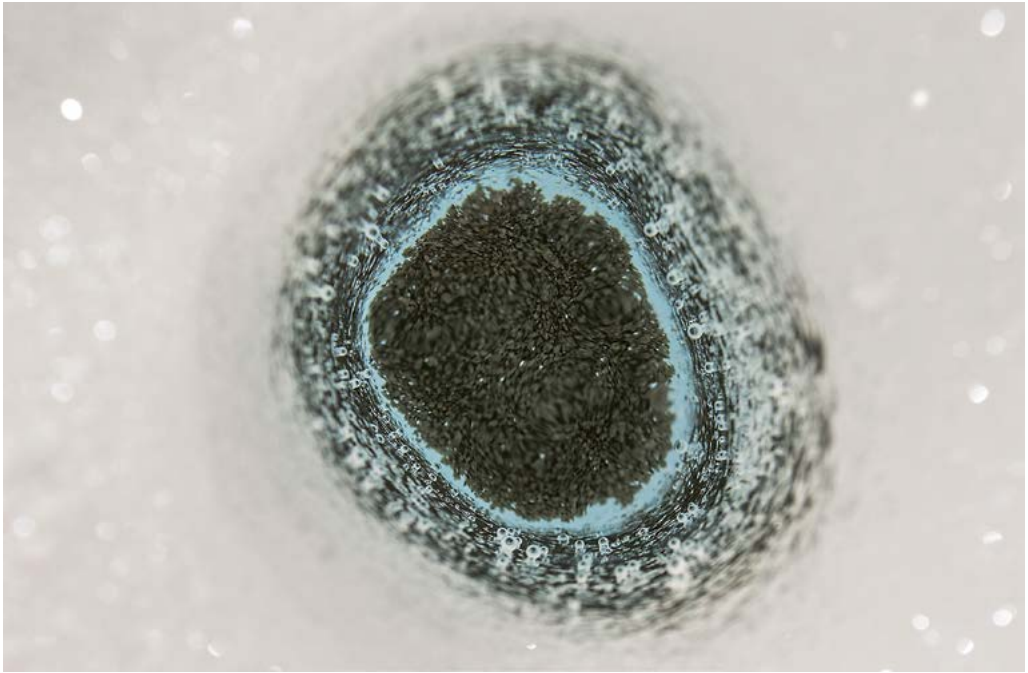
ledus vairoga kušana 1991.–2015. gadā paaugstināja globālo jūras līmeni par 0,5 mm katru gadu. Lai gan tas neizklausās daudz, šis skaitlis 21. gadsimtā arvien pieaug un pieaug arī ledus zudums no Antarktikas ledus vairogiem. Kopumā kriosfēra (ledus visās Zemes sfērās) nodrošina gandrīz pusi pēdējos gadu desmitos novērotā globālā jūras līmeņa kāpuma. Pārējo galvenokārt ietekmē okeānu termālā ekspansija (izplešanās), jo, ūdens temperatūrai paaugstinoties, palielinās ūdens tilpums. 20. gadsimtā kopumā globālais jūras līmenis ir paaugstinājies par aptuveni 20 cm.

Izmaiņas, kas mūsdienās norisinās Grenlandes ledus vairogā un ietekmē tā masas zudumu, ir dažādas: ledus kušana, ledus biezuma samazināšanās, ledus plūšana un ātruma izmaiņas, ledāju atkāpšanās, ledus virskārtas aptumšošanās. Ledus kušana galvenokārt norisinās ledus vairoga virsmā, un atšķirībā no Antarktikas ledus visā Grenlandes ledus vairoga virsmā var sasniegt kušanas temperatūru. Pirmo reizi šāda kušana tika novērota 2012. gada jūlijā, kad kusa visa ledus vairoga virsma, un tas nebija noticis nekad iepriekš novērojumu vēsturē.

Kušanas ūdeņi no ledus vairoga virsmas tiešā veidā lielākoties nenoplūst, bet krājas virsledāja ezeros un aizplūst ar virsledāja ūdens straumēm, līdz ietek ūdensrijējos. Pa tiem ledājūdeņi var sasniegt ledus vairoga gultni un paātrināt ledus plūsmas ātrumu. Ledāja priekšā ledājūdeņi noplūst pa iekšledāja un zemledāja tuneļiem. Ātrāka ledus plūsma, ko ietekmē gan ledājūdeņu pieejamība ledāja gultnē, gan citi faktori, veicina arī ledus biezuma samazināšanos. Jo ātrāk ledus plūst, jo lielāks ledus apjoms nonāk arī okeānā, kur tas atšķēļas kalvinga procesā. Aisbergu atšķēļšanās savukārt veicina ledāja malas atkāpšanos.

Ledum kūstot no virskārtas, izmainās sniega un ledus kristālu forma, kā arī virskārtā koncentrējas ledū iesalušās putekļu daļiņas. Tās lielākoties ir minerālas izcelsmes, bet nelielu daļu veido arī organiskās daļiņas un pat mikroorganismi. Aizvien vairāk Grenlandes ledus vairoga rietumdaļā ledus virskārtā atsedzas izdedžu un kvēpu daļiņas, kas tur nonākušas gan no Ziemeļamerikas mežu ugunsgrēkiem, gan no visā pasaulē plaši izmantoto ogļūdeņražu (nafta, ogles) sadedzināšanas. Tādējādi Grenlandes ledus vairoga virsma pēdējos divos gadu desmitos ir kļuvusi tumšāka.

Rietumgrenlandē ledus vairoga ablācijas zonā atrodas tumšāka ledus josla, kur vērojama izteiktākā ledus virsmas albedo samazināšanās. Ledus tumšo krāsu rada kriokonīts (*cryoconite*), ko veido putekļveida minerālās un organiskās daļiņas. Terminu kriokonīts pirmo reizi lietoja zviedru polārpētnieks Ādolfs Ēriks Nordenšelds (*Adolf Erik Nordenskiöld*) jau 1870. gadā, veicot pētījumus Grenlandē. Kriokonīts koncentrējas kriokonīta bedrītēs ledāju virsmā (73. att.). Šīs bedrītes veidojas, jo kriokonīta izvietojums ledus virsmā nav vienmērīgs. Tur, kur tā koncentrācija ir lielāka, palielinās absorbētās Saules radiācijas daudzums un daļiņas iekūst ledū, uzkrājoties bedrītes dibenā. Kriokonīta bedrītes ir sastopamas gandrīz



73. att. Kriokonīta bedrīte ledāja virsmā Grenlandē. Redzami arī ledāja ledū ieslēgtie gaisa burbulīši. Foto: K. Lamsters, 2016.

visos pasaules ledājos, tostarp Arktikā un Antarktīkā. Grāmatas autors ir novērojis bedrītes visos apmeklētajos ledājos Islandē, Grenlandē, Svalbārā un Antarktīkā. Tā kā šajās bedrītēs koncentrējas minerālās un organiskās daļiņas, no tām vairākās ekspedīcijās ievākti paraugi, kuros analizēta gan mikroorganismu, gan izdedžu daļiņu daudzveidība un izcelsme, kā arī piesārņojums.

Kriokonīta bedrītes ir atsevišķas ekosistēmas ar plašu mikroorganismu daudzveidību, jo tajās ir piemērota vide, piemēram, zaļajģēm un ciānbaktērijām. Kušanas sezonā sniegs un ledus aizvien vairāk iekrāsojas sarkanīgos un zaļganos toņos, ko rada aļģu savairošanās uz ledus un sniega. Aļģes sastopamas ne tikai Grenlandē, bet arī Antarktīkas perifērijā, kur īpaši krāsaini ir salu ledus kupoli pie Antarktīdas pussalas, ar izteikti sarkanām augstākajām daļām (74. att.), savukārt piekāje, kur barības vielas nodrošina roņu ekskrementi, bieži iekrāsojas dzeltenīgi zaļgana (75. att.). Aļģes fotosintēzes procesā rada organiskās vielas heterotrofajiem organismiem, piemēram, gauskājiem, kolembolām, ledus tārpiem un virpotājiem. Minētie procesi aptumšo ledus



74. att. Ar alģēm pārklāta
Barhana salas ledus kupola
virsmā Antarktikā. Foto:
K. Lamsters, 2018.



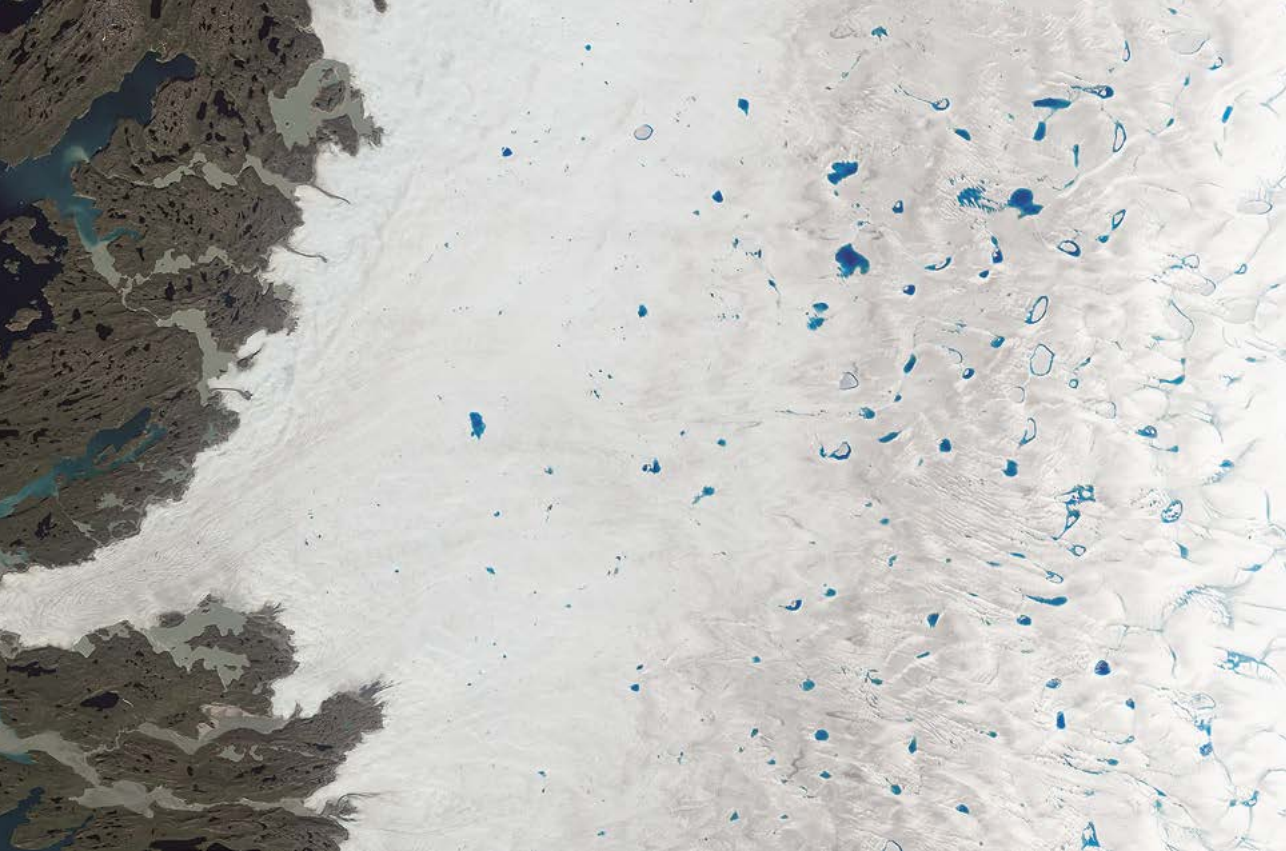
75. att. Ar alģēm pārklāta
Būta salas ledāja
virsa Antarktikā. Foto:
K. Lamsters, 2018.



76. att. Grenlandes ledus vairoga virsmas augstuma pazemināšanās no 2003.–2009. gada līdz 2018. gadam pēc *ICESat* un *ICESat-2* satelītu lāzera altimetru mērījumiem. Sarkanā krāsā ir apgabali, kur virsma pazeminās, savukārt zilajos apgabalos notiek ledus akumulācija. Krāsu skala no –1 m (sarkans) līdz 1 m (zils) gadā. Avots: *K. Elkins* (USRA), GSFC SVS.

virsmu, tādēļ samazinās tās albedo. Tādējādi ledus absorbē vēl vairāk Saules radiācijas, kas pastiprina ledus kušanu. Savukārt virsmas albedo samazināšanās ietekmē atgriezenisku reakciju – gaisa temperatūras straujāku paaugstināšanos, kas ir īpaši raksturīga arktiskajiem apgabaliem. Samazinoties platībām, ko klāj ledus vai sniegs, samazinās arī šo teritoriju albedo (tīrs sniegs atstaro gandrīz visu Saules radiāciju pretēji tumšai iezū un nogulumu virskārtai), palielinot akumulēto Saules radiāciju.

Aizvien pieaugošā ledus aizplūšana no Grenlandes ledus vairoga ir galvenokārt saistīta ar ledus zudumu no ledāju frontes (priekšējās malas), kas atkāpjas arvien ātrāk. Lielākais ledus masas zudums ir reģistrēts 2017. un 2018. gadā, sasniedzot 500 miljardus tonnu (King et al., 2020). Daudzi Grenlandes lielākie ledāji 21. gadsimtā ir sākuši strauji atkāpties, lai gan pirms tam to masas bilance ir bijusi tuvu neitrālai. Dažādos ledus vairoga reģionos novērotās izmaiņas ir atšķirīgas un ir arī ledāji, kuru atkāpšanās ātrums ir samazinājies, tomēr kopumā ikkatrā reģionā ledus zudums ir palielinājies par 4–5% uz katru kilometru no vidējā atkāpšanās ātruma. Satelītu dati liecina, ka arī Grenlandes ledus vairoga virsmas augstums pēdējos gadu desmitos samazinās, dažviet sasniedzot pat vairākus metrus gadā (76. att.).



Grenlandes ledus vairoga masas bilance, kas aprēķināta, izmantojot GRACE satelītu gravitācijas mērījumus 2003.–2016. gada periodam, norāda uz ledus masas zudumu 255 ± 15 gigatonnas gadā. Šie rādītāji sakrīt arī ar citu avotu datiem (piemēram, ar ledus virsmas pazemināšanās mērījumiem). Salīdzinājumam, 1993.–2003. gadā ledus masas zudums bija tikai 83 ± 63 gigatonnas gadā (Mottram et al., 2019).

Grenlandes ledus vairoga īpatnība ir liels daudzums virsledāja ezeru, kas veidojas ablācijas zonā katru kušanas sezonu (77. att.). Virsledāja ezeri ir sekli, un to diametrs parasti ir no 100 līdz 1000 metriem. Lielākā daļa ezeru kušanas sezonas beigās noplūst un īslaicīgi paātrina ledus plūsmas ātrumu. Lielākais ūdens apjoms, kāds ir noplūdis no virsledāja ezera, ir gandrīz 100 miljoni kubikmetru, sasniedzot vismaz 16 miljonus kubikmetru dienā. Lai virsledāja ezers noplūstu, nemaz nav nepieciešams ūdenssriņķis. Ir pierādīts, ka ezeru ūdens radītais spiediens ir

77. att. Virsledāja ezeri Grenlandes ledus vairoga rietumu daļā. Redzamās virsmas platums ir 100 km. Avots: NASA Earth Observatory, Landsat-8 satelītattēls, 2015. gada 15. jūlijs.

pietiekams, lai izraisītu hidroplaisāšanu – esošo plaisu strauju padziļināšanos, kas novada ūdeni līdz pat ledāja gultnei, izveidojot ūdensrijēju ledus plaisā. Vairums virsledāja ezera ūdens var tikt novadīts pat tikai dažu stundu laikā. Tas izraisa ledustrīces, ledus plūsmas ātruma palielināšanos un ledus virsmas paaugstināšanos, ūdenim uzkrājoties zem ledus. Nedaudz vēlāk ledus virsma atkal pazeminās, jo ūdens aizplūst ledus vairoga malas virzienā.

Virsledāja ezeru noplūšana un tam sekojošais ledus plūsmas ātruma pieaugums ir raisījis dažādas spekulācijas par globālo klimata pārmaiņu ietekmi. Būtiskākais jautājums ir, vai virsledāja kušanas ūdens un virsledāja ezeru daudzuma pieaugums izraisīs ledus plūsmas ātruma pieaugumu gada griezumā. Pētījumi liecina, ka korelācija starp gada vidējo ledus plūsmas ātrumu un ablāciju nepastāv. Respektīvi, ledus vairoga virsmas kušanas palielināšanās, kas izraisa ievērojama ūdens apjoma uzkrāšanos virsledāja ezeros un vēlāku to noplūšanu, ledus vairoga plūsmas ātrumu kopumā nepalielina. Tas ir izskaidrojams ar to, ka liela ūdens apjoma noplūšana zem ledus vairoga izraisa ledāja tuneļu paplašināšanos. Tātad zemledāja noteces sistēma kopumā kļūst vēl efektīvāka, lai varētu novadīt pieplūstošos ledājūdeņus. Tā rezultātā ledāja un gultnes sasaiste pieaug, jo ūdens no ledāja gultnes tiecas koncentrēties šajos paplašinātajos ledāja tuneļos. Izteiktāka ledāja un gultnes sasaiste samazina bazālās slīdēšanas iespējamību un samazina ledus plūsmas ātrumu.

Pēdējos desmit gados novērots, ka virsledāja ezeri veidojas arvien augstāk uz ledus vairoga. Tas, protams, liecina, ka ledus virsmas kušana skar aizvien lielāku ledus vairoga platību. Tomēr to virsledāja ezeru noplūšana, kuri atrodas tuvu 2 km virs jūras līmeņa, ir mazticama, jo šādā augstumā uz ledus vairoga neveidojas plaisas, kas varētu iniciēt ezeru noplūšanu. Ledus vairoga virsma tādā augstumā ir salīdzinoši plakana un plūsmas ātrums lēns. Tātad, visticamāk, šie virsledāja ezeri nenoplūdīs zem ledus, bet gan ziemā atkal sasals.

ANTARKTIKA

Antarktika ir viens no diviem Zemes polārajiem reģioniem (78. att.). Tā pretēji Arktikai atrodas Zemes dienvidu puslodē un ietver Antarktīdas kontinentu, šelfa ledājus, ūdeņus un salas Dienvidu okeānā, kas atrodas uz dienvidiem no antarktiskās konverģences zonas. Antarktiskā konverģence jeb antarktiskā polārā fronte ir josla, kas pilnībā aptver Antarktīdas kontinentu un iezīmē robežu starp aukstajiem uz ziemeļiem plūstošajiem antarktiskajiem ūdeņiem un relatīvi siltākiem subantarktiskajiem ūdeņiem. Būtībā antarktisko konverģenci var uzskatīt par 32–48 km platu zonu, kuras ģeogrāfiskais novietojums sezonāli mainās starp 48 un 61 dienvidu



paralēli. Šai zonai ir raksturīgs pēkšņs jūras ūdens temperatūras samazinājums ziemeļu–dienvidu virzienā par gandrīz trīs grādiem pēc Celsija. Antarktiskā konverģence uzskatāma par dabisku Dienvidu okeāna robežu, un šajā zonā aukstās un blīvās antarktiskās ūdens masas iegrimst zem siltākiem, no ziemeļiem plūstošiem ūdeņiem. Konverģences zonā notiek ūdens sajaukšanās un apvelings, tādējādi tur veidojas ūdens masas ar ļoti augstu jūras organismu produktivitāti, un šajā zonā īpaši liela ir Antarktiskā krila (*Euphausia superba*) biomasa.

Oficiāli nozīmīga Antarktikas robeža ir 60 dienvidu paralēle. Visa teritorija uz dienvidiem no tās ir iekļauta Antarktikas Līgumā, kas regulē starptautiskās attiecības Antarktikā (šī teritorija brīvi izmantojama zinātniskiem mērķiem, un tajā aizliegtas militārās aktivitātes). Zīmīga dabiska robeža ir dienvidu polārais

78. att. Antarktīdas karte. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot NASA MODIS satelītattēlu kompozīciju.

loks jeb antarktiskais loks, kurš atrodas $66^{\circ}33'48''$ uz dienvidiem no ekvatora. Dienvidu polārā loka novietojums ir mainīgs, un šobrīd tas pārvietojas dienvidu virzienā par aptuveni 15 m katru gadu. Tā novietojumu galvenokārt ietekmē Zemes rotācijas ass slīpums (leņķis starp Zemes rotācijas asi un perpendikulu pret orbītas plakni), kurš patlaban ir aptuveni $23^{\circ}26'11,7''$. Rotācijas ass slīpums mainās nedaudz vairāk nekā divu grādu robežās no $22,1^{\circ}$ līdz $24,5^{\circ}$, galvenokārt Mēness gravitācijas spēkiem mijiedarbojoties ar Zemi. Zemes rotācijas ass slīpums ir iemesls gadalaiku maiņai uz Zemes, un ilglaicīgā kontekstā tas ir viens no cēloņiem, kas rada globālas klimata pārmaiņas un apledojumus.

Dienvidu polārais loks astronomiski iezīmē robežu, kur dienvidu puslodes vasaras solstīcijas jeb saulgriežu laikā (21. vai 22. decembrī dienvidu puslodē un 21. vai 22. jūnijā ziemeļu puslodē) Saule atrodas virs horizonta divdesmit četras stundas. Var teikt arī, ka dienvidu polārais loks apzīmē ziemeļu robežu, līdz kurai vismaz vienu dienu gadā Saule nenoriet. Nepārtrauktas polārās nakts vai dienas ilgums palielinās no vienas dienas pie dienvidu polārā loka līdz pat sešiem mēnešiem Dienvidpolā. Saulgriežu laikā uz Zemes ir attiecīgi visīsākā nakts un garākā diena vai otrādi, un šis moments iezīmē astronomiskās ziemas vai vasaras sākumu.

Antarktīdas kontinents pilnībā neatrodas dienvidu polārā loka robežās, tas šķērso to, piemēram, Antarktīdas pussalā. Pirmo reizi vēsturē šo polāro loku šķērsoja kapteinis Džeimss Kuks 1773. gada 17. janvārī.

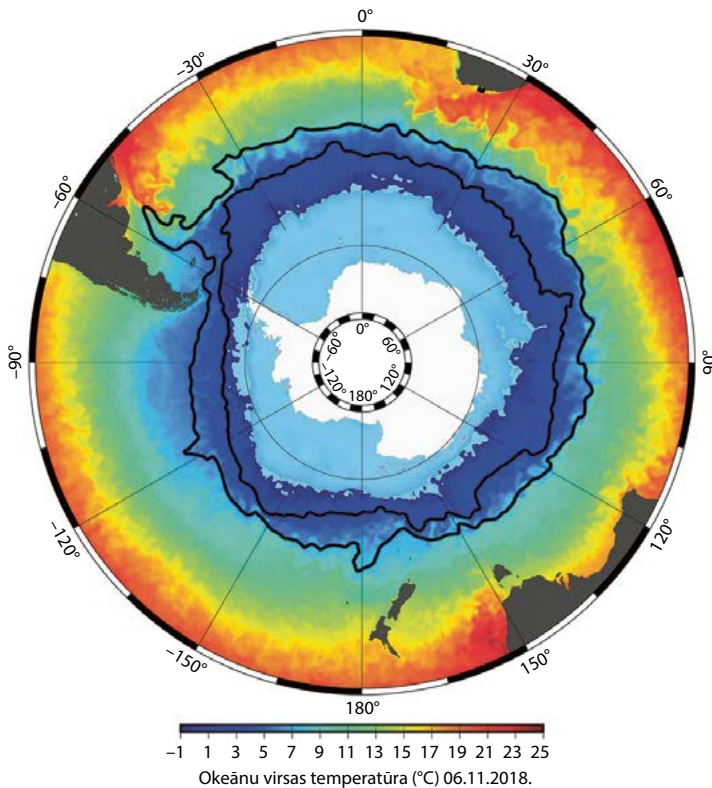
Antarktīdas kontinents aizņem 14,2 miljonus kvadrātkilometru lielu platību, un tas ir gandrīz divreiz lielāks par Austrāliju. Sākotnēji iedomātais dienvidu kontinents tika dēvēts par *Terra Australis*, kas latīņu valodā nozīmē – dienvidu zeme. 98% no Antarktīdas klāj ledus, kura vidējais biezums ir aptuveni 2 km, savukārt maksimālais zināmais biezums sasniedz 4897 m. Antarktīda uzskatāma par aukstāko, sausāko un vējaināko kontinentu. Zemākā nomērītā gaisa temperatūra Antarktīdā ir sasniegusi $-89,2^{\circ}\text{C}$, savukārt ar satelītu sensoriem reģistrēti pat $-94,7^{\circ}\text{C}$.

Lai gan Antarktīdu gandrīz pilnībā klāj ledus, kurš veidojies galvenokārt no atmosfēras nokrišņiem, šis kontinents ir polārais tuksnesis. Vidējais nokrišņu daudzums visā Antarktīdā ir tikai 195 mm gadā, turklāt lielākā daļa nokrišņu izkrīt piekrastes reģionos. Antarktīdas sausajās ielejās nokrišņu nav bijis miljoniem gadu, un tur atrodas divi no pasaules sālākajiem ezeriem – Dona Huana dīķis un Vandas ezers. Sāls koncentrācija šajos ezeros vairāk nekā desmit reižu pārsniedz jūras ūdens sāļumu, tādēļ tie uzskatāmi par hipersāļiem ezeriem. Dona Huana dīķis gandrīz nekad neaizsalst, pat mīnus 50 grādu temperatūrā. Vandas ezerā ieplūst garākā Antarktīdas upe – Oniksa, kuras garums tikai nedaudz pārsniedz 30 km.

Kopējā Antarktīkas apledojuma vēsture sniedzas vismaz 34 miljonu gadu pagātnē, un tas sakrīt ar eocēna–oligocēna robežlaikā (33,9 milj. gadu) notikušo sugu

masveida izmiršanas epizodi, kas bija saistīta ar klimata pārmaiņām, ko veicināja meteorītu triecieni un pastiprināts vulkānisms. Vēlāk nozīmīga Antarktikas ledāju atkāpšanās saistīta ar miocēna klimatisko optimumu pirms 16,8–14,7 miljoniem gadu, pēc kura Zemes klimats kļuva ievērojami aukstāks, un pirms 14 miljoniem gadu Antarktikas ledus vairogs piedzīvoja strauju izplešanos. Kopš tā laika Antarktikas ledus vairogs pilnībā nokūsis nav nekad.

Pretēji Arktikas reģionam, kuru veido arī Ziemeļamerikas un Eirāzijas kontinenta ziemeļu daļas, Antarktika ir reģions, ko no visām pusēm norobežo Dienvidu okeāns. Tādējādi spēcīgie vēji un straumes okeānā pārvietojas rietumu–austrumu jeb pulksteņrādītāju virzienā visapkārt Antarktīdai, radot Antarktikas cirkumpolāro jeb Rietumvēju straumi, kas neļauj siltākiem okeāna ūdeņiem nokļūt tuvāk Antarktīdai (79. att.). Šī atmosfēras un okeāna cirkulācijas zonālā efekta dēļ Zemes dienvidu puslodē vidējos platumu grādos pola virzienā pārvietojas niecīgs enerģijas daudzums, pretēji Ziemeļu puslodei. Tāpēc Antarktika ir aukstāka un sausāka par Arktiku.

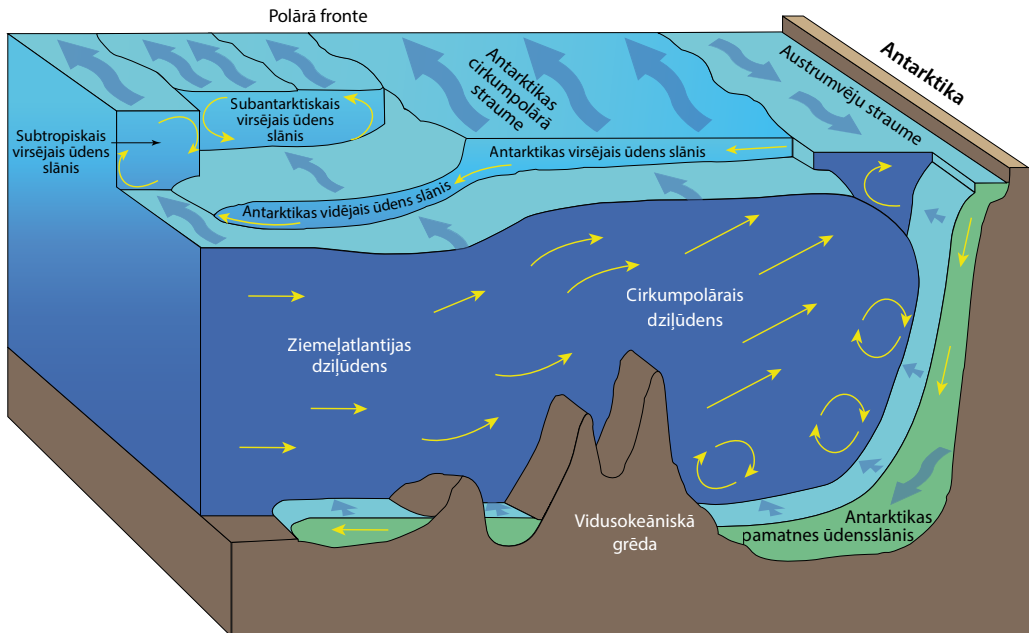


79. att. Okeānu virsas temperatūras karte, kas izveidota pēc satelītu sensoru mērījumiem. Ar gaiši zilo krāsu attēlots jūras ledus. Divas melnās līnijas norāda Antarktikas cirkumpolārās straumes ziemeļu un dienvidu frontes ilgtermiņa novietojumu. Avots: *The Conversation* (H. Phillips, B. Legresy, N. Bindoff).

Antarktiskas cirkumpolārā straume ir lielākā okeāna straume pasaulē. Būtībā tā neļauj siltākiem okeāna ūdeņiem nokļūt līdz Antarktikai. Straumes izveidošanās ir saistīta ar paleogēna perioda eocēna epochas (pirms 56–33,9 milj. gadu) beigām un oligocēna epochas (pirms 33,9–23 milj. gadu) sākumu, kad radās Tasmanijas jūrasceļš starp Austrumantarktīdu un Austrāliju un Dreika jūras šaurums starp Rietumantarktīdu un Dienvidameriku. Gar Antarktiskas cirkumpolārās straumes ziemeļu robežu izveidojusies antarktiskās konvergences zona, kas iezīmē Dienvidu okeāna ziemeļu robežu. Protams, šī okeāna virsmas straume ir tikai daļa no okeānu cirkulācijas. Dienvidu okeāna ūdeņi dažādā dziļumā pārvietojas atšķirīgos virzienos, veidojot ļoti komplicētu okeāna cirkulāciju (80. att.), kas ir cieši saistīta ar Pasaules okeāna cirkulāciju.

Globālā klimata procesos būtiska nozīme ir tieši okeānu termohalīnajai cirkulācijai, īpaši Atlantijas meridionālajai cirkulācijai, kura izveidojas un izzūd saistībā ar leduslaikmetiem un starpleduslaikmetiem uz Zemes. Šī cirkulācija veidojas ūdens blīvuma gradienta dēļ, ko rada ūdens temperatūras un sāļuma atšķirības. Galvenais cirkulācijas virzītājspēks ir Ziemeļatlantijas un Antarktiskas dziļūdens. Ziemeļatlantijas dziļūdens veidojas, Golfa straumes ūdeņiem nokļūstot Atlantijas okeāna ziemeļos, kur tie atdziest un nogrimst okeāna gultnē. Tālāk šie aukstie un blīvie ūdeņi pārvietojas dienvidu virzienā, un liela daļa nokļūst līdz pat Dienvidu okeānam un paceļas augšup. Savukārt Antarktiskā veidojas visblīvākais okeāna ūdens, kurš plūst pat zem Atlantijas dziļūdens. Šie ūdeņi veidojas Vedela un Rosa jūrā. Vedela jūras dziļūdens piepilda Atlantijas un Indijas okeāna gultni, savukārt Rosa jūras dziļūdens plūst Klusā okeāna virzienā. Šī blīvā Antarktiskas pamatnes ūdens slāņa veidošanos veicina spēcīgie katabatiskie vēji, kas pūš no Antarktīdas ledus vairogiem uz to malām. Vēji izraisa jūras ledus pārvietošanos prom no kontinenta un atsedz atvērtus auksta ūdens laukumus, kurus dēvē par polinjām. Tur veidojas jauns jūras ledus, un tā rašanās procesā jūras ūdens virsējā daļā palielinās sāls daudzums, kas savukārt būtiski palielina ūdens blīvumu. Blīvais un aukstais ūdens nogrimst okeāna gultnē un sāk plūst lejup pa Antarktīdas kontinentālo nogāzi, ietekmējot visu Pasaules okeāna ūdens kustību.

Jūras ledus platība Antarktiskā var mainīties no 18 miljoniem kvadrātkilometru septembrī līdz tikai 2 miljoniem kvadrātkilometru februārī, un tās ir daudz lielākas fluktuācijas nekā jūras ledum Arktiskā. Pretēji Arktikai, kur jūras ledus platība pēdējos gadu desmitos ir samazinājusies par vairāk nekā 4% desmit gados, Antarktiskas jūras ledus platība ir pieaugusi vismaz kopš 1979. gada, kad kļuva pieejami dati no satelītiem. Šo pieaugumu pārtrauca strauja gada vidējās ledus platības samazināšanās kopš 2014. gada, tā krietni pārsniedza jūras ledus samazināšanos Arktiskā. Iespējamie iemesli šim ledus samazinājumam pēc gandrīz 40 gadus ilgā konstantā



pieauguma varētu būt daudzi, bet kopumā tas norāda uz savstarpēji saistītu globālo klimata sistēmu un to, ka Antarktika nav nemaz tik norobežots reģions. Procesi tropos un vidējos platumā grādos okeānos un atmosfērā daudzējādi ietekmē arī Antarktiku.

Vairāki pētījumi liecina, ka Atlantijas okeāna meridionālā cirkulācija pēdējos simtos gadu, iespējams, ir kļuvusi vājāka, lai gan neapstrīdamu pierādījumu tam nav. Ja šis process turpināsies un termohalīnā cirkulācija mazināsies, tam var būt dramatiska ietekme uz klimatu Eiropā un Ziemeļamerikā, tas var kļūt vēsāks. Globālā ietekme būs saistīta ar ekstremālu laikapstākļu un citu dabas katastrofu (vētru, plūdu, ekstremālu gaisa temperatūru) intensitātes palielināšanos, biežākas būs El Niño parādības. Pasaules okeāna ekosistēmu būtiski ietekmētu skābekļa daudzuma samazināšanās okeānā (termohalīnās cirkulācijas rezultātā okeānu dziļākie ūdens slāņi tiek apgādāti ar skābekli, un šajā procesā būtiska loma ir Antarktiskajiem dziļūdeņiem, kas savā ziņā nodrošina okeānu “ventilāciju”).

Ļoti nozīmīga Pasaules okeāna funkcija, kas ietekmē globālo klimatu, ir siltuma uzkrāšana. Piemēram, Pasaules okeāns

80 att. Dienvidu okeāna ūdens cirkulācija. Okeāna gultnes lejasdaļā atrodas Antarktiskais pamatnes ūdens slānis, virs tā ir Ziemeļatlantijas un cirkumpolārais dziļūdens. Virspusē atrodas spēcīgā Antarktiskā cirkumpolārā straume, kuru ziemeļos no subantarktiskā un subtropiskā virsējā ūdens slāņa norobežo polārā fronte. Daļa no Antarktiskajiem aukstajiem ūdeņiem okeāna virsējā slānī pārvietojas austrumu virzienā, savukārt cita daļa – ziemeļu virzienā. Sagatavojis K. Lamsters pēc *Wikimedia Commons* (F. Oyster).

akumulē lielāko daļu siltuma enerģijas, kas rodas antropogēnas izcelsmes siltumnīcefekta gāzu emisijas dēļ (siltumnīcefekta gāzes absorbē un reemitē infrasarkanā starojumā). Trīs ceturtdaļas siltuma absorbē tieši Dienvidu okeāns, un lielu daļu no tā – Vedela jūra Antarktīkā. Kādās okeāna dziļumos un kādā daudzumā šis siltuma daudzums tiek akumulēts, ir būtisks jautājums, un vislielākās neskaidrības ir par šiem procesiem polārajos un subpolārajos apgabalos. Kādā 2020. gada pētījumā tika apkopoti ūdens temperatūras mērījumi Vedela jūrā kopš 1989. gada (Strass et al., 2020). Tika atklāts, ka dziļumā virs 700 m notiek plaša ilgtermiņa okeāna ūdens sasilšana, turklāt sasilšanas ātrums dziļumā virs 2000 m piecas reizes pārsniedz okeāna vidējo sasilšanas ātrumu. Šis atklājums norāda uz būtiskām Vedela jūras ūdens temperatūras pārmaiņām, kas var ietekmēt globālo okeānu ūdens cirkulāciju, jo tieši Vedela jūrā veidojas blīvākie un aukstākie dziļūdeņi, kas aizpilda pasaules okeānu pamatnes. Šiem ūdeņiem sasilstot, var palēnināties arī pārējā okeānu ūdens cirkulācija.

Kopumā Antarktīkā tiek nodalīti trīs ledus vairogi – Austrumantarktīkas ledus vairogs, Rietumantarktīkas ledus vairogs un Antarktīdas pussalas ledus vairogs. Austrumantarktīkas un Rietumantarktīkas ledus vairogus atdala Transantarktīdas kalnu grēda, kas stiepjas pāri visam kontinentam no Vedela līdz Rosa jūrai. Cita izteiksmīga kalnu grēda aizņem Antarktīdas pussalas lielāko daļu. Šī pussala atrodas Antarktīdas ziemeļdaļā, un to no Dienvidamerikas atdala Dreika jūras šaurums. Antarktīdas pussala ir vidēji tikai 70 km plata, 1300 km gara un ļoti kalnaina, vidējais pussalas augstums ir 1,5 km virs jūras līmeņa. Tiek uzskatīts, ka tajā esošās kalnu grēdas ir Dienvidamerikas Andu turpinājums. Augstākie kalni pārsniedz 3 km augstumu. Iespaidīgākās virsotnes nereti atrodas pussalas sānu daļās, tāds ir, piemēram, 1465 m augstais Šekltona kalns (81. att.).

Antarktīdas pussalas ledus vairogs ir vismazākais un jutīgākais pret klimata pārmaiņām. Kopš 20. gadsimta vidus Antarktīdas pussalas temperatūra vietām, piemēram, Vernadska polārstacijas apkārtnē, ir paaugstinājusies par 2,5 °C (Turner et al., 2005). Tomēr jāņem vērā, ka šis reģions nereprezentē visu Antarktīdu. Citās polārstacijās, piemēram, Amundsenskota-Sautpola polārstacijā Dienvidpolā, gaisa temperatūra ir kļuvusi zemāka, bet daudzviet gadu no gada ir raksturīgas temperatūras fluktuācijas. Temperatūras paaugstināšanās dēļ vairāki Antarktīdas pussalas ledāji ir izzuduši. Galvenokārt šādas katastrofiskas izmaiņas ir piemēklējušas šelfa ledājus. To lielākā daļa atrodas uz ūdens, tādējādi tie krasi reaģē gan uz okeāna ūdens, gan gaisa temperatūras paaugstināšanos. Larsena B šelfa ledājs (ar lielajiem burtiem tiek apzīmēts noteikts Larsena šelfa ledāja apgabals) gandrīz pilnībā dezintegrējās 2002. gadā, un tas notika tikai nedaudz vairāk nekā viena mēneša laikā. Sākotnēji (82. att.) uz ledāja virsmas varēja novērot daudzus virsledāja ezerus. Pēc

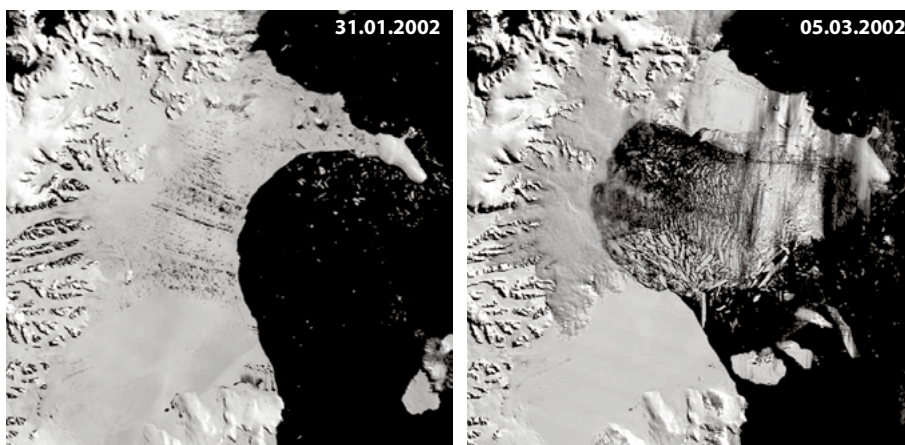


neilga laika liela daļa no tiem izzuda, tiem noplūstot pa šelfa ledāja plaisām. Ezeru noplūšana sekmēja esošo plaisu padziļināšanos, tādējādi šelfa ledājs sadalījās neskaitāmos aisbergos.

No Antarkīdas pussalas ledus vairoga izplūst daudzi izvadledāji, un piekrastē bieži atrodas vai nu šo izvadledāju uzpeldējušās mēles, vai arī šelfa ledāji. Ja Antarkīdas pussalas ledus vairogs nokustu pilnībā, Pasaules okeāna ūdens līmenis paaugstinātos par 0,2 m. Salīdzinājumam, Austrumantarktikas ledus vairogā esošais ūdens ekvivalents ir 53 m un Rietumantarktikas ledus vairogā – gandrīz 5 m.

Lielākoties Antarkīdas pussalas izvadledāji ir tik plaisaini (83. att.), ka pa tiem pārvietoties ir praktiski neiespējami. To var tikai ziemā, kad lielāko daļu plaisu sedz bieza sniega kārta, tomēr arī ziemā iekrišana plaisās ir pastāvīgs drauds, ar ko itin bieži saskārās pirmie Antarkīdas pētnieki, kas pārvietojās suņū kamanās.

81. att. Šekltona kalns
Griema Zemes rietumdaļā
Antarkīdā. Foto:
K. Lamsters, 2018.



82. att. Larsena B šelfa ledāja izmaiņas. MODIS sensora attēli no *NASA Terra* satelīta. Avots: NSIDC.

Gar Antarktīdas pussalu ir izkļiedētas salas, no tām lielākā visā Antarktīkā ir Aleksandra I sala. Tā atrodas Belinshauzena jūrā, pie Antarktīdas pussalas dienvidrietumu daļas. Šo un citas uz dienvidiem esošās salas ar Antarktīdas pussalu savieno šelfa ledāji. Salas pārsvarā pārklāj ledus kupoli (84. att.). Ir bijuši gadījumi, kad, ledus kupolam samazinoties, atklājas, ka daļa no tā ir atradusies uz atsevišķas nelielas salas. Piemēram, tika uzskatīts, ka ASV piederošās Pālmera polārstacijas senākā daļa atrodas uz Anvera salas, taču 2004. gadā, kad ledājs atkāpās, izrādījās, ka polārstacija uzbūvēta uz citas salas, un to nosauca par Amslera salu. Pālmera polārstacija ir no trim amerikāņu polārstacijām vienīgā, kas atrodas ziemeļos no polārā loka (pārējās divas ir lielākā polārstacija Antarktīdā – Makmerdo un vistālāk uz dienvidiem esošā – Amundsenskota-Sautpola), un to cauru gadu, izņemot dažus ziemas mēnešus, apkalpo ledlauzis *Laurence M. Gould*. Ar šo ledlauzi no netālu esošās Vernadska polārstacijas uz Dienvidameriku devās arī šīs grāmatas autors 2018. gada latviešu antarktiskās ekspedīcijas sastāvā.

Kopumā Antarktīkas ledus vairogi aizņem 13,9 miljonus kvadrātkilometru lielu platību (iekļaujot šelfa ledājus) un satur ledus daudzumu ar aptuveno tilpumu 27 miljoni kubikkilometru. Šādi dati iegūti no *Bedmap2* datubāzes, kurā apkopota pieejamā informācija par Antarktīkas virsmas augstumu, ledus biezumu un zemledāja reljefu. Datubāze publicēta žurnālā “The Cryosphere”



2013. gadā (Fretwel et al., 2013). 85% visas ledus masas atrodas Austrumantarktikas ledus vairogā. 40% no Antarktikas ledus vairogu pamatnes atrodas zem jūras līmeņa (85. att.), no tiem divas trešdaļas ir Austrumantarktīdas ledus vairoga daļa. Zemākā vieta ir vismaz 2870 m zem jūras līmeņa. Tādējādi zem Antarktikas ledus vairogiem eksistē daudzi dziļi kanjoni, kurus aizpilda ledāji. Vidēji Antarktīdas sauszemes (bez ledus segas) vidējais augstums ir tikai 83 m. Daļēji tas izskaidrojams ar ledus vairogu milzīgo svaru, zem kura Zemes garoza tiek ieliekta. (Līdzīgs process norisinājās arī Latvijā, kad to pirms 20 000–15 000 gadiem klāja Skandināvijas ledus vairoga nogāze un perifēriālā sega maksimāli gandrīz 1 km biezumā. Pēc ledus nokušanas Zemes garoza sāka celties augšup, un tas joprojām turpinās Latvijas ziemeļu daļā par aptuveni 1–2 mm gadā.)

Rietumantarktikas ledus vairogs ir mazākais, un tā pamatne lielākoties atrodas zem jūras līmeņa. Šī ledus vairoga gultni veido mīksti, lielākoties marīnas jeb jūras izcelsmes nogulumieži. Šie apstākļi rada priekšnoteikumus ledus vairoga nestabilitātei, respektīvi, ātrai reakcijai uz globālām klimata pārmaiņām, kuru rezultātā ledus vairogs strauji zaudē savu masu. Vairāki pētījumi liecina, ka Austrumantarktikas ledus vairogs iepriekšējo starpleds laikmetu laikā (arī patlaban uz Zemes ir starpleds laikmets) ir daudz maz saglabājis savu pašreizējo ledus tilpumu, savukārt

83. att. Viginsa izvadledājs Kijevas pussalā Antarktīdas pussalas rietumdaļā. Foto: K. Lamsters, 2018.

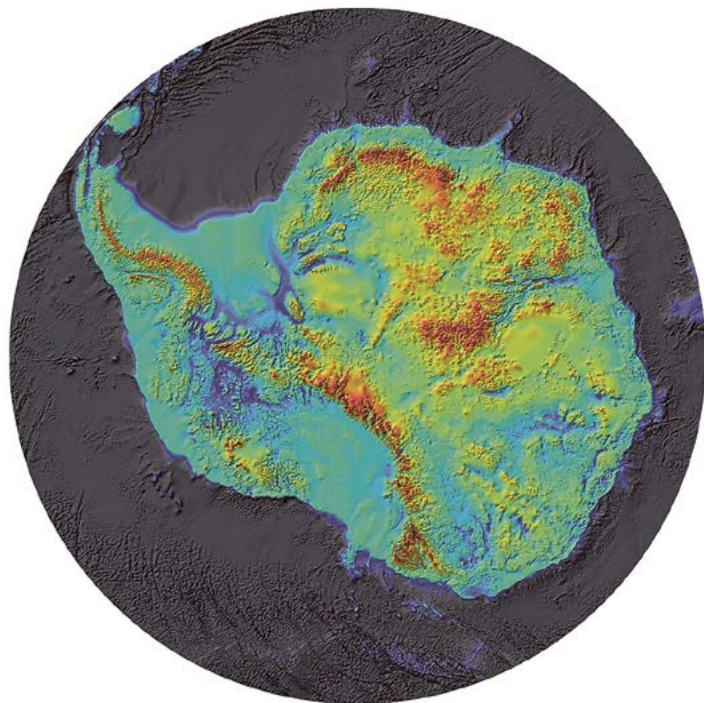
84. att. Ledus kupoli Antarktikā. Priekšplānā skats uz vienu no Barhanu salu ledus kupoliem. Tālumā esošie kalni atrodas uz Būta salas (kreisajā pusē), kuru no Antarktīdas pussalas atdala Lemāra kanāls. Foto: K. Lamsters, 2018.



Rietumantarktikas ledus vairogs visdrīzāk ir zaudējis lielāko daļu ledus masas, iespējams, pat nokusis pilnībā.

Austrumantarktikas ledus vairoga virsma lielākoties ir relatīvi plakana, un to dēvē par Dienvidu Polāro plato vai par Antarkīdas plato. Šī plato lielākos ledus paaugstinājumus mēdz izdalīt arī kā ledus kupolus, un tos sākotnēji apzīmēja ar lielajiem burtiem. Tie ir A (Arga) leduskupols, C (Čārli) ledus kupols un F (Fudži) jeb Valkīras ledus kupols (78. att. 112. lpp.). Augstākais no tiem ir Arga jeb A leduskupols, kurš sniedzas vairāk nekā 4 km augstumā un tiek dēvēts arī par aukstāko reģionu uz Zemes. Mitruma daudzums gaisā tur ir ļoti niecīgs un var būt pat zemāks par 1%. Šis ledus kupols atrodas starp Lemberta ledāja sākumdaļu un Dienvidpolu. Jāatzīmē, ka Lemberta ledājs ir pasaulē lielākā





zināmā ledus lielplūsma, kuras platums ir 40 km, garums pārsniedz 400 km, savukārt ledus biezums sasniedz 2,5 km. Lemberta ledāja nogruntētā ledus daļa aizņem 16% no visa Austrumantarktikas ledus vairoga.

Ieplūstot okeānā, ledājs veido Eimerija šelfa ledāju, kura platība ir tikai nedaudz mazāka par Latviju – 62 620 km². Aiz Rosa un Ronnes–Filhnera šelfa ledājiem tas ir trešais lielākais Antarktīkā. No Eimerija šelfa ledāja 2019. gadā atdalījās viens no lielākajiem un jaunākajiem aisbergiem pasaulē – D-28, tas joprojām atrodas netālu no šelfa ledāja un lēnām pārvietojas ziemeļu virzienā. Šādu aisbergu atrašanās vieta un stāvoklis tiek nepārtraukti novēroti, jo tie var radīt draudus kuģiem. Regulāri problēmas rada arī nelieli aisbergi polārstaciju apkārtnē (86. att.), apdraudot pārvietošanos ar ūdens transportu. Piemēram, reiz kāda jahta, kura bija pietauvojusies šaurā līcī starp Galindesa un Vinterailendas salām pie Vernadska polārstacijas, tika iesprostota, jo ieeju līcī aizsedza aisbergs. Lai atbrīvotu ceļu, Vernadska polārstacijas personāls,

85. att. Antarktikas reljefs bez ledus segas. Krāsu skala mainās no 2,8 km līdz –2,8 km. Visa zilā krāsā attēlotā teritorija atrodas zem jūras līmeņa. Avots: BAS, *Bedmap2* dati (Fretwell et al., 2013).



86. att. Nestabils aisbergs pie Vernadska polārstacijas ostas. Tas uzradās tieši tajā brīdī, kad polārpētniekiem bija aizņemtākās dienas gadā – tika sagaidīts apgādes kuģis. Foto: M. Krievāns, 2018.

izmantojot virves, aizstūma aisbergu projām. Līdzīgi gadījumi ir notikuši, kad, polārpētniekiem atgriežoties polārstacijā uz salas, piekļuvi tai aizsprosto daudzu nelielu aisbergu masa. Šādus aisbergus viegli pārvieto mainīgais polārais vējš, vai arī tie var pēkšņi izveidoties, sadaloties kādam lielākam aisbergam.

Vislielākais līdz šim zināmais aisbergs ir B-15, kurš atdalījās no Rosa šelfa ledāja 2000. gadā. Tā virsmas platība bija 11 000 km², garums – 295 km un platums – 37 km. Vairāku gadu laikā aisbergs sadalījās mazākās daļās, no tām četras bija novērotas pat 2018. gadā, un togad lielākā daļa (B-15Z) tika reģistrēta starp Folklanda un Dienvidzordžijas salām. Tādējādi daļa no B-15 aisberga eksistēja vismaz 18 gadus. Uz sākotnēji lielākās aisberga daļas (B-15A) zinātnieki 2001. gadā novietoja GPS uztvērēju. Līdz ar to šis aisbergs kļuva par pirmo detalizēti monitorēto aisbergu pasaulē. Tas piecus gadus ļāva sekot tā kustībai un ietekmei uz ekosistēmu. 2005. gadā aisbergs sadūrās ar netālu esošā Drigalska uzpeldējušā ledāja mēli un no tās



atlūza astoņus kvadrātkilometrus liela ledus daļa. B-15A aisbergs 2004.–2005. gada sezonā ietekmēja okeāna straumju un vēju kustību, aizkavējot jūras ledus sadalīšanos Makmerdo jūras šaurumā, un radīja šķērslī ikgadējiem apgādes kuģiem trim polārstaacijām. Turklāt aisbergs ievērojami palielināja pieaugušo Adeles pingvīnu ceļu no jūras līdz to mazuļu atrašanās vietai, tādējādi izraisot būtisku šo pingvīnu populācijas samazināšanos, kas savukārt ietekmēja arī roņu un dienvidu polāro klikkaiju populācijas. Šādi lieli aisbergi var būtiski ietekmēt visu jūras ekoloģiju, aizsedzot iepriekš atklāta ūdens platību un samazinot fitoplanktona produktivitāti, kas savukārt ietekmē visu pārējo barības ķēdi.

No šelfa ledājiem atlūzušie milzīgie tabulārie (plakanie) aisbergi (87. att.) ir īpaši nozīmīgi ledus vairoga masas bilancē. Tomēr jāņem vērā – lai gan pastiprināta aisbergu atdalīšanās var būt priekšvēstnesis šelfa ledāja sabrukšanai nākotnē, lielai daļai šelfa ledāju šādu aisbergu veidošanās ir daļa no to dzīves cikla, jo pēc kāda laika ledāju fronte atgriežas iepriekšējā stāvoklī.

Antarktīkas ledus vairogu dinamika un masas bilance ir atšķirīga. Lielākā daļa ledus masas ir koncentrēta Austrumantarktīkas

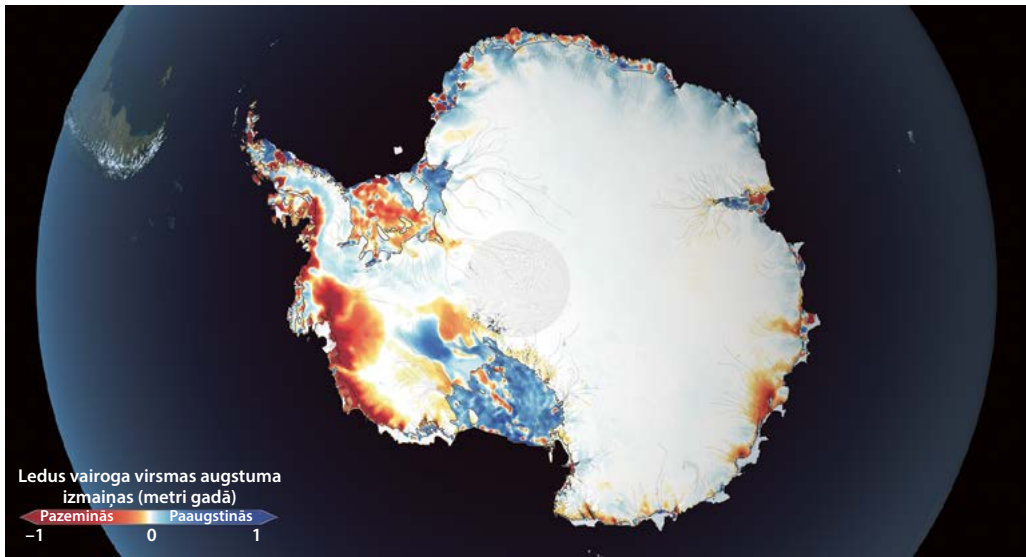
87. att. Milzīgs tabulārais aisbergs pie Antarktīdas pussalas. Foto: K. Lamsters, 2018.

ledus vairogā. Vairums zinātnieku uzskata, ka tas joprojām ir samērā stabils, ar pozitīvu masas bilanci, bet jāņem vērā, ka tā dinamika ir vāji izziņāta un kopējā Antarktīkas ledus vairogu masas bilance ir negatīva. Katru gadu šie ledus vairogi zaudē 100 vai pat vairāk miljardus tonnu ledus. Patlaban vēl vairāk ledus masu zaudē tikai Grenlandes ledus vairogs (no 200 līdz 300 miljardiem tonnu gadā), kuru globālās klimata pārmaiņas līdz šim skārušas vairāk. Lielākie ledus masas zudumi ir saistīti ar Antarktīdas pussalas un Rietumantarktīkas ledus vairogu. Krastu tuvumā, protams, ir daudz mitrāks klimats, un tas atspoguļojas gan palielinātā ledus akumulācijā, gan ablācijā (88. att.). Rietumantarktīkas vairoga krasta daļā akumulācija pārsniedz 1500 kg uz kvadrātmetru gadā, savukārt vislielākā akumulācija novērojama Antarktīdas pussalas rietumos, sasniedzot 3000 kg uz kvadrātmetru gadā. Austrumantarktīkas centrālajā daļā akumulācija nepārsniedz 50 kg uz kvadrātmetru gadā.

Iepriekšējā gadsimta 90. gados kopējā Antarktīkas ledus vairogu masas bilance bija tuva neitrālai, savukārt pēc 2000. gada masas bilance kļuvusi negatīva. Dažādos pētījumos aprēķinātie masas zudumi atšķiras, jo tiek izmantotas dažādas metodes. Viena no izplatītākajām metodēm ir ledus masas izmaiņu aprēķināšana, izmantojot lāzera altimetrijas datus no satelītiem. Šie instrumenti ļauj nomērīt visa ledus vairoga virsmas augstuma izmaiņas (88. att.) un attiecīgi aprēķināt virsmas masas bilanci. Šādus datus sniedza, piemēram, *ICESat* satelīts, kurš darbojās no 2003. līdz 2009. gadam, un tā pēctecis *ICESat-2*, kurš darbojas no 2008. gada.

Problēma šo datu izmantošanā ir apstākļi, ka lielāko daļu Antarktīkas pārklāj sniega un firna (sablīvējies sniegs, kurš, turpinot sablīvēties, var pārveidoties par ledāja ledu) kārtā, kuras detalizēts biežums nav zināms. Turklāt sniega, firna un ledus blīvumi būtiski atšķiras dažādās ledus vairoga vietās un dziļumā. Atkarībā no izmantotajiem algoritmiem aprēķinātā ledus vairoga masas bilance var atšķirties, tādēļ ledus masas bilances noteikšanai ir būtiski izmantot dažādas metodes. Ir jāņem arī vērā, ka, piemēram, ledus vairoga virsmas augstuma pieaugums uzreiz nenozīmē to, ka ir palielinājusies ledus masa. Tas norāda uz sniega akumulāciju, kas var īslaicīgi palielināties. Savukārt, lai no šī sniega Antarktīkā izveidotos ledus, ir jāpaiet vairākiem simtiem vai Antarktīkas centrālajos reģionos pat tūkstošiem gadu. Tādējādi ledus masas pieaugums atsevišķos Antarktīkas reģionos mūsdienās liecina par nokrišņu pieaugumu kādā laika posmā pagātnē. Ledus virsmas pazemināšanās Rietumantarktīkā (88. att.) galvenokārt saistīta ar ledus lielplūsmu kustības ātruma pieaugumu, kas izraisa ledus biezuma samazināšanos.

Alternatīva ledāju masas bilances noteikšanas metode ir to satelītu datu izmantošana, kuri mēra gravitācijas izmaiņas. Piemēram, *GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment – Gravitācijas atjaunošanās un klimata eksperiments)* satelītu dati reģistrējuši aptuveni 100 miljardus tonnu lielu ledus masas zudumu gadā



kopš 2003. gada. Šie dati ir ļoti līdzīgi citu pētnieku datiem, kas arī liecina par ledus masas zudumu tuvu 100 miljardiem tonnu. Turklāt GRACE satelītu gravitācijas misijas laikā iegūtie dati apliecina, ka Antarktīkas ledus vairoga masas zudumi kļūst aizvien lielāki. Publikācijā žurnālā “Nature” 2018. gadā (Shepherd et al., 2018), izmantojot dažādus pieejamos datus, secināts, ka periodā no 1992. līdz 2017. gadam Antarktīkas ledus vairogi kopumā zaudējuši $2,720 \pm 1,390$ miljardus tonnu ledus, kas atbilst jūras līmeņa kāpumam par $7,6 \pm 3,9$ milimetriem. Šajā periodā okeāna ietekmes izraisīta kušana Rietumantarktīkas ledus vairogā palielinājusies no 53 ± 29 līdz 159 ± 26 miljardiem tonnu gadā. Antarktīdas pussalas šelfa ledāju sabrukšana palielinājusi ledus masas zudumus no 7 ± 13 līdz 33 ± 16 miljardiem tonnu gadā. Protams, šiem rezultātiem ir lielas kļūdu robežas, tomēr tie nepārprotami norāda uz aizvien negatīvāku ledus masas bilances tendenci. Vislielākās kļūdas robežas ir Austrumantarktīkas ledus vairoga masas bilances aprēķiniem, jo tajos ir būtiski veikt glacioizostatisko korekciju. Piemēram, ja tiek izmantotas gravitācijas izmaiņas, jāņem vērā, ka, ledus masai samazinoties, arī gravitācija samazinās, bet tā palielinās Zemes garozas vertikālās pacelšanās dēļ, ko attiecīgi izraisa ledus masas zudums. Tā

88. att. Antarktīkas ledus vairogu virsmas augstuma izmaiņas. Mērījumi no ICESat (2003–2009) un ICESat-2 (2018–) satelītiem. Krāsu skala attēlo virsmas pazemināšanos līdz vienam metram (sarkans) un virsmas paaugstināšanos līdz vienam metram (zils). Avots: GSFC SVS.

kā datu par Zemes garozas vertikālajām kustībām zem Austrumantarktikas ledus vairoga ir ļoti maz, rodas atšķirības zinātnieku aprēķinos un tas ievērojami palielina kļūdu robežas. Iepriekš minētajā publikācijā aprēķināts, ka Austrumantarktikas ledus vairoga masas bilance 1992.–2017. gada periodā ir 5 ± 46 miljardi tonnu ledus gadā. Šajā gadījumā kļūda ir daudz lielāka par aprēķināto vērtību, un tas norāda uz joprojām lielo neskaidrību par Austrumantarktikas ledus vairoga masas bilanci. Pat ja tā joprojām ir pozitīva, ir visai iespējams, ka ne vēlāk kā dažu gadu desmitu laikā, vai pat ātrāk, arī šis pasaulē lielākais ledus vairogs sāks ledus masu zaudēt.

Mūsdienās Austrumantarktikas ledus vairoga iekšējos apgabalos virsmas kušana praktiski nenotiek, jo gaisa temperatūra vienmēr ir negatīva. Tur masa tiek zaudēta vienīgi sniega aizpūšanas un tiešas sublimācijas procesā, kad norisinās ledus iztvaikošana. Daļa no ledus Antarktikas ledus vairogu gultnē sasniedz spiedienukušanas punktu, tādējādi notiek bazālā ledus kušana palielināta spiediena dēļ, lai gan ledus temperatūra joprojām ir nedaudz negatīva. Nelieli ledus vairogu gultnes apgabali, īpaši zem Rietumantarktikas ledus vairoga, saņem ģeotermālo siltumu, kas pastiprina ledus bazālo kušanu. Vairums Antarktikas ledus vairogu masas tiek zaudēts ledāju–okeāna mijiedarbības zonā vai nu kalvinga, vai šelfa ledāju bazālās kušanas procesā.

Patlaban tieši šelfa ledāju bazālā kušana ir noteicošais process, kā Antarktika zaudē ledus masu, un to galvenokārt ietekmē siltāka ūdens pieplūde. Šis process ir īpaši izteikts Rietumantarktikas piekrastes ledājos Amundsena un Belinshauzena jūrā. Līdz šim tika uzskatīts, ka Austrumantarktikas šelfa ledāju pamatnes kušana ir niecīga, izņemot Totena (*Totten*) šelfa ledāju, tomēr jaunākajā publikācijā žurnālā “Nature Communications” atklāts, ka vēl lielāks bazālās kušanas ātrums ir Austrumantarktikas Širases (*Shirase*) ledāja mēlei, tas sasniedz 7–16 m gadā (Hirano et al., 2020). Jāpiezīmē, ka ledājs ieplūst okeānā vietā, kur praktiski visu gadu ir jūras ledus. Tādējādi šis pētījums atklāj satraucošu faktu – palielināta ledus bazālā kušana iespējama arī zem aukstākajiem un stabilākajiem šelfa ledājiem (kā līdz šim tika uzskatīts) Antarktīkā. Jāpiebilst gan, ka šelfa ledāji ne tikai kūst no apakšas, ledus zem tiem veidojas arī bazālās piesalšanas procesā, kas galvenokārt notiek nogruntēšanās līnijas tuvumā, kur izplūst auksti ledājūdeņi.

Attiecībā uz potenciālo Austrumantarktikas ledus vairoga stabilitāti nākotnē jaunas raizes ir radījuši vairāki pētījumi, kuros noskaidrots, ka Austrumantarktikas dienvidu daļā esošais Vilksa zemledāja baseins (pazeminājumā) plicocēna (pirms 5,33–2,58 milj. gadu) un pleistocēna epohā (pirms 2,58 milj. – 11,7 tūkst. gadu) ir vairākkārt zaudējis ievērojamu daudzumu ledus masas. Tikai pavisam nesenā pagātnē zinātnieki bija pārliecināti, ka Austrumantarktikas ledus vairogs ir bijis stabils miljoniem gadu. Nesenā pētījumā, kurš tikai 2020. gada vasarā publicēts

žurnālā “Nature” (Blackburn et al., 2020), atklāts, ka Vilksa baseinā ledus vairogs atkāpies sauszemē par 700 km vienā no nesenajiem Holšteinas (Latvijā – Pulvernieku) starpleduslaikmetiem tikai pirms aptuveni 400 000 gadu. Vilksa baseinā atrodas ledus daudzums, kas var paaugstināt jūras līmeni par 3–4 m. Globālā atmosfēras temperatūra Holšteinas starpleduslaikmetā bija tikai par 1–2 grādiem augstāka nekā mūsdienās un oglekļa dioksīda daudzums atmosfērā bija tikai 300 ppm (daļiņas uz miljonu). Mūsdienās oglekļa dioksīda daudzums atmosfērā pārsniedz 400 ppm. Kopumā pirms 400 000 gadiem jūras līmenis varēja būt augstāks līdz pat 13 m nekā mūsdienās (10 m paaugstinājumu izraisīja galvenokārt Grenlandes un Rietumantarktikas ledus vairogu kušana).

Klimata modeļi paredz, ka, klimatam pasaulē un arī Antarktīkā kļūstot siltākam, pieaugs arī nokrišņu daudzums Antarktīkā, un tas izraisīs vairākas sekas. Pirmkārt, palielināsies sniega izkrišana visā kontinentā. Tas palielinās sniega akumulāciju, bet temperatūras paaugstināšanās veicinās gan ledāju virsas kušanas pieaugumu, īpaši Antarktīdas pussalā, gan ledāju dinamiskās izmaiņas, tādas kā palielināts ledus caurplūdums, šelfa ledāju sabrukšana, nogruntēšanās līnijas atkāpšanās un jūrā bāzētu ledus vairogu pieaugoša nestabilitāte, kas savukārt kompensēs pieaugošu nokrišņu daudzuma radīto akumulāciju. Tādējādi, visticamāk, arī turpmāk šajā gadsimtā Antarktikas ledus vairogi zaudēs ledus masu un piedzīvos straujas izmaiņas krasta zonā, ledus plūsmu ātruma pieaugumu un šelfa ledāju sabrukšanu. Detalizētākas prognozes šobrīd gan nav iespējamas.

Antarktikas ledus vairogu drenē ledus lielplūsmas. Tās ir ātri plūstošas ledus masas (koridori), kas pārvietojas ar daudz lielāku ātrumu (vidēji 0,8 km/gadā) nekā apkārtesošais ledus. Ledus lielplūsmu kustības ātrums var sasniegt vairākus kilometrus gadā, savukārt starp tām esošais ledus pārvietojas lēnāk – tikai dažus desmitus vai pat dažus metrus (galvenokārt ledusšķirtņu tuvumā) gadā. Tātad tipiskā lielplūsmā ledus kustības ātrums ir vismaz vairāki metri dienā. Jāpiebilst, ka atsevišķu izvadlādāju ātrums ir sasniedzis pat vairākus desmitus metru dienā, ledāju uzplūdu laikā pat pārsniedzot 100 m. Ledus lielplūsmas tipiski ir diezgan apjomīgi veidojumi, to platums var pārsniegt 20 km un garums – virs 150 km. Tās iedala topogrāfiski ierobežotajās un “ūrajās” ledus plūsmās. Topogrāfiski ierobežotās ledus lielplūsmas aizņem iegarenus reljefa pazeminājumus, un to eksistenci galvenokārt nosaka zemledāja reljefs. Gan Antarktīdā, gan Grenlandē pat vairāku kilometru dziļumā ir atklāti daudzi zemledāja kanjoni, kuros koncentrējas ledus lielplūsmas. Antarktīdā vairāk nekā 90% visa ledus vairoga ledus krasta virzienā pārvietojas tieši ar ledus lielplūsmām. Turklāt ledus lielplūsmas veic nozīmīgāko zemledāja iežu eroziju un pārvietošanu.

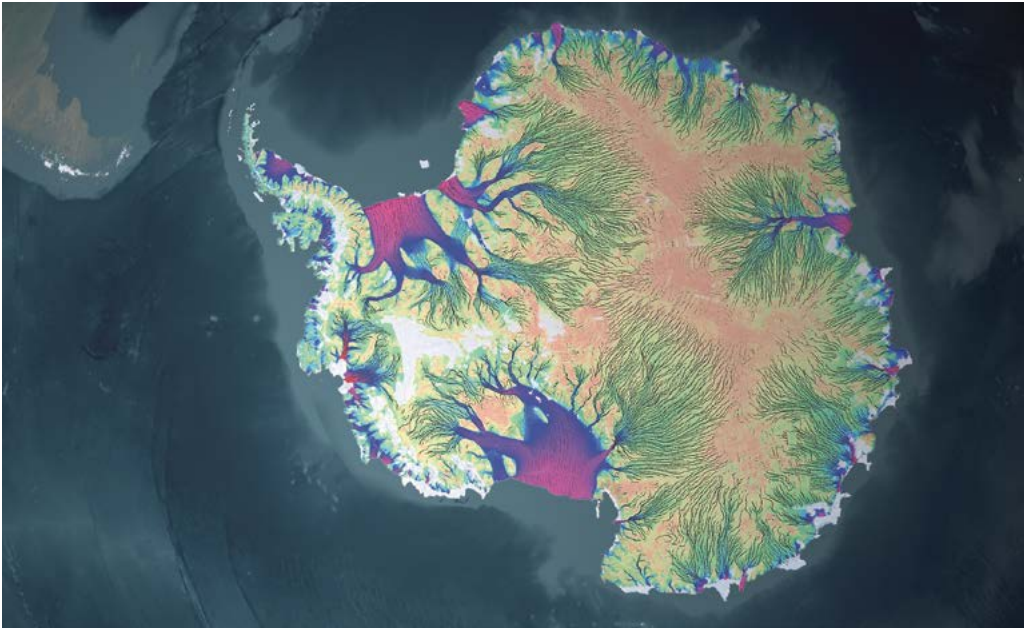
Viens no būtiskākajiem jautājumiem mūsdienu glacioloģijā ir – kas kontrolē ledus lielplūsmu novietojumu un ātro kustību? “Tīro” ledus lielplūsmu novietojumu

nenosaka reljefs. Ap lielplūsmām atrodas apgabali ar lēni plūstošu ledu, un to dinamika un eksistence joprojām nav pilnībā izskaidrota. Svarīgi arī piebilst, ka ledus lielplūsmas ne vienmēr ir ilglaicīgi veidojumi. To novietojums laikā un telpā var mainīties, tāpat arī plūsmas ātrums. Turklāt ledus lielplūsmas var aprimt un vēlāk atsākt ātru kustību, īpaši “tīrās” lielplūsmas. Pētījumi liecina, ka tās ir ļoti dinamiskas un var erodēt vai akumulēt ievērojumu daudzumu nogulumu pāris gadu desmitu laikā (Smith et al., 2007). Kopumā ir daudz un dažādu mehānismu, kas nosaka ledus lielplūsmu dinamiku, kustības ātrumu un novietojumu, un tie joprojām ir vāji izzināti.

“Tīrās” ledus lielplūsmas raisa pastiprinātu zinātnieku interesi. Vairums no tām atrodas Rietumantarktikas ledus vairogā un veido Rosa šelfa ledāju. Šīs lielplūsmas novada aptuveni 40% no visa Rietumantarktikas ledus vairoga ledus. Tām ir būtiska nozīme šī ledus vairoga stabilitātē. Šīs lielplūsmas ir vidēji 50 km platas, 300–500 km garas, un ledus biezums tajās ir aptuveni 1 km. Ledus plūsmas ātrums mainās no dažiem metriem līdz 800 m gadā. Starp ledus lielplūsmām ledus ir praktiski nekustīgs un piesalis gultnei. Žurnālā “Nature” publicētais pētījums (Conway et al., 2002) atklāja, ka Kamba ledus lielplūsma pirms 150 gadiem gandrīz apstājās un ledus plūsma no apgabala, kas agrāk tika novadīta Kamba lielplūsmā, pilnībā mainīja virzienu, un patlaban ledus tiek novadīts Vilansa ledus lielplūsmā. Šāda pēkšņa ledus lielplūsmu aktivitātes un novietojuma reorganizācija īsā periodā var norisināties arī nākotnē, jo ledus vairoga virsmas topogrāfija reaģē uz iekšējo ledus dinamiku un ilgtermiņa klimata pārmaiņām. Ja kādas lielplūsmas biezums mainās, tas var būtiski ietekmēt arī apkārtējā ledus plūsmu virzienu un ātrumu un attiecīgi arī ledus apjomu, kas tiek novadīts okeānā.

Izmantojot datus no satelītiem, zinātnieki ir izveidojuši visas Antarktikas ledus kustības ātruma un virziena karti (89. att.). Karte atklāj dendrītisku lielplūsmu sistēmu, kas atgādina lielo upju un to pieteku sistēmas sauszemē. Vispārsteidzošākais ir tieši ledus plūsmu pieteku daudzums un tas, cik tālu iekšzemē tās sniedzas. Turklāt ledus plūsmu nodrošina ne tikai ledus iekšējā deformācija, ledus pārvietojas pa savu gultni vai nu kopā ar gultnē esošajiem nogulumiem, tos deformējot, vai arī vietām slīdot pa gultni, ja tajā atrodas ūdens. Būtisks faktors lielplūsmu novietojumā ir mīkstu un viegli deformējamu nogulumu esamība gultnē. Līdz ar to zemledāja ģeoloģija un reljefs ir nozīmīgākie priekšnoteikumi lielplūsmu eksistencei.

Galvenās ledus lielplūsmas baro lēnāk plūstoša ledus plūsmas, un vislielākais ledus plūsmas ātrumu ir šelfa ledājos, kur ledus plūst virs ūdens. Lielplūsmas turpinās arī šelfa ledājos, tādējādi tos veido ledus plūsmas ar atšķirīgu kustības ātrumu. Vislēnākais ledus atrodas garā grēdā, kas stiepjas pāri gandrīz visai Antarktīdai. Tā ir ledusšķirtne, kas ietver augstākos Antarktīdas apgabalus un ledus kupolus. No



ledusšķirtnes ledus plūst uz pretējām pusēm. Kartē ietvertā informācija noteikti palīdzēs zinātniekiem labāk izprast Antarktīkas ledus vairogu dinamiku nākotnē un sagaidāmo ietekmi uz jūras līmeņa paaugstināšanos. Atkāpjoties un izzūdot šelfa ledājiem, okeānā nokļūš aizvien lielāks ledus apjoms, jo šelfa ledāji, neskatoties uz to, ka ledus plūsmas ātrums tajos ir vislielākais, rada šķērsli potenciāli vēl ātrākai ledus plūsmai no kontinenta.

Ūdens zem ledājiem var uzkrāties zemledāja ezeros, un vislielākais daudzums zemledāja ezeru ir atrasts Antarktīdā. Vēl šādi ezeri ir zināmi zem Grenlandes, Islandes un Kanādas Arktiskā arhipelāga ledājiem. 2007. gadā bija atklāti aptuveni 150 zemledāja ezeri Antarktīdā, savukārt 2012. gadā jau bija zināmi 379 zemledāja ezeri (Wright & Siegert, 2012), un jaunatklāto ezeru skaits joprojām palielinās. Ezeri lokāli var ietekmēt ledāja dinamiku, palielinot tā plūsmas ātrumu. Zem citiem ledājiem uz Zemes zemledāja ezeru skaits ir daudz mazāks. Līdz 2019. gadam Grenlandē bija zināmi vien četri ezeri. Savukārt 2019. gadā zinātniskajā publikācijā žurnālā “Nature Communications” (Bowling et al., 2019) tika identificētas vietas, kur varētu

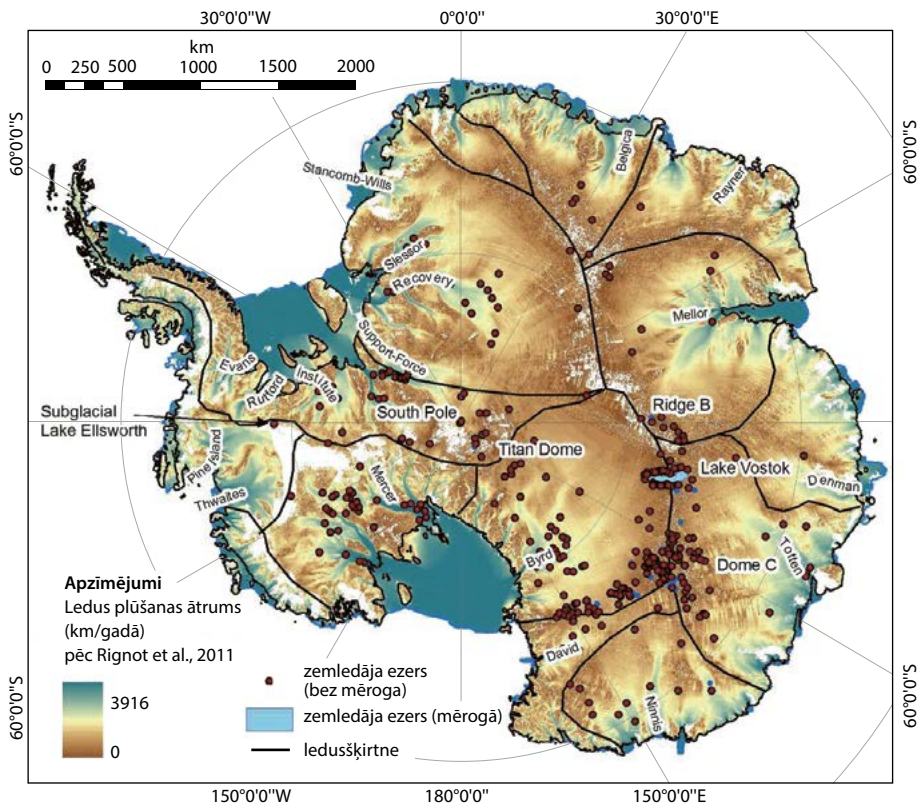
89. att. Ledus lielplūsmas Antarktīkā. Krāsu skala ir logaritmiska, un tā ataino ledus kustības ātrumu no viena metra (bēša) līdz vairākiem kilometriem (violeta) gadā. Avots: GSFC SVS.

atrasties 54 potenciālie zemledāja ezeri. Atšķirībā no Antarktīdas šie ezeri bieži veidojas tikai ziemā, savukārt vasarā tie mēdz noplūst pilnībā. Liela daļa ūdens zem ledus nokļūst no virsledāja ezeriem.

Zemledāja ezeru eksistenci Antarktīdā nosaka trīs galvenie faktori. Pirmkārt, ledus vairoga virsma ir samērā līdzena, tādējādi hidrauliskais gradients ir mazs, un tas veicina ūdens iesprostošanu pazeminājumos zem ledus. Otrkārt, zem ledāja eksistē daudzi pazeminājumi, kas radušies tektonisko procesu un zemledāja erozijas rezultātā un nav aizpildīti ar nogulumiem. Treškārt, tā kā ledus vairoga virsmā nav ledājūdeņu, tie nesasniedz ledāja gultni koncentrētu plūsmu veidā, kas varētu izskalot tuneļus un sekmēt ūdens aizplūdi no zemledāja ezeriem. Pēdējais faktors gan nenozīmē to, ka ūdens nekad neaizplūst no šiem ezeriem. Tieši otrādi – lai arī zemledāja ezeri var atrasties zem vairāku kilometru bieza ledus, ir pierādījumi par savstarpēji savienotiem zemledāja ezeriem. Kad ūdens daļēji aizplūst no viena ezera, ledāja virsma virs tā pazeminās, savukārt, kad ūdens ieplūst savienotajā ezerā, ledāja virsma virs tā paaugstinās. Tādējādi, sekojot līdzī ledus virsmas reljefa izmaiņām, ir iespējams raksturot arī zemledāja ezeru dinamiku. Pētījumi liecina, ka īslaicīgi zem ledāja var pārvietoties diezgan liels ūdens apjoms. Piemēram, tika novērots, ka Antarktīdā 1,8 km³ liels ūdens daudzums pārvietojās 290 km attālumā zem ledus vairoga 16 mēnešu laikā. Satelīt dati arī ļāva novērot ledāja virsmas pazemināšanos virs viena zemledāja ezera, kamēr virs diviem citiem ezeriem, kas atradās 290 km attālumā, ledāja virsmā radās kupolveida pacēlumi.

Dažreiz no zemledāja ezeriem ūdens var noplūst pieledāja teritorijā, radot megaplūdus jeb jokulhlaupus. Lielākoties tie raksturīgi Islandes zemledāja ezeriem, kuru eksistenci nodrošina ģeotermālais siltums un vulkāniskā aktivitāte. Tomēr arī Antarktīdā ir saglabājušās liecības par pagātnes megaplūdiem, piemēram, sausajās ielejās. Zemledāju ezeru vecums ir dažāds, lai gan par to nav daudz pētījumu, un tikai dažos ezeros ir veikti urbumi un noņemti paraugi. Iespējams, daži ezeri varētu būt izolēti no apkārtējās pasaules līdz pat 35 miljoniem gadu, kad Antarktīdā sāka veidoties ledus vairogs, un tajos, iespējams, attīstījušās dzīvības formas, kādas nav atrodamas nekur citur uz Zemes. Tieši šis apstāklis ir viens būtiskākajiem dzinūļiem zemledāja ezeru pētniecībā. Ja dzīvība spēj eksistēt šādos ezeros, tad ir iespējams, ka tā varētu eksistēt ūdenī arī zem citu planētu un pavadoņu ledus segas.

Lielākā daļa Antarktīdas zemledāja ezeru atrodas ledusšķirtņu apkārtnē (90. att.), kur ledus plūsmas ātrums ir vismazākais. Tomēr aizvien lielāks ezeru daudzums ir identificēts arī ledus lielplūsmu tuvumā. Lielākie ezeri atrodas Čārlī jeb leduskupola C un Vostoka polārstacijas apkārtnē Austrumantarktīkā, jo virs tiem atrodas bieza, izolējoša ledus sega un zemledāja topogrāfija šajā reģionā ir diezgan nelīdzena, nodrošinot pazeminājumus, kuros ūdens var uzkrāties. Ezeri vidēji atrodas zem 3 km



biezas ledus segas. Iespējams, ezeru koncentrēšanās reģionos zem bieza ledus ir saistīta arī ar to, ka tur bazālais ledus sasniedz spiedienkušanas punktu, tādējādi nodrošinot ledus kušanu.

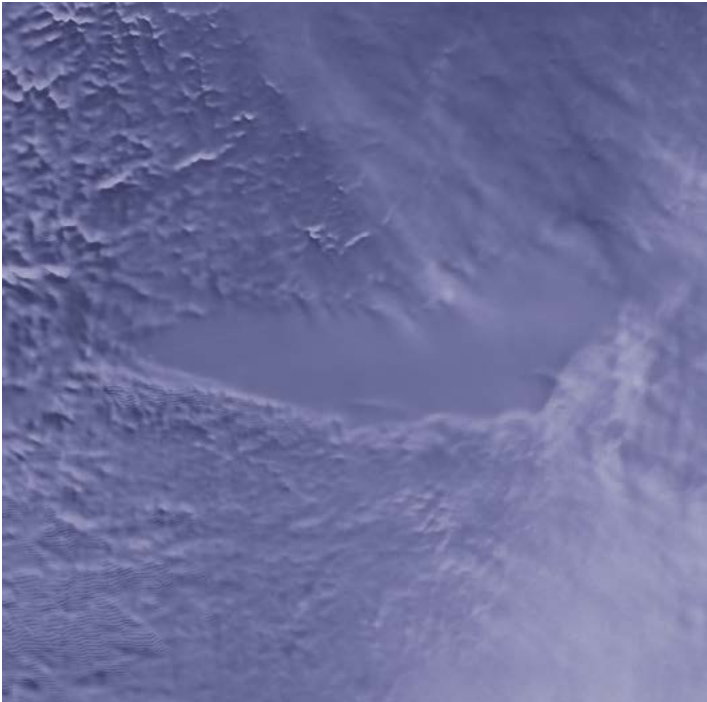
Kā tiek atrasti Antarktīdas zemledāja ezeri? Pirmo reizi zemledāja ezeri tika atklāti 20. gadsimta 70. gados ar radiolokācijas metodi, kas ļauj izmērīt ledus biezumu, ledus gultnes augstumu un reģistrēt signālus pat no zemledāja ūdens objektu virsmas, jo ledus un ūdens robeža rada spēcīgu elektromagnētisko viļņu atstarojumu. Izmantoto iekārtu sauc par ģeoradaru, un tā visbiežāk tiek novietota satelītos un lidmašīnās. Tomēr augstas detalitātes mērījumi ir iespējami, tikai pārvietojot iekārtu pa ledus virsmu. Aptuveni 280 ezeri ir atrasti, izmantojot tieši šo metodi, un 124 no šiem ezeriem tiek uzskatīti par aktīviem, respektīvi, ūdens no tiem regulāri noplūst dažu mēnešu līdz gadu laikā.

90. att. Zemledāja ezeru izvietojums Antarktīdā. Redzams, ka liela daļa zemledāja ezeru atrodas ledusšķirtnu tuvumu, kā arī zem ledus lielplūsmu sākuma zonām. Avots: Davies, pēc Rignot et al., (2011) un Wright, Siegert (2012) datiem.

Satelītattēli vai lāzera altimetru dati par ledus virsmas augstumu tiek izmantoti, lai identificētu plakanus apgabalus ledus virsmā, zem kuriem, visticamāk, atrodas zemledāja ezers. Altimetra mērījumi 1995.–2003. gadā no *ERS-2* satelīta ļāva noskaidrot, ka daudzus Austrumantarktikas ledus vairoga zemledāja ezerus uztur sistēma, ko veido zemledāja kušanas ūdens straumes. Tādējādi Antarktikas ledus vairogu zemledāja hidroloģiskā sistēma ir daudz komplicētāka, nekā zinātnieki uzskatīja agrāk. Lai reģistrētu ledus virsmas izmaiņas, plaši tika izmantoti *ICESat* satelīta lāzera altimetra dati, un arī tie liecināja par konstantām ledus virsmas izmaiņām, ko izraisīja ūdens plūsma starp ezeriem. Šādi aktīvi ezeri jaunākos pētījumos ir identificēti tieši zem ledus lielplūsmu un izvadledāju sākumdaļām. Tādējādi no tiem noplūstošais ūdens sekmē un uztur ātru ledus plūsmu, nodrošinot ledāja gultnes apūdeņošanu, respektīvi, samazina berzi starp ledu un gultni.

Viens no labi pētītiem piemēriem ir Vilansa zemledāja ezers (*Lake Whillans*), kurš aizņem aptuveni 60 km² lielu platību zem Vilansa ledus lielplūsmas Rietumantarktikā. Tas ir pētīts, izmantojot ledus virsmas izmaiņas no *ICESat* satelīta altimetrijas datiem, kā arī GPS novērojumus un seismiskos datus. Ezers atrodas zem 800 m bieza ledus un ir tikai dažus metrus dziļš. Amerikāņi 2013. gadā līdz ezeram izurba dziļurbumu un noņēma ūdens un ezera gultnes nogulumu paraugus. To analīzes atklāja gandrīz 4000 dažādus mikroorganismus (Achberger et al., 2016). Ezerā esošās baktērijas dzīvību uztur bez fotosintēzes. Tā vietā mikroorganismi izmanto amonjaku un metānu no ezera gultnes nogulumiem. Tajos tika atrastas fosilas kramalģu atliekas, šīs aļģes dzīvojušas pirms 15 miljoniem gadu, kad ezera dibens bija jūras gultne. Tas sakrīt ar laiku, pēc kura (pirms aptuveni 14 miljoniem gadu) drīz Antarktikā izveidojās ledus vairogī. Vilansa ezera urbums ir pirmais, kurā iegūti pirmie nepiesārņotie zemledāja ezera paraugi Antarktikā. Līdzīgu dziļurbumu 2012. gadā veica britu zinātnieki Elsvēta ezerā (*Lake Ellsworth*) pēc 16 gadu ilgas tehnoloģiju izstrādes, bija paredzēts iegūt nepiesārņotus paraugus no ezera. Diemžēl tehnisku problēmu dēļ ezers netika sasniegts.

Iespējams, viszināmākais dziļurbums ir Vostoka ezera dziļurbums. Vostoka ezers (91. att.) ir lielākais zemledāja ezers pasaulē, tas ir pat septītais lielākais no visiem pasaules ezeriem un ceturtais dziļākais. Tas atrodas Austrumantarktidā un ir 250 km garš, 50 km plats un aizņem gandrīz 14 000 km² lielu platību. Vidējais dziļums ir 432 m, bet maksimālais dziļums sasniedz 1,2 km. Ledus biezums virs Vostoka ezera ir līdz 4 km. Pilnīga ūdens apmaiņa ezerā notiek 13 300 gados, ūdenim piesalstot pie ledus vairoga pamatnes un citviet atkūstot. Tādējādi virs ezera vairāk nekā 200 m biezumā atrodas ledus, kurš veidojies, sasalstot ezera ūdenim. Robeža starp ledus vairoga (meteorisko) un ezera ledu ir strauja – raksturīgas izotopu un ķīmiskā sastāva izmaiņas, kā arī lieli nedeformēti ledus kristāli. Zem ezera



saldūdens slāņa atrodas sāļa ūdens slānis. Zemledāja eksistence daļēji saistīta ar ģeotermālo aktivitāti zem ledus vairoga.

Krievijas 1990. gadā uzsāktais urbšanas projekts tika pabeigts 2012. gadā, kad tika sasniegts šī ezera virsmas ledus. Urbis netika ielaists ezerā, lai nepiesārņotu to, kritiskajā brīdī urbšana tika pārtraukta. Brīdī vēlāk urbumā notika ezera ūdens injekcija no apakšas, un tas sasala gandrīz 40 m biezumā esošajā urbumā. Šī sasalušā ezera ūdens serde tika iegūta tikai gadu vēlāk, jo bija pienākusi ziema un urbšanas komandai polārstacija bija jāatstāj. Ledus serdes paraugi tika iegūti 2013. gadā, bet vadošie zinātnieki paziņoja, ka tā ir piesārņota ar mikroorganismiem no urbšanas šķidrums. Kopumā ezera paraugos tikai identificētas gandrīz 4000 unikālas gēnu sekvences, arī tādas, kas atbilst baktērijām, kuras dzīvo kompleksos organismos, piemēram, zivīs. Daži procenti no gēnu sekvencēm atbilda daudzšūnu organismiem. Kopumā zinātniskā sabiedrība uz šiem atklājumiem lūkojās skeptiski un apgalvoja, ka atrastie mikroorganismi ir nokļuvuši ledū no

91. att. Austrumantarktikas ledus vairoga virsma virs Vostoka zemledāja ezera.
Avots: CSA Radarsat, GSFC SVS.

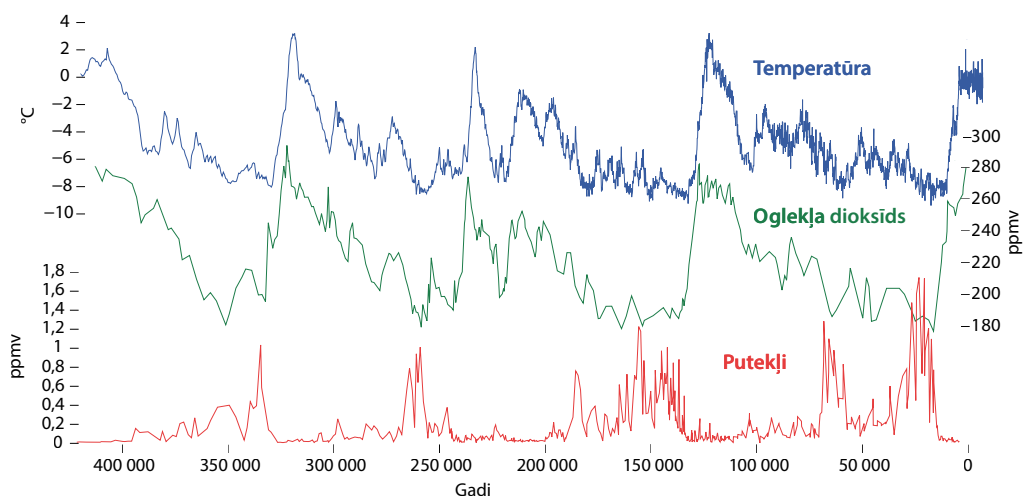
virszemes un daļa no tiem – ledus seržu nepareizas uzglabāšanas un transportēšanas procesā. Vēlāk Krievijas finansējums urbšanas projektam tika pārtraukts, un līdz ar to arī beidzās mēģinājumi iegūt nepiesārņotus paraugus no ezera ledus.

Vostoka dziļurbuma nozīme ir nenovērtējama kādā citā zinātnes jomā, jo virs ezera 2012. gadā tika iegūts dziļākais ledus serdenis pasaulē (3720 m), un tas zinātniekiem sniedza būtisku informāciju par atmosfēras sastāvu un klimatu pēdējos 420 000 gados. Interesanti, ka urbšanas vieta netika ar nolūku izvēlēta virs ezera, bet tas tika atklāts pavisam nejauši dažus gadus vēlāk, izmantojot radiolokāciju.

Ceturtais un jaunākais Antarktīdas zemledāja ezera paraugošanas mēģinājums tika veikts 2018. gada beigās Mersera ezerā (*Lake Mercer*). Tas bija veiksmīgs, un zinātniekiem izdevās izurbties cauri 1067 m ledus, izmantojot augsta spiediena karsta ūdens urbi. Tika ievākti ūdens un zemledāja ezera gultnes nogulumi, kuros tika atrastas diatomeju čaulas, labi saglabājušās vēžveidīgo un gauskāju (*Tardigrada*) atliekas. Tas bija ļoti nozīmīgs atklājums, un 2019. gadā tas tika publicēts zinātniskajā žurnālā “Nature” (Fox, 2019), tā bija pirmā liecība par dzīvnieku (mikroskopisku organismu) eksistenci zemledāja ezerā. Lai gan šie dzīvnieki bija miruši, ezerā tika atrasta liela baktēriju koncentrācija, no kā dzīvnieki varētu pārtikt. Mersera ezers pagaidām ir tikai otrais Antarktīdas zemledāja ezers, kura nepiesārņotus paraugus zinātniekiem ir izdevies iegūt.

Zīmīgi uzsvērt, ka Antarktīdas zemledāja ezerus var uzskatīt par analogu potenciāliem zemledāja ezeriem citviet Saules sistēmā. Pēdējie pētījumi ir apstiprinājuši dažādu dzīvības formu eksistenci Antarktīdas ezeros, tādēļ potenciālā dzīvības eksistence arī Marsa zemledāja ezeros vairs nevar tikt uzskatīta par naivu iedomu. Šādu iespējamību apstiprina arī vairāki teorētiski pētījumi.

Attiecībā uz ledus urbšanu nozīmīgs zinātnieku izaicinājums ir vecākā ledus meklējumi. Šāds ledus sniegtu informāciju par klimatu un to ietekmējošiem faktoriem vismaz viena miljona un vairāk gadu pagātnē. Vostoka dziļurbums sniedz informāciju par temperatūru un oļšskābās gāzes koncentrāciju atmosfērā tikai pēdējos 420 000 gados (92. att.). Eiropas ledus urbšanas projektam Antarktīkā (EPICA) ir izdevies iegūt ledus serdeni, kas satur datus par gandrīz 800 000 gadu pagātni. Šis serdenis ir unikāla informācijas krātuve, kas parāda astoņu secīgu apledojumu un starpleduslaikmetu miju. No ledus serdeņiem iespējams noskaidrot pagātnes atmosfēras sastāvu un temperatūru. Visai droši nosakāma gan oļšskābās gāzes, gan metāna koncentrācija. Tā kā Zemes atmosfēras oļšskābās gāzes koncentrācijas mērījumi tika uzsākti tikai 20. gadsimta 50. gados, informācija no ledus serdeņiem būtiski palielina šo periodu. Pēc skābekļa izotopu attiecības tiek noteikts, cik daudz ledus uz Zemes eksistēja attiecīgajā laika posmā. No ledus serdeņu gaisa burbuļu analīzēm ir noskaidrots, ka oļšskābās gāzes koncentrācijai un temperatūrai



ir nozīmīga korelācija. Silta klimata apstākļos ogļskābās gāzes koncentrācija ir augsta, un otrādi. Lielākoties gan temperatūras, gan ogļskābās gāzes koncentrācijas līknes sakrīt viena ar otru, tomēr bieži novērojams, ka temperatūra paaugstinās īsi pirms ogļskābās gāzes koncentrācijas pieauguma. Tādējādi abi faktori vienlīdzīgi ietekmē viens otru, tomēr ogļskābās gāzes izmaiņas lielākoties norisinās kā reakcija uz temperatūras izmaiņām, kuras nosaka citi, īpaši orbitālie, faktori.

Klimatam pēdējos simtos tūkstošu gadu raksturīgas būtiskas variācijas, bet izmaiņas galvenokārt ir relatīvi pakāpeniskas. Tomēr ir norisinājušās arī ļoti pēkšņas izmaiņas, un tās galvenokārt ir bijušas raksturīgas Zemes ziemeļu puslodei. Pēkšņas izmaiņas parasti attiecināmas uz temperatūras kāpumu, nevis pazemināšanos. Pat pēdējā leduslaikmetā pirms 115 000–11 700 gadu bija raksturīgas ātras klimata svārstības, tā sauktie Dansgārda–Oišģera (*Dansgaard-Oeschger*) notikumi. Zināmi vismaz 25 cikli, un tie ir izpaužušies galvenokārt ziemeļu puslodē. Piemēram, Grenlandes klimata rekonstrukcijas pēc ledus serdeņu datiem uzrāda gaisa temperatūras paaugstināšanos atsevišķos reģionos pat par 10 °C un vairāk dažu gadu desmitu laikā. Pēc šīm pēkšņajām silta klimata epizodēm klimats pakāpeniski kļuva vēsāks. Nereti šādas straujas temperatūras izmaiņas ir bijušas saistītas ar okeāna

92. att. Dati no Vostoka dziļurbuma Antarktīdā. Tie parāda temperatūras, ogļskābās gāzes un atmosfēras duļķainības (putekļu) izmaiņas pēdējos 400 000 gadu. Zilā līkne parāda nevis globālo, bet Antarktīdas atmosfēras temperatūru polārstacijas "Vostok" apkārtnē. Zemākās temperatūras periodi sakrīt ar četriem apledojumiem. Redzams, ka ogļskābās gāzes koncentrācija šajā periodā nekad nav pārsniegusi 300 ppmv koncentrāciju. Avots: *Wikimedia Commons* (NOAA dati), ar K. Lamstera pārveidojumiem.

straumju cirkulācijas pārkārtošanos (īpaši Ziemeļatlantijā), kad samazinājās siltuma pārnese ziemeļu virzienā, bet vēlāk šī cirkulācija strauji atjaunojusies.

Līdzšinējie ledus dziļurbumi tomēr neatrisina būtisku zinātnisku problēmu. Pēdējā viena miliona gadu laikā ledus laikmeti ir ilguši aptuveni 100 000 gadus, savukārt senāk – aptuveni 41 000 gadus. Šie cikli sakrīt ar tā sauktajiem orbitālajiem Milankoviča cikliem, kurus uzskata par leduslaikmetu galveno cēloni. 100 000 gadu cikls sakrīt ar Zemes orbītas cikliskām izmaiņām – ekscentritāti. Savukārt 41 000 gadu cikls sakrīt ar Zemes rotācijas ass sašķiebuma cikliskām izmaiņām. Kādēļ aptuveni pirms miliona gadu 41 000 gadu cikla laikā sāka dominēt 100 000 gadu cikls, joprojām ir neatbildēts jautājums. To varētu atrisināt, ja izdotos iegūt ledus serdeni, kas aptvertu laika posmu ilgāku par miljons gadiem.

2016. gadā Antarktīkā izdevās iegūt ledu, kurš ir vecāks par miljons gadiem. Urbšana tika veikta Transantarktīdas kalnu grēdas Allana kalnos, kur atrodams tā sauktais zilais ledus. Tas ir vecs ledus, kurš ledus kustības dēļ nonācis tuvu ledāja virspusei. Ledus serdenis diemžēl ir salīdzinoši īss un aptver nelielu laika posmu, bet tā lejasdaļā esošais ledus tika datēts ar kālija-argona metodi, un ledus vecums izrādījās 2,7 miljoni gadu. Gaisa burbuļi no šī ledus satur gāzes no Zemes atmosfēras laikā, kad sākās pēdējais lielais leduslaikmets uz Zemes (tas turpinās arī mūsdienās) – kvartāra perioda leduslaikmets, kuram raksturīga vairāku desmitu apledojuumu un starpledu laikmetu mija. Tādējādi šī ledus izpēte varētu sniegt dažas atbildes par šī ledus laikmeta cēloņiem.

Antarktīkā atrodami arī vulkāni, no tiem zināmākais ir Erebus. Tas atrodas Rosa salā un ir ne tikai vistālāk uz dienvidiem esošais vulkāns, bet arī viens no retajiem vulkāniem uz Zemes, kurā atrodas lavas ezers. Šī stratovulkāna augstums sasniedz 3794 m, un tas ir bijis aktīvs jau vismaz 1,3 miljonus gadu. Erebusa vulkānu atklāja Dž. Ross 1841. gadā. Viņš nosauca to un blakus esošo vulkānu Teroru savu kuģu vārdā. Zem Erebusa atrodas tā sauktais karstais punkts, ko rada augšupejoša mantijas plūsma. Līdzīgi karstie punkti atrodas zem Havaju salām, Islandes un citur, un to esamība izraisa pastiprinātu vulkānisko aktivitāti.

Zem Erebusa mantijas plūsma konstatēta 250–300 km diametrā un atrodas 200 km dziļumā. Dziļāk plūsma sašaurinās, bet ir izsekojama vēl vismaz 400 km dziļumā. Karstā punkta eksistence ir pierādīta ar seismiskiem pētījumiem. Pēc atšķirībām seismisko viļņu izplatīšanās ātrumā var spriest par magmas sastāva un/vai temperatūras izmaiņām. Tā kā seismisko viļņu izplatīšanās ātrumu visdrīzāk ietekmē augšējās mantijas temperatūra, nevis sastāvs, zinātnieki novēroto primāro seismisko viļņu izplatības ātruma samazināšanos zem Erebusa līdz 400 km dziļumam skaidro ar termālu anomāliju – mantija tur ir karstāka un ar mazāku viskozitāti (lielāku plūstamību). Šis apstāklis ļauj karstākai uzkusūšai magmai pasīvi pacelties



līdz pat Zemes virsai. Antarktīdas kontinents atrodas uz Antarktīkas litosfēras plātnes, kura robežojas ar okeāniskajām plātnēm, un subdukcija norisinās tikai gar Dienvidamerikas rietumu krastu un Dienvidšetlendas salām, tādēļ Erebusa augšējās mantijas termālā anomālija nav saistīta ar subdukcijas zonas vulkānismu, bet ar mantijas plūsmas eksistenci un konvekciju, kas rodas Rietumantarktīkas rifta sistēmas spreadinga dēļ.

Aktīvo vulkānu Antarktīkā nav daudz, bet kopumā zem Rietumantarktīkas ledus vairoga ir identificēti 138 iespējamie vulkāni. Šis ledus vairogs pārklāj Rietumantarktīkas rifta sistēmu, kas stiepjas 3000 km rietumos no Transantarktīdas kalnu grēdas līdz pat Antarktīdas pussalai. Šīs rifta sistēma, līdzīgi kā Austrumāfrikas rifts, sastāv no daudziem īsākiem riftiem, bet detalizētas informācijas par tiem nav, jo pētījumus apgrūtinā ledus sega. Austrumantarktīkas vulkāniskais potenciāls ir vēl mazāk izpētīts, bet pastāv norādes par vulkānisku aktivitāti arī zem Austrumantarktīkas ledus vairoga.

Potenciālā vulkāniskā aktivitāte zem Rietumantarktīkas ledus vairoga ir zinātnisku debašu avots, un atsevišķi pētījumi liecina,

93. att. Ledus serdenis no Rietumantarktīkas ledus vairoga ar vulkānisko pelnu slāni (tumša josla serdeņa labajā pusē). Šie pelni zemledāja vulkāna izvirdumā nosēdās uz ledus pirms 21 000 gadu. Avots: *Heidi Roop, NSF.*

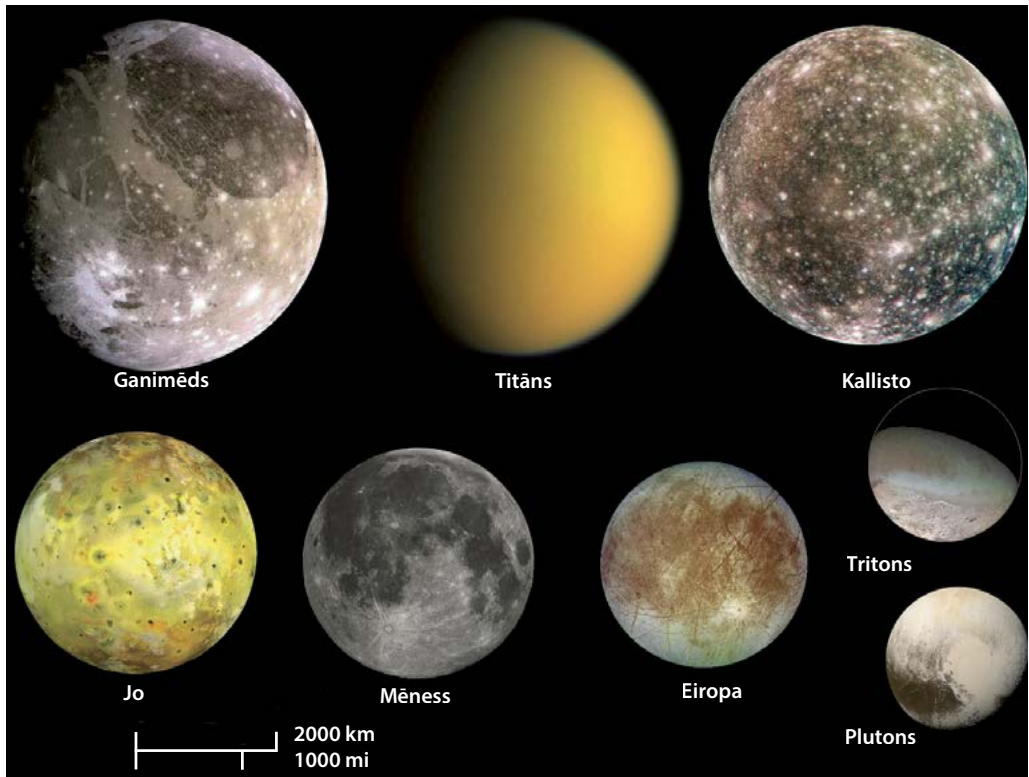
ka šī aktivitāte varētu būt lielāka, nekā tiek uzskatīts. Vietām ir novērota arī seismiska aktivitāte, kas varētu liecināt par magmas kustību. Uz potenciāli aktīvu vulkānu eksistenci zem Rietumantarktikas ledus vairoga norāda vietām ledū atrastie pelnu slāņi (93. att.). 2017. gadā veikto pelnu slāņu (tefras) analīzes (Iverson et al., 2017) norāda, ka to avots atradās Rietumantarktikas ledus vairoga centrālajā daļā un varētu būt kāds no netālajiem zemledāja vulkāniem – Resnika kalns (*Mt. Resnik*), Tīla kalns (*Mt. Thiel*) vai Kaserta kalns (*Mt. Casertz*). Ja ledus vairoga masa turpinās samazināties, tas varētu samazināt ledus spiedienu uz Zemes garozu un veicināt vulkānismu nākotnē, kas savukārt varētu ietekmēt ledus vairoga stabilitāti.

5. NODAĻA

LEDĀJI ĀRPUS ZEMES

Vai ledāji eksistē arī uz citām planētām un pavadoņiem? Ņemot vērā, ka lielākā daļa debess ķermeņu Saules sistēmā atrodas tālāk no Saules nekā Zeme, atbilde uz šo jautājumu ir vienkārša. Turklāt liela daļa pavadoņu pat sastāv pārsvarā no ūdens ledus, piemēram, Reja, Tētija, Hiperions un citi no 82 Saturna pavadoņiem. Citi, piemēram, Encelads, ir klāti ar biezu ledus kārtu, zem kuras atrodas globāls okeāns. Liela daļa no pavadoņiem sastāv aptuveni vienlīdzīgās daļās no iežiem un ledus, piemēram, lielākais Saturna pavadonis Titāns un Jupitera pavadoņi – Ganimēds un Kallisto (94. att.). Lielākais Jupitera un visas Saules sistēmas pavadonis Ganimēds, kā arī Saturna pavadoņi Titāns un Encelads, Jupitera pavadonis Eiropa satur vairāk šķidru ūdeni (procentuāli pret to kopējo masu) nekā Zeme.

Vismaz vienu trešdaļu no lielākā Neptūna pavadoņa Tritona arī veido ledus, vienīgi tas nav galvenokārt ūdens ledus kā uz citiem pavadoņiem. Tritona diametrs ir 2706 km, un tādējādi tas ir tikai nedaudz mazāks par Mēnesi, tā virsma ir ļoti jauna (6–50 milj. gadu) un relatīvi plakana. Virsmas topogrāfijas izmaiņu amplitūda ir mazāka par vienu kilometru. Par ziemeļu puslodi zinātniekiem nav informācijas, savukārt dienvidu puslodes lielāko daļu klāj polārais segledājs, kas tika atklāts 1989. gadā pēc kosmiskā lidaparāta “Voyager-2” pārlidojuma.



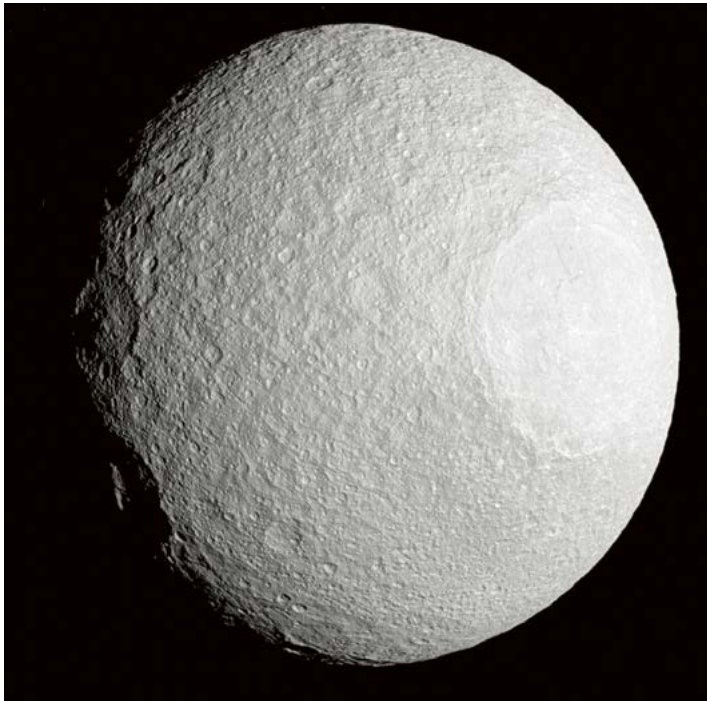
94. att. Saules sistēmas pavadoņi un Plutons. Visi debess ķermeņi attēloti vienā mērogā. Attēlā redzami Jupitera pavadoņi (Ganimēds, Kallisto, Jo, Eiropa), Saturna (Tītāns), Zemes (Mēness), Neptūna (Tritons) pavadoņi un Plutons. Avots: NASA.

Tritona virsmu veido galvenokārt slāpekļa ledus, bet garoza sastāv no 55% slāpekļa ledus, pārējo veido ūdens un oglekļa dioksīda ledus ar nelielu daudzumu metāna, amonjaka un oglekļa monoksīda ieslēgumiem. Ziemeļu puslodes polārā segledāja apvidū novērojamas tumšas joslas. Tās ir auksto geizeru (zināmi vismaz 50 geizeri) izmešu rezultāts – slāpekļa ledus un putekļu daļiņas tiek izmestas līdz pat 8 km augstumā. Izvirdums var ilgt veselu gadu, un to veicina ledus sublimācija Saules radiācijas ietekmē. Zem daļēji caurspīdīgās slāpekļa ledus garozas atrodas tumšs iežu materiāls, kas absorbē Saules radiāciju, veicinot pārsežošu slāpekļa ledus iztvaikošanu. Pieaugot gāzu spiedienam, rodas geizeru izvirdumi. Putekļu daļiņas tiek nogulsnētas plašā reģionā (150 km un tālāk), veidojot tumšas joslas. Tritonam raksturīga īpatnība ir tā orbīta – tā ir gandrīz ideāla riņķa līnija (nevis nedaudz saplacināta kā citiem pavadoņiem un planētām). Turklāt

Tritons aprīņo savu planētu pretējā virzienā – pretēji Neptūna rotācijas virzienam. Diemžēl paredzams, ka nākotnē Neptūna gravitācijas dēļ Tritons pietuosies savai planētai tik tuvu, ka šķērsos Roša robežu (pavadoņa minimālais orbītas rādiuss, kurā tas vēl netiek sagrauts planētas radītās gravitācijas dēļ) un sadalīsies sīkās daļās, izveidojot gredzenu ap Neptūnu.

Viens no viszemākajiem blīvumiem no Saules sistēmā sastopamajiem pavadoņiem ir Saturna pavadoņim Tētijai. Tas ir tikai $0,98 \text{ g/cm}^3$, tādēļ zinātnieki uzskata, ka Tētija galvenokārt sastāv no ūdens ledus. Šāds no ledus gandrīz pilnībā veidots pavadoņis atstaro lielāko daļu Saules gaismas (95. att.).

Spožāks par Tētiju ir tikai Encelads (96. att.), kura virsma atstaro vairāk nekā 90% no saņemtās Saules gaismas. Encelads ir viens no vislabāk izpētītajiem pavadoņiem Saules sistēmā. Tā diametrs ir aptuveni 500 km, un ārējo slāni veido 30–40 km bieža ūdens ledus garoza. Encelada virsmas temperatūra ir $-198 \text{ }^\circ\text{C}$. Atšķirībā no Tētijas zem Encelada biezs ledus segas varētu



95. att. Saturna pavadoņi – Tētija. Attēla labajā pusē redzams pavadoņa lielākais krāteris – Odisejs, kura diametrs sasniedz 450 km. Attēls no kosmosa kuģa *Cassini* 2015. gada 11. aprīlī. Avots: NASA/JPL-Caltech.



96. att. Saturna pavadonis Encelads un ar ūdeni bagātu strūklu izvirdumi tā dienvidu puslodē.
Avots: NASA/JPL-Caltech, mākslinieka interpretācija.

pastāvēt ūdens. *Cassini* kosmiskā aparāta novērojumi ir apstiprinājuši ar ūdeni bagātu strūklu izvirdumus Encelada dienvidu polārajā reģionā. Visticamāk, šī ūdens avots ir globāls zemledus okeāns, kura dziļums sasniedz aptuveni 30 km. Ūdens tvaika, slāpekļa, oglekļa dioksīda, vienkāršu ogļūdeņražu (metāns, propāns), putekļu izvirdumi liecina par krio-vulkānisma procesiem uz pavadoņa virsmas. Pavadoņa kodols ir veidots no porainiem iezīem, kas ļauj ūdenim infiltrēties Encelada dzīlēs, veicinot hidrotermālo aktivitāti. Dienvidu polārajā reģionā ir novērojamas struktūras, kas tiek dēvētas par “tīģera svītrām”. Tās ir 130 km garas, 2 km platas, līdz pat 500 m dziļas struktūras, kuras norobežo ap 100 m augstas grēdas. Visticamāk, tās ir tektoniskas izcelsmes plaisas, iespējams, ledus litosfēras plaisas. Tā kā reģionā nav konstatēti krāteri, tās ir samērā jaunas (4–100 milj. gadu). Grēdas atšķirībā no pārējās pavadoņa virsmas sastāv no lielkristāliska

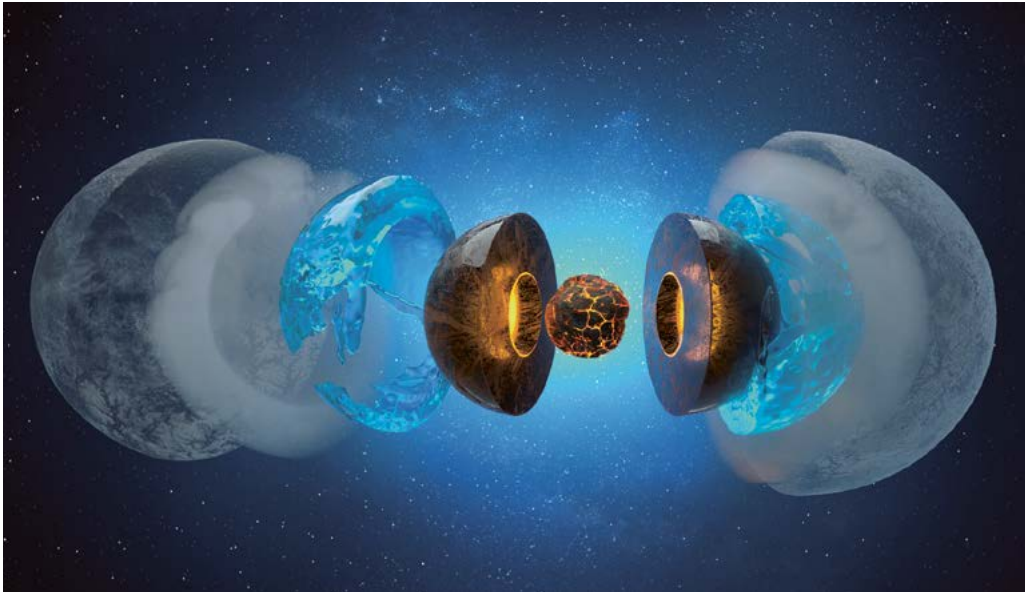
ledus ar CO₂ ledus ieslēgumiem un organisko materiālu. Dienvidu polārā reģiona kriovulkāni papildina Saturna E gredzenu (2000 km biezs) ar ūdens tvaiku un ledus kristāliem, iežu daļiņām, nātrija hlorīdu, ūdeņraža molekulām, metānu un slāpekli. Daļiņu produkcija sasniedz 200 kg sekundē, un to avots ir vairāk nekā 100 kriovulkānu jeb auksto geizeru.

Ūdens pieejamība un organisku molekulu klātbūtne Enceladu un citus debess ķermeņus padara par potenciālām vietām, kur varētu attīstīties dzīvība. Tādējādi ledāju un potenciālā ūdens klātbūtne ir galvenais iemesls, kādēļ ir būtiski īstenot kosmiskās misijas uz šādiem debess ķermeņiem.

Saules sistēmas gāzu planētas Urāns un Neptūns tiek dēvētas par ledus gigantiem, un ir zināms, ka to uzbūvē dominē ūdeņradis un hēlijs. Jaunākajās zinātnieku datorsimulācijās un eksperimentos noskaidrots, ka Urāns un Neptūns galvenokārt varētu sastāvēt tieši no ūdens. Tas gan nav ūdens tradicionālā izpratnē un nav arī ledus. Tā sauktais superioniskais ūdens/ledus pastāv miljoniem atmosfēru lielā spiediena un tūkstošiem grādu augstās temperatūras dēļ. Iespējams, tā ir plaši izplatīta ūdens/ledus forma Visumā. Superioniskajā fāzē ūdens nav ciets kā ledus, bet nav arī šķidrums. Tas ir karsts un blīvs, vismaz četras reizes smagāks par uz Zemes sastopamo ūdens ledu. Tajā ūdeņraža oksīda (H₂O) molekulu skābekļa atomi ir organizēti cietās kristāliskās struktūrās – kristāliskajā režģī, savukārt ūdeņraža joni brīvi pārvietojas kā šķidrums. Šis fakts padara superionisko ūdeni/ledu par elektrisko vadītāju, kura īpašības līdzinās metālu īpašībām, vienīgi elektrisko strāvu veido nevis negatīvi lādēti elektroni, bet gan pozitīvi lādēti ūdeņraža joni. Ņemot vērā, ka superioniskajā ūdenī ūdeņraža atomi ir atdalīti cits no cita, to nevar uzskatīt par ūdeni. Iespējams, superioniskais ledus veido Urāna un Neptūna dziļu lielāko daļu (analogu mantijai uz Zemes), kas aptver iežu kodolu un atrodas zem gāzveida apvalka un šķidra jonizēta ūdens slāņa (97. att.).

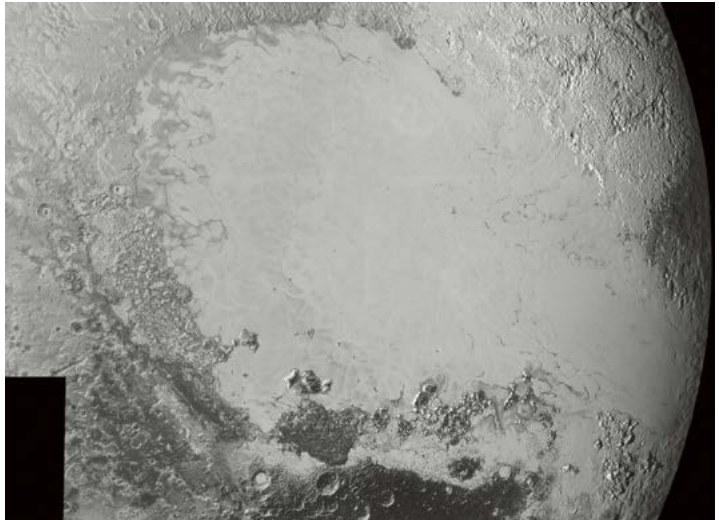
Ledus eksistē arī uz Saules sistēmas pundurplanētām, piemēram, uz planētas statusu zaudējušās pundurplanētas Plutona. Lielāko daļu no Plutona virsmas veido slāpekļa ledus, vietām sastopams metāna un oglekļa monoksīda ledus. Tādējādi pundurplanētas virsma ir ļoti kontrastaina, to veido reģioni ar dažādu gaišumu un krāsu. Tumšākie apgabali veidoti no metāna ledus, kalni savukārt – no ūdens ledus. Plutons, visticamāk, sastāv no iežu kodola, kuru apņem ūdens ledus mantija. Kodola diametrs ir aptuveni 70% no pundurplanētas kopējā diametra. Iespējams, ka Plutona dziļēs iekšējās siltuma plūsmas eksistē arī mūsdienās, un tās ir radījušas šķidra ūdens okeānu starp pundurplanētas kodolu un mantiju aptuveni 100–180 km biezumā (Nimmo et al., 2016).

Viens no īpatnējākajiem Plutona reģioniem ir aptuveni 1000 km liels pazeminājums – *Sputnik Planitia* (Sputņika zemiene; 98. att.). To veido galvenokārt slāpekļa



97. att. Urāna un Neptūna iespējamā uzbūve. Cietu iežu kodolu aptver superioniskais ledus/ūdens (tumšā krāsā), ko savukārt ieskauj šķidr ūdens un gāzveida apvalks. Avots: lamMoteh, "Quanta Magazine".

98. att. Plutona *Sputnik Planitia* apgabala līdzenuma ledājs. NASA "New Horizons" kosmosa kuģa uzņemto augstas izšķirtspējas attēlu mozaīka, 2015. Avots: NASA, Johns Hopkins APL.



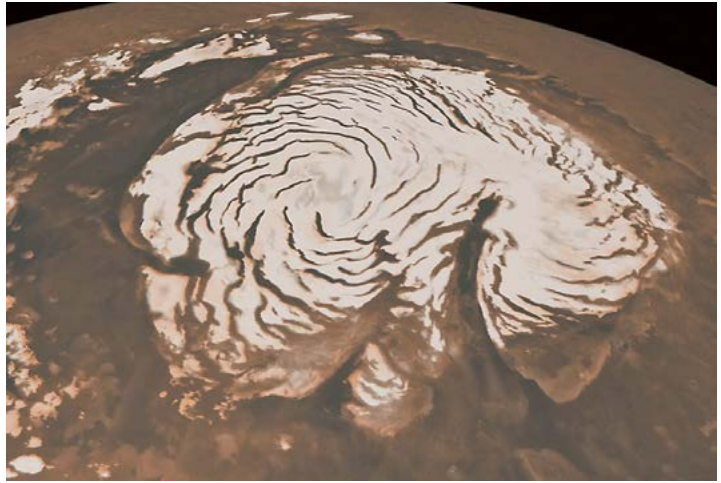
un oglekļa monoksīda ledus sega, kas sadalīta daudzstūru šūnās. Šis reģions, kurā konstatēti konvekcijas procesi, ir ģeoloģiski jauns un aktīvs. Reģiona struktūras, iespējams, rodas slāpekļa un oglekļa monoksīda ledus konvekcijas rezultātā, kad siltāks ledus pundurplanētas iekšējā siltuma dēļ ceļas augšup šūnu centrālajā daļā, savukārt aukstais ledus grimst gar šūnu malām. Virsmas reljefam ir 100 m amplitūda, bet modelēšanas rezultāti norāda, ka šo konvekcijas šūnu dziļums varētu būt līdz pat 3–4 km, savukārt plūsmas ātrums – ap 7 cm gadā. Šūnu platums ir ap 20 km, un tās atdala sekli pazeminājumi. Plutona virsmas temperatūra ir ap $-235\text{ }^{\circ}\text{C}$, tādēļ slāpekļa un oglekļa monoksīda ledi ir blīvi un ne tik trausli kā ūdens ledus, un tas rada priekšnoteikumus ledus plūšanai. Uz Plutona sastopama plaša reljefa formu daudzveidība, ieskaitot slāpekļa ledus plūsmas struktūras, kuras var uzskatīt par ledāja reljefa formām. Pundurplanētas kalnos eksistē ieleju ledāji, piemēram, pa 3–8 km platu ieleju *Sputnik Planitia* apgabala līdzenumā izplūst ledus masas, veidojot priekškalnu ledāja lobu.

MARSA LEDĀJI

Uz Marsa līdzīgi kā uz Zemes eksistē ledāji. Gan Marsa dienvidu, gan ziemeļu puslodē atrodas polārie segledāji. Vidējos platumu grādos pastāv dažādas ledājiem līdzīgas formas, un, visticamāk, pat Marsa tropos zem putekļu kārtas ir saglabājies ledus. Kopumā Marsa virsmas tuvumā atrodas vismaz 21 miljons kubikkilometru ledus – tas ir pietiekami, lai ar ledu pārklātu visu Marsu 35 m biezumā. Iespējams, Marsa dziļēs atrodas pat vēl lielāks ledus apjoms.

Lielāko daļu Marsa atmosfēras veido oglekļa dioksīds, tādēļ tas kopā ar ūdeni atrodams arī Marsa ledus sastāvā. Marsa ziemeļu polārā segledāja diametrs sasniedz 1100 km (Antarkīdas ledus vairogā platākajā vietā gan ir aptuveni piecas reizes lielāki). Dienvidu polārā segledāja diametrs sasniedz tikai 400 km, un to pretstatā ziemeļu segledājam klāj bieža oglekļa dioksīda kārtas. Kopumā dienvidu polārais segledājs ir biežāks, un tas sasniedz 3,7 km biezumu (nedaudz mazāk nekā Antarkīdā), tādēļ abiem segledājiem ir līdzīgs tilpums.

Radara mērījumi liecina, ka ziemeļu puslodes segledājs ir līdz 2 km biezs. To galvenokārt veido ūdens ledus, bet ziemā Marsa atmosfērā esošais oglekļa dioksīds izkrīt kā cietie nokrišņi, radot ap vienu metru biezu ledus slāni. Vasarā oglekļa dioksīds iztvaiko un atgriežas atmosfērā. Ziemeļu polārā segledāja spirālveida forma (99. att.) ir veidojusies galvenokārt vēja darbības rezultātā. Spēcīgiem katabatiskajiem vējiem ir nozīmīga loma ledus vairoga morfoloģijas veidošanā, jo tie pārvieto ledus daļiņas no centra uz malām spirālveida plūsmās, līdzīgi kā Koriolisa efekts



99. att. Marsa ziemeļu polārais segledājs *Planum Boreum*. Tā labajā pusē redzams kanjons *Chasma Boreale*, kura izmēri līdzinās Lielajam kanjonam Arizonā ASV. Avots: NASA/JPL-Caltech (E. DeJong, J. Craig, M. Stetson).

uz Zemes izraisa ciklonu rotāciju. Šie spirālveida topogrāfiskie viļņi veido grēdas un ielejas simtiem kilometru garumā. Attālums starp tām sasniedz 60 km, bet virsmas amplitūda – dažus simtus metru. Līdzīgas struktūras, tikai daudz mazākas, ir novērotas Antarktīdā, un tās sauc par sniega megakāpām.

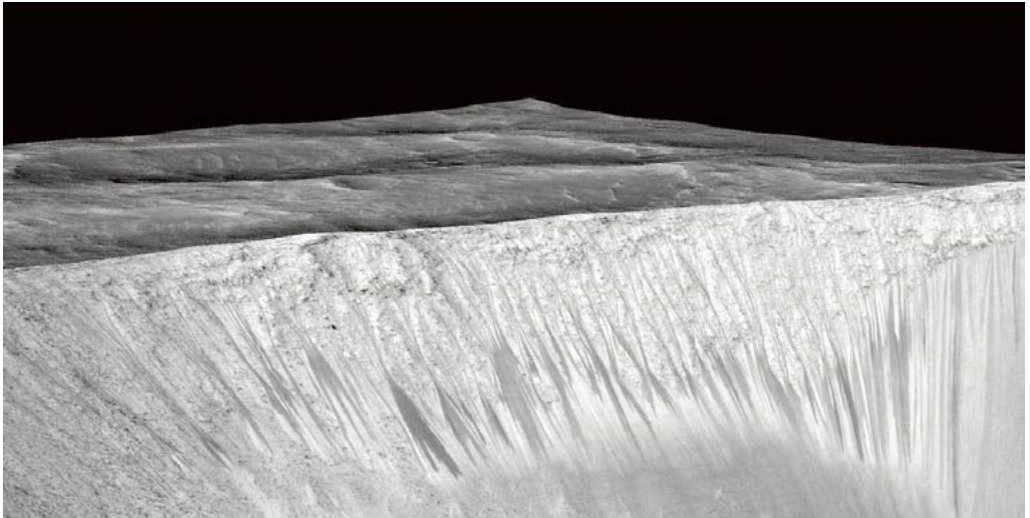
Zinātnieki ir noskaidrojuši, ka uz Marsa pirms 2,1–0,4 miljoniem gadu bija plaši izplatīti apledojumi, un patlaban, iespējams, uz Marsa ir starpleduslaikmets, tāpat kā uz Zemes. Marss ir piedzīvojis vismaz 40 globālas klimatiskās izmaiņas pēdējo 5 miljonu gadu laikā. Apledojumi rodas Marsa rotācijas ass sašķiebuma un orbītas variāciju (ekscentritātes) periodisku izmaiņu dēļ. Rotācijas ass sašķiebums Marsam var būt daudz lielāks nekā Zemei, tas var sasniegt daudzus desmitus grādu. Datorsimulācijas rāda, ka Marsa rotācijas ass sašķiebums par 45 grādiem radītu ledāju veidošanos mazo platuma grādu reģionos, kur sastopamas kādreizēju ledāju reljefa formas. Līdzīgi arī Marsa orbītas ekscentritāte var mainīties divreiz lielākā amplitūdā nekā Zemei (Zemes rotācijas asi, pretstatā Marsam, stabilizē Zemei proporcionāli lielais Mēness). Ja rotācijas ass sašķiebums ir liels, polārie reģioni saņem vairāk Saules radiācijas, un tas veicina segledāja sublimāciju un palielina tvaika daudzumu atmosfērā. Globālās atmosfēras plūsmas pārvieto mitro gaisu no lielajiem platuma grādiem uz mazajiem un sekmē ledāju veidošanos ārpus polārajiem

apgabaliem, kur klimats ir vēsāks. Tur tvaiks izkrīt sniega veidā un laika gaitā veido ledājus. Ziemeļu puslodes segledāju veido atsevišķi ledus un putekļu slāņi, kas liecina par nozīmīgām klimata pārmaiņām planētas vēsturē. Ledus sublimācijas un atkārtotas veidošanās procesi izraisa ledus un putekļu slāņojumu: daļēji ledum sublimējot, tas saglabājas zem putekļu slāņa, līdz virs tā izveidojas jauna ledus sega.

Teorētiski zem Marsa segledājiem varētu atrasties ūdens, ja tur pastāv ģeotermālas anomālijas. Līdz 2018. gadam ūdens zem Marsa segledājiem nebija identificēts, bet 2018. gada publikācijā žurnālā “Science” pirmo reizi tika ziņots par zemledāja ezera esamību zem Marsa dienvidu puslodes segledāja (Orosei et al., 2018). Aptuveni 20 km plats zemledāja ezers tika identificēts, analizējot radara datus. Visticamāk, šķidrums ūdens ezerā eksistē palielināta sāļuma dēļ, jo nav pietiekamu pierādījumu par ģeotermālā siltuma avotu zem ledāja. Tomēr arī šāda iespējamība netiek izslēgta, un, piemēram, 2019. gada publikācijā žurnālā “Journal of Geophysical Research: Planets” (Arnold et al., 2019) ir ziņots par modelēšanas rezultātiem, kas gūti, mēģinot paredzēt zemledāja ezeru atrašanās vietas. Izmantojot segledāja virsmas un gultnes reljefa modeļus, tika aprēķināts zemledāja hidrauliskais potenciāls. No vairāk nekā 1000 potenciālajām vietām zem ledāja, kur ezers varētu eksistēt ledus radītā spiediena un piemērotas zemledāja topogrāfijas dēļ, neviena nesakrīta ar 2018. gadā atklāto ezeru. Tādējādi zinātnieki uzsver, ka šis zemledāja ezers, iespējams, veidojies lokāla ģeotermāla siltuma ietekmē. 2020. gada publikācijā žurnālā “Nature Astronomy” (Lauro et al., 2020) atklājums par zemledāja ezera esamību zem Marsa segledāja tiek vēlreiz apstiprināts, turklāt, izmantojot jaunas radara signāla apstrādes procedūras, ir identificēti vēl trīs iespējamie zemledāja ezeri, katrs vairāku kilometru platumā.

Uz Marsa virsmas liels ūdens apjoms ilglaicīgi nevar eksistēt, jo Marsa globālā atmosfēras temperatūra ir $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ un atmosfēras spiediens – tikai 0,6% no Zemes atmosfēras jūras līmenī. Tomēr ir zināms, ka Marsa atmosfērā ir ļoti neliels ūdens tvaika daudzums. Ņemot vērā, ka uz ekvatora saulainās nogāzēs var eksistēt pozitīvas temperatūras, īslaicīga ūdens klātbūtne uz Marsa virsmas ekvatora tuvumā nav izslēdzama. Vietām Marsa substrātā atrodas sālsūdens. Tā sasaldēšanas temperatūra ir pietiekami zema, lai tas varētu eksistēt kā šķidrums ūdens. Iespējams, šis ūdens vietām īslaicīgi sasniedz arī Marsa virsmu. Potenciālie pierādījumi ir atrodami vairākos Marsa krāteros, piemēram, Garni krāterī, kura nogāzēs redzami vairākus simtus metru gari veidojumi, kas atgādina gravas (100. att.). Pastāv zinātniska hipotēze, ka tos veido sālsūdens.

Mūsdienās Marsa vidējos platumā grādos eksistē dažādi ledājiem līdzīgi veidojumi, piemēram, ziemeļu puslodes *Protonilus Mensae* reģionā, kur pa ieleju līdzenumā izplūstošais ledājs (101. att.) atgādina pjedmonta tipa ledājus uz Zemes. Tā



100. att. Garni krātera nogāze ar vairākus simtus metru gariem lineāriem veidojumiem, kuri atgādina gravas un, iespējams, veidojušies saistībā ar sālsūdens plūsmām substrātā. Attēls izveidots, apvienojot ortorektificētu attēlu un digitālo virsmas modeli. Avots: NASA/JPL-Caltech.



101. att. Ledājam līdzīga forma Marsa ziemeļu puslodē. Avots: NASA/JPL-Caltech.

malas norobežo gala morēnām līdzīgi veidojumi. Mūsdienu Marsa ledāji ir klāti ar atlūzām un putekļiem, un tiem līdzīgi veidojumi uz Zemes ir sastopami gan Antarktīdā, gan augstkalnos. Kopumā uz Marsa ir atklāti vairāk nekā 1300 ledājiem līdzīgi veidojumi, kuri, visticamāk, ir atliekas no kādreiz eksistējušām daudz lielākām ledus masām. Lai gan pierādījumi par daudzskaitlīgiem ledājiem uz Marsa ir pārlicinoši, ledāju veidotas reljefa formas ir sastopamas daudz mazākā skaitā. Visticamāk, tas ir Marsa zemāko temperatūru dēļ, kas ierobežo ledāju pārvietošanās un erozijas spēju, jo tam ir nepieciešama šķidra ūdens klātbūtne ledāja gultnē un nogulumos. Dažviet ir atrodamas tādas ledāju veidotas reljefa formas kā galamorēnas, cirki un ielejas, drumlini vai, piemēram, osi, kuri izplatīti dienvidu polārajā reģionā un norāda uz ledus vairoga eksistenci Marsa pagātnē.

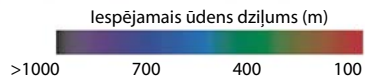
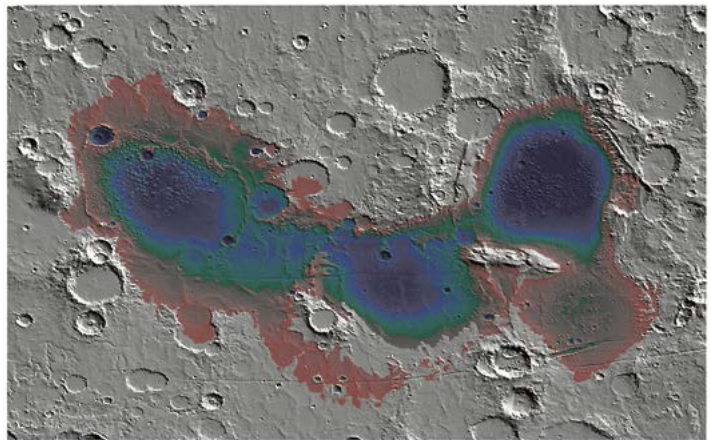
ŪDENS UZ MARSĀ PAGĀTNĒ

Pirms četriem miljardiem gadu, kad Marss bija ģeoloģiski aktīvs, uz tā atradās arī jūras, piemēram, Eridānas (*Eridania*) ezers vai jūra (102. att.). Tā virsma aizņēma 1,1 miljonu kvadrātkilometru un dziļums sasniedza 2,4 kilometrus. Eridānas jūra bija lielāka, piemēram, par Kaspijas jūru uz Zemes, bet izsīkstot tā sadalījās vairākos nelielos ezeros Noasa (*Noachian*) perioda beigās. Šajā laikā Marsa dienvidu augstienēs eksistēja arī vismaz 200 citi ezeri. Eridānas ezera gultnē ir atrasts vairāk nekā 400 m biezs nogulumu slānis, ko veido tādi minerāli kā saponīts, vizlas, serpentīni, magnija, dzelzs un kalcija karbonāti, kā arī, iespējams, dzelzs sulfīdi, kas veidojās dziļā ūdenī hidrotermālos procesos.

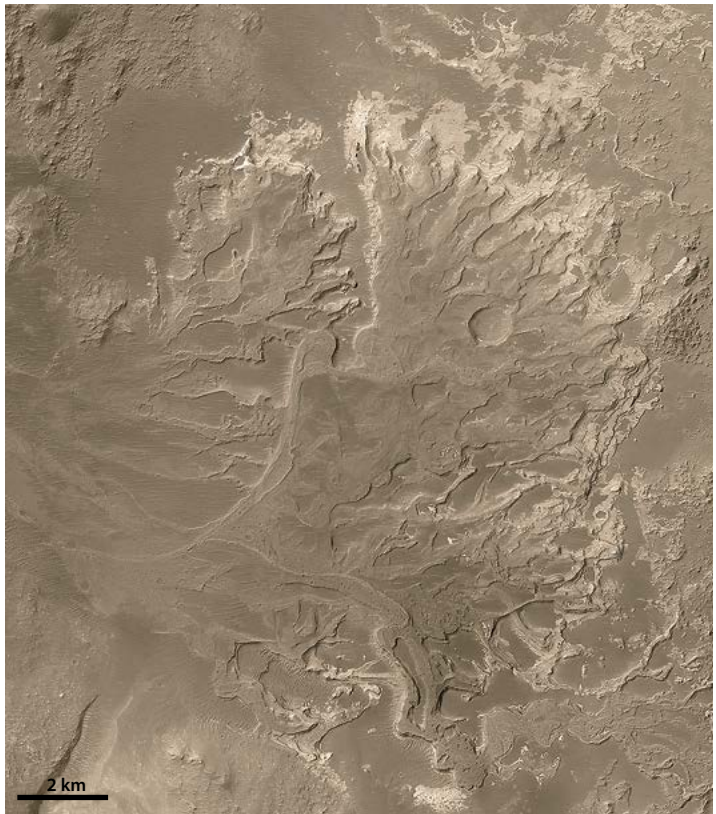
Uz Marsa virsmas ir atrastas daudzas liecības par ūdens aktivitāti pagātnē. Viens no pirmajiem atklājumiem, ka Marsa ielejās reiz eksistēja ilglaicīga šķidrums plūsma ar ūdenim atbilstošām īpašībām, līdzīgi kā Zemes upēm, bija Ebersvaldes (*Eberswalde*) deltas (103. att.) atklāšana 2002. gadā. Tā kā mūsdienās delta ir liti-ficēta, respektīvi, to veidojošie ieži ir cieti un sacementēti, tā sniedza pirmo nepāprotamo pierādījumu, ka daži Marsa ieži reiz izgulsnējās šķidrā, visticamāk, ūdens vidē. Deltu veido daudzi meandrējoši kanāli, kuri mūsdienās reljefā atspoguļojas kā likumoti vaļņi. Visticamāk, kādreiz deltu klāja nogulumi, kuri iespējamās vēja erozijas dēļ mūsdienās vairs nav sastopami, bet ir saglabājusies kādreizējā delta, jo to veido izturīgāki un cietāki ieži.

Šobrīd uz Marsa ir atklāts jau vairāk par 40 000 upju ieleju. Tomēr ne visi zinātnieki uzskata, ka šīs upes veidojušās Marsa virsūdens noteces rezultātā, jo tam būtu nepieciešams ilgstoši silts un mitrs klimats. 2020. gada publikācijā žurnālā “*Nature Geoscience*” (Galofre et al., 2020) salīdzināti dažādu procesu fizikālo modeļu

102. att. iespējamo ūdens dziļumu kārtojums Eridānas jūrā. Attēlā parādīts 850 km plats Marsa apgabals. Krāsu skala attēlo metrus. Avots: NASA/JPL-Caltech.



103. att. Ebersvaldes fosilā delta uz Marsa. Attēls no Marsa globālā izpētes aparāta (*Mars Global Surveyor*) Marsa orbītas kameras (*Mars Orbiter Camera*) Nr. MOC2-1225, 2005. gada 20. septembris. Avots: NASA/JPL-Caltech.



radītie upju ieleju morfometriskie parametri ar Marsa dienvidu puslodes augstieņu upju ieleju morfometriskajiem parametriem un secināts, ka dominējošie procesi Marsa upju veidošanā bija zemledāja un fluviālā erozija. Tas nozīmē, ka liela daļa šo upju, iespējams, veidojās ledājūdeņu erozijas dēļ kā zemledāja kanāli. Šim secinājumam var būt nozīmīga ietekme uz zinātnieku izpratni par Marsa klimatu un ledāju izplatību pagātnē. Esošie Marsa klimatiskie modeļi liecina, ka pirms 3,8 miljardiem gadu Marsa klimats varēja būt daudz aukstāks mazākas Saules radiācijas intensitātes dēļ, un tas apstiprina potenciālo ledāju eksistenci.

6. NODAĻA

NOZĪMĪGĀKIE MŪSDIENU LEDUS VAIROGU ATKLĀJĒJI UN PĒTNIEKI

Viens no nozīmīgākajiem mūsdienu ledus vairogu, īpaši Grenlandes un Arktikas, pētniekiem bija Fritjofs Nansens (*Fridtjof Nansen*, 1861–1930), un viņa sasniegumus aprakstījis arī Latvijas zināmākais polārpētnieks Leonīds Slaucītājs (1899–1971), kurš kopā ar latviešu sabiedrisko darbinieku, publicistu un diplomātu Alfrēdu Bīlmani (1887–1948) 1934. gadā izdevis monogrāfiju “Fridtjofs Nansens”. (Paša L. Slaucītāja biogrāfija ir lasāma šeit: <https://web.archive.org/web/20160305090328/http://foto.lu.lv/avize/19981999/ua13/leo.htm>). Zīmīgi, ka L. Slaucītājs ir bijis arī vienīgais latvietis, kurš 20. gadsimta 50. gados vadījis ģeofizikālos pētījumus trīs antarktiskajās ekspedīcijās no Argentīnas.

Vēl viens no nozīmīgākajiem Grenlandes pētniekiem bija vācu polārpētnieks un ģeofiziķis Alfrēds Lotārs Vēģeners (*Alfred Lothar Wegener*, 1880–1930). Viņš 20. gadsimta sākumā organizēja četras ekspedīcijas uz Grenlandi. To laikā tika veikti nozīmīgi glacioloģiskie, meteoroloģiskie un ģeofizikālie pētījumi. A. Vēģeners pirmais Grenlandē izveidoja trīs polārstacijas un pārziemoja tās ledus vairoga vidienē. Viņš pirmais veica ledāju urbšanu Grenlandē un pēc seismiskajiem mērījumiem secināja, ka ledus vairogs ir vismaz 2700 m biezs.

Pirmajā Grenlandes ekspedīcijā A. Vēgeners kā meteorologs piedalījās 1906. gadā un konstruēja tur pirmo meteoroloģisko staciju. Ekspedīcija piedzīvoja arī lielu neveiksmi, jo izbraucienā ar suņu pajūgu bojā gāja ekspedīcijas vadītājs un divi citi dalībnieki. Neveiksmīgi iesākās arī otrā ekspedīcija, kurā piedalījās Vēgeners. Pirms došanās iekšzemē ekspedīcijas dalībniekus gandrīz nogalināja aisbergs, kurš atšķēlās no ledāja malas. Ekspedīcijas vadītājs dānis Johans Peters Kohs (*Johan Peter Koch*, 1870–1928), iekrītot ledāja plaisā, salauza kāju. Pēc vairāku mēnešu ilgas atveseļošanās J. Kohs ar A. Vēgeneru atgriezās Grenlandē, un viņi bija pirmie cilvēki, kuri pārsieca uz iekšzemes ledus Grenlandes ziemeļaustrumos. Pārsiešanas laikā viņi izurba 25 m garu ledus serdeni. Savukārt 1913. gada vasarā abi polārpētnieki devās pāri ledus vairogam un veica divreiz garāku attālumu nekā F. Nansens 1888. gadā. Ekspedīcijas noslēgumā komanda gandrīz gāja bojā no bada, nespēdami atrast vienkāršu ceļu cauri plaisainam ledum. Kad



104. att. Pēdējā fotogrāfija, kurā redzams izcilais Grenlandes pētnieks Alfrēds Vēgeners kopā ar inuītu kolēģi Rasmusu Villumsenu. Fotografēts 1930. gada 1. novembrī uz Grenlandes ledus vairoga neilgi pirms abu nāves. Avots: *Wikimedia Commons*.

bija apēsti pēdējie suņi un Islandes zirgi, viņus nejauši izglāba kāds garīdznieks no Upernavikas.

A. Vēgenera pēdējās ekspedīcijas laikā 1930. gadā tika izveidotas trīs pastāvīgas polārstacijas, kur tika veikti ledus biezuma un meteoroloģiskie mērījumi. Šī apjomīgā un loģistiski sarežģītā ekspedīcija pārtrauca Vēgenera dzīves gājumu. Ekspedīcijā tika izveidota Eismites (*Eismitte*) polārstacija Grenlandes ledus vairoga vidienē, kur bija jāpārziemo diviem pētniekiem. Diemžēl jau vasaras beigās Eismites polārstacijā sāka izbeigties degviela, tādēļ A. Vēgeners organizēja apgādes misiju ar suņu pajūgu no Rietumu polārstacijas. Gaisa temperatūra misijas laikā sasniedza -60 °C, tādēļ vācu meteorologam nācās amputēt kājas pirkstus ar kabatas nazi bez anestēzijas. Oktobrī Vēgeners ar inuītu kolēģi Rasmusu Villumsenu (*Rasmus Villumsen*, 1907–1930) (104. att.) devās projām no Eismites polārstacijas ar diviem suņu pajūgiem, jo polārstacijā krājumu pietika tikai trīs cilvēkiem. Suņiem ēdiena nebija, tādēļ tie cits pēc cita tika nogalināti, lai pabarotu pārējos, līdz palika tikai viens suņu pajūgs un Vēgeneram nācās slēpot pašam. Neviens no vīriem neatgriezās Rietumu polārstacijā. A. Vēgenera ķermenis vēlāk tika atrasts un apbedīts ledū, savukārt Villumsens netika atrasts.

A. Vēgenera dzīves stāsts ļoti labi ilustrē sākotnējo polāro ekspedīciju bardzību un arī to, ka par spīti piedzīvotajām neveiksmēm ir iespējams veikt nozīmīgus zinātniskus atklājumus. Iespējams, būtiskākais A. Vēgenera pienesums zinātnei, neskaitot Grenlandes pētījumus, bija kontinentu dreifa teorijas (plātņu tektonikas teorijas) izstrādāšana 1926. gadā, tā vēlāk pilnībā mainīja zinātnieku izpratni par Zemes attīstību (sākotnēji šo teoriju lielākā daļa zinātnieku noraidīja un izsmēja).

Savukārt Antarktīda pasaules kartēs tika iezīmēta jau 16. gadsimtā. Tā tika atēlota kā hipotētisks kontinents. Viena no pirmajām detalizētajām pasaules kartēm, kurā tika iekļauta Antarktīda, ir flāmu kartogrāfa Abrahama Ortēliusa (*Abraham Ortelius*, 1527–1598) 1570. gada pasaules karte “*Typvs Orbis Terrarvm*” (105. att.).

Antarktīkas reģiona izpēte sākās 18. gadsimta beigās, kad kapteinis Džeimss Kuks (*James Cook*, 1728–1779) (106. att.) veica vienu no iespaidīgākajiem ceļojumiem pasaules vēsturē. Viņš ar komandu burāja gar pakledus robežu un pierādīja, ka Antarktīdas kontinents, kurš tolaik tika dēvēts par *Terra Australis Incognit*, neaizņem lielāko dienvidu puslodes daļu, kā tika teorētiski uzskatīts, tomēr pašu Antarktīdu viņš tā arī neatklāja. Dž. Kuks pirmais izvirzīja hipotēzi, kas balstās vismaz uz netiešiem novērojumiem, ka tālu dienvidos ir jābūt sauszemei, kuras ledāji rada okeānā peldošos aisbergus.

Pēc Džeimsa Kuka otrā jūras ceļojuma (1772–1775) interese par potenciālo dienvidu kontinentu apsīka un atjaunojās tikai 19. gadsimta sākumā, kad nozīmīgas ekspedīcijas īstenoja F. G. Belinshauzens, Dž. Bisko, Dž. K. Ross un citi.



105. att. 1570. gada pasaules karte "Typvs Orbis Terrarvm", kurā flāmu kartogrāfs Abrahams Ortelius ir iezīmējis iedomātās "Terra Australis Incognita" aprises, kā arī iespējamo sauszemi ap Ziemeļpolu. Avots: *Wikimedia Commons*.

106. att. Kapteinis Džeimss Kuks 1775. gadā. Viņš rokās tur paša izveidoto karti, kurā iezīmēts Dienvidu okeāns. Avots: *Wikimedia Commons*.

Fabiāns Gotlībs jeb Fadejs fon Belinshauzens (*Fabian Gottlieb Thaddeus von Bellingshausen*, 1778–1852), vācbaltu izcelsmes Krievijas Impērijas jūrasbraucējs, piedzima 1778. gadā Sāmsalā. F. G. Belinshauzena ekspedīcija bija otrā (pēc Dž. Kuka), kuras laikā tika apkuģots apkārt Antarktīdai un nokļūts tolaik vistālāk uz dienvidiem (107. att.). Šī pirmā krievu antarktiskā ekspedīcija ilga no 1819. līdz 1821. gadam, un tajā piedalījās divi kuģi – “Vostok” un “Mirnij”. Kuģošanas laikā abiem kuģiem izdevās noturēties tādā attālumā, kas apkalpēm ļāva saskatīt vienai otru. F. G. Belinshauzena un komandiera Mihaila Lazareva (*Михаил Петрович Лазарев*, 1788–1851) ekspedīcija tiek uzskatīta par pirmo, kurā jūrasbraucējiem izdevies ieraudzīt Antarktīdu (šelfa ledāju, kurš vēlāk tika nodēvēts par Fimbula šelfa ledāju). Tas notika 1820. gada 27. janvārī, un tādējādi viņi tiek uzskatīti par Antarktīdas atklājējiem. Izrādot cieņu šim atklājumam un nolūkā pievērst uzmanību pasaules klimata pārmaiņām, 200 gadus vēlāk jūrasbraucienā pa Belinshauzena pēdām devās igauņu jahta “Admirālis Belinshauzens”, uz kuras klāja Antarktīdu apciemoja arī Igaunijas prezidente Kersti Kaljulaida.

Protams, ka ieraudzīt Antarktīdu pirmo reizi steidza vairāki jūrasbraucēji, un tas izvērtās par sava veida sacensībām. Ir zināms, ka bez Belinshauzena Antarktīdu 1820. gadā ieraudzīja arī amerikāņu roņu mednieks un pētnieks Natenjels Brauns Pālmers (*Nathaniel Brown Palmer*, 1799–1877) un britu karaliskās flotes virsnieks Edvards Brensfīlds (*Edward Bransfield*, 1785–1852). E. Brensfīlds Antarktīdu (Triniti pussalu, kurā atrodas Antarktīdas kontinenta galējais ziemeļu punkts) ieraudzīja trīs dienas vēlāk par Belinshauzenu – 1820. gada 30. janvārī.

Angļu jūrasbraucējs Džons Bisko (*John Biscoe*, 1794–1843) bija trešais jūrasbraucējs, kurš apkuģoja Antarktīdas kontinentu. Viņš veica daudzus nozīmīgus atklājumus gar Antarktīdas pussalu, 1832. gadā atklājot Adelaidas salu, virkni salu, kas vēlāk tika nosauktas par Bisko salām, un Antarktīdas pussalas rietumu piekrasti, ko Bisko nosauca par Greiema Zemi. Šajā Antarktīdas apgabala ziemeļdaļā mūsdienās atrodas Ukrainai piederošā akadēmiķa Vernadska polārstacija, kas kļuva par bāzes vietu arī pirmajai Latvijas zinātniskajai antarktiskajai ekspedīcijai 2018. gadā.

Sers Džeimss Klārks Ross (*James Clark Ross*, 1800–1862) vadīja vairākas antarktiskās ekspedīcijas, atklājot un izpētot jūru, salu un šelfa ledāju, kuri vēlāk tika nosaukti viņa vārdā.

Pirmais, kurš Antarktīdā pārziemoja (1899. gadā) un veica vienus no pirmajiem šī kontinenta polārpētījumiem, ir norvēģis Kaštens Egebergs Borkgrevinks (*Carsten Egeberg Borchgrevink*, 1864–1934). Ekspedīcijā pirmo reizi Antarktīdas izpētes vēsturē tika izmantotas suņu vilktas kamanas. Tās kļuva par ļoti nozīmīgu vēlāko, īpaši britu, ekspedīciju sastāvdaļu. Borkgrevinks veica tolaik uz dienvidiem tālāko ceļojumu Antarktīdā, sasniedzot 78 paralēli.



108. att. R. Amundsena komanda pie Norvēģijas karoga Dienvidpolā 1911. gada decembrī. Avots: *Gutenberg* projekta publiskais īpašums (O. Bjaaland).

Pirms Borkgrevinka vistuvāk Antarktīdai (aiz dienvidu polārā loka) pārziemoja beļģu polāro ekspedīciju vadītājs Adriāns de Gerlahs (*Adrien de Gerlache*, 1866–1934), kura kuģis iestrēga ledū Belinshauzena jūrā. Gerlaha ekspedīcijā piedalījās arī Roalds jeb Ruāls Amundsens (*Roald Engelbregt Gravning Amundsen*, 1872–1928), kurš vēlāk 1911. gada 14. decembrī pirmais sasniedza Dienvidpolu (108. att.). Šie vīri kopā ar Robertu Falkonu Skotu, Ernestu Henriju Šekltonu, Nilu Oto Gustafu Nordenšeldu (*Nils Otto Gustaf Nordenskjöld*, 1869–1928) un Žanu Batistu Etjēnu Ogistu Šarko (*Jean Baptiste Étienne Auguste Charcot*, 1867–1936) bija galvenās personības Antarktīdas izpētes heroiskajā laikmetā 19. gadsimta pašās beigās un 20. gadsimta sākumā, kad tika organizētas daudzu valstu pirmās antarktiskās ekspedīcijas un veikti nozīmīgākie atklājumi Antarktīdā.

Nozīmīgus pētījumus Antarktīdā 20. gs. sākumā veica viens no dižākajiem polārpētniekiem – britu karaliskās flotes virsnieks Roberts Falkons Skots (*Robert Falcon Scott*, 1868–1912). Viņš sasniedza Dienvidpolu tikai mēnesi pēc R. Amundsena. Plaši zināmais traģiskais ceļojums beidzās ar Skota komandas nāvi 1912. gada 29. martā vai nedaudz vēlāk. Viņa komanda gāja bojā no aukstuma, bada un pārguruma, nerasniedzot 20 km attālumā novietotās pārtikas rezerves uz Rosa šelfa ledāja.

Savukārt neticamu izglābšanos 1916. gadā piedzīvoja īru polārpētnieka Ernesta Henrija Šekltona (*Ernest Henry Shackleton*, 1874–1922) komanda. Ekspedīcijas kuģis “Endurance” iesala



pakledū Vedela jūrā un vēlāk nogrima. Kuģa komanda E. H. Šekltona vadībā vairākus mēnešus dzīvoja uz pakledus cerībā, ka jūras ledus gabals viņus aiznesīs uz Polē salu. Diemžēl, kad viņi nonāca 97 km tuvu Polē salai, ceļš uz to nebija mērojams ledus dēļ. Ledus gabals, uz kuras atradās komandas nometne, sadalījās, un komanda ar glābšanas laivām sasniedza Elefantas salu Dienvidšetlandas salu arhipelāgā, pēc 497 dienām beidzot nokļūstot uz sauszemes. Tā kā Elefantas sala atrodas tālu no kuģu ceļiem, izglābšanās bija mazticama, tādēļ E. H. Šekltons kopā ar pieciem vīriem nolēma laivā (109. att.) doties līdz Dienvidzordžijas salai, kur mēdz uzturēties vaļu mednieki. Sasniegt viņiem izdevās tikai Dienvidzordžijas salas neapdzīvoto daļu, tādēļ Šekltons devās tālāk bīstamā 36 stundu pārgājienā pāri salas kalniem, līdz sasniedza vaļu mednieku staciju. Vēlāk viņam izdevās noorganizēt čliešu kuģi, kurš izglāba visus 22 cilvēkus uz Elefantas salas, kur tie bija pavadījuši četrus ar pusi mēnešus. Pēc neticamās izglābšanās E. H. Šekltons 1921. gadā atkal nolēma doties ekspedīcijā uz Antarktīdu, taču pirms tās, 1922. gada 5. janvārī, 47 gadu vecumā nomira ar sirdslēkmi.

Tiek uzskatīts, ka ar Šekltona ekspedīciju vai vēlāk ar viņa nāvi beidzies Antarktīdas izpētes heroiskais laikmets, kurā pētījumu izdošanās bija atkarīga no buru kuģiem, cilvēka un dzīvnieku fiziskā spēka.

Turpmākā Antarktīdas izpēte (2. tabula) notiek, iesaistot dažādus mehāniskus pārvietošanās līdzekļus, un šajā izpētes posmā

109. att. E. H. Šekltons ar saviem vīriem dodas palīdzības meklējumos no Elefantas salas 1916. gada 24. aprīlī. Iespējamais autors: Šekltona ekspedīcijas fotogrāfs F. Harlijs (*F. Hurley*). Fotogrāfija publicēta E. Šekltona grāmatā "South", ko 1919. gadā sagatavojusi izdevniecība *William Heinemann*.

2. tabula. Nozīmīgākās antarktiskās ekspedīcijas 20. gadsimtā

Beļģija	
1897–1899	Beļģijas antarktiskā ekspedīcija
Britu impērija / Nāciju Sadraudzība	
1898–1900	Dienvīdu Krusta ekspedīcija
1901–1904	R. Skota pirmā ekspedīcija
1907–1909	E. Šekltona pirmā ekspedīcija
1910–1913	R. Skota otrā ekspedīcija
1911–1914	D. Mavsona (<i>Douglas Mawson</i>) pirmā ekspedīcija
1914–1917	E. Šekltona otrā ekspedīcija
1921–1922	E. Šekltona trešā ekspedīcija
1929–1931	D. Mavsona otrā ekspedīcija
1934–1937	Greiema Zemes izpētes ekspedīcija
1943–1945	Operācija "Tabarin"
1955–1958	Transantarktiskā ekspedīcija
Francija	
1903–1905	Ž. B. Šarko pirmā ekspedīcija
1908–1910	Ž. B. Šarko otrā ekspedīcija
Vācija	
1901–1903	E. Drīgaļska (<i>Erich von Drygalski</i>) ekspedīcija ar kuģi "Gauss"
1911–1912	V. Filhnera (<i>Wilhelm Filchner</i>) ekspedīcija
1938–1939	Jaunšvābijas (<i>Neuschwabenland</i>) ekspedīcija (to organizēja nacistiskā Vācija)
Japāna	
1910–1912	Japāņu antarktiskā ekspedīcija
Norvēģija	
1910–1912	R. Amundsena ekspedīcija
1956–1960	Sestā norvēģu antarktiskā ekspedīcija
1957–1958	B. Lunkes (<i>Bernhard Luncke</i>) ekspedīcija
Padomju Savienība	
1955–1957	Pirmā Padomju antarktiskā ekspedīcija
1956–1958	Otrā Padomju antarktiskā ekspedīcija
Zviedrija	
1901–1904	Zviedrijas antarktiskā ekspedīcija
Amerikas Savienotās Valstis	
1928–1930	R. Bērda pirmā ekspedīcija
1939–1941	Savienoto Valstu Antarktiskā dienesta ekspedīcija
1946–1947	Operācija "Highjump"
1947–1948	Operācija "Windmill"
1947–1948	F. Ronnes ekspedīcija
1955–1956	Operācija "Deep Freeze"

liela loma ir Amerikas Savienotajām Valstīm. 1929. gada 29. novembrī Dienvidpolu pirmo reizi pārlido ASV pilots Ričards E. Bērds (*Richard E. Byrd*), kurš vēlāk vadīja vairākas amerikāņu ekspedīcijas. No 1946. līdz 1947. gadam R. Bērda vadībā tika īstenota ASV Jūras kara flotes Antarktikas attīstības programma – operācija “Highjump”. Tā bija lielākā ekspedīcija, kāda jebkad īstenota Antarktīdā, un tā iekļāva 4700 cilvēkus, 13 kuģus un 33 lidaparātus. Ekspedīcijas primārais mērķis bija izveidot Antarktīdas polārstaciju – Mazā Amerika IV (*Little America IV*). Līdz ar zinātniskiem pētījumiem misijas uzdevumi ietvēra personāla apmācību un ekipējuma testēšanu skarbos polāros apstākļos, potenciālo polārstaciju izveidošanas un uzturēšanas izpēti, metožu attīstību gaisa bāzu izveidei uz ledus, kā arī ASV suverenitātes nostiprināšanu lielākajā praktiski izmantojamā Antarktīdas apgabalā. Pēdējo uzdevumu, protams, ASV publiski noliedza līdz pat ekspedīcijas beigām.

Pēc šīs ekspedīcijas tika organizēta vēl viena izpētes un apmācības programma – operācija “Windmill”. Savukārt no 1947. līdz 1948. gadam norvēģu izcelsmes amerikāņu inženieris un polārpētnieks Finns Ronne (*Finn Ronne*) organizēja amerikāņu ekspedīciju, kurā tika izpētīta un kartēta pēdējā nezināmā Antarktīdas piekraste Pālmera Zemē un gar Vedela jūru, pierādot, ka Antarktīda ir viens kontinents un nesastāv no divām daļām, jo Vedela un Rosa jūras nav savienotas. Viņa vārdā vēlāk tika nosaukts otrs lielākais šelfa ledājs. Finna Ronnes sieva Edīte Ronne (*Edith Ronne*) un ekspedīcijas galvenā pilota sieva Dženija Darlingtone (*Jennie Darlington*) kļuva par pirmajām sievietēm, kuras pārziemoja Antarktīdā.

No 1956. gada ASV turpināja īstenot daudzas misijas, kas tika dēvētas par “Operation Deep Freeze”, tās nodrošināja konstantu ASV klātbūtni Antarktīdā. 20. gadsimta 50. gados Antarktīdas izpētei tika pievērsta pastiprināta uzmanība, tostarp Starptautiskā ģeofizikas gada laikā no 1957. gada 1. jūlija līdz 1958. gada 31. decembrim. Šajā periodā Antarktīkā tika ierīkotas vairāk nekā 50 polārstacijas, atjaunota zinātniskā sadarbība starp rietumu un austrumu valstīm, kas bija apsīkusi aukstā kara sākumā. Gandrīz 70 valstis piedalījās dažādos Starptautiskā ģeofizikas gada zinātniskajos projektos. Neskaitot Antarktikas izpēti, tika veikti nozīmīgi pētījumi vairākās Zemes zinātņu jomās un orbītā tika palaisti pirmie mākslīgie pavadoņi. Padomju Savienības satelīts Sputņik-1 bija pirmais Zemes mākslīgais pavadoņs, tas orbītā tika palaists 1957. gada 4. oktobrī.

Starptautiskais ģeofizikas gads bija turpinājums iepriekš notikušajiem Starptautiskajiem polārajiem gadiem (1882.–1883. gadā un 1932.–1933. gadā), kuru laikā tika veikti starptautiski nozīmīgi ar polārajām teritorijām saistīti zinātniskie pētījumi. Trešais Starptautiskais polārais gads ilga no 2007. gada līdz 2009. gadam.

1956. gadā Dienvidpolā ASV jurisdikcijā tika izveidota Amundsenskota-Sautpola polārstacija. Tā bija pirmā reize, kad cilvēki Dienvidpolā pārziemoja. Pirmās



110. att. Amundsenskota-Sautpola polārstacija Dienvidpolā 2018. gada 5. decembrī. Zīme priekšplānā norāda uz ģeogrāfiskā Dienvidpola atrašanās vietu. Tā katru gadu 1. janvārī tiek pārvietota ledus kustības dēļ. Avots: NSF, ASV Antarktīkas programmas foto bibliotēka (*M. Lucibella*).

stacijas būves pastāvēja līdz 1975. gadam, kad tās tika pamestas, bet 2010. gadā tās tika daļēji demontētas. Atlikušās būves atrodas zem vairāk nekā 10 m biezas sniega segas. Patlaban tur darbojas trešais šīs polārstacijas komplekss, kas būs uz regulējamām kolonnām, lai polārstaciju varētu pacelt augstāk, kad sniega sega kļūs pārāk bieza. Šādā veidā mūsdienās ir uzbūvētas vairākas polārstacijas. Amundsenskota-Sautpola polārstacija ir unikāla, jo tā atrodas vistālāk uz dienvidiem pasaulē – faktiski pie paša ģeogrāfiskā Dienvidpola (110. att.). Tā ir nosaukta par godu pirmajiem diviem polārpētniekiem, kas sasniedza Dienvidpolu: Roaldam Amundsenam un Robertam Skotam. Amundsenskota-Sautpola atrodas 2835 m augstumā uz Austrumantarktīkas ledus vairoga. Gaisa temperatūra šajā vietā vidēji gadā ir $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$, savukārt zemākā temperatūra ir sasniesusi $-82,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Mūsdienās Antarktīkā un Subantarktīkā darbojas aptuveni 100 polārstacijas. Puse no tām ir sezonālas, savukārt otra puse – vissezonas.

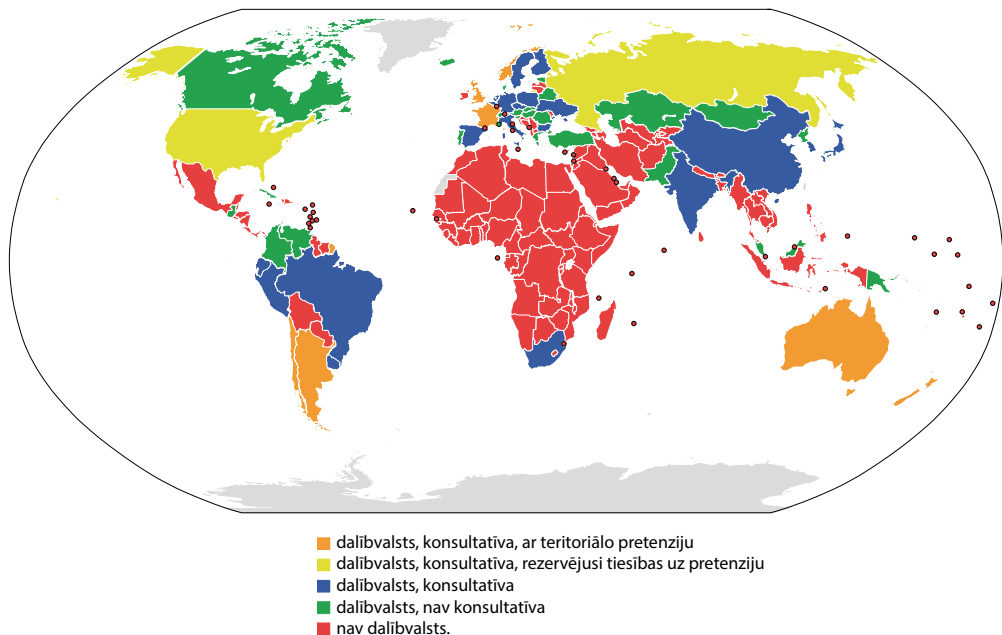
Starptautiskā ģeofizikas gada beigās noslēdzās arī pirmā transantarktiskā ekspedīcija caur Dienvidpolu, ko organizēja Nāciju Sadraudzība (*Commonwealth of Nations*), valstu apvienība, kurā ietilpst Lielbritānija un vairāk nekā 50 tās bijušo koloniju. Šo transantarktisko ekspedīciju no Vedela jūras puses vadīja britu

ģeologs un polārpētnieks Vivians Fukss (*Vivian Fuchs*), savukārt jaunzēlandiešu alpīnists sers Edmunds Hilarijs (*Edmund Hillary*) izveidoja atbalsta bāzi Rosa salā. V. Fukss Antarktīdas šķērsošanu uzsāka 1957. gadā kopā ar divpadsmit vīriem un sešiem mehāniskiem transportlīdzekļiem. Ekspedīcijas maršruts veda no Šekltonas bāzes Vedela jūras piekrastē līdz Rosa jūras piekrastei. E. Hilarija uzdevums bija sagatavot ekspedīcijas ceļu no Rosa salas līdz Dienvidpolam, izvietojot pārtikas noliktavas. E. Hilarija komanda izmantoja iespēju un nokļuva Dienvidpolā pirmie – 1958. gada 3. janvārī, tādējādi viņi pēc 56 gadu pārtraukuma bija trešie cilvēki (aiz R. Amundsena un R. Skota), kuri sasniedza Dienvidpolu pa sauszemi, un pirmie, kas to izdarīja, izmantojot motorizētos transportlīdzekļus (amerikāņu komanda, kas 1956. gadā izveidoja Amundsenskota-Sautpola polārstaciju Dienvidpolā, to sasniedza, izmantojot gaisa transportlīdzekļus). V. Fuka komanda Dienvidpolu sasniedza 1958. gada 19. janvārī, un tur viņus sagaidīja E. Hilarijs ar saviem vīriem. Hilarija komanda atpakaļceļu veica, izmantojot lidmašīnu, savukārt V. Fuks devās uz Antarktīdas otru krastu, un 2. martā, komandai 99 dienās pieveicot 3473 km garu ceļu, Antarktīda pirmo reizi tika šķērsota.

Ekspedīcijā atbalstam un pārtikas rezervju izvietošanai plaši tika izmantoti lidaparāti. 1957. gada decembrī četri ekspedīcijas vīri veica 11 stundu garu lidojumu pāri Antarktīdai no Šekltona bāzes līdz Skota bāzei, šķērsojot Dienvidpolu. Tādējādi šis bija arī pirmais nepārtrauktais transantarktiskais pārlidojums. Sers Edmunds Hilarijs bija ne tikai trešais, kurš sasniedza Dienvidpolu, bet arī pirmais cilvēks, kurš sasniedzis abus Zemes polus un augstāko Zemes virsotni (1953. gadā viņš kopā ar šerpu Tenzingu Norgaju uzkāpa Everestā, bet 1985. gadā piedalījās lidojumā uz Ziemeļpolu ar komandu, kuras sastāvā bija vairāki pasaules izcilāko sasniegumu veicēji, ieskaitot astronautu Nīlu Ārmstrongu).

Pirmā Antarktīdas šķērsošanas ekspedīcija, kurā netika izmantoti motorizēti transportlīdzekļi, vienīgi suņu pajūgi, norisinājās 1990. gadā. Šī starptautiskā transantarktiskā ekspedīcija bija arī garākā vēsturē, jo seši ekspedīcijas dalībnieki no ASV, Francijas, Padomju Savienības, Lielbritānijas, Ķīnas un Japānas veica 6020 km garu ceļu 220 dienās. Neizmantojot ne motorizētus transportlīdzekļus, ne arī suņu pajūgus, Dienvidpolu arī 1990. gadā sasniedza un pirmo reizi Antarktīdu šķērsoja alpīnists Reinholds Mesners (*Reinhold Messner*) ar Arvedu Fuku (*Arved Fuchs*) (Mesners, 2004). Viņi izmantoja slēpes un pie ķermeņa piestiprināmu buru, kas ļāva ātrāk pārvietoties, kad to ļāva laikapstākļi. A. Fuks turklāt bija pirmais cilvēks, kurš sasniedza abus polus viena gada laikā.

Pēc šīs ekspedīcijas kā pilnībā nerealizēts izaicinājums bija palikusi tikai Antarktīdas šķērsošana vienatnē, neizmantojot nekādu atbalstu no citiem (piemēram, pārtikas novietņu izveidošanu maršrutā no gaisa) un nekādus palīgīdzekļus,



111. att. Antarktikas Līguma sistēmas dalībvalstis. Avots: Wikimedia Commons.

izņemot slēpes. To 2018. gada decembrī neatkarīgi viens no otra paveica amerikāņu atlēts Kolins O’Bredijs (*Colin O’Brady*) un brits Luiss Rads (*Louis Rudd*). O’Bredijs Antarktīdu 1500 km garumā šķērsoja divas dienas ātrāk, un tam bija nepieciešamas 54 dienas. Abi vīri Antarktīdu gan šķērsoja vienā no tās šaurākajām vietām – sāka Ronnes–Filhnera šelfa ledāja sākumā un beidza Rosa šelfa ledāja sākumā, tādējādi Antarktīdas šķērsošanā nākotnes izaicinājumu joprojām netrūkst, jo platākajā vietā šis kontinents sniedzas aptuveni 5500 km garumā. Līdz šim garāko Antarktīdas ceļojumu (5306 km), izmantojot tikai slēpes un gaisa pūķi, 2020. gada 4. janvārī paveica austrālietis Džefs Vilsons (*Geoff Wilson*), iepriekšējo rekordu pārsniedzot par 206 km. Tomēr Dž. Vilsons nešķērsoja Antarktīdu visā garumā, bet gan pēc Dienvidpola sasniegšanas atgriezās atpakaļ pa nedaudz citu maršrutu.

Starptautiskā ģeofizikas gada laikā uzsāktā zinātniskā sadarbība tika turpināta un oficiāli nostiprināta, izveidojot Antarktikas Līguma sistēmu (*Antarctic Treaty System*). Pirmais Antarktikas Līguma dokuments tika parakstīts 1959. gada 1. decembrī, un to

1961. gada 23. jūnijā ratificēja 12 valstis: Argentīna, ASV, Austrālija, Beļģija, Čīle, Dienvidāfrika, Francija, Japāna, Jaunzēlande, Lielbritānija, Norvēģija, PSRS. No šīm valstīm visas, izņemot Beļģiju, Dienvidāfriku, Japānu, ASV un PSRS, izvirzīja teritoriālās pretenzijas. Dažas no teritorijām, uz kurām ir izteiktas teritoriālās pretenzijas, pārklājas. Savukārt PSRS un ASV paturēja tiesības izteikt pretenzijas nākotnē.

Antarktiskas Līguma sistēma regulē starptautiskās attiecības Antarktikā, un tās ietvaros par Antarktiku uzskata visu sauszemes teritoriju un šelfa ledājus, kas atrodas uz dienvidiem no sešdesmitā dienvidu platuma grāda. Līgumā ir noteikts, ka Antarktika ir teritorija, kura izmantojama mierīgiem mērķiem, zinātnisko pētījumu veikšanai, un tajā aizliegta militārās aktivitātes. Svarīgi atzīmēt, ka Antarktiskas Līgums bija pirmais bruņošanās kontroles līgums starp pretstāvošām pusēm, un tas tika noslēgts aukstā kara laikā. 2019. gadā Antarktiskas Līgumu bija parakstījušas 54 valstis (111. att.), tostarp lielākā daļa Eiropas valstu, izņemot Latviju, Lietuvu, Īriju, Moldovu, Albāniju, Horvātiju, Serbiju, Bosniju un Hercegovinu, Melnkalni, Ziemeļmaķedonijas Republiku un Eiropas pundurvalstis, neskaitot Monako. Antarktiskas Līguma redakcija būs spēkā līdz 2041. gadam. Pēc tā teorētiski atsevišķi noteikumi var tikt pārskatīti, tostarp attiecībā uz derīgo izraķeņu izpēti un ieguvu.

7. NODAĻA

LATVIJAS ZINĀTNIEKU MŪSDIENU LEDĀJU PĒTĪJUMI

Mūsdienu ledāju pētījumus Latvijā veic Latvijas Universitātes ģeologi, kuri 2014. gadā sāka īstenot zinātniskās ekspedīcijas uz polārajiem apgabaliem. Pirmā zinātniskā ekspedīcija norisinājās centrālajā Islandē, aizsākot latviešu ģeofizikālos pētījumus mūsdienu ledājos. Turpmākās ekspedīcijas tika īstenotas gan uz Islandes, gan Grenlandes, Antarktikas un Svalbāras ledājiem (3. tabula). Nākamās grāmatas nodaļas ir veltītas šīm ekspedīcijām hronoloģiskā secībā, iepazīstinot gan ar to norisi, gan zinātniskajiem rezultātiem.

ISLANDE – 2014

2014. gada augustā notika Latvijas Universitātes ģeologu pirmā ekspedīcija uz Islandi, un ar šo ekspedīciju tiek aizsākti polārie pētījumi Latvijas Universitātē. Ekspedīcijā piedalījās Ģeoloģijas nodaļas doktorantūras studenti Kristaps Lamsters un Jānis Karušs un maģistrantūras students Dāvids Bērziņš (112. att.). Tādējādi par polāro pētījumu aizsācējiem Latvijas Universitātē uzskatāmi studenti.

Par ekspedīcijas galamērķi tika izvēlēts centrālās Islandes Hofsjokula ledus kupola izvadledājs Mūlajokuls (*Múlajökull*), kur uz ledāja tika veikti radiolokācijas

3. tabula. Latvijas Universitātes zinātnieku polāro ekspedīciju norises laiks un dalībnieki

Numurs pēc kārtas	Vieta	Gads	Dalībnieki
1	Islande	2014	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Dāvids Bērziņš
2	Islande	2015	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Dāvids Bērziņš, Aleksandrs Vlads
3	Grenlande	2016	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Māris Krievāns, Agnis Rečs, Reinis Pāvils
4	Islande	2017	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Māris Krievāns, Agnis Rečs
5	Antarktika	2018	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Māris Krievāns
6	Islande	2018	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Māris Krievāns, Jurijs Ješkins
7	Svalbāra	2019	Kristaps Lamsters, Jānis Karušs, Pēteris Džeriņš, Ingus Pērkons



112. att. 2014. gada Islandes ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Kristaps Lamsters, Dāvids Bērziņš, Jānis Karušs. Foto: K. Lamsters, 2014.



113. att. 2013. gada ceļojuma uz Islandi dalībnieki pie neliela ledāja Nauthagajokula (*Nauthagajökull*) blakus Mūlajokulam. No kreisās: Elīna Ruka, Sandijs Mešķis, Kristaps Lamsters, Āris Andersons, Armands Bernaus. Foto: K. Lamsters, 2013.

mērījumi ar mērķi novērtēt metodes izmantošanas iespējas ledāju pētījumos. Līdz šim Latvijas zinātnieki šādus pētījumus nebija veikuši, tādēļ ekspedīcijas galvenais uzdevums bija izmēģināt Latvijas uzņēmuma “Radar Systems” ražoto iekārtu – ģeoradaru – pētījumos uz ledāja. Kopumā ekspedīcijā tika iegūti daudzsoļoši rezultāti, kas iedvesmoja pētniekus jau pēc gada organizēt nākamo ekspedīciju, lai veiktu detalizētus pētījumus.

Ekspedīcijas galamērķis Mūlajokula izvadledājs izvēlēts, jo tas ir unikāls visā pasaulē – pie ledāja atklāts lielākais mūsdienu drumlinu lauks Islandē (Johnson et al., 2010). Drumlini ir reljefa formas, kas veidojas zem aktīvas ledus plūsmas, un tie ir sastopami ne tikai zem mūsdienu ledājiem un pie tiem, bet arī vietās, kuras klāja pleistocēna segledāji, tostarp Latvijā. Drumlinu veidošanās joprojām ir zinātnieku plaši diskutēts jautājums, un ir izvirzītas ļoti daudzas hipotēzes. Tādējādi ekspedīcijas

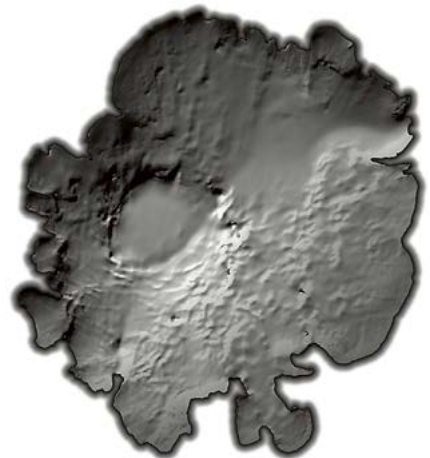
organizatoriem veikt mērījumus uz ledāja, zem kura, iespējams, izplatīti drumlini, bija zinātnisks izaicinājums.

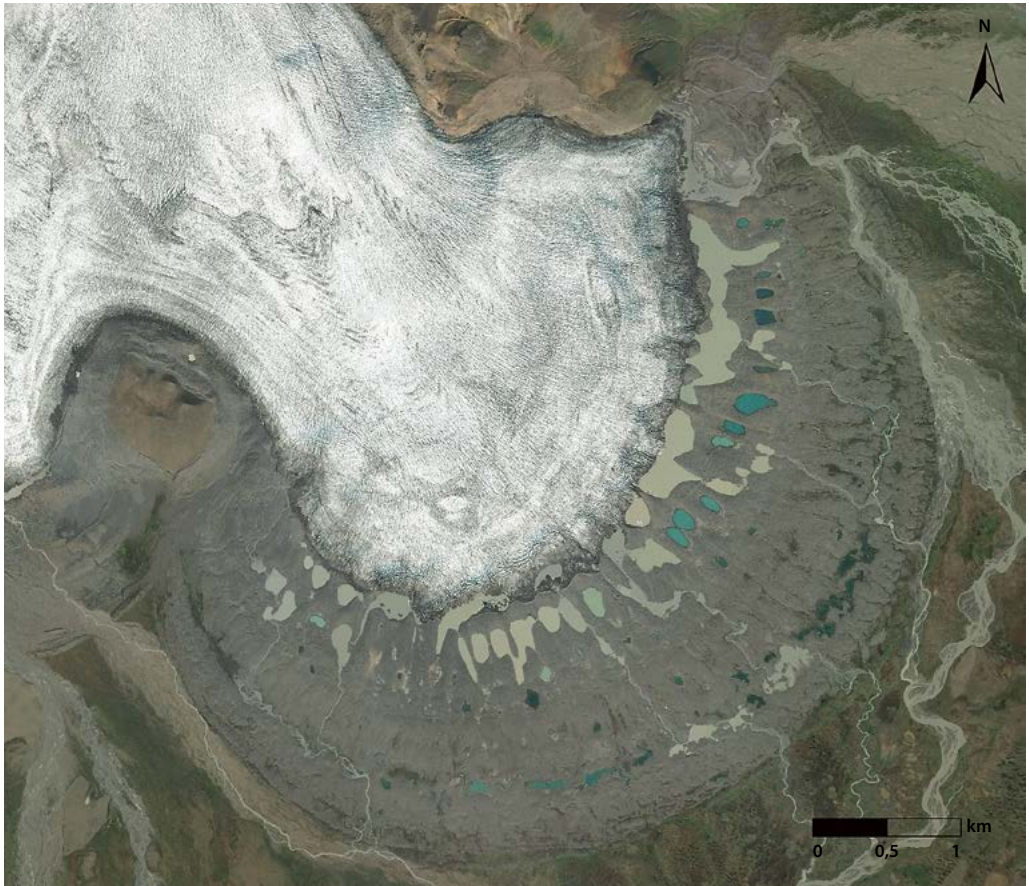
Ekspedīcijas plānošanā un īstenošanā tika ņemta vērā grāmatas autora pieredze 2013. gadā, kad uz šo ledāju viņš ceļojumā devās pirmo reizi kopā ar domubiedriem – Āri Andersonu, Armandu Bernaus, Sandiju Meški un Elīnu Ruku (113. att.).

Mūlajokuls ir pulsējošs izvadledājs, kas drenē Hofsjokula ledus kupola dienviddaļu. Hofsjokuls ir trešais lielākais ledājs Islandē pēc tā aizņemtās teritorijas (890 km²) un atrodas Islandes centrālajā daļā (39. att. 67. lpp.). Tā vidējais biezums ir 225 m, savukārt maksimālais biezums sasniedz 760 m. Ledus kupols atrodas uz tāda paša nosaukuma vulkāna, kura kaldera skaidri izceļas ledus kupola virsmā (114. att.). Mūlajokulam (115. att.) ir raksturīgi periodiski uzplūdi jeb sērdži, kas notiek ar aptuveni 10–20 gadu intervālu. To laikā ledāja mala uzvirzās pieledāja teritorijā par vairākiem simtiem metru. Pēdējie izteiktie uzplūdi notika 1992. gadā, un pēc tiem ledāja mala ir atkāpusies vidēji par 45 m gadā. Neliela ledāja malas uzvirzīšanās notika arī 2008. gadā, kad izveidojās gala morēna.

Mūsdienās pie Mūlajokula sastopami jau vairāk nekā 150 drumlini, turklāt to skaits palielināts, ledāja malai atkāpjoties (116. att.). Ieplakās starp drumliniem bieži atrodas pieledāja ezeri. Drumlinus

114. att. Hofsjokula ledus kupols. Attēlā pa labi: Hofsjokula digitālais virsmas modelis. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot *ESRI World Imagery* satelītattēlus un lāzerskenēšanas datus no Islandes Nacionālā zemes dienesta.





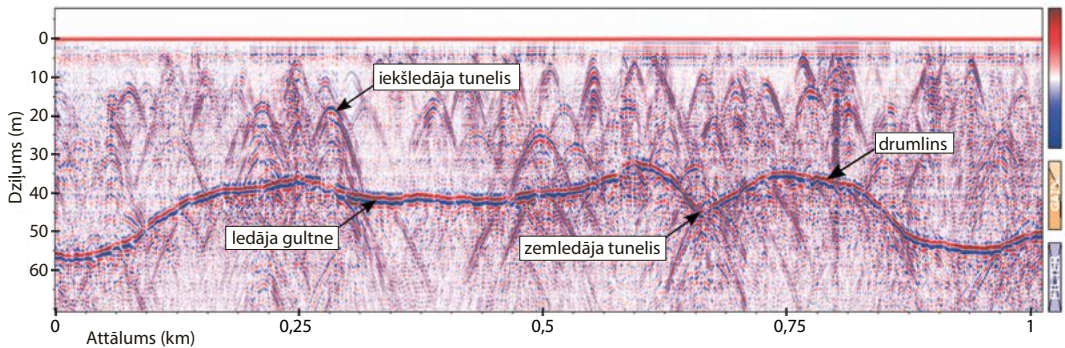
115. att. Mūlajokula izvadledājs centrālajā Islandē. Tumši pelēkais laukums ledāja priekšā ir morēnas līdzenuma, kuru no apkārtējās purvainās teritorijas nodala mazā leduslaikmeta gala morēna. Starp ezeriem ledāja priekšā izveidoti drumlini. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot satelītattēlu mozaiku no *ESRI World Imagery*.

veidojošie nogulumu ir tumšpelēka, plātņaina, smilšaina zemledāja morēna, kurā ir salīdzinoši liels oļu īpatsvars, un vietām sastopamas ar oranžu smalkgraudainu materiālu aizpildītas zarveidīgas atūdeņošanās struktūras. Oļu orientācija morēnā cieši sakrīt ar ledāja kustības virzienu un drumlinu garenasu virzienu. Par ledāja kustības virzienu pēdējos uzplūdus var spriest arī pēc ledāja radītajām skrambām un laukakmeņiem, kuri bieži atrodas uz drumliniem. Tas ļauj secināt, ka uzplūdu noslēguma etapā ledājs bija atkābinājies no gultnes un pārvietojās, slīdot pa gultni. Bazālajā ledū iesalušais drupu materiāls izberza skrambas laukakmeņu virsmā. Pēc uzplūdiem bazālajā plaisā tika iespiesti zemledāja morēnas nogulumu, izveidojot plaisu aizpildījuma grēdas.



116. att. Jauni drumlini pie Mūlajokula izvadledāja. Šie drumlini ledāja priekšā parādījušies tikai pēdējos gados, atkāpjoties ledāja malai. Foto: K. Lamsters, 2014.

117. att. Pirmie latviešu ģeologu radiolokācijas pētījumi uz Mūlajokula izvadledāja. Priekšplānā – J. Karušs, veicot mērījumus ar ģeoradaru. Foto: K. Lamsters, 2014.



118. att. 2014. gada ekspedīcijā uz Mūlajokula ierakstītā radargramma. Tajā redzami atstarojumi no ledāja tuneļiem un skaidri izteikti atstarojumi no ledāja gultnes, uz kuras identificēta reljefa forma atbilst drumlinam. Sagatavojis J. Karušs.

Ekspedīcijā Mūlajokula malas zonā gan paralēli, gan perpendikulāri ledāja malai tika ierakstītas vairākas radargrammas, tas veikts, izmantojot ģeoradaru *Zond-12e*, kurš aprīkots ar zemas frekvences (38 un 75 MHz) antenām (117. att.). Ar šo ģeoradaru un antenu iespējams rīkoties vienam cilvēkam, tādējādi tā ir salīdzinoši mobila iekārta, kas kopā sver ap 12 kilogramiem. Ņemot vērā, ka antenai nav nepieciešams būt ciešā kontaktā ar ledu, to iespējams nest rokās un vajadzības gadījumā var šķērsot ledāja plaisas un upes, nepārtraucot mērījumus.

Uz ledāja ierakstītajās radargrammās (118. att.) nepārprotami identificējami atstarojumi no ledāja gultnes, kā arī no strukturām iekšā ledū, kuras, visticamāk, interpretējamas kā iekšledāja kanāli. Radargrammā, kura 1 km garumā ierakstīta gar Mūlajokula izvadledāja malu, ledus biezums mainās no 33 līdz 56 m. Tādējādi ledāja gultne uzskatāma par diezgan nelīdzenu, jo zemledāja reljefa amplitūda pārsniedz 20 m. Radargrammā skaidri izceļas pacēlums ledāja gultnē, kura augstums sasniedz gandrīz 15 m. Ņemot vērā ģeoradara profila orientāciju un identificētā pacēluma augstumu un platumu, tas tiek interpretēts kā drumlins. Tādējādi latviešu zinātnieki ir pirmie, kuri identificējuši drumlinus arī zem Islandes ledājiem, turklāt savā pirmajā ekspedīcijā, tādēļ tika pieņemts lēmums, ka pētījumi jāturpina arī turpmāk. Ekspedīcijas rezultāti skaidri parādīja, ka, izmantojot radiolokācijas metodi un esošo iekārtu, ir iespējams uzmērīt ledus biezumu un ledāja gultnes reljefu līdz 150 m dziļumam, kā arī iespējams veikt ledāja tuneļu identificēšanu un iekšledāja noteces sistēmas raksturošanu.

2015. gadā tika īstenota otrā ekspedīcija uz Islandi, kurā bez iepriekšējās ekspedīcijas dalībniekiem – Jāņa Karuša, Kristapa Lamstera un Dāvida Bērziņa – piedalījās arī Aleksandrs Vlads (119. att.).

Arī otrās Islandes ekspedīcijas galamērķis bija Mūlajokula izvadledājs. Lai līdz tam nokļūtu, tika mērots aptuveni sešu stundu ilgs ceļš ar automašīnu līdz Islandes vidienei. Ar automašīnu nokļūt Mūlajokula tuvumā iespējams vien dažus vasaras mēnešus, pārējā gada laikā iekšzemes ceļi ir slēgti. Ziemā tie netiek atbrīvoti no sniega segas, un ūdens līmenis upēs tikai vasarās ir pietiekami zems, lai tās būtu iespējams šķērsot ar automašīnu. Šādos braucienos obligāti nepieciešama pilnpiedziņas automašīna ar paaugstinātu klīrensu. Lai samazinātu ekspedīcijas izmaksas, automašīna tika aizgūta no kāda latviešiem pazīstama islandiešu fermiera. Tā bija *Mercedes Benz* markas automašīna, un savu uzdevumu tā pildīja godam, neņemot vērā dažas nianšes.

Dodoties tālāk Islandes iekšzemē, ir būtiski nepabraukt garām pēdējam benzīntankam, kuru islandieši nodēvējuši par “oli”. Par to arī brīdina atbilstoša ceļazīme – nākamais benzīntanks atrodas

119. att. 2015. gada Islandes ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Aleksandrs Vlads, Dāvids Bērziņš, Jānis Karušs, Kristaps Lamsters. Foto: K. Lamsters, 2015.





120. att. Tipiska Islandes iekšzemes ainava, kurā dominē akmeņu tuksnesis. Tālumā – Hofsjokula ledus kupols. Pa kreisi – iekšzemes ceļš jeb akmens klajumā ar automašīnu iebrauktas sliedes, kuras vietām no pārējās teritorijas nodala ceļa mietīni. Foto: K. Lamsters, 2015.

pēc krietna attāluma. Nokļūstot līdz vietai, no kuras uz ledāju tālāk jādodas kājām, būtiski ir no automašīnas neizkāpt uzreiz. Vispareizāk ir attaisīt logu, lai saprastu, no kuras puses pūš vējš un cik spēcīgs tas ir, un tikai tad atvērt durvis, tās stingri turot. Ņemot vērā, ka Islandes vidienē starp Hofsjokula ledus kupolu un centrālajām augstienēm ir plaša, salīdzinoši līdzena teritorija, gaisa plūsmām nav nekādu šķēršļu un vējš bieži mēdz būt īpaši spēcīgs. Par iespējamo vēja ātrumu neliecina nekas, jo visapkārt ir akmeņu tuksnesis (120. att.), aiz kura atrodas ledājs.

Attālumi šeit nav vienkārši uztverami, jo ledus kupolu, ņemot vērā, ka tas atrodas uz vulkāna, iespējams redzēt no krietna attāluma, bet, lai tur nokļūtu kājām, ir vajadzīgas divas dienas. Stiprā vēja izpausmes tika piedzīvotas jau iepriekšējā ekspedīcijā 2014. gadā, kad, ierodoties Islandes vidienē, kļuva skaidrs, ka doties līdz ledājam tik spēcīgā vējā nav iespējams un tika pieņemts lēmums pārlaist nakti automašīnā. Arī telts uzbūvēšana stiprajā vējā un lietū toreiz bija neizpildāms uzdevums. Nokrišņi Islandes dienvidu un centrālajos reģionos ir gandrīz ikdienišķa parādība. Galu galā lielais sniega daudzums nodrošina ledāju pastāvēšanu.

Pēc automašīnas atstāšanas bija jāmēro aptuveni 8 stundu garš ceļš līdz potenciālajai nometnes vietai. Pārvietoties šajā teritorijā nav viegli, jo jāpārvar upes, kuras ledāja tuvumā kļūst arvien sazarotākas. Neiztikām arī bez vairākiem starpgadījumiem, kad, piemēram, grāmatas autors gandrīz iegrīma plūstošajās smiltīs upes gultnē. Lai nokļūtu līdz Mūlajokulam, bija jāmēro divreiz garāks apkārtceļš, jo upes bija šķērsojamas tikai blakus esošā Tjorsārjokula ledāja tuvumā. Arī tālākais ceļš kādu laiku bija jāveic pa Tjorsārjokula virsmu, jo pārvietoties pa ledāju ir drošāk nekā pa pieledāja teritoriju, kurā atrodas upes, ezeri, apraktais ledus un grimstoša grunts. Upes jāšķērso arī uz ledāja, kur tās, plūstot pa nolaideno ledus virsmu, veido neskaitāmus meandrus (līkumus). Augstāk uz ledāja, kur ledus ablācija (kušana) ir mazāka, upes ledū iegrauzušās arvien dziļāk un reizēm ir pārklātas ar sniegu (121. att.). Kāpt uz šāda sniega nedrīkst, jo tā biezums var būt arī nepietiekams, lai noturētu cilvēka svaru. Zem tā ir dzirdams, kā mutoļo spēcīga ledājūdeņu straume.

121. att. Virsledāja ūdens straume uz Mūlajokula izvadledāja, kuru vietām pārklāj sniega sega. Ar laiku kanāla augšdaļa var tikt aizspiesta ciet ledus plūsmas dēļ un var izveidoties iekšledāja tunelis. Foto: K. Lamsters, 2015.





122. att. Mūlajokula pieledāja teritorija ar aprakto ledu un ledus caurkusuma ezeriem.
Foto: K. Lamsters, 2015.

No bāzes nometnes līdz ledājam bija iespējams nokļūt vienas stundas laikā. Lielākais izaicinājums katru dienu ir tieši uzkāpšana uz ledāja, jo teritorija pie ledāja malas ir ļoti dinamiska. Aprimušā ledāja mala ir pārklāta ar drupu materiālu, kurā vietām izveidojušies caurkusuma ezeri (122. att.). Drupu materiāls ir piesātināts ar ūdeni, tādējādi tajā ir iespējams pēkšņi iegrimt. Ledājūdeņu straumes pie ledāja nereti plūst virs aprimuša un aprakta ledus, lai gan ne vienmēr to iespējams pamanīt. Apraktais ledus kūst, tādējādi situācija mainās ik dienu.

Arī šeit ekspedīcijas dalībnieki ieguva jaunu pieredzi, kad, šķērsojot seklu ledājūdeņu straumi, grāmatas autors pēkšņi atradās ledainā ūdenī līdz viduklim. Tika secināts, ka iepriekšējās ekspedīcijas dienās bijām šķērsojuši upi, kura nevis plūst pa sauszemi, bet gan virs aprimuša ledus, un tajā ir izveidojies jauns caurkusums. Starpgadījums atgādināja, ka piesardzības nevar būt par daudz, tādēļ nākamajās dienās, lai nokļūtu uz ledāja, tika izmantots garāks apkārteļš un uzkāpšana uz ledāja notika tur, kur iespējamība šķērsot apraktu ledu bija potenciāli mazāka.



Nokļūstot uz ledāja, tika novērots, ka būtiskas izmaiņas gada laikā notikušas gan ar ledāja malu (tā atkāpusies tālāk iekšzemē), gan ar pieledāja teritoriju. Tajā parādījušies jauni ezeri, un daži senāki ezeri apvienojušies vienā pieledāja ezerā, kurā gada laikā izveidojusies jauna delta (123. att.). Pirms deltas pašā ledāja malā tika novērots zemledāja tunelis, no kura izplūda ledājūdeņu straume, nesdama grantainu un oļainu materiālu. Augšup pa ledāju stiepās iekšledāja tunelis, kurš atradās tieši pretī deltai pie pašas ledāja virsmas.

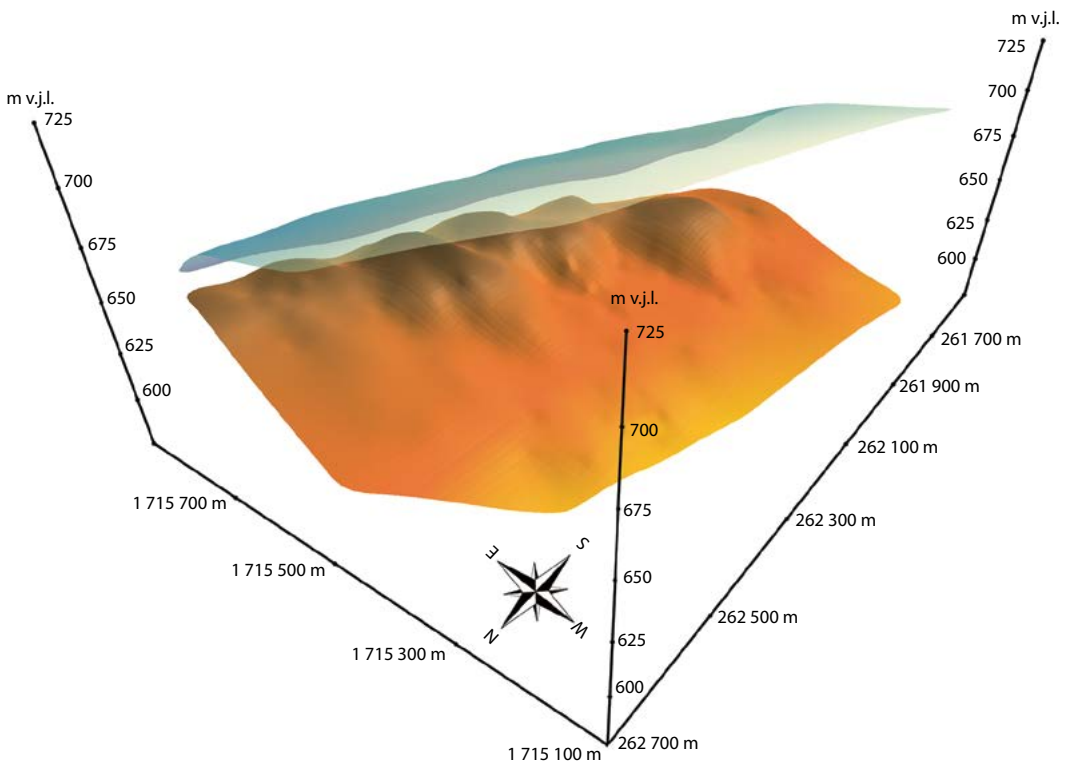
Ekspedīcijas galvenais mērķis bija noskaidrot iespējamo drumlinu izplatību zem ledāja un to saistību ar plaisu sistēmām ledāja malas zonā. Tādēļ tika veikti detalizēti mērījumi ar ģeoradaru, izvietojot radiolokācijas profilus paralēli ledāja malai

123. att. Iekšledāja tunelis, kuram tieši pretī ledāja sprostezērā izveidojusies delta. Foto: K. Lamsters, 2015.

ar 50 m attālumu starp tiem. Kopumā tika ierakstīti 22 radiolokācijas profili 10,5 km garumā, aptverot 0,65 km² lielu teritoriju. Radiolokācijas profilu sākuma un beigu punktu koordinātas un augstums noteikts, izmantojot GPS sistēmu – *Magellan Promark 3*. Radiolokācijas profilēšanas laikā tika izmantots vislielākais pieejamais laika logs – 2000 nanosekundes, tādējādi varēja ierakstīt ģeoradara signālu līdz pat 150 m dziļumam. Izmantojot atstarojumus no ledāja gultnes un noteikto profilu sākumpunktu absolūto augstumu ik pēc 50 m, SAGA GIS datorprogrammā tika izveidots ledus virsmas un ledāja gultnes reljefa augstuma modelis (124. att.).

124. att. Mūļajokula ledāja virsmas un gultnes reljefa modelis. Sagatavojis Agnis Rečs pēc 2015. gada ekspedīcijas datiem.

Izveidotajā modelī ir skaidri redzams, ka Mūļajokula gultnes reljefs ir izteikti artikulēts un tajā izšķirami vairāki iegareni pauguri. To garums sasniedz 420 m, platums – 250 m, savukārt augstums – 20 m. Šie pauguri interpretēti kā drumlini, kas



veidojušies daudzkārtējos ledāja uzplūdus, mobiliem glacigēnajiem nogulumiem (morēnai) uzkrājoties iegarenos pauguros. Zem ledāja esošo drumlinu izvietojums sakrīt ar izteiktāko puslokā izliektu plaisu sistēmu virs ledāja. Visticamāk, šo plaisu veidošanas ietekmējuši ledāja gultnes nelīdzenumi (drumlini), kas radīja atšķirīgu spriegumu rašanos ledāja ķermenī, ledus plūsmai bremsējoties pirms drumliniem.

Ekspedīcijas rezultāti tika publicēti žurnālā “Polar Science” (Lamsters et al., 2016), un tie sniedz jaunas zināšanas par drumlinu izplatību un veidošanos mūsdienu ledājos. Nozīmīgs atklājums bija arī drumlinu izvietojums un iespējamās drumlinu lauka robežas. Ekspedīcijas dati atklāja, ka drumlini izbeidzas tālāk no ledāja malas, kur puslokā izliektas plaisas vairs nav sastopamas un kur zem ledāja sākas izteikts reljefa pazeminājums, kas radies ledāja erozijas rezultātā.

Salīdzinot pēc ekspedīcijas GPS uzmērījumiem izveidoto virsmas modeli ar 2008. gada reljefa modeli, ko veidojuši islandiešu zinātnieki pēc lāzerskenēšanas datiem, tika secināts, ka no 2008. līdz 2015. gadam ledus virsma pētītajā apgabalā ir vidēji pazeminājusies par 18 m, savukārt maksimāli – par 34 m ledāja malā. Šajā laikā posmā ledāja mala ir atkāpusies par 220 m.

GRENLANDE – 2016

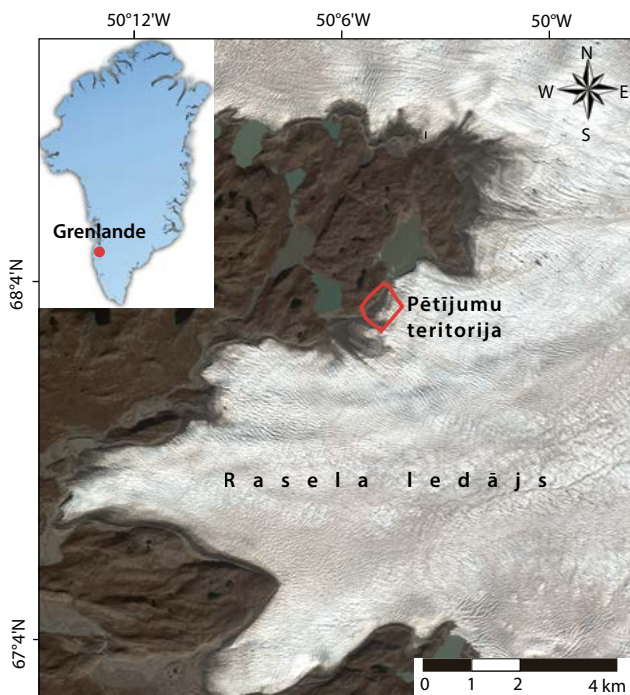
Ekspedīcija uz Grenlandi 2016. gadā bija secīgs iepriekšējo polāro ekspedīciju turpinājums. Ideja doties uz Grenlandi radās jau 2015. gada Islandes ekspedīcijas noslēgumā, un pēc atgriešanās sākās jaunās ekspedīcijas plānošanas pirmais posms. Vienmēr viens no svarīgākajiem uzdevumiem visu polāro ekspedīciju plānošanā ir finansējuma atrašana, un līdzekļi nepieciešami gan pašas ekspedīcijas izdevumu segšanai, gan inventāra un komandas ekipējuma iegādei. Lai to visu nodrošinātu, tiek meklēti sponsori arī Latvijas uzņēmumu vidū. Sākot ar šo ekspedīciju, finansiālu atbalstu sniedz SIA “Ceļu būvniecības sabiedrība “Igate””. Ekspedīcijai nepieciešamais apģērbs tika speciāli radīts tekstila apstrādes uzņēmumā SIA “Spectre Latvia”, savukārt ēdienu sponsorēja SIA “Nākotne” un SIA “Gemoss”. Ekspedīcijā piedalījās iepriekšējo ekspedīciju organizatori – Kristaps Lamsters un Jānis Karušs – un jaunie dalībnieki – Māris Krievāns un Agnis Rečs, kā arī ar Latvijas Universitātes Studentu padomes finansiālu atbalstu ekspedīcijā devās ģeoloģijas bakalaura studiju programmas students Reinis Pāvils (125. att.). Viens no viņa pienākumiem bija iemūžināt ekspedīcijas norisi fotogrāfijās un video. Vēlāk ekspedīcija tika atspoguļota četrās sērijās raidījumā “Vides fakti” 2016. gada rudenī.

Grenlandes ekspedīcijas galamērķis bija Rasela izvadledājs (126. att.), kurš atrodas 25 km attālumā no Kangerlugsuakas (*Kangerlugssuaq*) lidostas salas



125. att. 2016. gada Grenlandes ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Agnis Rečs, Kristaps Lamsters, Māris Krievāns, Jānis Karušs, Reinis Pāvils. Foto: R. Pāvils, 2016.

126. att. 2016. gada ekspedīcijas pētījumu teritorijas atrašanās vieta Grenlandē. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot ESA/Sentinel satelītattēlu.





dienvidrietumos. Rasela ledājs tika izvēlēts vairāku faktoru dēļ. Pirmkārt, tur iespējams salīdzinoši vienkārši nokļūt – ledāju var sasniegt vienas dienas laikā no starptautiskās Grenlandes lidostas, daļu no ceļa mērojot ar automašīnu. Tas ir būtiski, jo katram ekspedīcijas dalībniekam bija jānes vairāk nekā 35 kg svara, neskaitot ģeneratoru un benzīna kannas. Otrkārt, Rasela ledājs tika izvēlēts zinātniskās problemātikas dēļ, jo latviešu zinātnieki, veicot mērījumus ar ģeoradaru, vēlējās noskaidrot, kā viena pieledāja ezera ūdeņi noplūst uz otru pieledāja ezeru pa iespējamajiem zemledāja vai iekšledāja tuneļiem (skat. ezerus pie pētījumu teritorijas 126. att.).

Pirmais uzdevums, nokļūstot potenciālās pētījumu teritorijas tuvumā, ir ierīkot bāzes nometni. Tās vieta jāizvēlas tā, lai pētījumu teritorija būtu netālu, tomēr ne pārāk tuvu ledājam, no kura var pūst spēcīgi vēji. Bāzes nometnei jābūt vismaz nedaudz pasargātai no valdošajiem vējiem, un tai jāatrodas ūdens avota tuvumā. Pēc bāzes nometnes ierīkošanas otrs svarīgākais

127. att. Grenlandes ekspedīcijas bāzes nometne un inventārs. Priekšplānā atrodas ģenerators, kurš galvenokārt nepieciešams drona akumulatoru uzlādēšanai. Foto: R. Pāvils, 2016.



128. att. Grenlandes ekspedīcijas pārtikas produktu slēpšana zem akmeņu krāvuma, lai tos pasargātu no dzīvniekiem. Foto: R. Pāvils, 2016.

uzdevums ir inventāra pārbaude un ēdiena sašķirošana un paslēpšana. Lai uzlādētu iekārtu akumulatorus, ekspedīcijas dalībniekiem līdzī bija benzīna ģenerators (127. att.). Tas īpaši nepieciešams bezpilota gaisa kuģa (drona) akumulatoru uzlādei. Drons šajā polārajā ekspedīcijā uz ledājiem tika izmantots pirmo reizi, tādējādi attīstot arī šādu tālīzpētes pētījumu virzienu Latvijas Universitātē.

Lielākā daļa ekspedīcijā līdzpaņemto produktu bija desas, žāvēta gaļa, griķi un auzu pārslas. Putra paredzēta brokastīm, desas gabals – pusdienām uz ledāja, savukārt griķi ar gaļu – vakariņām. Pēc produktu sašķirošanas ir svarīgi tos noslēpt, jo teritoriju apdzīvo dažādi dzīvnieki – ziemeļbrīeži, polārie zaķi un lapsas, kas var mēģināt ēdienam piekļūt. Produkti tika sakrauti pie lielāka akmens, un visapkārt saliktas akmens plāksnes, veidojot nelielu kurgāna tipa krāvumu (128. att.). Katru reizi pirms ēdienreizes šis krāvums bija jāizjauc. Šāda piesardzība bija pilnībā pamatota, jo jau nākamajā dienā ekspedīcijas nometnē tika manīta lapsa.



Polārlāči šajā apkaimē parasti nemēdz uzturēties, tādēļ attiecībā uz tiem nekādi piesardzības pasākumi nebija jāievēro.

Polārajās ekspedīcijās ar iekārtām mēdz atgadīties neparedzamas problēmas, kas saistītas gan ar aukstumu un mitrumu, gan dažādām citām tehniskām ķībelēm. Tā, piemēram, jau pirmajā pētījumu veikšanas dienā pārstāja darboties ģeoradars. Problēmu par mata tiesu izdevās atrisināt un varēja turpināt pētījumus.

129. att. Rasela izvadledāja virsma. Tālumā redzams Grenlandes ledus vairoga plašums. Mēroga apjaušanai noder divi ekspedīcijas dalībnieki. Foto: R. Pāvils, 2016.



Šis un citi atgadījumi ekspedīcijas dalībniekiem sniedza nenovērtējamu pieredzi. Turpmākajās ekspedīcijās viss iespējamais inventārs tika ņemts līdzī dubultā, lai vajadzības gadījumā to būtu iespējams aizvietot. Ekspedīcijā iegūtie dati katru vakaru tika pārakstīti vairākos ārējos datu nesējos, jo šīs ierīces mēdz pārstāt darboties, pat ja bijušas pilnīgi jaunas.

Rasela ledāja artikulēto virsmu veido iegareni ledus pazeminājumi un paaugstinājumi vairāku desmitu metru amplitūdā (129., 130. att.). Tāpēc, lai izveidotu precīzu ledus virsmas modeli, tika veikta aerofotogrāfiju uzņemšana ar bezpilota gaisa kuģi (131. att.) apmēram 1 km² lielā platībā. Pētījumi tika veikti divos atsevišķos poligonos starp diviem pieledāja ezeriem, kuros ar ģeoradaru (132. att.) tika ierakstīti 30 radiolokācijas profili 10 km kopgarumā.

Pētījumu mērķis bija gan metožu pilnveidošana detalizētai ledāja gultnes topogrāfijas rekonstruēšanai, gan potenciālo

130. att. Rasela izvadledāja virsmas reljefs ar stāvām ledus sienām. Foto: R. Pāvils, 2016.





131. att. Grenlandes ekspedīcijas dalībnieki A. Rečs un M. Krievāns, kas pilotē pirmo latviešu zinātnieku bezpilota gaisa kuģa lidojumu virs Rasela ledāja. Foto: R. Pāvils, 2016.

132. att. Radiolokācijas profilu ierakstīšana ar ģeoradaru uz Rasela ledāja. Foto: R. Pāvils, 2016.





133. att. Jānis Karušs pie virsledāja ezera Grenlandē.
Foto: R. Pāvils, 2016.

iekšledāja/zemledāja tuneļu kartēšana. Ir zināms, ka ledāju note-
ces sistēmas veido virsledāja, iekšledāja, zemledāja un pieledāja
komponenti. Pētāmās teritorijas apkārtnē tika novēroti vairāki
virsledāja ezeri un upes. Ezeri (133. att.) bija caurtekoši un sekli,
bet to gultnē atradās atsevišķi padziļinājumi – kriokonīta bedres
ar diametru līdz pat vienam metram. Virsledāja upes bija me-
andrējošas (134. att.) un nereti ar stāvām ledus sienām (135. att.),
bet ūdens dziļums nepārsniedza dažus desmitus centimetru. Arī
upju gultnē koncentrējās tumšs kriokonīta materiāls. Visas virs-
ledāja upes ieplūda ūdensrijējos (136. att.), izņemot nelielas un
īslaicīgas virsledāja ūdeņu straumes ledāja malas zonā.

Ūdensrijēji ir vertikālas akas ledū, un tie parasti izveidojušies,
ledājūdeņiem paplašinot ledāja plaisu. Dziļāk ledājā ūdeņi tiek
novadīti pa iekšledāja vai zemledāja tuneļiem, kuri izbeidzas pie-
ledāja ezerā. Šo pieledāja ezeru var dēvēt par ledus sprostezeru,
jo vienā pusē tas robežojas ar ledāja malu, kura ir kā dambis, kas
notur ūdeni no aizplūšanas. Tomēr šāda ūdens aizplūšana notiek,
un ir zināms, ka sprostezers noplūst regulāri, izraisot plūdus jeb



134. att. Izteikti meandrējoša virsledāja upe uz Rasela izvadledāja Grenlandē. Foto: R. Pāvils, 2016.

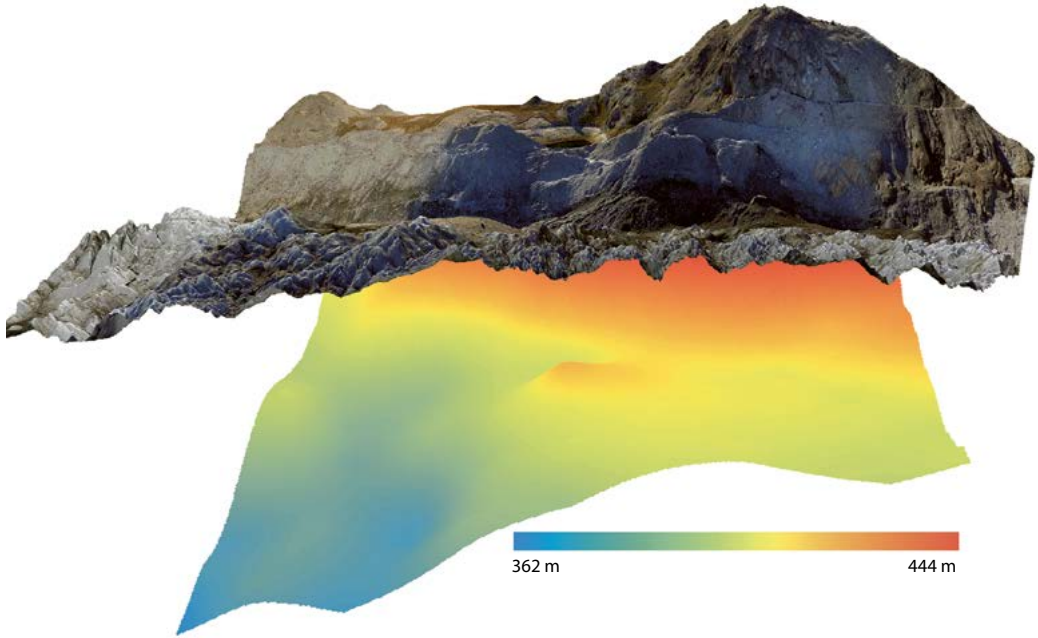
135. att. Virsledāja upe ar stāvām ledus sienām. Mēroga apjaušanai noder ekspedīcijas dalībnieki tālumā. Foto: R. Pāvils, 2016.



136. att. Plaisa ledājā, kurā ledājūdeņu straume ieplūst, veidojot ūdensrijēju. Foto: R. Pāvils, 2016.

jokulhlaupus. Pēdējo reizi noplūšana norisinājās 2008. gadā, kad ezera ūdens līmenis pazeminājās par vairāk nekā 40 m. Sprostezera ūdens pazūd zem ledāja un izplūst blakus esošajā ezerā.

No ekspedīcijā iegūtajiem datiem tika izveidots ledāja gultnes reljefa modelis (Lamsters et al., 2020a), kurā atspoguļojas komplicēta topogrāfija ar augstuma atšķirībām gandrīz 100 metru amplitūdā (137. att.). Ledāja gultnes reljefs pazeminās virzienā no noplūstošā sprostezera uz piededāja ezeru, kurā plūdu laikā ieplūst ledājūdeņi. Iespējamais zemledāja tunelis vai ledāja gultnes iežos iegrauztais tunelis pētījumā netika identificēts, tomēr ģeoradara dati ļāva identificēt potenciālo iekšledāja tuneli, kurš stiepjas aptuveni paralēli ledāja malai. Visticamāk, šis iekšledāja tunelis ir saglabājies no pēdējiem jokulhlaupiem un pa to ir noplūduši plūdu ūdeņi. Ekspedīcijas dalībniekiem izdevās atrast arī iespējamo šī iekšledāja ūdeņu fragmentu netālu no piededāja ezera.



Grenlandes ekspedīcijā atšķirībā no iepriekšējām tika organizēta arī dažādu paraugu ievākšana, lai izzinātu ģeoloģiskos un ekoloģiskos procesus gan uz ledāja, gan pieledāja vidē. Tika ievākti ledus, ūdens un kriokonīta paraugi no ledāja virsmas, lai izpētītu mikroorganismu daudzveidību uz ledāja un sfērisko izdedžu daļiņu sastāvu, kā arī smilts graudu attīstības vēsturi. No pieledāja teritorijas tika ievākti ūdens, augsnes un nogulumu paraugi, lai veiktu augsnes attīstības pētījumus un noteiktu smilts graudu virsmas mikrotekstūru. Tika izpētīti arī atsegumi pieledāja ezera terasē, un tie atklāja sasalušu aprakto augsni ar dažādu augu un sūnu daļiņām, kas uzkrājušās pirms vairākiem tūkstošiem gadu. Uz ledāja paraugi tika ievākti no kriokonīta bedrītēm attālumā līdz 2,5 km no ledāja malas dažādā augstumā.

Pētījumā (Stivrins et al., 2018) tika noskaidrots, ka 2016. gada kušanas sezonas beigās Rasela izvadledāja kriokonīta bedrītēs dominēja zaļalģes (*Chlamydomonadaceae*, *Chloromonas*, *Mesotaeniaceae*) un mazākā daudzumā atrodamas arī ciānbaktērijas (*Oscillatoriaceae*). Salīdzinot ar citiem pētījumiem, var secināt, ka mikroorganismu daudzveidība ir mainījusies. Iespējams, šādas izmaiņas notiek katru sezonu, jo mikroorganismi attīstās

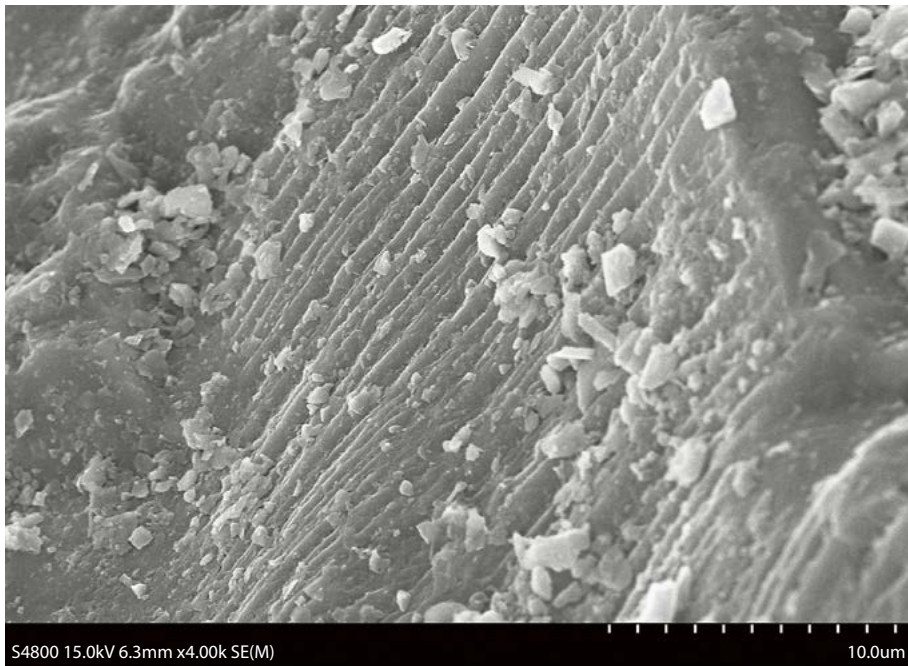
137. att. Pētījumu teritorijas ledāja un tam piegulošās teritorijas virsmas un ledāja gultnes reljefa modelis. Skats pret ledāja malu un kalna nogāzi. Sagatavojis K. Lamsters pēc 2016. gada ekspedīcijas datiem (Lamsters et al., 2020a).

sezonāli, bet iespējamas arī barības vielu un barības avotu izmaiņas pēdējo gadu laikā. Kriokonīta bedrītēs tika atrastas arī mikrokokogļu (138. att.) un sfēriskas izdedžu daļiņas, kas rodas ogļūdeņražu sadedzināšanas procesos. Mikrokokoglēs esošais slāpekļis veicina zaļajūgu attīstību, kuras pretēji ciānbaktērijām nespēj piesaistīt slāpekli no atmosfēras. Neorganiskā materiāla koncentrācija pieaug ledāja malas virzienā, bet sfērisko izdedžu daļiņu koncentrācija ledāja virsmā ir nevienmērīga.

No kriokonīta bedrīšu paraugiem īpaši tika analizētas minerālās daļiņas. Aplūkojot kvarca graudus skenējošajā elektronu mikroskopā, iespējams analizēt gan graudu noapaļotību, gan to virsmas reljefu un mikrotekstūras. Šīs mikrometra izmēra tekstūras atspoguļo vidi, kurā kvarca grauds ir veidojies. Dažādās vidēs veidojas atšķirīgas mikrotekstūras, kas sniedz priekšstatu par smilts grauda attīstības vēsturi. Dominējošās Rasela ledāja kriokonīta bedrīšu paraugos atklātās mikrotekstūras bija trieciena liecības, īpaši V veida mikrotekstūras. Tās norāda, ka ledāja izcelsmes smilts grauda virsmu nav pārveidojis ledājs, bet gan aktīvās ūdens straumes. Šādas ūdens straumes var plūst gan zem, gan virs ledāja. Par tiešu ledāja ietekmi graudu reljefa un virsmas veidošanā liecina, piemēram, pakāpienveida mikrotekstūras (139. att.). Tās rodas, ja graudi tiek spiesti zem ledāja svara. Kopumā mikrotekstūru pētījumi (Kalińska-Nartiša et al., 2017)

138. att. Ar mikroskopu uzņemta fotogrāfija no 2016. gada ekspedīcijā ievākta kriokonīta parauga. Attēlā redzamais objekts ir mikrokokogle, kas Rietumgrenlandē, iespējams, nokļuvusi no mežu ugunsgrēkiem Ziemeļamerikā. Sagatavojis N. Stivriņš, 2016.





atklāja daudzveidīgo smilts graudu izcelsmi un pārvietošanas aģentus: ledāju, ūdens straumes, vēju. Dažiem graudiem atrastas pazīmes, kas liecina par to tālo izcelsmi Zemes tuksnešos.

ISLANDE – 2017

2017. gadā norisinājās jau trešā Latvijas Universitātes ģeologu ekspedīcija uz Islandi. Tajā piedalījās Kristaps Lamsters, Māris Krievāns, Jānis Karušs un Agnis Rečs (140. att.). Ekspedīcijā tika veikti dažādi starpdisciplināri pētījumi uz un pie četriem Hofsjokula un Vatnajokula ledus kupolu izvadledājiem. Veikti vairāki eksperimentāli pētījumi gan uz ledājiem, gan pieledāja teritorijā, tādējādi paplašinot Latvijas zinātnieku kompetenci polāros pētījumos dažādās jomās.

2017. gada ekspedīcija sākās ar došanos uz Hofsjokula ledus kupola izvadledājiem – Tjorsārjokulu un Mūlajokulu, kur pētījumi tika veikti arī iepriekšējās ekspedīcijās. Lai līdž ledājiem

139. att. Kvarca grauda virsmas mikrotekstūras no Rasela izvadledāja Grenlandē. Šīs pakāpienveida mikrotekstūras radušās, graudiem savstarpēji saduroties zem ledāja. Pakāpieni nav veidojušies nesen, jo tiem pielipušas nelielas kvarca daļiņas. Ar skenējošo elektronu mikroskopu uzņemta fotogrāfija no 2016. gada ekspedīcijā ievāktajiem paraugiem. Sagatavojusi E. Kalińska-Nartiša, 2016.



140. att. 2017. gada Islandes ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Kristaps Lamsters, Māris Krievāns, Jānis Karušs. Ceturtais dalībnieks Agnis Rečs šajā fotogrāfijā nav redzams. Foto: K. Lamsters, 2017.

nokļūtu, ceļā bija jāpavada vesela diena, un līdzī jņņem arī viss nepieciešamais aprīkojums gan radiolokācijas mērijumiem, gan paraugu ievākšanai un uzglabāšanai. Viss aprīkojums, apģērbs un ēdiens tika sašķirots un sapakots, un katram ekspedīcijas dalībniekam bija jānes viena liela un viena maza soma. Līdzīgi kā iepriekšējās Islandes ekspedīcijās, arī šajā viens no lielākajiem izaicinājumiem bija neskaitāmo piedēja upju šķērsošana (141. att.). Tās mēdz sagādāt pārsteigumus, un tie neizpalika arī šajā ekspedīcijā. Piemēram, kādas lietainas dienas beigās, kurā pētījumi pie Mūlajokula ieilga, ekspedīcijas dalībnieki konstatēja, ka ūdens līmenis lielākajā upē starp ledāju un bāzes nometni ir ievērojami paaugstinājies. Tādējādi upes šķērsošana ledāja tuvumā nebija iespējama. Lai atrastu piemērotu vietu upes pārvarēšanai, ģeologiem bija jādodas tālu prom no ledāja. Upe tika šķērsota tikai līdz ar tumsas iestāšanos, tādējādi garais ceļš līdz bāzes nometnei bija jāmēro tumsā, mēģinot saskatīt vienīgo orientieri – kāda kalna siluetu. Nometne tika sasniegta tikai vēl naktī.



141. att. Upes šķērsošana ar smagām somām vienmēr ir izaicinājums un ievērojami samazina pārvietošanās ātrumu. Hofsjokula ledus kupola teritorijā upju ir tik daudz, ka lielākā daļa ceļa tika mērota makšķernieku gumijas zābakos. No kreisās – A. Rečs un M. Krievāns. Foto: K. Lamsters, 2017.

142. att. Bāzes nometne uz Tjorsārjokula izvadledāja. Foto: K. Lamsters, 2017.



143. att. Pēkšņa migla uz Tjorsārjokula ledāja. Šādā laikā Islandes ekspedīcijas dalībniekiem nebija iespējams saskatīt citam citu. Foto: K. Lamsters, 2017.

Cits izaicinājums ekspedīcijā ir dzīvošana uz ledāja. Lai tam sagatavotos, piemērota ekipējuma iegādē atbalstu sniedza veikals “Ceļotājs”. Ekspedīcijā tika izmantotas speciālas ekspedīciju teltis (142. att.), kuru stiprināšanai uz ledus noderēja ledus skrūves. Gulēšanai piemērotu vietu uz ledāja nelīdzenās virsmas atrast nav viegli, tādēļ tika mēroti 8 km pa ledāju, līdz tika sasniegta kāda sena vulkāna virsotnes daļa, kas atsedzas virs ledāja. Šādas virsotnes virs ledājiem tiek dēvētas par nunatakiem. Nometne tika uzbūvēta aptuveni 1100 m augstumā virs jūras līmeņa apgabalā, aiz kura netālu jau atrodas sniega līnija. Tā aptuveni sakrīt arī ar neitrālās bilances līniju uz ledāja, kur akumulācija ir vienāda ar ablāciju gada griezumā. Sniegs šeit saglabājas cauru gadu.

Pēc nakts, kas pavadīta teltī uz ledāja, interesantu pavērsienu piedzīvoja divi ekspedīcijas dalībnieki – viņu telts pamatnes daļa bija ielūzusi ledū. Pa nakti cietā firna (sablīvēta sniega, kurš vēl nav tik blīvs, lai būtu uzskatāms par ledu) virskārta bija izkususi un zem tās atsedzās tukšums. Nākamajā dienā uz ledāja īslaicīgu pārsteigumu sagādāja strauja zemo mākoņu uzvirzīšanās. Pēkšņi ledāju pārklāja necaurredzama migla (143. att.), kurā saskatīt

citam citu nebija iespējams. Par laimi, pētījumi tajā brīdī tika veikti telts tuvumā, kur ledāja virsma ir līdzena, un migla tikpat strauji arī atkāpās.

Uz Tjorsárjokula izvadledāja tika ievākti ledus paraugi, kuros vēlāk LU ĢZZF Vides datēšanas laboratorijā analizētas skābekļa un ūdeņraža izotopu vērtības. Kopumā noteiktās vērtības sakrita ar tām, kuras sagaidāmas arī mūsdienu nokrišņos, tomēr tika atrastas atšķirības starp paraugiem ledāja malas tuvumā un tiem, kas atrodas augstāk uz ledāja. Ledāja malas tuvumā esošajos paraugos skābekļa izotopu vērtības bija vairāk negatīvas, un tas liecina, ka tur atsedzas senāks ledus, kurš ledus kustības un deformācijas dēļ pie ledāja malas atrodas tuvāk ledus virsmai.

Citi jauni pētījumi tika veikti pie blakusesošā Mūlajokula izvadledāja, kur ir purvainā teritorija. Tur joprojām izplatīts sporādiskais grunts sasulums, un vietās, kur gruntī (kūdrā) izveidojušās ledus lēcas, virs tām kūdras slānis pacēlies, veidojot aptuveni vienu metru augstus paugurus. Šos paugurus dēvē par palsām. Izkūstot palsas ledus kodolam, tā vietā izveidojas termokarsta ezers. Teritorijā tika veikta radiolokācijas profilēšana, un visās ierakstītajās radargrammās tika identificēts spēcīgs atstarojums aptuveni 2 m dziļumā, un tas atbilst kūdras slāņa biezumam. Zem tā savukārt identificēti glaciofluviāli nogulumi. No palsām un profila līnijā līdz ledāja malai tika ievākti arī augsnes paraugi, kuru analīze ļauj noskaidrot augsnes attīstības procesus dažādā attālumā no ledāja malas. Tāpat paraugi tika ievākti arī no ezeriem dažādā attālumā no ledāja malas. Tos analizēja speciālisti no LU ĢZZF, LU Mikrobioloģijas un biotehnoloģijas institūta un no Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centra, kur tika veikta paraugu DNS sekvencēšana. Rezultāti atklāja mikroorganismu daudzveidību un dažādību pieledāja ezeros (Lamsters et al., 2020d).

Otrā Islandes ekspedīcijas daļa tika aizvadīta pie diviem Vatnajokula ledus kupolu izvadledājiem – Virkisjokula (*Virkisjökull*) un Svīnafelsjokula. Uz Svīnafelsjokula ledāja tika veikti mērījumi ar ģeoradaru un ievākti paraugi no kriokonīta bedrītēm. Savukārt Virkisjokula (144. att.) apkārtnē paraugi ievākti gan no ledus, gan pieledāja teritorijas līdz pat sandru līdzenumam, kas stiepjas tālu aiz ledāja. Paraugos tika analizētas smilts graudu mikrotekstūras (Kalińska et al., 2021).





144. att. Skats uz Virkisjokula izvadledāju Islandes dienvidrietumos. Priekšplānā ir ledājūdeņu straume, bet tālumā redzams leduskritums, kur ledus pa stāvu nogāzi noplūst no Vatnajokula ledus kupola daļas. Foto: K. Lamsters, 2017.

Uz Virkisjokula ledāja virsmas atrasti īpatnēji veidojumi – koncentriski sūnu saaugumi (145. att.). Tie veidojušies, sūnu sporām nonākot uz ledāja no blakus esošās kalna nogāzes. Sūnas apaugušas ap virsledāja atlūzu daļiņām. To apaļā forma izveidojusies šādi: vispirms ar sūnām pārklājusies atlūzas virsējā daļa; ledus zem sūnu saauguma ir ticis pasargāts no tiešiem Saules stariem, tādējādi apkārtējā ledus virsma kūsusi ātrāk; zem sūnu saauguma nevienmērīgas ledus kušanas dēļ palicis šaurs ledus pacēlums; no šī pacēluma sūnu saaugums, iespējams, ar vēja palīdzību tika novelts un apgriezts otrādi; sūnas saaugušas arī atlūzas otrā pusē, izveidojot koncentrisku saaugumu.



ANTARKTIKA – 2018

2018. gadā pirmo reizi Latvijas vēsturē tika organizēta latviešu zinātnieku ekspedīcija uz Antarktiku. Tā kopumā ilga no 2018. gada 10. februāra līdz 18. aprīlim. Lai ekspedīciju īstenotu, tika noslēgts sadarbības līgums starp Latvijas Universitāti un Ukrainas Nacionālo Antarktiskas pētījumu centru. Ekspedīcijai nepieciešamais finansējums iegūts no LU Fonda (mecenāts SIA “Mikrotīkls”), SIA “Ceļu būvniecības sabiedrības “Igate”” un Kristapa Lamstera pēcdoktorantūras projekta (ERAF). Ekspedīcijā piedalījās trīs LU ĢZZF ģeologi – Jānis Karušs, Māris Krievāns un Kristaps Lamsters (146. att.).

Antarktiskās ekspedīcijas galamērķis bija Ukrainai piederošā akadēmiķa Vernadska polārstacija, kas atrodas Vilhelma arhipelāga Argentīnas salu grupas Galindesa salā.

Argentīnas salas (147., 148. att.) atrodas Belinshauzena jūrā 7 km uz rietumiem no Antarktīdas pussalas Greiema krasta, un tajās iekļauti vairāki desmiti lielāku un mazāku salu un klinšu. Lielākās ir Galindesa, Skua, Vinterailendas, Irizāra, Urugvajas,

145. att. Sūnu saaugumi uz Virkijsokula izvadledāja. To kodolā parasti ir virsledāja atlūzas gabals. Foto: K. Lamsters, 2017.



146. att. 2018. gada Latvijas antarktiskās ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Jānis Karušs, Māris Krievāns, Kristaps Lamsters. Foto: K. Lamsters, 2018.

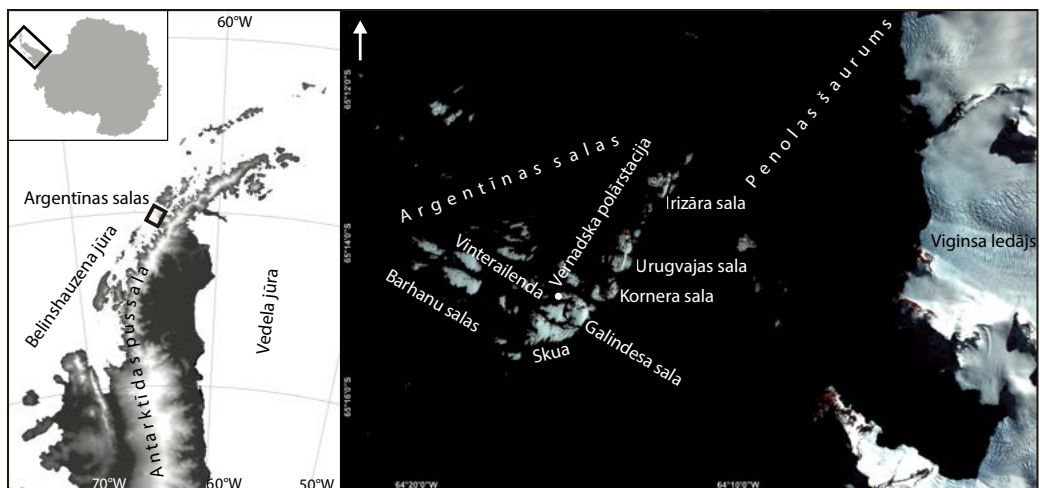
Kornera un Barhanu salas. No Antarktīdas pussalas salu grupu atdala Penola šaurums. Šī apgabala pirmie pētījumi norisinājušies 19. gadsimta beigās un 20. gadsimta sākumā. Nozīmīgākās ekspedīcijas, kurās tika veikta sākotnējā Greiema Zemes kartēšana, bija beļģu antarktiskā ekspedīcija 1897.–1899. gadā, to vadīja kapteinis Adrians de Gerlahs, un pirmā franču antarktiskā ekspedīcija 1903.–1905. gadā, to vadīja Žans Batists Šarko, un kopš tā laika kartēs tika iekļautas arī Argentīnas salas.

Vernadska polārstacija ir viena no senākajām un visilgāk nepārtraukti izmantotajām polārstacijām Antarktīkā. Tās pirmsākums meklējams jau 1935. gadā, kad briti uz Vinterailendas salas (tā atrodas blakus Galindesa salai) uzbūvēja ziemošanas bāzi, un tā bija viena no Britu Greiema Zemes ekspedīcijas (*British Graham Land Expedition, BGLE*) bāzēm. Šī bija viena no ievērojamākajām Antarktīdas pussalas rietumu daļas izpētes ekspedīcijām, kas norisinājās no 1934. līdz 1937. gadam. Tajā tika veikta Greiema Zemes kartēšana un, izmantojot teodolītu, tika izveidotas arī pirmās Argentīnas salu kartes. 1946. gadā ziemas bāze neizskaidrojami pazuda, un tādēļ nākamās britu pētījumu



programmas (*the Falkland Islands Dependencies Survey*) laikā 1947. gadā tika izveidota jauna bāze, kuru nodēvēja par Bāzi F. Vēlāk tās galveno dzīvojamo ēku nosauca par “Vordija māju” (*Wordie House*) par godu skotu polārpētniekam seram Džeimsam Vordijam (*James Wordie*), kurš bija Ernesta Šekltona vadītās britu imperiālās transantarktiskās ekspedīcijas dalībnieks un apmeklēja polārstaciju tās būvēšanas laikā. Vordija māja (149. att.) ir saglabājusies joprojām, un tajā iekārtots muzejs. Ēka ir aizsargājama, un tai piešķirts speciāli aizsargāta vēstures

147. att. Argentinas salu grupa Antarktīkā. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot Antarktīkas pētījumu zinātniskās komitejas digitālo Antarktīkas datubāzi un *ESA/Sentinel-2-A* satelīttēlu.





148. att. Skats uz Argentinas salu grupu no Antarktīdas pussalas. Foto: K. Lamsters, 2018.

pieminekļa statuss. To ir iespējams apmeklēt arī tūristiem, saņemot atslēgu pie Vernadska polārstacijas personāla.

1954. gadā tika uzbūvēta jauna bāze uz blakus esošās Galindesa salas, kura atrodas atklātākā vietā, un vēlāk šī bāze tika pārdēvēta par Faradeja staciju. Tā oficiāli darbojās līdz 1996. gadam, kad Apvienotā Karaliste šo staciju par simbolisku naudu – vienu mārciņu – nodeva Ukrainai, un tā tika pārdēvēta par akadēmiķa Vernadska polārstaciju par godu dabaszinātniekam Vladimiram Vernadskim (*Владимир Иванович Вернадский*, 1863–1945). Mārciņas monēta joprojām redzamā vietā glabājas polārstacijas bārā. Ukrainai polārstacija tika nodota, jo valsts spēja pierādīt savu zinātnisko un tehnisko kapacitāti, kas nepieciešama, lai turpinātu un attīstītu Apvienotās Karalistes uzsāktos pētījumu virzienus šajā polārstacijā. Sākotnēji visi zinātniskie dati, kas tika iegūti Vernadska polārstacijā, Ukrainai bija jānodod Apvienotajai Karalistei.

Vernadska polārstacija darbojas cauru gadu, tādēļ tajā pastāvīgi uzturas zinātniskais un tehniskais personāls – kopskaitā 12 cilvēki (150. att.). Seši no tiem ir zinātnieki, kas nodrošina Ukrainas ilgtermiņa antarktiskās programmas un tajā iekļauto meteoroloģisko, bioloģisko un ģeofizikālo mērījumu un novērojumu izpildi. Seši pārējie cilvēki uztur polārstaciju un uzrauga ekspedīcijas personālu, un tie ir: ekspedīcijas vadītājs, ārsts, pavārs, informācijas tehnoloģiju speciālists, mehāniķis un dīzeļa



1949



2018



149. att. Vordija māja uz Vinterailendas salas Antarktikā pagātnē un mūsdienās. Pa kreisi: 1949. gada fotogrāfija. Autors: R. Moss, publicēts ar Britu antarktiskā dienesta arhīvu servisa laipnu atļauju. Pa labi: M. Krievāna foto no 2018. gada ekspedīcijas, tā ļauj konstatēt arī Galindesa salas ledus kupola nogāzes izmaiņas.

150. att. Latvijas un Ukrainas 2018. gada antarktiskās ekspedīcijas dalībnieki. Foto: K. Lamsters, 2018.

ģenerators tehniķis. Ņemot vērā, ka pusgadu polārstacijas personāls dzīvo izolācijā no ār pasaules, cilvēku labsajūta un dzīvība ir atkarīga tikai no pašiem.

Vernadska polārstacija atrodas Galindesa salas ziemeļrietumu daļā. Vienā pusē pretī salai atrodas Dienvidu okeāna plašumi, savukārt otrā – Antarktīdas pussalas kalni (151. att.). Polārstacija sastāv no vairākām ēkām (152. att.), no kurām guļamtelpas, darba, atpūtas, laboratoriju un citas telpas ir savienotas, tādējādi, lai nokļūtu, piemēram, no guļamtelpām uz ēdamistabu, no polārstacijas nav jāiziet. Tas ir ļoti būtiski ziemā, kad sniega segas



151. att. Akadēmiķa Vernadska polārstacija Antarktikā. Fonā skats uz 7 km attālumā esošajiem Antarktīdas pussalas kalniem. Foto: K. Lamsters, 2018.



152. att. Vernadska polārstacijas ēku komplekss marta beigās, kad apkārtni sāk pārklāt sniega sega. Foto: M. Krievāns, 2018.



biezums var sasniegt vairākus metrus. Sniegs neklāj polārstacijas tuvāko apkārtni tikai dažus mēnešus gadā (no janvāra līdz martam). Polārstacija atrodas gandrīz pie pašas jūras, tādēļ tur izveidota laivu piestātne. Vienkāršas piepūšamās laivas ir galvenais un vienīgais pārvietošanās līdzeklis starp salām. Antarktīdas pus-salu piemērotos laikapstākļos iespējams sasniegt stundas laikā.

Polārstacijas apgāde ar pārtikas produktiem, degvielu un personāla nomaiņa notiek reizi gadā. Tādēļ polārpētniekiem, kuri polārstacijā ziemo, cauru gadu ir jāpārtiek no reizi gadā sagādātajiem pārtikas un citiem produktiem. Arī Latvijas ekspedīcijas dalībniekiem bija iespēja piedalīties apgādes kuģa sagaidīšanā, polārstacijas personāla nomaiņā un atvesto preču pārkraušanā (153. att.). Nozīmīgākais notikums šajā procesā ir dīzeļdegvielas pārsūkņēšana no kuģa uz degvielas tilpni (154. att.). Tajā tradicionāli piedalās viss personāls, no degvielas tilpnes līdz kuģim izliekot garu degvielas pārsūkņēšanas cauruli. Lieki piebilst, ka nākamajā dienā visuresošais dīzeļdegvielas aromāts ir īpaši nepatīkams. Dīzeļdegviela un dīzeļa ģeneratori nodrošina polārstaciju

153. att. Ikgadējā pārtikas preču pārkraušana Vernadska polārstacijā. Attēlā redzama lielākā daļa visam gadam nepieciešamo pārtikas preču. Foto: K. Lamsters, 2018.



154. att. Vernadska polārstacijas svarīgākais objekts – dižeļdegvielas tilpne. Foto: M. Krievāns, 2018.

ar nepārtrauktu elektroenerģijas padevi, kas nepieciešama visām pārējām polārstacijas sistēmām. Ar saražoto elektroenerģiju pat tiek apkurināta pirts.

Personāla nomaīņa tiek atzīmēta ar saviesīgu pasākumu polārstacijas bārā. Ar apgādes kuģi polārstacijā ierodas ne tikai 12 “ziemotāju” komanda, bet arī īsās vasaras ekspedīcijas dalībnieki, kuri īsteno dažādus pētījumu projektus. Tādējādi vairāku nedēļu garumā polārstacija ir pārapsdzīvota, jo tur mitinās gandrīz 50 cilvēki. Nepieciešamās gultasvietas tiek iekārtotas visās polārstacijas telpās, ieskaitot trenāžieru zāli.

Latvijas Universitātes ģeologi līdz Vernadska polārstacijai nokļuva ar “Polar Latitudes” kompānijas kruīza kuģi “Hebridean Sky” (155. att.). Tas ir salīdzinoši neliels pasažieru kuģis ar maksimāli 120 pasažieru ietilpību. Šis kuģis bija vienīgā iespēja, kā Latvijas polārpētniekiem nokļūt polārstacijā, jo ekspedīcijas plānošanas laikā radās neplānotas loģistikas problēmas. Sākotnēji uz Antarktiku bija paredzēts doties ar ukraiņu apgādes kuģi janvārī vai februārī, tomēr no šādas iespējas nācās atteikties, jo



155. att. Latviešu antarktiskās ekspedīcijas turpceļa kruīza kuģis "Hebridean Sky". Foto: K. Lamsters, 2018.

156. att. Latvijas antarktiskās ekspedīcijas dalībnieku kajīte. Kajītes vidū atrodas kastes ar dārzeņiem. Foto: K. Lamsters, 2018.

janvārī Ukrainas Antarktīkas pētījumu centram joprojām nebija noslēgts līgums ar potenciālo pārvadāšanas kompāniju. Tādējādi bija jāmeklē iespēja līdz polārstacijai nokļūt pašu spēkiem. To ir iespējams izdarīt, izmantojot kruīza kuģus, jo daļa no tiem dodas līdz Vernadska polārstacijai, tomēr janvārī vairums biļešu ir pārdotas. Šādiem kruīza ceļojumiem biļetes ir jāiegādājas pat divus gadus iepriekš.

Kopumā kruīza ceļojumus uz Antarktiku piedāvā vairāki desmiti kuģu pārvadājumu kompāniju, kā arī jahtas. Grāmatas autors sazinājās ar visām kompānijām, no kurām viena piedāvāja trīs vietas uz kruīza kuģa pēc dažām nedēļām. Šo vienīgo piedāvājumu ekspedīcijas organizatori arī izmantoja, turklāt kompānija piedāvāja izmitināt trīs zinātniekus divvietīgā kajītē par vairākkārt zemāku cenu. Neskaitot trīs gultas, kajītes telpā atradās arī zinātniskās iekārtas, ekipējums un pārtikas produkti, galvenokārt dārzeņi un augļi, kuri tika novietoti visos kajītes brīvajos laukumos, plauktos un atvilktnēs (156. att.). Ņemot vērā, ka personāls polārstacijā ir uzturējies jau gadu, svaigi augļi un dārzeņi ir visnepieciešamākais produkts. Kuģa saldētavās tika iekrauta arī svaiga gaļa un olas. Prece, kuras vajadzība sākotnēji izraisīja neizpratni, ir minerālūdens, tādēļ tas tika ņemts līdzī nelielā daudzumā. Tomēr vairāk nekā mēneša garumā uzturā lietojot destilētu ūdeni (dzeramais ūdens polārstacijā tiek nodrošināts, destilējot jūras ūdeni), kļuva saprotama kaut nedaudz mineralizēta ūdens vērtība. Ilgstoši lietojot uzturā destilētu ūdeni, ir arī iespējamās veselības problēmas.

Atpakaļceļa biļetes no Antarktīkas netika iegādātas, jo mājup bija paredzēts doties ar apgādes kuģi, kura ierašanās laiks tobrīd nebija zināms. Kuģis uz Antarktiku dodas no vistālāk dienvidos esošās pilsētas pasaulē – Ušvajas. Tā ir Argentīnas ostas pilsēta, no kuras uz Antarktiku dodas lielākā daļa kuģu. Ceļš līdz Vernadska polārstacijai aizņem piecas dienas. Trīs no tām tiek pavadītas, šķērsojot vienu no visvētrainākajām vietām pasaulē – Dreika jūras šaurumu. Kuģojot tam pāri, okeānā izveidojas līdz 7 m augsti viļņi. Jūras slimība dažādās izpausmēs piemeklē visus kuģa pasažierus. Lai samazinātu jūras slimības radīto nelabumu, tiek piedāvātas speciālas zāles tablešu formā vai plāksteri. Lai gan sākotnēji visiem ekspedīcijas dalībniekiem šķita, ka nelabums ir pārejošs, kuģim iebraucot Dreika jūras šaurumā, no zālēm neatteicās neviens. Kopumā viļņošanās okeānā bija tik spēcīga, ka lielākā daļa kuģa pasažieru visu dienu pavadīja kajītē. Uz kuģa ēdienreizes bija trīs reizes dienā, un latviešu pētnieki neizlaida nevienu no tām. Galu galā par pārtikas pieejamību polārstacijā pilnīgas skaidrības nav, bet uz kuģa bija restorānu cienīga ēdienkarte. Piektajā dienā, kad tika sasniegta Antarktīdas pussala, kuģa publiskajās telpās redzamo cilvēku skaits pieauga.

Vernadska polārstacija tika sasniegta 18. februārī, un, kamēr kuģa pasažieri devās ekskursijā pa polārstaciju, latviešu pētnieki izstaigāja Galindesa salu un vēlāk



devās izpētes braucienā ar laivu apkārt Argentīnas salu grupas lielākajām salām, lai izvēlētos ledus kupolus turpmākiem pētījumiem. Tie tika uzsākti jau nākamajā dienā, jo bija jau februāris – pēdējais antarktiskās vasaras mēnesis. Sākotnēji gaisa temperatūra dienā nedaudz pārsniedza 0 °C, tādēļ ledāju virsējo daļu klāja ar ūdeni piesūcināta sniega kārtā (šķīdonis). Pēc pāris dienām ekspedīcijas dalībnieku kalnu zābaki kļuva mitri, un šo mitrumu izžāvēt turpmāk tā arī neizdevās pat polārstacijas žāvētavā.

Ekspedīcijas ikdienu parasti sākas ap septiņiem no rīta. Katru diennakti polārstacijā ir dežūras, kuru laikā viens cilvēks paliek nomodā visu nakti. Viņa pienākums



157. att. Dodoties ar laivu pāri Penola šaurumam Antarktīkā, nereti sastopami vaļi. Attēlā redzama kuprvaļa mugura. Foto: K. Lamsters, 2018.

ir veikt regulāras apgaitas un uzraudzīt visu polārstacijas sistēmu, īpaši ģeneratoru, darbību. Modinātāja zvani polārstacijā ir aizliegti, jo personālam ir dažāds gulētiešanas laiks saistībā ar specifiskajiem pienākumiem un pētījumiem. Piemēram, meteorologiem jāveic meteoroloģiskie novērojumi ik pēc trīs stundām. Ja kādu personu nepieciešams pamodināt, iepriekšējā vakarā uz kopīgās tāfeles ir jāuzraksta pamodināšanas laiks, un polārstacijas dežurants to noteikti izpildīs. Uzraksts “7:00 wake up Latvians” (septiņos piecelt latviešus) no tāfeles praktiski netika nodzēsts.

Dodoties ārpus polārstacijas, svarīgi arī to atzīmēt uz tāfeles. Līdzī vienmēr jāņem rācija, un ik pēc divām stundām jāsazinās ar bāzes dežurantu, informējot, ka viss ir kārtībā. Brokastīs tiek apēsti iepriekšējās dienas pusdienu un vakariņu pārpalikumi. Vienīgā ēdienreize, ko latviešu pētnieki mēģināja ieturēt kopā ar pārējiem, bija vakariņas, lai gan nereti pētījumi ieilga. Katru dienu polārstacijā tiek cepta svaiga baltmaize, tādēļ līdzpaņemtajās pusdienās laukā parasti ir baltmaize un zivju konservs. Pēc brokastīm ekspedīcijas dalībnieki salika ekipējumu laivā un devās uz kādu no arhipelāga salām (157. att.). Parasti bija jāuzgaida ukraiņu kolēģis, kurš mēdza palīdzēt pētījumu veikšanā. Uz tālākām salām un Antarktīdas pussalu dažas reizes ekspedīcijas dalībniekus aizveda arī poļu jahta “Selma expeditions” (158. att.), kuras kapteinis mēdza iegriezties Vernadska polārstacijā.

Piemērotas vietas atrašana un izkāpšana no laivas vienmēr bija pirmais rīta izaicinājums, jo salu krasti parasti ir klinšaini un sliedeni. Izkāpjot krastā, ledus kupola augstākajā vietā tika uzstādīta GPS bāzes stacija. Ja laikapstākļi bija piemēroti, pa visu salu tika izlikti atbalsta punkti, kurus iespējams atpazīt aerofotogrāfijās. Tās tika iegūtas ar bezpilota lidaparātu *DJI Phantom 3 Advanced* (159. att.). Pēc aerofotografēšanas tika uzmērītas atbalsta punktu koordinātas, un pēc tam atbalsta punkti tika savākti. Argentīnas salu aerofotografēšana ar dronu tika veikta pirmo reizi, tādējādi bija iespējams izveidot detalizētākas ortofotokartes, nekā līdz tam. Kopumā aerofotogrāfēšanas misijas bija veiksmīgas, lai gan dažnedažādu problēmu dēļ lidojumi aizņēma vairāk laika, nekā plānots. Parasti problēmas izraisīja laikapstākļi vai savienojuma traucējumi starp bezpilota lidaparātu, pulti un planšetdatoru. Laikapstākļi Antarktīkā ir ļoti mainīgi, un okeāna tuvums nodrošina



158. att. Ceļā uz Antarktīdas pussalu ar poļu jahtu "Selma expeditions" kādā sniegotā marta dienā. Foto: K. Lamsters, 2018.



159. att. Bezpilota lidaparāta piezemēšanās antarktiskās ekspedīcijas dalībnieka rokās. Fonā – Antarktīdas pussala. Foto: K. Lamsters, 2018.

biežu miglu un spēcīgu vēju. Drona veiktspēju ietekmē arī aukstums, un dažreiz šo lidaparātu nav iespējams pacelt gaisā, jo akumulatori ir atdzisuši. Lai to atrisinātu, akumulatori tika sildīti, tos novietojot apģērba iekškabatās.

Nākamais uzdevums bija salas ledus kupolu mērījumi ar ģeoradaru. Uz lielākajām salām šie pētījumi tika veikti vairākas dienas. Dati ar ģeoradaru tiek ierakstīti, pārvietojoties paralēlās profila līnijās, kas izvietotas 25 m attālumā. Vēlāk mērījumi tika veikti arī pa perpendikulārām līnijām, ierakstot datus režģveida tīklā. Atsevišķs ģeoradara datu fails tika ierakstīts, veicot aptuveni 50 m lielu attālumu. Lai ierakstītu precīzus datus regulārā tīklā, sākotnēji ledus virsmā tiek izveidota taisna profila līnija, to ik pēc 50 m atzīmējot ar ledū ieskrūvētu skrūvi, kurai galā piestiprināta sarkana lente. Persona, kas nes ģeoradaru, pārvietojas no viena punkta uz nākamo. Aiz šīs personas iet GPS operators, kurš uzmēra katra punkta precīzas koordinātas un augstumu. Lai nākamā profila līnija būtu paralēla iepriekšējai, tika izmantota 25 m gara virve, kuras vienu galu turēja GPS operators, bet otru galu – trešā persona. Abas personas pārvietojās 50 soļus uz priekšu, un vienlaicīgi iepriekšējā profila punkti tika novākti un jauni ieskrūvēti nākamajā profilā. Tādējādi mērījumi tika veikti pa visu ledāju, neuzmērot tikai atsevišķus laukumus ledāja malas tuvumā, kur atrasties ir pārāk bīstami plaisu vai sniega sanesumu dēļ. Dažviet, ja ledus kupols izveidojies arī virs ūdens starp diviem sauszemes izvīzījumiem, zem ledāja atrodas plaša arka, virs kuras atrasties varētu būt bīstami (160. att.). Šādā gadījumā tika izmantota cita ģeoradara antena, kura bija piestiprināta pie virves un pārvilkta pāri plānajam ledum.

Ekspedīcijas beigās ģeologu izmantotā ģeoradara antena pārstāja funkcionēt. Antena pirms ekspedīcijas tika speciāli pielāgota, lai to padarītu praktiski ūdensnecaurlaidīgu, bet mitrajos apstākļos antenas mikroshēmās bija izveidojies kondensāts un sabojājis savienojumus. Diemžēl bojājumus novērst neizdevās, un dažas turpmākās dienas mērījumi tika pabeigti, izmantojot ukraiņu ģeofiziķa ģeoradaru, kas nebija piemērots pētījumu veikšanai uz bieziem ledājiem, bet līdz aptuveni 20 m ar to bija iespējams iegūt kvalitatīvus datus.

Pēc atgriešanās polārstacijā drēbes un apavi tiek novietoti žāvētavā un jāizžāvē arī iekārtas. Pēc vakariņām tiek veikti pieraksti par dienas laikā paveikto, turklāt visi dati tiek pārrakstīti gan datora, gan ārējā cietajā diskā. Ik pēc pāris dienām nosūtām īsas ziņas tuviniekiem, izmantojot ierobežotos interneta resursus. Ziņu nosūtīšanu ar elektronisko pastu vienreiz dienā veic informācijas tehnoloģiju speciālists. Viņš arī vienreiz dienā saņem ienākošās ziņas un nodod tās polārstacijas personālam. Parasti brīvā laika ekspedīcijas dalībniekiem ir pavisam nedaudz, lai, piemēram, veiktu ierakstus dienasgrāmatā. Tā ikdienas pētījumi noris aptuveni mēnesi.



Pārējie polārstacijas iemītnieki nerima atgādināt, ka latviešiem ļoti veicies ar laikapstākļiem, jo mēneša laikā tikai vienu dienu nācās palikt polārstacijā laikapstākļu dēļ. Pētījumi tika pārtraukti marta beigās, jo ilgāk par nedēļu laikapstākļi bija tik nepiemēroti, ka pat pārvietošanās ārpus polārstacijas kļuva sarežģīta spēcīgā vēja un snieguputeņa dēļ. Labi, ka lielākā daļa pētījumu bija pabeigti pirms nelabvēlīgo laikapstākļu iestāšanās.

Veicot pētījumus Antarktīkā, jāreķinās ar tās pastāvīgajiem iemītniekiem. Gandrīz uz visām salām atrodas kāda ausroņu jeb kotiku (161., 162. att.) kolonija. Katru no tām veido vairāki desmiti mātišu un viens tēviņš. Lai gan lielāko dienas daļu kotiki laiski gulšņā, tēviņi modri apsargā savu teritoriju. Ja kotikiem pietuvojas, tie kļūst agresīvi un var sākt “skriet” virsū. Īsās distancēs tie var sasniegt cienījamu ātrumu. Lai gan visi Antarktīkas iemītnieki ir jārespektē un jāturas no tiem tālāk, kotiki reizēm ekspedīcijas dalībniekus mēdza pārsteigt, jo ne vienmēr viņus izdevās laikus pamanīt to tumšās krāsas dēļ.

Reizēm bija sastopami arī Vedela roņi un krabjēdāvroņi, kas parasti atpūtās uz aisbergiem. Vieni no izteismīgākajiem un lielākajiem zīdītājiem Antarktīkā ir ziloņroņi, to tēviņiem attīstījies

160. att. Barhanu salas ledus kupols ar izteismīgu ledus arku. Foto: M. Krievāns, 2018.



161. att. Ausroņi jeb kotiki – uz sauszemes visbiežāk sastopamie zidītāji Argentīnas salu grupā Antarktīkā. Foto: K. Lamsters, 2018.



162. att. Snaudulojošs kotiks uz kādas Antarktīkas salas. Foto: K. Lamsters, 2018.

neparasts snuķis. Tēviņu izmērs var sasniegt 5–6 metrus. Plēsīgākie roņu dzimtas pārstāvji Antarktīkā ir jūras leopardi. To pamatbarība ir pingvīni, un zināmi arī uzbrukumi cilvēkiem. Tā kā apkārt Vernadska polārstacijai izveidojusies džentū pingvīnu kolonija, jūras leopardi pastāvīgi uzturas jūrā polārstācijas tuvumā. Krastā viņi vasarā izkāpj ļoti reti. Latviešu ekspedīcijas laikā tika pieredzēti divi gadījumi, kad izpaudās jūras leopardu agresija. Abās reizēs pret gumijas laivām, kurās nebija cilvēku. Leoparda izplēstais caurums laivā bija vairāku desmitu centimetru diametrā. Ukrainas pētnieki piedzīvojuši arī gadījumu, kad jūras leopardis peldējis pakaļ laivai un mēģinājis tai uzbrukt.

Lielākie Antarktīkas un visas pasaules zīdītāji ir vaļi, un Dienvidu okeāns ir nozīmīga dzīves vieta daudzām vaļu sugām. Penola šaurumā starp Antarktīdas pussalu un Argentīnas salām arī ekspedīcijas dalībniekiem reizēm izdevās novērot un sadzirdēt kuprvaļus (163., 164. att.), īpaši – veicot pētījumus uz tālākās Irizāra salas. Dodoties laivās uz Antarktīdas pussalu, varēja

163. att. Antarktīkā biežāk novērojamā vaļa – kuprvaļa – astes spura. Foto: K. Lamsters, 2018.





164. att. Kuprvaļa izelpotā ūdens strūkļa. Foto: K. Lamsters, 2018.

pārsteigt pēkšņa vaļa muguras parādīšanās. Antarktiskās vasaras laikā daudzas vaļu sugas migrē uz dienvidiem barības meklējumos. Tie, līdzīgi kā citi Antarktīdas iemītnieki, pārtiek galvenokārt no krila, kas ir Antarktīkas ekosistēmas pamats. Krila pastāvēšana savukārt ir atkarīga no fitoplanktona, kura attīstību nosaka Dienvidu okeāna virspusē nonākošo barības elementu pieejamība visapkārt Antarktīdai.

Industriāla mēroga vaļu medības Antarktīkā tika uzsāktas 20. gadsimta sākumā un turpinājās līdz deviņdesmitajiem gadiem. Japāna vaļu “zinātnisko” zveju Antarktīkā pārtrauca tikai 2019. gadā. Kopumā Dienvidu puslodē tika nogalināti aptuveni divi miljoni vaļu, daudzas sugas gandrīz novedot līdz iznīcībai, un tās ir nopietni apdraudētas joprojām. Tādējādi vaļu un to paradumu izzināšana ir būtisks daudzu valstu antarktisko pētniecības programmu uzdevums. Antarktīkā sastopami arī pasaules lielākie vaļi – Antarktīkas zilie vaļi, kuri var sasniegt 34 m garumu. Patlaban to populācijas lielums veido tikai 3% no kādreizējās populācijas pirms industriālās zvejas uzsākšanas.



Izplatītākie nelidojošie putni Antarktīkā, protams, ir pingvīni, un ar to klātbūtni ekspedīcijas dalībniekiem bija jāsadzīvo katru dienu, jo pingvīnu kolonija atradās visapkārt Vernadska polārstacijai. Galvenokārt uz Antarktīkas salām dzīvo otas astes pingvīnu ģints pārstāvji. Ģintī ir trīs sugas – Adeles pingvīni, zodasiksnas pingvīni (165. att.) un džentū pingvīni (166. att.). Lielākie ģintī ir džentū pingvīni, un tieši tie veido kolonijas uz Argentīnas salām. Šīs pingvīnu sugas īpatņu augums var sasniegt 90 cm. Par tiem lielāki ir tikai karaliskie un imperatorpingvīni. Džentū pingvīni ir arī ātrākie peldētāji visā pingvīnu dzimtā. Peldēšanas ātrums var pārsniegt 30 kilometrus stundā, un līdzīgi delfīniem pingvīni var peldēt, daudzkārt izlecot un ienirstot atpakaļ ūdenī. Mazākie otas astes pingvīnu ģints pārstāvji ir zodasiksnas pingvīni. Tiem raksturīgā pazīme ir melna svītra pāri visai zoda daļai. Visu pingvīnu sugas ir atšķiramas ne tikai pēc ārējā izskata, bet arī pēc to balsīm. Lai arī zodasiksnas pingvīni nav apdraudēti, to kopējais skaits samazinās, un tas tiek saistīts ar klimata pārmaiņām, kas ietekmē pingvīnu galvenās barības – krila – produktivitāti.

Pingvīnu pastāvīgās klātbūtnes dēļ arī latviešu ģeologiem bija jāievēro daži pavisam vienkārši noteikumi. Pirmkārt, atrodoties

165. att. Mazākie otas astes pingvīnu ģints pārstāvji Antarktīkā – zodasiksnas pingvīni. Foto: K. Lamsters, 2018.

polārstacijas apkārtnē, jāskatās zem kājām. Otrkārt, jāpārbauda zābaku zole pirms ienākšanas polārstacijā. Treškārt, jāmēģina nepaklupt, dodoties uz pirts būdiņu, kura atradās aiz blīvi apdzīvotās kolonijas daļas. Šie ieteikumi galvenokārt ir saistīti ar pingvīnu ekskrementu plašo izplatību, īpaši – ar to nelāgo smaku.

Pingvīnu kolonijas parasti ir izkārtotas diezgan koncentriski, un to centrālajā daļā ekskrementi pilnībā pārklāj iežus, veidojot sarkanu slāni. Lauka pētījumu laikā pingvīni arī mēdza atgādināt par savu klātbūtni, reizēm parādoties pat ledus kupolu augstākajās daļās. Neparastākā novērotā pingvīnu uzvedības nianse bija ģeologiem zināmā interese par oļiem, no kuriem pingvīni veido savu ligzdu, izkārtojot tos riņķveidīgi. Pastāvīgā pingvīnu rosība polārstacijas apkārtnē bieži bija saistīta ar nepārtrauktu oļu pārvietošanu, tos nozogot no citām ligzdām. Otrs savdabīgākais novērojums bija pingvīnu pārvietošanās uz sauszemes, tie, lai gan brīžiem izskatījās neveikli, bija ļoti ātri. Turklāt atsevišķas pingvīnu populācijas mitinājās klintīs salu augstākajās daļās, līdz kurām nokļūšana ir ilgstoša un sarežģīta.

166. att. Džentū pingvīni dodas uz okeānu. Foto: K. Lamsters, 2018.

No lidojošajiem putniem Antarktikas salās visbiežāk bija sastopama dienvidu polārā klijkaija jeb Antarktikas klijkaija (167.,168. att.). Šie putni mēdz sagādāt raizes arī polārstacijas





167. att. Dienvidu polārā
klījkaija jeb Antarktikas
klījkaija. Foto: K. Lamsters,
2018.



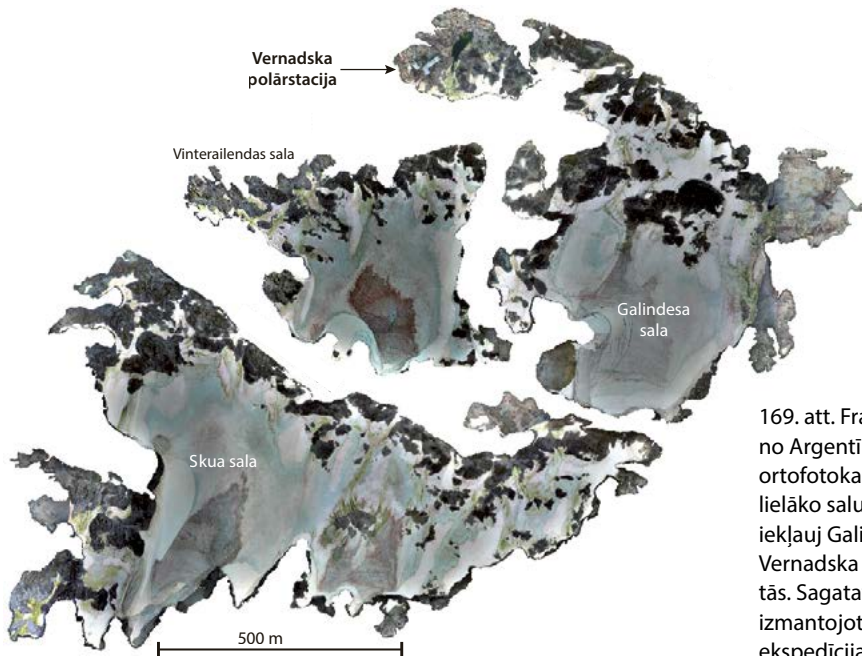
168. att. Antarktikas
klījkaijas spēka
demonstrējums. Foto:
K. Lamsters, 2018.

personālam to ziņkārības un salīdzinoši lielā spēka dēļ. Polārpētnieku vidū izplatīts bija stāsts par klijkaijas lielāko guvumu – dzelzs lauzni, kuru klijkaija nozaga un, pacēlusies spārnos, iemeta jūrā. Klijkaiju ligzdu apkārtnē mēdz atrasties arī dažādas no tūristiem nozagtas lietas, piemēram, rotaļmanta rozā sivēns. Lielākās problēmas ekspedīcijā sagādāja klijkaiju pastāvīgā ziņkārība un vēlme visus spīdīgos un košos priekšmetus iegūt savā īpašumā. Līdz ar to, izvietojot radiolokācijas profilu atzīmes, skrūves ar to galā piestiprināto sarkano lenti ledū bija jāstiprina maksimāli stingri.

Klijkaijas ir sastopamas gan Antarktīkā, gan Arktīkā, jo ir spējīgas izdzīvot skarbos apstākļos. Tās pat var būtiski ietekmēt pingvīnu populācijas, iznīcinot pingvīnu olas un jaunos pingvīnus. Ir bijuši gadījumi, kad klijkaijas ir nogalinājušas gandrīz visus jaundzimušos pingvīnus kolonijā. To spēcīgais knābis var izsist caurumu pat pieaugušu pingvīnu galvaskausā. Tādējādi arī polārpētnieku pārvietošanās pa salu ledājiem klijkaiju ligzdu tuvumā var būt bīstama, īpaši brīžos, kad tikko izšķīlušies klijkaiju mazuli.

Antarktīkas ekspedīcijā tika iegūti jauni un detalizēti dati par Argentīnas salu virsmas reljefu, ledāju izplatību, biežumu un uzbūvi, un tie ir publicēti vairākos zinātniskos rakstos (Karušs et al., 2019; Lamsters et al., 2019a, b; 2020b). Šī ekspedīcija apliecina Latvijas zinātnieku kapacitāti iesaistīties Antarktīkas reģiona ledāju pētījumos. Ekspedīcijā tika iegūts vairāk nekā 11000 aerofotogrāfiju, no kurām izveidotas ortofotokartes un digitālie virsmas modeļi astoņām Argentīnas salām (Skuas, Galindesa, Urugvajes, Kornera, Vinterailendas, Irizāras un divām Barhanu salām). Ortofoto karšu vidējā izšķirtspēja ir 3 cm, savukārt digitālo virsmas modeļu vidējā izšķirtspēja ir 7 centimetri. Iegūtie reljefa modeļi un kartes sniedz unikālu un augstas detalizācijas informāciju par salu un ledus kupolu virsmas reljefa artikulāciju un izplatību. Materiāli var tikt tālāk izmantoti, gan lai pētītu veģetācijas izmaiņas un dzīvnieku populācijas, gan arī lai veiktu ledāju izmaiņu monitoringu. Izveidotajās ortofotokartēs (169. att.) precīzi izšķiramas ledus un sniega klātās platības, roņi un pingvīnu populācijas un atsevišķi indivīdi, kā arī novērojamas, piemēram, sniega aļģu klātās platības ledus kupolu augstākajās daļās. Savukārt sagatavotie salu virsmas modeļi ļauj detalizēti novērtēt gan ģeoloģiskas struktūras, gan ledāju izplatības un virsmas reljefa īpatnības. Galindesa salas virsmas modeļi izšķiramas gan Vernadska polārstacijas ēkas, gan plaisas pie ledus kupola stāvākās sienas (170. att.). Savukārt Urugvajes salas digitālais virsmas modelis (171. att.) atklāj neparastu ledus veidojumu – garu un šauru ledus valni salas dienvidu daļā, tas šaurākajā vietā ir tikai dažus metrus plats.

Ekspedīcijas laikā uz lielākajiem Argentīnas salu ledus kupoliem tika veikti apjomīgi pētījumi ar ģeoradaru, kopumā ierakstot aptuveni 60 kilometrus profila

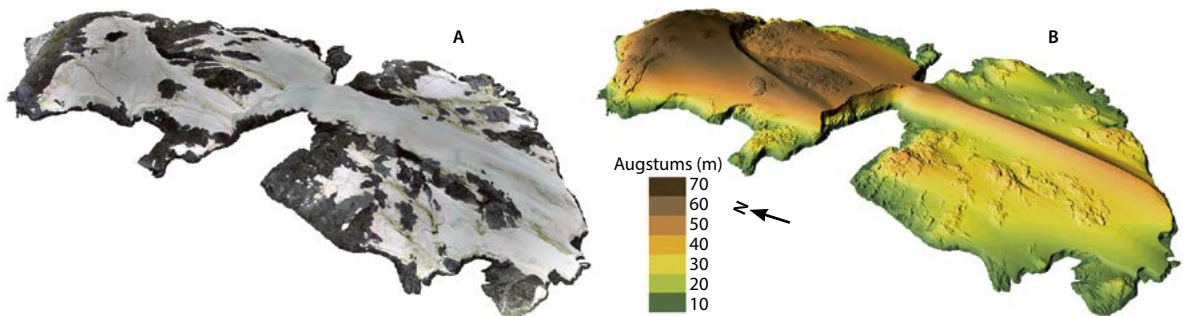


169. att. Fragments no Argentinas salu ortofotokartes, kurā attēlota lielāko salu grupa, kas iekļauj Galindesa salu ar Vernadska polārstaciju uz tās. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2018. gada ekspedīcijas datus.



170. att. Galindesa salas virsmas reljefa modelis. Attēla apakšējā kreisajā stūrī redzamas Vernadska polārstacijas ēkas, kuras noder arī mēroga apjaušanai. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2018. gada ekspedīcijas datus.

līniju. No iegūtajiem datiem izveidoti ledus kupolu biezuma un zemledāja reljefa modeļi (Karušs et al., 2019). Tādējādi pirmo reizi tika iegūti dati par šo ledus kupolu biezumu un iekšējās uz-būves īpatnībām. Lielākais ledus biezums konstatēts Galindesa salas ledus kupolā, tas sasniedz 35,3 metrus. Uz šīs salas ir arī lielākais vidējais ledus biezums – 11,6 metri. Uz mazākās Kornera

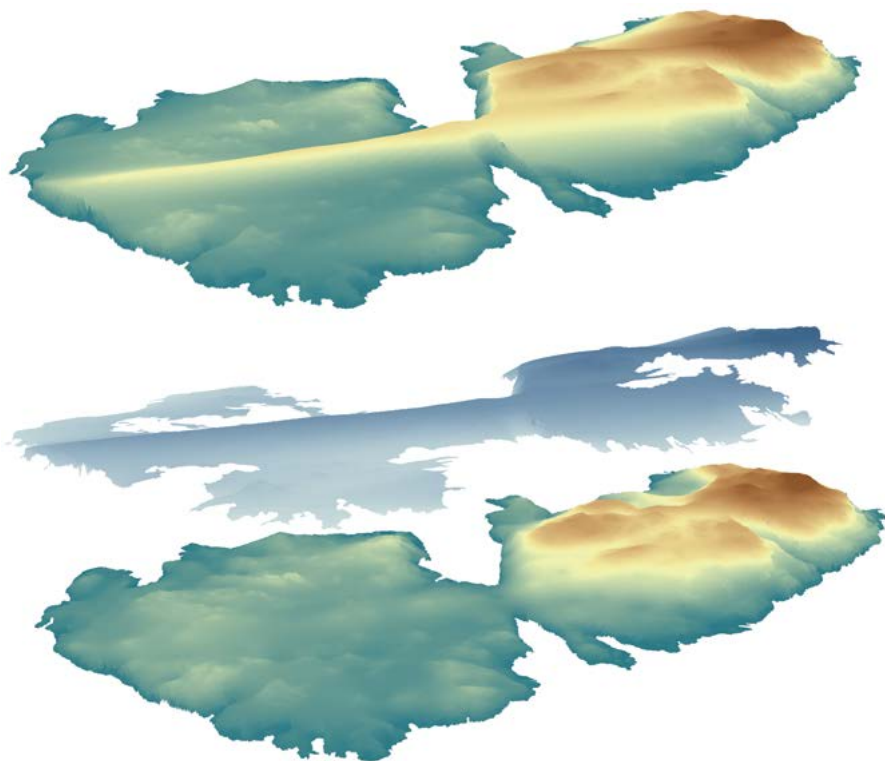


171. att. Urugvajas salas ortofotokarte un virsmas reljefa modelis. Salas garums –1 km. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2018. gada ekspedīcijas datus.

salas maksimālais ledus biezums ir tikai 7 m, savukārt vidējais ledus biezums ir tikai viens metrs. Tādējādi šie nelielie ledāji ir īpaši jutīgi pret klimata pārmaiņām, un mazās salas pie Antarktīdas pussalas tuvā nākotnē piedzīvos ievērojamas izmaiņas.

Ledāju iekšējo uzbūvi lielākoties raksturo nedeformēta vai vāji deformēta primārā stratifikācija, ko veido ziemas ledus un vasaras ledus slāņi. Vietām ledus kupolu malās nodalāmi vairākus metrus bieza sniega un firna slāņi. Zemledāja reljefam un valdošo vēju virzienam ir būtiska nozīme ledāju attīstībā. Piemēram, iegarenais ledus valnis uz Urugvajas salas visdrīzāk veidojies, laika gaitā krājoties sniegam aiz salas ziemeļu daļā esošās klints. Zem šī ledus vaļņa neatrodas pamatiežu pacēlums (172. att.). Zem Urugvajas salas ledus kupola atklāts arī līdz šim nezināms zemledāja ezers. Tas, visticamāk, veidojies, iepakā zem ledāja uzkrājoties ledus un sniega kušanas ūdeņiem, kuri tur ieplūst no virszemes ezera. Otru ezeru 2019. gadā atklāja Ukrainas pētnieki uz Galindesa salas. Tas savukārt izveidojies ledus alas dibenā, kur no virsledāja plaisām ieplūst virsledāja kušanas ūdeņi. Ierakstītie radiolokācijas dati atklāj arī salu ledus kupolu iekšējās uzbūves nevienmērību. Piemēram, ir iespējams, ka salās tālāk uz ziemeļiem sastopams arī siltais ledus (porās starp ledus kristāliem satur ūdeni).

Antarktiskajā ekspedīcijā ievākti arī nogulumu, augsnes, sūnu, ledus un ūdens paraugi, kas nodoti zinātniekiem no dažādām institūcijām mikrobioloģiskās daudzveidības, piesārņojuma, augsnes attīstības un nogulumu graudu virsmas mikrostruktūru analizēm. Kopumā Antarktīkā tika ievākti un no tās izvesti apmēram 30 kg paraugu, un daļa no tiem joprojām tiek uzglabāti.



Paraugu analizēšanā ir iesaistīties Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskais institūts “BIOR”. Tā pētnieki analizē noturīgos piesārņotājus no Antarktīkas un Arktikas (Svalbāras) ekspedīcijām. Latvijas Biomedicīnas pētījumu un studiju centra pētnieks Ņikita Zrelovs, izpētot Antarktīdas pussalas augšņu paraugos sastopamās baktērijas, atklājis līdz šim nezināmus bakteriofāgus. Tie ir vīrusi, kas inficē baktērijas. Bakteriofāgu praktiskais lietojums nākotnē var būt saistīts ar to izmantošanu cīņā ar baktērijām, kas ir rezistentas pret antibiotikām.

Ģeologu antarktiskā ekspedīcija varētu būt pirmais solis Latvijas ilgtermiņa antarktisko pētījumu attīstībā. Uzsāktā sadarbība ar Ukrainas Nacionālo Antarktīkas pētījumu centru joprojām turpinās, un Latvijai ir iespēja veidot ciešu sadarbību, organizējot ekspedīcijas arī nākotnē. Plānojot turpmākus pētījumus Antarktīkā, Latvijai būtu obligāti jāpievienojas Antarktīkas Līguma sistēmai (*Antarctic Treaty System*), tās dalībvalstis ir lielākā daļa

172. att. Urugvajās salas virsmas (augšā) un zemledāja reljefa (apakšā) modelis. Apakšējā attēlā redzama sala bez ledus kupola – tas ir attēlots atsevišķi virs salas. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2018. gada ekspedīcijas datus.

Eiropas Savienības valstu. Zinātnisko pētījumu veikšanai Antarktīkā neatsverama nozīme būtu Latvijas zinātniskās bāzes izveidei. Šādas bāzes izveidošana ļautu Latvijas visdažādāko jomu zinātniekiem iesaistīties globāli nozīmīgu vides jautājumu risināšanā, kuri mūsdienās ir īpaši aktuāli saistībā ar klimata pārmaiņām. Turklāt, ņemot vērā Latvijas zinātnieku un uzņēmēju iesaisti, piemēram, kosmosa pētniecībā un dažādu videi draudzīgu un ilgtspējīgu tehnoloģisko risinājumu izstrādē, antarktiskā bāze būtu vienojošs projekts, kas veicinātu starpnozaru pētījumu attīstību un augsto tehnoloģiju attīstību zinātniskās darbības un dzīvības nodrošināšanai īpaši nelabvēlīgos vides apstākļos.

ISLANDE – 2018

2018. gadā ģeologu komanda organizēja jau ceturto ekspedīciju uz Islandi, tā norisinājās tikai četrus mēnešus pēc Antarktīkas ekspedīcijas. Šoreiz ekspedīcijas galamērķis bija Eijabakajokula (*Eyjabakkajökull*) izvadledājs Islandes austrumos, kurš drenē Vatnajokula ledus kupola ziemeļaustrumu daļu. Šis ledājs tika izvēlēts, jo tas ir pulsējošs izvadledājs, pie kura ir veikti nozīmīgi ledāja reljefa formu pētījumi, bet detalizētas informācijas par ledus biezumu, iekšējo struktūru un zemledāja topogrāfiju trūka. Ekspedīcijā piedalījās Kristaps Lamsters, Māris Krievāns, Jurijs Ješkins un Jānis Karušs (173. att.).

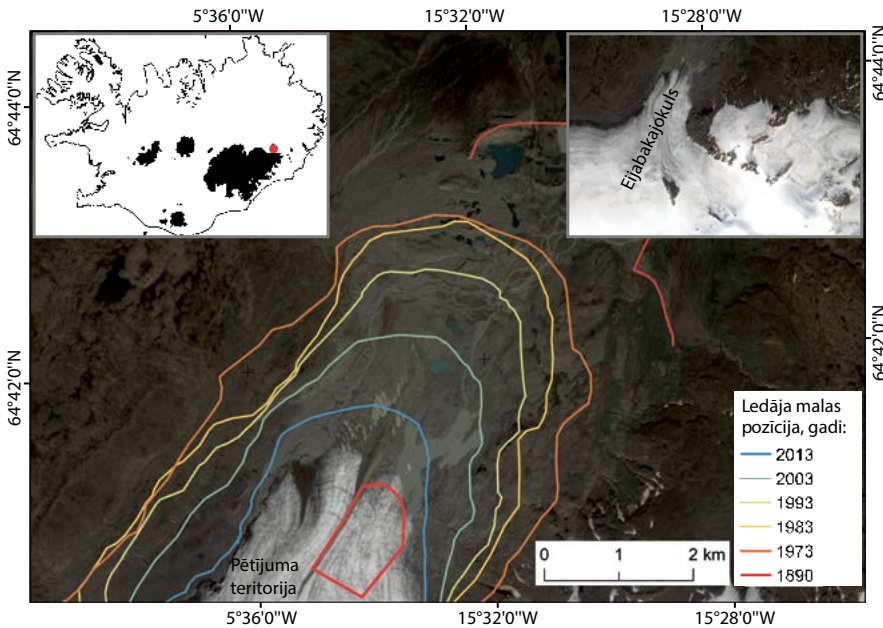
Vēsturiski zināmie Eijabakajokula izvadledāja uzplūdi ir norisinājušies 1890., 1931., 1938. un 1972.–1973. gadā. Ledāja malas pozīcijas šajos uzplūdus var rekonstruēt pēc glaciotektoniskas izcelsmes gala morēnām, kuras atrodas atšķirīgā attālumā no ledāja un veidojušās dažādu uzplūdu laikā. Pētījumi liecina, ka kopumā ledājs ir sācis pulsēt jau vismaz pirms 2200 gadiem. Pēdējos gados norisinās strauja ledāja malas atkāpšanās. Kopš ledāja malas tālākās pozīcijas mazajā leduslaikmetā tā mala ir atkāpusies par 5 km. Savukārt no 1973. gada stāvokļa ledāja mala atkāpusies par 3,4 km, kas atbilst 75,5 m gadā (174. att.). Pēdējos divdesmit gados ledāja malas atkāpšanās ātrums ir palielinājies, un dažos gados pat pārsniedzis 200 m. Eijabakajokula negatīvā masas bilance var samazināt uzplūdu biežumu (patlaban ledājs nav pulsējis jau gandrīz 50 gadus) vai arī tas var pārstāt pulsēt pavisam, ja tiek pieņemts, ka uzplūdu biežumu kontrolē klimats un ledus masas bilance. Jāatzīmē, ka šādas sakarības ne vienmēr ir novērotas.

Eijabakajokula izvadledājam var izdalīt trīs atsevišķas plūsmas vienības, kas pārvietojas ar atšķirīgu ātrumu. Šis ledāja plūsmas ablācijas zonā atdala izteiksmīgas grēdas, kuras dēvē par vidusmorēnām. Lielākās vidusmorēnas (175. att.) augstums pārsniedz 30 m, un tā galvenokārt veidota no ledus, kuru pārklāj līdz 1 m



173. att. 2018. gada Islandes ekspedīcijas dalībnieki. No kreisās: Kristaps Lamsters, Māris Krievāns, Jurijs Ješkins, Jānis Karušs. Foto: J. Ješkins, 2018.

174. att. Eijabakajokula izvadledājs un rekonstruētās ledāja malas pozīcijas 1890. gadā (pēc gala morēnas izvietojuma) un ik pēc 10 gadiem kopš 1973. gada (no *Landsat* un *Sentinel* satelītattēliem). Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot *Sentinel-2* satelītattēlu (2018. gada 3. septembris).





175. att. Eijabakajokula izvadledājs un Snaifela (*Snaefell*) vulkāns tālumā. Tas ir augstākais Islandes vulkāns, kas atrodas ārpus ledus kupoliem. Foto: K. Lamsters, 2018.

biezs virsledāja atlūzu materiāls. Virsledāja atlūzas samazina ledus saņemto siltuma daudzumu, tādējādi ledus kušana zem tām ir lēnāka. Eijabakajokula pieledāja teritorijā atrodas liels daudzums plaisu aizpildījuma grēdu un flūtingu, arī daži drumlini, zigzagveida un klasiskie osi, kā arī sandru līdzenumi ar glaciokarsta ieplakām. Ledāja ziemeļaustrumu daļas priekšā izveidojies liels ledāja sprostezers, kurā atrodas arī neliels likumots osa valnis (176. att.).

Ņemot vērā ledāja straujo atkāpšanos pēdējos gadu desmitos, pirms ekspedīcijas ir būtiski iepazīties ar jaunākajiem satelītattēliem par potenciālo pētījumu teritoriju un nokļūšanu tajā. Lai gan viens no ērtākajiem veidiem, kā sākotnēji iepazīt plānoto teritoriju, ir izmantot programmu *Google Earth*, jāatceras, ka tur pēc noklusējuma iestatījumiem attēlotie satelītattēli ne vienmēr ir jauni. Piemēram, pietuvinot Eijabakajokula ledāju, būs redzams vairāk nekā 10 gadus vecs satelītattēls, kurā ledāja malas pozīcija atrodas gandrīz 2 km tālāk nekā 2020. gadā. Lai precīzi izplānotu ekspedīciju, nepieciešams izanalizēt jaunākos satelītattēlus.



Tādi pieejami, piemēram, mājaslapā www.planet.com, kur tiek piedāvāts lejupielādēt satelītattēlus pat ar 3 m izšķirtspēju. Izcili brīvpieejas satelītattēli pieejami no Eiropas Kosmosa aģentūras *Landsat* un *Sentinel* misijām. Piemēram, *Sentinel-2* misijā polārajā orbītā atrodas divi satelīti, un satelītattēli ir brīvi pieejami ik pēc dažām dienām ar maksimālo izšķirtspēju 10 m uz pikseli. Šie satelītattēli aptver teritoriju līdz pat 84. ziemeļu platumā grādam.

Arī šajā ekspedīcijā tika piedzīvoti polārajiem apgabaliem raksturīgi laikapstākļi. Vienā no pirmajām ekspedīcijas dienām pētījumi tika veikti lietū, un pēc tam radās problēmas ar signāla pārraidi no ģeoradara uz lauka datoru. Kādā citā ekspedīcijas dienā pētījumi bija jāpārtrauc, jo pārstāja darboties vads, kurš savieno ģeoradaru ar datoru. Lai lauka apstākļos saprastu problēmas cēloni, daļai ekspedīcijas dalībnieku bija jāmēro ceļš līdz bāzes nometnei pēc rezerves aprīkojuma un atpakaļ, un tas kopumā aizņēma vairāk nekā trīs stundas. Kādā citā dienā ekspedīcijas

176. att. Eijabakajokula izvadledāja pieledāja teritorija ar zem ledāja veidoto reljefa formu daudzveidību. Labajā pusē atrodas drumlini un virs tiem plaisu aizpildījuma grēdas. Pieledāja ezerā izveidojies osa valnis. Attēla kreisajā pusē atrodas morēnas līdzenums, kurā paralēli cits citam stiepjas flūtingi. Foto: M. Krievāns, 2018.

dalībniekus pārsteidza sniegs (177. att.). Lai gan pētījumu teritorija atrodas uz ledāja, tādā augstumā vasarā sniegs nav tipiska parādība, bet tas darbu īpaši neapgrūtina, pretēji lietum. Tā kā plānoto pētījumu veikšanai ir iēplānotas arī rezerves dienas, visi pētījumi tika paveikti par spīti sarežģījumiem un tehniskām problēmām. Tām ģeologi bija attiecīgi sagatavojušies, ekspedīcijā ņemot līdzī rezerves iekārtas un vadus.

Ekspedīcijas noslēgumā tika atrasts interesants iespaidīga izmēra zemledāja tunelis (178. att.), kurā ledājūdeņi vairs neplūst. Tunelis stiepjas dziļi zem ledāja, un tālāku iekļuvi tajā apgrūtina sarežģīts zemledāja reljefs. Zemledāja tuneļa izlūkošana radīja idejas nākamajām ekspedīcijām, kurās varētu veikt šādu tuneļu lāzerskenēšanu un trīsdimensionālu modeļu izveidi.

Ekspedīcijā tika iegūti dati par Eijabakajokula ziemeļausstrumu daļas plūsmas vienības ledus virsmu un virsledāja struktūrām (atvērtām un aizvērtām plaisām, ūdensrijējiem, kušanas ūdeņu gultnēm), ledus biezumu, par iekšledāja struktūru (iekšledāja kanāliem, plaisainību) un zemledāja reljefu (Lamsters et al., 2020c). Tāpat kā iepriekšējās ekspedīcijās, radiolokācijas mērījumi tika veikti ar ģeoradaru *Zond-12e*, izmantojot 38 MHz

177. att. Islandes ekspedīcijas bāzes nometne sniegainā augusta dienā. Attēla kreisajā pusē atrodas ekspedīcijas dalībnieku ierīkotā pastāvīgā GPS bāzes stacija. Foto: K. Lamsters, 2018.





antenu. Kopumā tika ierakstīti 15 radiolokācijas profili perpendikulāri ledus kustības virzienam un 4 profili paralēli ledus kustības virzienam. Kopumā veikti mērījumi 20 km garumā, aptverot 1,5 km² lielu platību ledāja ablācijas zonā. Ledāja virsmas aerofotogrāfiju ieguvei tika izmantots bezpilota lidaparāts *DJI Phantom 4 Pro v2.0*. No aerofotogrāfijām ar programmu *Agisoft PhotoScan Pro* vēlāk tika izveidota ledāja ortofotokarte un virsmas modelis.

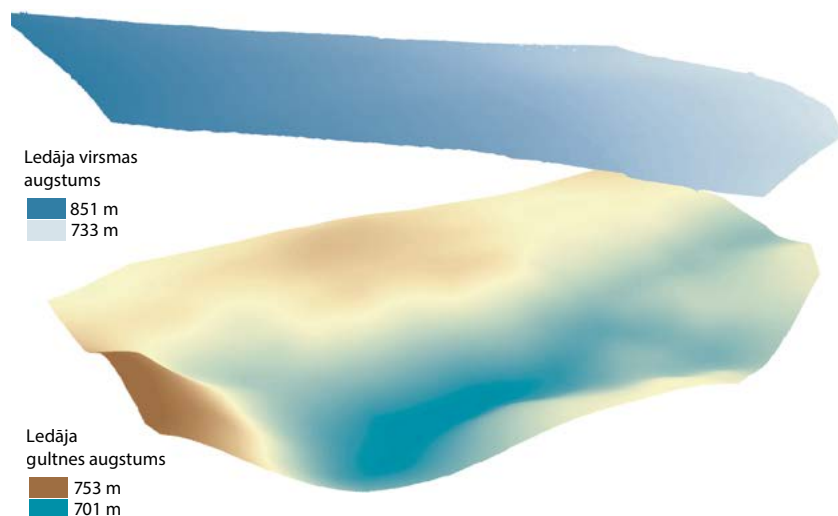
Izmantojot virsmas modeli un ledus biezuma mērījumus, tika izveidots ledāja gultnes reljefa modelis (179. att.), kurā netika identificētas akumulatīvas ledāja reljefa formas, kā, piemēram, drumlini, pretēji iepriekšējiem pētījumiem uz Mūlajokula ledāja centrālajā Islandē. Toties pētījumu teritorijas centrālajā daļā tika identificēts izteiksmīgs, iegarens erozijas padziļinājums, kura dziļums sasniedz 45 m. Tas acīmredzot izveidojies daudzkārtējo ledāja uzplūdu dēļ, ledājam erodējot savu gultni ziemeļaustrumu plūsmas vienības centrālajā daļā, kur potenciāli varētu būt vislielākais ledāja plūsmas ātrums. Paredzams, ka šo erozijas padziļinājumu, ledāja malai atkāpjoties, aizpildīs ledājkūšanas ūdeņi un tajā izveidosies pieledāja ezers.

178. att. Neaktīvs zemledāja tunelis zem Eijabakajokula izvadledāja Islandē. Foto: K. Lamsters, 2018.

Ierakstītajās radargrammās iespējams izšķirt aptuveni 400 atsevišķus iekšledāja atstarojumus, kas lielākoties saistāmi ar atstarojumiem no iekšledāja tuneļiem. Radiolokācijas profili bija galvenokārt izvietoti paralēli ledāja malai, tādēļ daudzi no šiem atstarojumiem ir no viena tuneļa. Izmantojot izveidoto ledāja ortofotokarti, pētījumu teritorijā identificēti 139 ūdensrijēji, kuri novada ūdeni uz iekšledāja kanāliem. Iekšledāja noteces sistēma ledāja malas zonā ir ļoti labi attīstīta. Izmantojot iegūtos datus, pētījumu teritorijā kartētas 4000 atvērtas plaisas un 12 000 aizvērtas plaisas. Atvērtās plaisas galvenokārt orientētas paralēli ledus plūsmai, savukārt aizvērtās plaisas ir orientētas šķērseniski ledus plūsmai. Šo struktūru orientācija liecina par stiepes spriegumu, kurš orientēts šķērseniski ledus plūsmai (ledus sānu malu virzienā), un spiedes spriegumu, kurš orientēts paralēli ledus plūsmai. Tādējādi kādreizējās šķērseniskās plaisas, kas veidojušās ledāja uzplūdos, tiek aizvērtas.

Salīdzinot izveidoto ledāja virsmas modeli ar senāku no lāzerskenēšanas datiem islandiešu veidotu modeli, secināts, ka pētījumu teritorijā ledus virsma no 2010. līdz 2018. gadam pazeminājusies vidēji par 35 m, kas atbilst 4,4 m gadā. Šāds ledāja virsmas pazemināšanās ātrums ir līdzīgs arī citiem Vatnajokula izvadledājiem.

179. att. Eijabakajokula izvadledāja virsmas un gultnes augstuma modelis. Sagatavojis K. Lamsters pēc 2018. gada ekspedīcijas datiem.



2019. gada augustā Latvijas Universitātes zinātnieki devās pirmajā ekspedīcijā uz Svalbāras arhipelāgu. Kopumā šī bija jau septītā latviešu zinātnieku polārā ekspedīcija. Tajā piedalījās LU doktori Kristaps Lamsters un Jānis Karušs, doktorants Pēteris Džeriņš, kā arī doktorants un Pārtikas drošības, dzīvnieku veselības un vides zinātniskā institūta “BIOR” pētnieks Ingus Pērkons (180. att.). Ekspedīcija īstenota sadarbībā ar Nikolaja Kopernika universitāti Toruņā, kura pārvalda vienu no Polijas polārstacijām Svalbārā. Neskaitot Latvijas zinātniekus, polārstacijā uzturējās arī četri poļu zinātnieki. Ekspedīciju tāpat kā iepriekš finansiāli atbalstīja SIA “Ceļu būvniecības sabiedrība “Igate””.

Svalbāra ir Norvēģijas teritorija Arktikā ar speciālu starptautisku statusu. Teritoriju veido salu arhipelāgs (181. att.), kurš atrodas starp 74. un 81. ziemeļu platuma grādu aptuveni 930 km uz ziemeļiem no Norvēģijas pilsētas Trumses. Ziemeļpols atrodas tikai 1300 km attālumā. Arhipelāgu galvenokārt veido deviņas lielākās salas, un lielāko arhipelāga daļu aizņem Špicbergenas sala. Pagaidām šī ir tālākā vieta uz ziemeļiem, kur latviešu zinātnieki

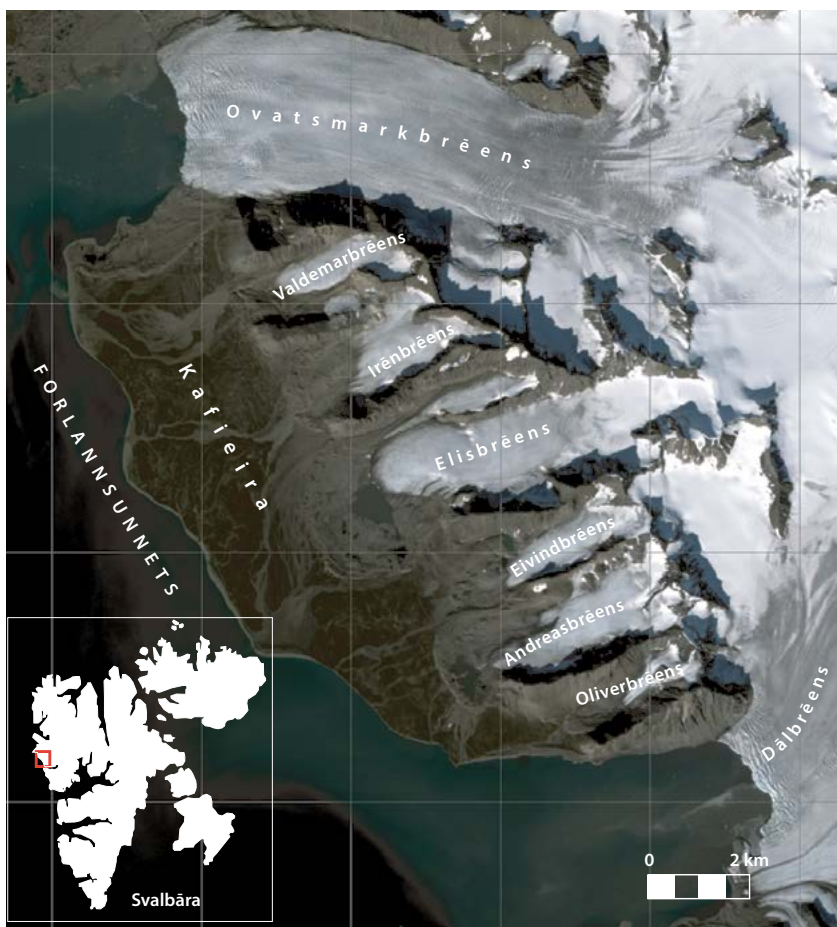
180. att. 2019. gada Svalbāras ekspedīcijas dalībnieki (ieskaitot poļu zinātniekus) pie Nikolaja Kopernika universitātes Toruņā polārstacijas. No kreisās: Pjotrs Vekvērts (*Piotr Weckwerth*), Pšemeks Kojs (*Przemek Koj*), Tomašs Grajevskis (*Tomasz Grajewski*), Ireneušs jeb Ireks Sobota (*Ireneusz Sobota*), Jānis Karušs, Pēteris Džeriņš, Ingus Pērkons, Kristaps Lamsters. Foto: K. Lamsters, 2019.



veikuši ledāju pētījumus. Divas trešdaļas no Svalbāras arhipelāga platības aizņem septiņi nacionālie parki un 23 dabas rezervāti, bet Svalbāras rietumdaļa, kur īstenota latviešu ekspedīcija, ir viens no retajiem Svalbāras reģioniem, kuram nav aizsargājamas dabas teritorijas statusa. Apmēram 60% no arhipelāga klāj ledāji, aizņemot 34 000 km² lielu platību. To kopējais skaits ir aptuveni 2100, un vismaz viena trešdaļa no tiem ir pulsējošie ledāji. Tā ir viena no lielākajām pulsējošu ledāju koncentrācijām pasaulē. Salīdzinājumam – Islandē atrodas tikai 26 pulsējošie ledāji.

Pēc vairākus desmitus gadu vai līdz pat 150 gadu ilga perioda Svalbāras pulsējošie ledāji sāk uzvirzīties ar ātrumu, kurš

181. att. Kafeiras reģiona un Svalbāras ekspedīcija pētītā Valdemarbrēna ledāja novietojums. Attēlu sagatavojis I. Sobota.





var sasniegt vairākus desmitus metru dienā, lai gan lielākā daļa ledāju mūsdienās atkāpjas klimata pārmaiņu ietekmē. Pulsējoši ledāji joprojām ir pilnībā neizskaidrots dabas fenomens.

Polārstacija (182. att.) atrodas Kafieiras (*Kaffiøyra*) reģionā Oskara II Zemē Špicbergenas salas ziemeļrietumos. Tā sastāv no galvenās dzīvojamās ēkas ar diviem korpusiem – veco un jauno –, kas savā starpā savienoti ar virtuvi. Latviešu zinātnieki dzīvošanai izvēlējās veco korpusu, kur kopumā ir sešas gultas. Korpus ir vienkārša būve no skaidu plātnēm, līdz ar to šalkojošais vējš ir labi dzirdams un telpas ir salīdzinoši aukstas un mitras. Lai tās kaut nedaudz apsildītu, tiek kurināta plītiņa ar nelielu daudzumu malkas, kas tiek atgādāta ar poļu apgādes kuģi vienreiz gadā, un ar visiem pārējiem degošajiem iepakojuma materiāliem. Ārpus dzīvojamās ēkas atrodas neliela pirtiņa, kas tiek kurināta ar akmeņoglēm. No tām joprojām Svalbāras lielākajā pilsētā Longjērbjēnē tiek ražota arī elektroenerģija.

182. att. Skats uz Nikolaja Kopernika universitātes Toruņā polārstaciju Svalbārā. Foto: K. Lamsters, 2019.

Pārējās polārstacijas ēkas ir vairāki metāla konteineri, no kuriem viens tiek izmantots kā pārtikas noliktava (vairums pārtikas produktu tiek atgādāti reizi gadā). Uz šī konteineru daudzviet redzami polārlāču ķetnu iespaidumi. Arī latviešu ekspedīcijas laikā, kas ilga gandrīz divas nedēļas, novērošanas videokamera fiksēja ziņkārīgu polārlāci (183. att.), kurš apgāja ap polārstaciju un uzslējās pakaļkājās pie pārtikas noliktavas.

Kopumā reģistrēto polārlāču skaits 2019. gada jūlijā un augustā pārsniedza 10, un tas ir salīdzinoši liels daudzums. Lielākā daļa no tiem pārvietojas gar piekrasti uz tuvumā esošo līci, kur mēdz uzturēties roņi. Ņemot vērā polārlāču klātbūtni, polārstacijas durvis dienas laikā vienmēr ir atvērtas, lai vajadzības gadījumā būtu iespējams ātrāk ieskriet iekšā. Ejot ārā no polārstacijas, kaut vai uz tualeti, obligāti jāņem līdzī ierocis. No polārlāčiem visdrošākā vieta ir uz ledājiem, jo šiem dzīvniekiem nav iemesla kāpt uz tiem, tādēļ, veicot mērījumus uz ledājiem, ieroci droši var atstāt pie ledāja. Kādā ekspedīcijas dienā latviešu zinātnieki parāciju saņēma ziņu, ka pie stacijas ir manīts polārlācis, bet viņš ātri vien devies tālāk pie jūras, kur atradis kāda dzīvnieki atliekas.

Teritoriju apdzīvo arī citi dzīvnieki, piemēram, Svalbāras ziemeļbrieži (184. att.) un polārlapsas (185. att.). Tie ir bieži viesi arī polārstacijas apkārtnē. Polārlapsas pie polārstacijas tiek manītas gandrīz katru dienu, tās meklē iespējamās ēdiena atliekas.

183. att. Polārlācis dodas gar Svalbāras polārstaciju barības meklējumos. Foto: I. Sobota, 2019.





184. att. Svalbāras
ziemeļbriedis tundrā. Foto:
K. Lamsters, 2019.



185. att. Viena no
polārlapsām, kas
polārstacijas apkārtnē
regulāri meklēja pārtikas
atkritumus. Foto:
K. Lamsters, 2019.

Arī uz ledājiem, kad tie apsnieg, novērojamas polārlapsu pēdas. To kažoks vasaras beigās ir gan balts, gan brūns.

Kafieiras reģions stiepjas 14 km garumā un 4 km platumā. Reģionu no abām pusēm norobežo divi jūrā bāzēti ledāji, savukārt starp tiem atrodas septiņi ieleju ledāji. Ledāji pēc to termālās struktūras, iespējams, ir politermāli. Respektīvi, to akumulācijas zonā ledāja pamatnē, iespējams, eksistē siltais ledus (tā temperatūra sasniedz kušanas punktu, un tajā starp ledus kristāliem atrodas arī daži procenti šķidra ūdens). Kopumā Svalbāras ledāji var būt gan auksti, gan silti, gan politermāli bāzēti.

Līdz šim Kafieiras reģiona ledāju termālā struktūra nav pētīta, un tas bija galvenais latviešu ekspedīcijas mērķis. Šim Špicbergenas piekrastes reģionam raksturīga palielināta mākoņainība un spēcīgi vēji. Mākoņi virs teritorijas ir tik bieži, ka gandrīz neiespējami atrast satelītattēlus bez mākoņiem, līdz ar to satelītattēlu izmantošana ledāja virsmas izmaiņu un plūsmas ātruma noteikšanai ir sarežģīta. Kafieiras reģionā vasaras meteoroloģiskie dati tiek ierakstīti jau no 1975. gada. Kopš tā laika vidējā vasaras gaisa temperatūra ir palielinājusies par 1,2 °C desmit gados. Periodā no 1975. līdz 2010. gadam vidējā vasaras temperatūra bija 4,9 °C, savukārt 1997.–2015. gada periodā vidējā gaisa temperatūra vasarā bija jau 5,4 °C. Gada vidējā gaisa temperatūra reģionā ir –2,0 °C.

Kafieiras ledāju masas bilance 20. gadsimtā ir bijusi mainīga, bet kopš 1997. gada tā ir negatīva. Kopš ledāju maksimālās izplatības mazajā leduslaikmetā, kurš ilga līdz pat 19. gadsimta otrajai pusei, reģiona ledāju platība ir samazinājusies par 43%. Tomēr ledāju atkāpšanās ātrums Svalbārā ir daudz mazāks nekā Islandē. Piemēram, Valdemarbrēena (*Waldemarbreen*) ledāja mala pēdējos gadu desmitos ir atkāpusies vien nedaudz vairāk par 10 m katru gadu. Šī ledāja vidējā gada masas bilance ir aptuveni –1 m ledus (ūdens ekvivalenta). Negatīvā masas bilance atspoguļojas arī sniega līnijas izmaiņās. Tā ir paaugstinājusies no 270 m 1996. gadā līdz 525 m 2015. gadā.

Ievērojami samazinājusies ir arī uzledojumu platība Kafieiras ledāju priekšā, un tas, iespējams, norāda uz to termālās struktūras izmaiņām un iespējamā siltā ledus apjoma samazināšanos. Tā kā siltais ledus satur ūdeni gan mikroskopiskos, gan makroskopiskos tukšumos ledājā, no tā arī ziemas laikā var tik novadīti ledājūdeņi. Ja ledāja lielākā pamatnes daļa ir piesalusi gultnei, ledājūdeņi ziemas laikā var plūst caur atkusušu zonu ledāja gultnes nogulumos un izplūst virspusē pie ledāja. Šādi ziemā veidojas uzledojumi ledāja priekšā, piemēram, pie Valdemarbrēena ledāja (186. att.). Uzledojumu platība pie Valdemarbrēena 21. gadsimtā ir samazinājusies par 90%. Ekspedīcijas dalībnieki vairākkārt novēroja spiedienūdeņu izplūšanu pie pašas ledāja malas, tie veidoja strūklaku aptuveni 1 m augstumā (187. att.). Tas netieši norāda uz to, ka gan ledāja gultne, gan grunts pieledāja teritorijā galvenokārt ir sasalusi.



186. att. Valdemarbræna ledājs un pieledāja teritorija 2019. gada augustā. Šis ielejas tipa ledājs bija galvenais ekspedīcijas pētījumu objekts. Baltais plankums ledāja priekšā ir uzledojums, kas veidojies, sasilstot ledāja priekšā galvenokārt ziemas laikā izplūstošajiem ledājdūdeņiem. Foto: K. Lamsters, 2019.

187. att. Pieledāja teritorijā izplūstošo spiedienūdeņu radītā aptuveni 1 m augstā strūklaka (attēla labajā centrālajā daļā) pie Valdemarbræna ledāja. Foto: K. Lamsters, 2019.



188. att. Periglaciālās reljefa formas Kafeiras reģionā Svalbārā. Priekšplānā redzams akmeņu gredzens ar rupjatlūzu materiāla koncentrāciju gar malām. Foto: K. Lamsters, 2019.

Ilglaicīgais sasalums ir raksturīgs visai Svalbārai, un tā ir periglaciālās zonas galvenā pazīme. Periglaciālā zona ir dabas apgabals, kur apstākļus galvenokārt nosaka sala procesi vai parādības, kas izriet no klimatiskiem apstākļiem un novietojuma ledāja tuvumā. Mūsdienās periglaciālais apgabals var stiepties tālu no ledāja malas, un tas var arī būt relikti vai vispār nesaisīti ar ledājiem. Viens no raksturīgākajiem periglaciālā apgabala veidojumiem ir grunts materiāla sakārtojums vairāk vai mazāk simetriskās dažāda veida ģeometriskās formās – apļos, daudzstūros, pakāpienos, tīklos un joslās. Šādus veidojumus sauc par poligonālām gruntīm, un poligoniem var būt daudzstūru (visbiežāk sešstūra) vai apļveida forma. Parasti poligonu iekšieni un ārmaļu veidojošais materiāls atšķiras pēc izmēriem. Biežāk novērojama situācija, kad smalkgraudains materiāls atrodas poligona iekšienē, bet rupjākas atlūzas koncentrējas gar poligona malām. Kafeiras līdzenuma tundrā ir bieži sastopami šādi akmens gredzeni (188. att.). Tie veidojušies sala šķirošanas procesos, kad,



sasalstot gruntī esošajam ūdenim, no tās tiek izspiests ārā rupjatlūzu materiāls. Daudzkārtēju salšanas un atkušanas ciklu laikā rupjākās atlūzas koncentrējas gar poligonu malām. Atkušana notiek ilglaicīgā sasaluma aktīvajā slānī, kura biezums mainās no nedaudz mazāk par 1 m piekrastē līdz 2 un vairāk metriem dziļāk tundrā. Aktīvā slāņa biezuma izmaiņas konstatētas pēc latviešu ģeologu mērījumiem ar ģeoradaru.

Vēl kāda izteiksmīga reljefa forma, kas veidojas ilglaicīgā sasaluma apgabalos, ir pingo (189. att.). Tie ir lieli kupolveida pauguri, kas sastāv no grunts ar ledus kodolu. Pingo var sasniegt 50 m augstumā un 1200 m diametrā. Pingo veidojas, kad, piemēram, ilglaicīgajā sasalumā rodas caurkusums un tajā esošais ūdens sasalst un veido ledus lēcu. Spiedienūdeņi sekmē ūdens pieplūdumu lēcai, tādēļ tā pakāpeniski veidojas arvien lielāka. Virs ledus ķermeņa esošā grunts tiek spiesta uz augšu, veidojot pauguru. Tam augot lielākam, grunts pingo virskārtā sāk plaisāt un noslīdēt, izsaucot ledus kušanu. Ledus kodolam kūstot, pingo virsotnes daļa var iegrūt, veidojot vulkānam līdzīgu pauguru ar

189. att. Pingo pie Elisbrēena ledāja. Tas ir ap 15 m augsts paugurs ar ledus kodolu. Paugurs sāk degradēties, jo grunts virs tā ir saplaisājusi (aptuveni 1,5 m dziļā plaisa attēla labajā pusē), un tas ilgtermiņā veicinās ledus kodola kušanu. Foto: K. Lamsters, 2019.



190. att. Valdemarbræna ledājs augusta beigās. To pilnībā klāj jauna sniega sega. Foto: K. Lamsters, 2019.

ezeru tā virsotnē. Ekspedīcijas dalībnieki atklāja pingo pie Elisbræna (*Elisbreen*) ledāja, un veica mērījumus ar ģeoradaru, lai noskaidrotu tajā esošā ledus kodola dziļumu.

Valdemarbræns (190. att.) ir galvenais ledājs, kas tika pētīts 2019. gada ekspedīcijā. Tas ir ielejas ledājs jeb šļūdonis, kam ir viens barošanās apgabals (akumulācijas zona), kurš atrodas bļodveida padziļinājumā, ko dēvē par cirku (191. att.). Ledāja augstākā daļa atrodas 550 m v.j.l., savukārt mēle noplūst līdz 130 m v.j.l. augstumam. 2019. gadā ledāja garums bija 3 km un platums 700–800 m. Pēdējos gadu desmitos ledāja akumulācijas zona ir samazinājusies, un dažos gados nokūst pat viss ziemā uzsnigušais sniegs. Atšķirībā no siltajiem Islandes ledājiem Valdemarbræna virskārtā atrodami tikai divi pavisam nelieli ūdensriņķi. Daļa virsledāja ūdeņu ieplūst ledāja plaisās, bet daļa noplūst ar nepastāvīgām ūdens straumēm ledāja virsmā. Tikai dažas ūdens straumes ir pastāvīgas un iegrauzušās ledāja virsmā. Kad ekspedīcijas beigās Valdemarbrænu pārklāja līdz 0,5 m bieza sniega sega un temperatūra nokritās zem 0 °C,



ledāja malas zonā saglabājās aktīvi tikai divi lielākie virsledāja kanāli.

Svalbāras ekspedīcijas zinātnisko pētījumu mērķis bija noskaidrot Kafieiras reģiona ledāju termālo struktūru un noteces sistēmas īpatnības, galveno uzmanību pievēršot Valdemarbrēena ledājam. Nozīmīgākie pētījuma uzdevumi bija šādi: veikt visa ledāja aerofotografēšanu ar bezpilota gaisa kuģi; veikt ledus biezuma mērījumus ar ģeoradaru; pēc ģeoradara datiem noskaidrot ledāja termālo struktūru; izveidot ledāja ortofotokarti, kā arī ledāja virsmas, ledus biezuma, termālās struktūras un zemledāja reljefa modeļus; veikt ledāja plaisu kartēšanu; izveidot iekšledāja/zemledāja noteces sistēmas modeli, rekonstruējot iespējamo ledāja tuneļu izvietojumu un noskaidrojot veidošanās mehānismus; ievākt paraugus Kafieiras reģionā, lai pēc to izpētes varētu raksturot noturīgo organisko piesārņotāju klātbūtni Arktikā.

Paraugu ievākšanu galvenokārt veica zinātniskā institūta "BIOR" pētnieks Ingus Pērkons, nereti vienatnē dodoties polārlāču medību laukos. Viņš ievāca faunas, floras, nogulumu un ledus paraugus, lai iespējami precīzāk būtu iespējams noskaidrot plaša diapazona noturīgo organisko piesārņotāju izplatību Svalbārā. Rezultāti ļaus raksturot tādu ķīmisko savienojumu klātbūtni,

191. att. Daļa no Valdemarbrēena ledāja akumulācijas zonas cirkā. Attēlā redzama arī sniega linija, kas 2019. gadā bija diezgan augstu. Mēroga apjaušanai noder divi ģeologi uz ledāja, nedaudz pa labi no attēla centra. Foto: K. Lamsters, 2019.

kuriem raksturīga migrācija ar atmosfērā esošajiem aerosoliem un kuri satur specifiskas noturīgo organisko piesārņotāju savienojumu klases – hlorēto parafīnu – ķīmisko “pirkstu nospiedumu”. Kopumā tika ievākti aptuveni 250 dažādi paraugi. Kādēļ ir būtiski šāda veida piesārņotājus pētīt tieši Svalbārā? Tādēļ, ka arhipelāgs daudzējādā ziņā šķiet izolēts no ārpusaules un cilvēku radītā piesārņojuma avoti pašā arhipelāgā ir niecīgi. Tas ļauj raksturot tieši citviet uz Zemes radītā piesārņojuma pārvietošanas un uzkrāšanos Arktikas viegli ievainojamajā ekosistēmā un atbildēt uz diviem nozīmīgiem jautājumiem: kuri piesārņotāji vidē saglabājas visilgāk un kāda ir to pārvietošanās dinamika. Būtiski ir saprast, kuri ķīmiskie savienojumi nonāk Arktikā ar nokrišņiem, kuri – ar okeāna straumēm un kuri – ar dzīvajiem organismiem.

Ģeologu pētījumos tika izmantots ģeoradars *Zond-12e* ar 38 MHz antenu, tas ļauj izmērīt ledus biezumu līdz 160 m. Radiolokācijas profilu un drona atbalsta punktu novietojums tika

192. att. Mērījumi ar ģeoradaru un GPS uztvērēju Valdemarbrēna ledāja akumulācijas zonā. Foto: K. Lamsters, 2019.





fiksēts, izmantojot *EMLID Reach RS+* GPS uztvērēju (192. att.). Lai nodrošinātu ierakstīto koordinātu augstu precizitāti, pie polārstacijas tika izveidota GPS bāzes stacija (193. att.), kas uzkrāja datus visas dienas garumā un vēlāk ļāva precizēt mērījumus, kas veikti ar otru pārvietojamo GPS.

Datu ierakstīšanai ar ģeoradaru nepieciešami vismaz trīs cilvēki, turklāt par ģeoradara operatoriem uz maiņām jāklūst visiem ekspedīcijas dalībniekiem, jo pārvietoties ar iekārtu pa slīpu, plaisainu un reizēm ar sniegu klātu ledāja virsmu ir fiziski nogurdinošs uzdevums. Ledāja mēle atrodas gandrīz 500 m zemāk (vertikālie augstuma metri) par ledāja augstāko daļu. Cirka nogāzes, kuras apliec šo bļodveidīgo pazeminājumu ledāja augstākajā daļā, ir ļoti stāvas, tādēļ stāvs ir arī pats ledājs. Pārvietošanās šajā zonā ir ne tikai grūta slīpuma un sniega dēļ, bet arī bīstama. Plaisas vietumis ir redzamas, bet citviet pazūd zem sniega, un ekspedīcijas dalībnieki mēdza vairākkārt līdz viduklim ieslīdēt šādās apslēptās plaisās. Dažas plaisas ir krietni dziļākas, piemēram, bergšrunds jeb atrāvumplaisa, kura izveidojusies

193. att. Meteoroloģisko novērojumu stacija, kur blakus novietota arī latviešu zinātnieku GPS bāzes stacija. Foto: K. Lamsters, 2019.

slīpās cirka nogāzes stāvuma dēļ. Atrasties uz ledāja augstāk par šo plaisu ir bīstami, jo vietām tā ir redzama, bet citviet pārklāta ar sniegu (194. att.).

Ledāja ablācijas zonā tika veikti arī eksperimentāli seismiskie mērījumi. Uz ledāja tiek novietota speciāla biezas plastmasas plāksne, pa kuru ar smagu āmuru tiek raidīts seismiskais impulss (195. att.). Radītos seismiskos viļņus reģistrē ģeofoni, kas izvietoti uz ledāja virsmas un savstarpēji savienoti ar vadu, lai tālāk novadītu signālu uz seismogrāfu. Datu reģistrācijai ir nepieciešams gan seismogrāfs, gan portatīvais dators, kas piemērots darbam nelabvēlīgos vides apstākļos, gan ietilpīgs akumulators. Apstrādājot iegūtos datus, ir iespējams noteikt ledus un arī zem ledus esošo nogulumu biezumu un tipu, jo seismiskie viļņi dažādās vidēs izplatās ar atšķirīgu ātrumu.

194. att. Bergšrunds jeb atrāvumplaisa ledāja augstākajā daļā. Foto: K. Lamsters, 2019.

Aerofotogrāfiju ieguvei ekspedīcijā tika izmantots bezpilota gaisa kuģis *DJI Phantom 4 Pro v2.0*. Tā kā laikapstākļi ne vienmēr bija piemēroti, datu iegūšana ar šo dronu ilga vairākas





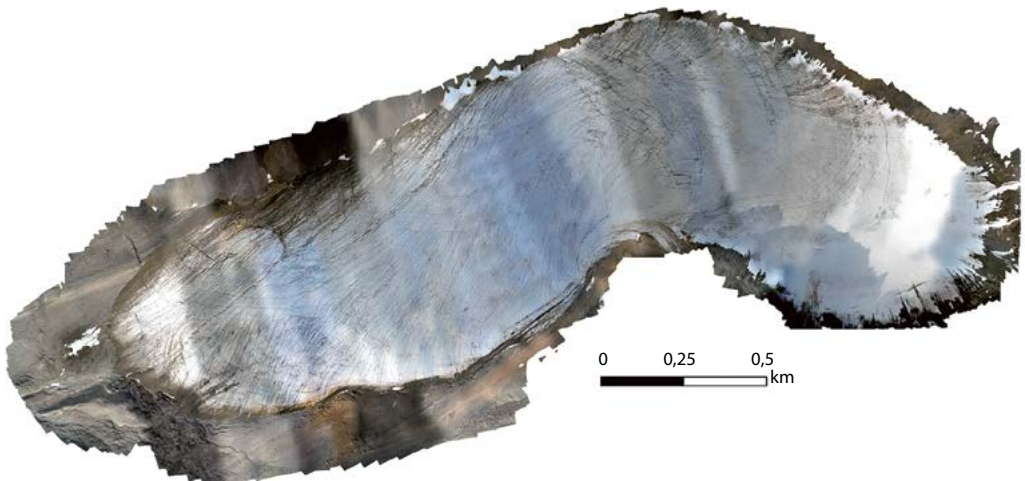
dienas. Bieži virs ledāja bija spēcīgs vējš, lietus, mākoņi un migla. Ja ledāju pilnībā pārklājis sniegs, uzņemtajās aerofotogrāfijās ir mazāk informācijas par ledāja virsmas struktūrām. Lielākais izaicinājums, atrodoties tik tālu uz ziemeļiem, ir automātisku lidojumu misiju īstenošana, jo bezpilota lidaparāti izmanto magnētisko lauku, lai lidotu taisnā līnijā. Magnētiskais lauks tuvu Ziemeļpolam ir atšķirīgs – tam ir izteikta vertikālā komponente, respektīvi, iedomātās magnētiskā lauka līnijas ir vērstas gandrīz vertikāli pret Zemi. Šī iemesla dēļ bezpilota lidaparāta vadības sistēmai ir grūtības kalibrēt iebūvēto kompasu. Ja tas netiek kalibrēts, automātisko lidojuma misiju nav iespējams uzsākt. Tādējādi grāmatas autoram bija jāpavada vairākas dienas uz ledāja, vadot bezpilota lidaparātu un reizēm veltiģi mēģinot veikt kompasu kalibrēšanu. Šajā procesā lidaparāts ir vairākkārt jāapgriež ap savu asi. Nereti arī lidaparātā iebūvētais GPS uztvērējs nespēj noteikt savu atrašanās vietu un misiju īstenot nav iespējams. Galu galā izdevās iegūt aptuveni 4300 aerofotogrāfiju, no kurām tika izveidota visa ledāja ortofotokarte (196. att.) un virsmas

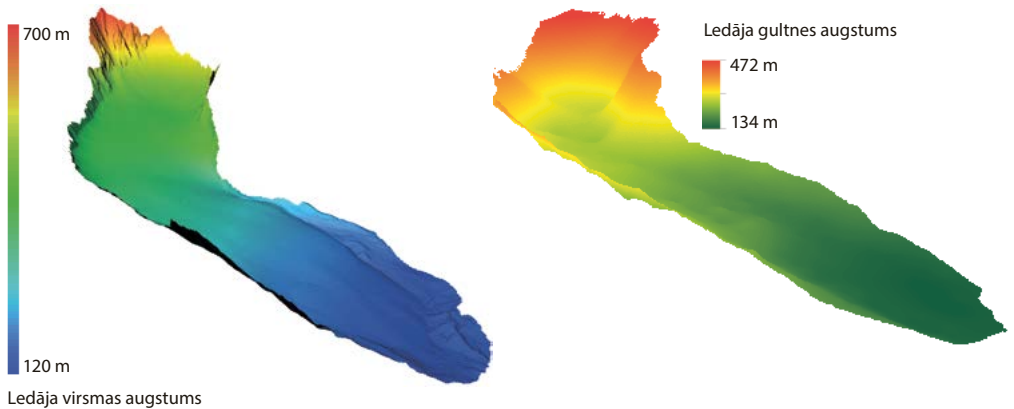
195. att. Pēteris Džeriņš gatavojas seismiskā impulsa radišanai uz ledāja. Foto: K. Lamsters, 2019.

196. att. Valdemarbrēna ledāja ortofoto mozaika. Ortofoto krāsu atšķirības saistītas ar aerofotogrāfiju uzņemšanu dažādā laikā un vairākās dienās mainīgos apgaismojuma apstākļos, ko ietekmēja Saules pozīcija virs horizonta, ēnas un mākoņainība. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2019. gada ekspedīcijas datus.

augstuma modelis (197. att.) ar ļoti augstu izšķirtspēju (3 cm ortofotokartei un 6 cm virsmas modelim). Uz ledāja virsmas izvietotie kontrolpunkti (aptuveni 60) nodrošināja modeļu augsto precizitāti. No virsmas modeļa un ledus biezuma mērījumiem tika izveidots arī zemledāja reljefa modelis (197. att.). Pēc izveidotajiem materiāliem ir iespējams precīzi noteikt ledus tilpumu. Lai nākotnē reģistrētu precīzas ledus tilpuma izmaiņas, atkārtoti būs nepieciešams iegūt tikai ledāja virsmas augstuma modeli.

Ierakstītie radiolokācijas dati no Valdemarbrēna ledāja pirmo reizi ļauj izvērtēt visa ledāja gultnes reljefu, ledus biezumu, termālo struktūru un iekšledāja noteces sistēmas uzbūvi. Ledāja gultnes reljefa amplitūda sasniedz 338 m, un tai raksturīga izteikta cirkveida ieplaka, kur ledus biezums pārsniedz 140 m. Pārējā ledāja gultnē atrodas iegarens erozijas pazeminājums ar nedaudz izteiktāku iegrauzumu ledāja ziemeļaustrumu daļā (197. att.). Radiolokācijas dati atklāj Valdemarbrēna politermālo struktūru – ledāju lielākoties veido auksts ledus, bet tā akumulācijas zonā atklāts ievērojama biezuma silta ledus slānis (198. att.). Siltā ledus slānis vidēji ir 40 m biezs, bet maksimāli sasniedz 80 m. Tas galvenokārt atrodas ledāja pamatnē, bet ledāja dziļākajā daļā veido pat ledus kolonnas lielāko daļu. Siltā ledus slānis vismaz daļēji uzskatāms par reliktu, respektīvi, tas veidojies senāk. Patlaban esošais ledus biezums ir nepietiekams, lai siltais ledus

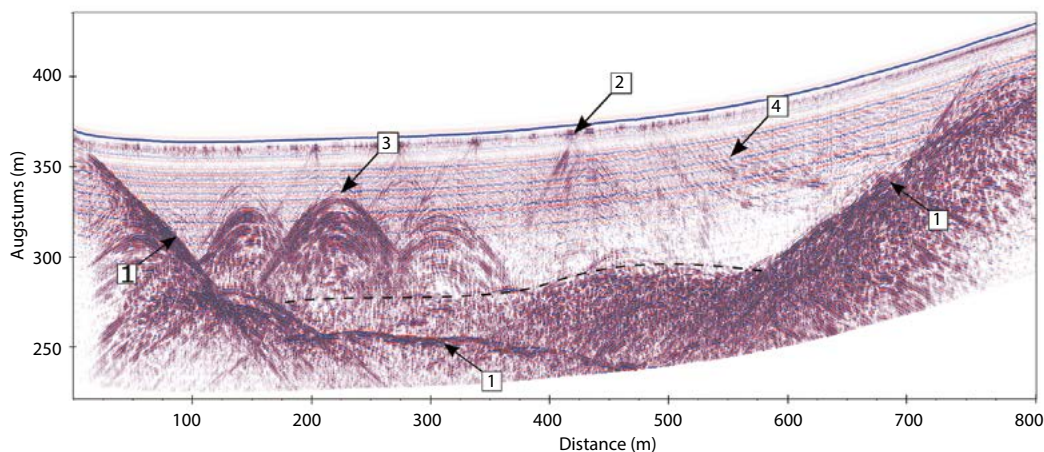




veidotos mūsdienās. Siltā ledus slānis varētu veidoties mūsdienās, ja ledus biezums lielākajā siltā ledus izplatības laukumā sasniegtu vismaz 80 m, bet siltais ledus atrodas pat ledāja augšdaļā, kur ledus biezums ir vien dažī desmiti metru. Visticamākais siltā ledus pastāvēšanas izskaidrojums ir tāds, ka tas ir saglabājies no laika, kad ledus biezums bija krietni lielāks (mazā ledus laikmeta beigās). Tādējādi siltā ledus pastāvēšana mūsdienu klimatiskajos un glacioloģiskajos apstākļos ir apdraudēta, un ir liela ticamība, ka, gaisa temperatūrai pieaugot un ledus biezumam samazinoties ledus kušanas dēļ, siltā ledus slānis samazināsies un izzudīs pavisam, ledājs pilnībā kļūs par auksto ledāju. Pētījumi liecina, ka Valdemarbrēna ledāja virsma mūsdienās pazeminās. Pēdējo desmit gadu laikā (2009–2019) ledāja virsma jau ir vidēji pazeminājusies par 11,6 m jeb 1,6 m gadā. Maksimāli ledāja virsma pazeminājusies par 31 m ledāja malā (199. att.).

Ierakstītājās Valdemarbrēna ledāja radargrammās identificējami arī atstarojumi no iekšledāja tuneļiem (198. att.), kuru potenciālais skaits ir daudz mazāks nekā, piemēram, Islandes ledājiem. Tiek uzskatīts, ka iegraušānās un aizvēršanās ir noteicošais iekšledāja tuneļu veidošanās mehānisms aukstos un politermālos ledājos, tomēr Valdemarbrēna iekšledāja tuneļu veidošanās interpretēta atšķirīgi, izņemot īsāko tuneli ledāja ziemeļu daļā, kurš ir daļēji iekšledāja, daļēji zemledāja tunelis. Atšķirībā no pārējiem tuneļiem šī tuneļa veidošanos varētu skaidrot ar iegraušānās

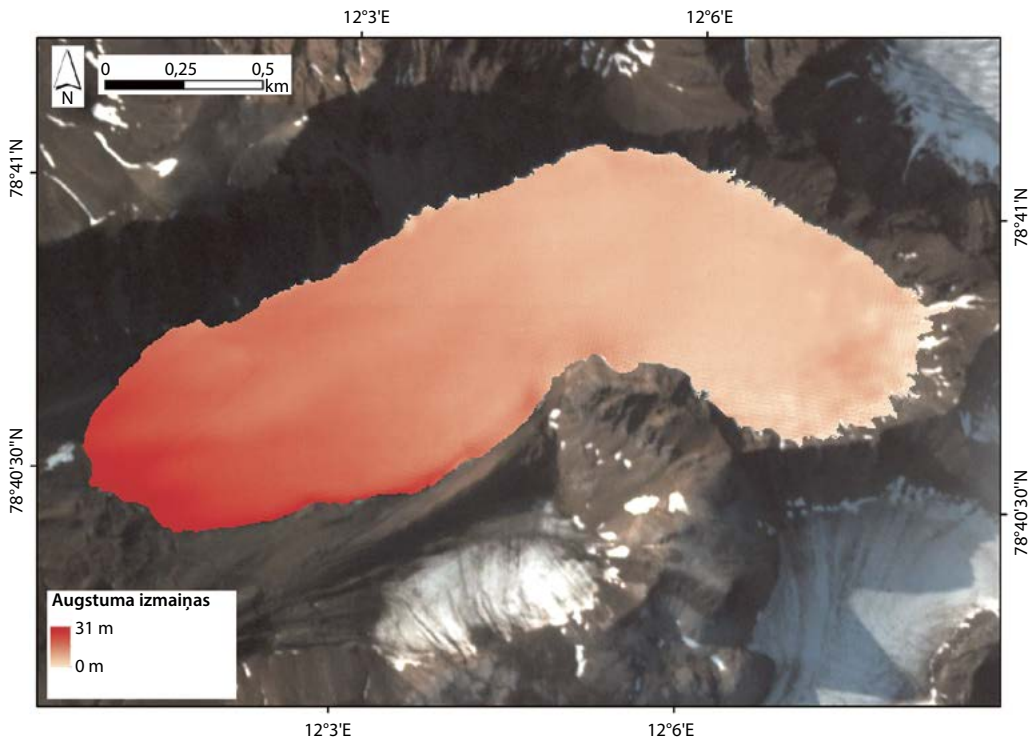
197. att. Valdemarbrēna ledāja virsmas (pa kreisi) un gultnes reljefa augstuma modeļi. Virsmas augstuma modelis ietver arī nelielu pieledāja teritorijas daļu. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2019. gada ekspedīcijas datus.



198. att. Uz Valdemarbrēena ledāja ierakstītā radargramma. Ar cipariem atzīmēti svarīgākie atstarojumi: 1) no ledāja gultnes; 2) no ledāja plaisas; 3) no iekšledāja tuneļa; 4) no ledus primārā slāņojuma. Sagatavojis J. Karušs pēc 2019. gada ekspedīcijas datiem.

un aizvēršanās mehānismu. Iegraušanās un aizvēršanās mehānismā iekšledāja tuneļi veidojas, kad ledāja virsmā rodas padziļināta ledājūdeņu straumes gultne. Tā padziļinās, jo ūdens siltuma (ūdens ir siltāks par ledu) un ūdens berzes siltuma dēļ notiek ledu kušana zem tekošās ūdens straumes. Gultnes padziļināšanos var līdzsvarot apkārtējā ledu kušana. Ūdens straumes gultnei iegraužoties, tās augšdaļa var tikt aizspiesta ciet ledu plūsmas (iekšējās deformācijas) dēļ. Gultnes augšdaļas aizvēršanos veicina arī gultnē uzkrātie sniega sanesumi. Galu galā izveidojas iekšledāja tunelis, kurā virsledāja ūdeņi ieplūst caur ūdensrijējiem vai plaisām. Šādi veidotiem iekšledāja tuneļiem raksturīgi, piemēram, ļoti stāvi tuneļa posmi, kas mijas ar lēzeniem, kā arī tuneļa dziļāka iegraušanās ledāja mēles virzienā.

Izteiktākie atstarojumi no iekšledāja tuneļiem koncentrējas ledāja dienviddaļā, un tātad tur pastāv tuvu novietotu tuneļu sistēma līdz pat 120 m platā zonā līdzīgā augstumā. Ledāja centrālajā daļā atrodas atsevišķs iekšledāja tunelis. Tā iegraušanās mehānisms nav pārlicinošs, tas īsti neatbilst abu iepriekš minēto Valdemarbrēena iekšledāja tuneļu veidošanās procesam. Iegraušanās notiek pārāk lēni saistībā ar īso kušanas sezonu, un ledāja virsmas slīpums un virsledāja straumju tecēšanas virziens būtiski atšķiras no iespējamo tuneļu orientācijas ledājā mūsdienās. Mehānisms, kurā iekšledāja tuneļi veidojas, ūdenim plūstot gareniskās ledāja plaisās, arī nav ticams, jo ledājam raksturīgs



gareniskas stiepes režīms – plaisas attīstās galvenokārt šķērse- niski pret ledāja plūsmas virzienu. Agrāk plaši akceptētais Šrīva modelis, kurš apraksta virsledāja ūdens iesūkšanos starp ledus kristāliem un tuneļu veidošanos šādas koncentrētu ledājūdeņu infiltrācijas dēļ, ir ļoti diskutabls un praktiski neiespējams, jo le- dus temperatūra ir negatīva un auksts ledus ir praktiski ūdensne- caurlaidīgs, turklāt iekšledāja tuneļi parasti ir salīdzinoši lēzeni un nekad neatbilst teorētiskajam to slīpumam, kas ir perpendi- kuls pret ekvipotenciālajām līnijām (virsmām, ko definē kon- stants hidrauliskais potenciāls).

Visticamāk, Valdemarbrēna iekšledāja tuneļi sāk veido- ties ledāja akumulācijas zonā (cirkā), kur norisinās virsledāja kušanas ūdeņu infiltrācija ledājā caur plaisām. Galvenais tune- ļu veidošanās mehānisms ir hidroplaisāšana – kad neliela plai- sa strauji padziļinās, ja hidrostatiskais spiediens (to rada plaisā esošais ūdens), kas uz to iedarbojas, sasniedz noteiktu lielumu.

199. att. Valdemarbrēna ledāja virsmas pazeminā- šanās no 2009. līdz 2019. gadam. Pamatnē 2019. gada satelītattēls no *PlanetScope*. Sagatavojis K. Lamsters, izmantojot 2019. gada ekspedīcijas datus.

Hidroplaisāšanas dēļ plaisu dziļums var palielināties īsā laikā. Ledājūdeņiem nokļūstot dziļāk ledājā, to tālāka migrācija var notikt gan saistībā ar hidroplaisāšanu, gan pa pavājinājuma zonām ledājā. Tās var būt saistītas ar ledus primāro stratifikāciju un atlūzu koncentrācijas plaknēm ledājā.

Neskaitot detalizētus Valdemarbrēena pētījumus, ekspedīcijā tika ierakstīti radiolokācijas profili arī uz diviem blakus esošajiem ledājiem, un tas ļāva novērtēt to aptuveno biezumu un iekšējo struktūru, kā arī potenciālos turpmāko pētījumu virzienus. Uzsāktā sadarbība ar Nikolaja Kopernika universitāti Toruņā un ekspedīcijā iegūtie rezultāti iezīmē abu iesaistīto pušu zinātnieku interesi arī par turpmākiem ledāju pētījumiem Svalbārā.

KOPSAVILKUMS

Monogrāfijas mērķis ir iepazīstināt Zemes zinātņu un citu dabaszinātņu studentus un plašāku sabiedrību ar jautājumiem par mūsdienu ledāju un ledus vairogu attīstību, klasifikāciju, plūsmas mehānismiem, deformāciju, hidroloģiju, termālo struktūru, izplatību, izmaiņām un aktuālākajiem zinātniskajiem pētījumiem, kā arī ar Latvijas Universitātes zinātnieku polāro ekspedīciju organizāciju, norisi un rezultātiem.

Galvenā uzmanība grāmatā pievērsta mūsdienu ledāju, galvenokārt Arktikas un Antarktīkas reģionu ledus vairogu, raksturojumam, jo šie ledāji ietver lielāko daļu pasaules ledāju ledus masas. Papildus aplūkota arī ledus un ledājiem līdzīgu formu izplatība Saules sistēmas debess ķermeņos. Vienlaikus ar izpratni par mūsdienu ledus vairogiem lasītājs gūs arī zināšanas par to, kā veidojušies, izzuduši pagātnes ledus vairogi, kas reiz klāja lielu daļu Ziemeļamerikas, Eirāzijas, iekļaujot Latviju, un kādi bijuši to dinamiskie procesi.

Monogrāfiju bagātīgi ilustrē fotogrāfijas (tās galvenokārt uzņēmis grāmatas autors un viņa līdzgaitnieki), kā arī ekspedīcijās pētīto ledāju vizualizācijas, un šie materiāli nozīmīgi papildina tekstu, veicinot ar ledājiem saistīto procesu izpratni. Autors, pamatojoties uz savu pieredzi un novērojumiem mūsdienu ledājos, kā arī atspoguļoto jaunākajos zinātniskajos pētījumos, apskata nozīmīgākos pētniecības jautājumus un norises pasaules ledājos.

Latvijas zinātnieku polāro ekspedīciju apraksts, kļūs par piemēru un iedvesmas avotu studentiem un pētniekiem, kas vēlas nākotnē turpināt attīstīt polāro pētījumu jomu Latvijā. Monogrāfijā apskatīta gan ekspedīciju organizācija un ikdiena, gan arī zinātniskie pētījumi un to rezultāti. Grāmata publicēta latviešu valodā, lai tā, kļūstot par vienu no retajiem uzziņu avotiem tiem latviešu lasītājiem, kuri vēlas izprast ledāju procesus un parādības dzimtajā valodā, veicinātu arī zinātnes terminoloģijas attīstību.

SUMMARY

The goal of the monograph "Contemporary glaciers" is to introduce students of Earth Sciences and related fields, as well as broader society to the issues concerning the evolution, classification, flow, deformation, hydrology, thermal structure, distribution, changes, and current scientific studies related to contemporary glaciers and ice sheets. This volume also aims to tell readers the story of the organization, implementation, and results of the polar expeditions conducted by the University of Latvia scientists.

The main focus of this work is the characterization of the glaciers around the globe, and particularly the largest ice masses (ice sheets) located in the Arctic and Antarctic regions. Additionally, the existence of ice and glacier-like forms on the celestial bodies of the Solar System is described. Furthermore, the characterization of the contemporary ice sheets allows to understand the possible evolution, retreat, and dynamic processes related to the past ice sheets that covered part of North America and Eurasia, including Latvia.

The monograph is richly illustrated by the photographs taken mainly by the author and his associates, supplementing the text and visualizing the described glaciers and processes related to them. The author draws upon his experience and observations in polar glaciers, as well as the newest scientific findings highlighting the most significant issues and ongoing changes pertaining to the world's glaciers.

The description of Latvian polar expeditions serves as an illustration and inspiration for the next generation of students and researchers willing to further develop the field of polar science in Latvia. Examples are given on the organization, daily work, research questions and outcomes of the expeditions. The book is published in the Latvian language to serve as one of the very rare teaching aids available to Latvian readers aspiring to comprehend the glacial phenomena in their native tongue. Thus, this work supports the development of glacier-related terminology in the Latvian language.

IZMANTOTIE SAĪSINĀJUMI

- BAS (*British Antarctic Survey*) – Britu antarktiskais dienests
- CSA (*Canadian Space Agency*) Radarsat – Kanādas Kosmosa aģentūras Zemes novērošanas satelītu programma
- EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) – Eiropas projekts ledus vairoga dziļurbšanai Antarktīdā
- ERAF – Eiropas Reģionālās attīstības fonds
- ERS (*European Remote Sensing satellite*) – Eiropas tālzonvērošanas satelīts (Eiropas Kosmosa aģentūras Zemes novērošanas satelītu programma)
- ESA (*European Space Agency*) – Eiropas Kosmosa aģentūra
- ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) – Vides sistēmu pētniecības institūts
- GPS (*global positioning system*) – globālā pozicionēšanas sistēma
- GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) – Gravitācijas atjaunošanas un klimata eksperiments (NASA un Vācijas Aviācijas un kosmosa centra kopīga misija)
- GSFC SVS (*the NASA Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio*) – Godāra Kosmosa lidojumu centra Zinātniskās vizualizēšanas studija
- ĢZZF – [Latvijas Universitātes] Ģeogrāfijas un Zemes zinātņu fakultāte
- ICESat (*the Ice, Clouds, and Land Elevation Satellite*) – daļa no NASA īstenotās Zemes novērošanas sistēmas
- IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) – Klimata pārmaiņu starpvaldību padome
- Johns Hopkins APL (*Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory*) – Džonsa Hopkinsa universitātes Lietišķās fizikas laboratorija
- JPL-Caltech (*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*) – Kalifornijas Tehnoloģiju institūta Reaktīvās piedziņas laboratorija
- LU – Latvijas Universitāte
- MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) – vidējās izšķirtspējas attēlveidošanas spektrometrs; NASA izmantotais instruments *Aqua* un *Terra* satelītos.
- NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – ASV Nacionālā aeronautikas un kosmosa administrācija
- NSIDC (*National Snow & Ice Data Center*) – ASV Nacionālais sniega un ledus datu centrs
- NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) – ASV Nacionālā okeāna un atmosfēras pētījumu pārvalde
- NSF (*National Science Foundation*) – ASV Nacionālais zinātnes fonds
- ppm (*parts per million*) – miljonās daļas
- ppmv (*parts per million by volume*) – tilpuma miljonās daļas
- USRA (*Universities Space Research Association*) – Universitāšu Kosmosa izpētes asociācija
- WGMS (*World Glacier Monitoring Service*) – Pasauls Ledāju monitoringa dienests

SVARĪGĀKO LIETOTO TERMINU SKAIDROJUMS

ablācija – process, kurā ledāji zaudē ledus masu. Nozīmīgākais ablācijas komponents ir ledāja virsmas kušana, savukārt polārajos un augstkalnu ledājos arī ledus sublimācija (ledus iztvaikošana). Jūrā ieplūstošie ledāji lielāko daļu ledus masas zaudē kalvinga procesā, no ledāja malas atšķēloties aisbergiem.

akumulācija – process, kurā ledāju masa palielinās. Galvenokārt to nodrošina sniega uzkrāšanās ledāja akumulācijas zonā, bet ledus var veidoties arī, atkārtoti sasalstot ledājūdeņiem.

apvelings – okeāna dziļu aukstā ūdens pacelšanās augšpusē.

atlūzu materiāls (saneši) – materiāls, kurš radies, ledājam erodējot tā gultni. Zem ledāja radītais atlūzu materiāls ledāja malas daļā nereti nokļūst tā virspusē un veido virsledāja atlūzu slāni.

atrautenis – ledāja pārvietoti un citviet noguldīti iežu blāķi vai nogulumi.

auksts ledājs – ledājs, kurā ledus temperatūra viscaur ir zemāka par kušanas punktu. Šāds ledājs ir piesalis gultnei, un tā kustību nodrošina tikai ledus iekšējā (plastiskā) deformācija.

bazālā slīdēšana – ledāja ātra pārvietošanās pa plānu ūdens kārtiņu tā gultnē.

cirka (kares) ledājs – ledājs, kurš atrodas kausveida padziļinājumā kalnu nogāzē (parasti tās augšgalā) – cirkā. Šādi pazeminājumi veidojas galvenokārt ledāju erozijas rezultātā.

deglaciācija – ledāja izzušana no teritorijas, kuru tas agrāk pārklājis. Latvijā pēdējā apledojuma deglaciācija nebija vienmērīga visā teritorijā, jo ledus lobi un mēles zemienēs uzvirzījās atkārtoti, bet augstienes no ledus segas atbrīvojās pamazām.

depresija – (šīs grāmatas kontekstā) pazeminājums (padziļinājums) ledāja gultnē. Parasti veidojas, ledājam erodējot gultni. Dziļākās depresijas, ledājam atkāpjoties, aizpilda pieledāja ezeri.

drumlīni – ledāja reljefa formas, kas veidojas ledāja gultnē, tam erodējot, akumulējot, deformējot un pārvietojot ledāja gultnes materiālu ledus plūsmas virzienā. Drumlīni plaši izplatīti Latvijas zemienēs, un to forma atgādina iegarenus maizes klaipus.

erātiskais materiāls – atlūzu materiāls, ko ledājs ir pārvietojis no tālienes (cilmes vietas) un kas nav raksturīgs teritorijai, uz kuru tas ir pārvietots.

firns – pārejas forma starp sniegu un ledu. Firna blīvumam pārsniedzot $0,83 \text{ g/cm}^3$, tā poras vairs nav savstarpēji savienotas un ir izveidojies ledāja ledus.

flūtingi – taisnas un cita citai paralēlas reljefa formas, kas bieži veidojas zem aktīviem mūsdienu ledājiem. Tie rodas, ledāja gultnes materiālam (morēnai) aizpildot zemledāja dobumus aiz bazālā šķēršļa.

gala morēna – ledāja priekšā sabīdīts, sastumts vai uzbērts valnis vai grēda. Lielākās un tālāk no mūsdienu ledājiem esošās gala morēnas, kuras dēvē par terminālajām gala morēnām, izveidojās mazajā leduslaikmetā 18. gadsimtā vai līdz 19. gadsimta vidum.

glaciāls – skat. leduslaikmets.

glaciofluviālie nogulumi – nogulsneši ledājūdeņu straumju saneši, ko galvenokārt veido smilts, grants un oļu materiāls. Stāvošu ledājūdeņu izgulsnēto smalkāko frakciju materiālu dēvē par glaciolimniskajiem nogulumiem.

glaciokarsts – process, kurā, izkūstot aprakta (ar sanešu materiālu pārklāta) ledus blāķim, zemes virskārtā izveidojas ieplaka.

glacioloģija – zinātnes nozare, kas pēta ledājus un ar tiem saistītos procesus.

glaciotektoniskās deformācijas – ledāja gultnes virsējo iežu un nogulumu slāņu deformācijas, kas rodas pārsedzošā ledus statiskā un bīdes sprieguma iedarbības rezultātā un rada plastiskas (piemēram, krokas) un trauslas (piemēram, lūzumi un plaisas) deformācijas struktūras.

holocēns – kvartāra perioda jaunākā epoha, kas sākās pirms 11 700 gadiem un turpinās mūsdienās. Holocēnu mēdz dēvēt arī par pēclēduslaikmetu, bet daudzi zinātnieki to uzskata par starplēduslaikmetu.

interglaciāls – skat. starplēduslaikmets.

jokulhlaupi – ledāja megaplūdi, ko rada katastrofiska ledājūdeņu noplūšana no zemledāja vai pieledāja ezeriem. Īpaši raksturīgi Islandei, kur zemledāja ezeru veidošanos pastāvīgi nodrošina ģeotermālais siltums.

kalvings – aisbergu veidošanās, tiem atšķēloties no ūdenī iepeldējuša ledāja vai šelfa ledāja malas.

katabatiskie vēji – auksta un blīva gaisa masas, kuras pārvietojas lejup pa nogāzi gravitācijas dēļ. Raksturīgi ledus vairogiem, kur tie pūš no ledus vairogu centrālajām daļām.

karenūdēns – ar ūdeni piesātināts sniega vai firna slānis.

kriokonīts – smalkgraudains materiāls ledājos, kuru veido galvenokārt putekļveida minerālas un organiskas izcelsmes daļiņas. Kriokonīts visbiežāk sastopams ledāju virsmā to malas zonā, un tas iekļauj arī mikrokokogles, sfēriskas izdedžu daļiņas, mikrometeorītus, putekšņus, sporas un dažādus mikroorganismus. Lielāki kriokonīta sakopojumi izraisa pastiprinātu ledus kušanu, veidojot izkusuma bedrītes, kuras dēvē par kriokonīta bedrītēm jeb ledāja glāzītēm.

kriosfēra – zemeslodes nevienlaidu apvalks (sfēra), kas ietver to atmosfēras, hidrosfēras un litosfēras daļu, kur ūdens atrodas cietā stāvoklī. Kriosfēra iekļauj, piemēram, ledājus, sniegu, jūras ledu un grunts sasalumu.

krīps – ledāja lēna pārvietošanās ledus iekšējās deformācijas rezultātā. To mēdz dēvēt arī par ledāja lamināro plūsmu. Ar krīpu ģeoloģijā apzīmē arī grunts masīva lēnu pārvietošanos, kas aizsākas jau relatīvi lēzenās nogāzēs.

kvartārs – kainozoja ēras jaunākais periods, kas sākās pirms 2,588 miljoniem gadu un turpinās joprojām. To iedala divās epohās – pleistocēnā un holocēnā.

ledāja (glacigēnā) erozija – ledāja ģeoloģiskā darbība, kurā tas padziļina savu gultni, to abradējot (skrambājot un pulējot), izdobjot, izgrebjot, izvagojot, atraujot vai izlaužot iežu daļas vai nogulumus.

ledus kaldrona – ieapaļš padziļinājums ledāja virsmā, kurš veidojies ledāja pamatnes kušanas un ledājūdeņu aizplūšanas rezultātā. Parasti kaldornu veidošanās saistīta ar zemledāja vulkānu izvirdumiem vai ledus kušanu ģeotermālā siltuma dēļ. Nereti

sākotnēji zem ledāja veidojas zemledāja ezers, kuram noplūstot ledāja virsmā izveidojas kaldrona.

leduslaikmets (glaciāls) – periods Zemes vēsturē, kad segledāji pārklāj plašas teritorijas galvenokārt pazeminātas globālās gaisa temperatūras dēļ.

ledus lielplūsmas – ledus vairogos ātri plūstošu ledus masu koridori, kas pārvieto vairāk nekā 90% ledus vairogu masas. Ledus lielplūsmu ātrums var sasniegt vairākus kilometrus gadā.

ledus masas bilance – starpība starp ledus akumulāciju un ablāciju. Ja ledus ablācija ir lielāka par akumulāciju, masas bilance ir negatīva, un otrādi.

ledus vairogs (segledājs) – lielākie ledus masu sakopojumi uz Zemes. Mūsdienās saglabājušies tikai Grenlandē un Antarktīkā, bet pleistocēnā klāja arī daļu Ziemeļamerikas (Laurentīdu ledus vairogs) un Eirāzijas (Eirāzijas ledus vairogs, bieži dēvēts arī par Skandināvijas jeb Fenoskandijas ledus vairogu).

lielizmēra glaciālie lineamenti – garākās subglaciālās (zemledāja) gultnes reljefa formas, kuras veidojušās zem aktīva ledāja. Līdzīgas, tikai mazākas, reljefa formas ir flūtingi.

morēna (glaciģēnie nogulumi) – no paša ledāja izgulsnējies nešķirots zemledāja vai virs-
ledāja atlūzu materiāls. Latvijā zināms arī kā smilšmāls un mālsmilts ar oļiem.

Naja tuneļi (N tuneļi) – ledājūdeņu izskalotas gultnes ledāja gultnes iežos. Nosaukti pēc to atklājēja zinātnieka uzvārda (*John Frederick Nye*).

neitrālās bilances līnija – iedomāta līnija uz ledāja, kur akumulācija un ablācija ir līdzsvarā.

nunataks – izolēta kalna virsotne vai tās daļa, kas paceļas virs ledāja.

orbitālie cikli – cikliskas Zemes orbītas un Zemes rotācijas ass izmaiņas, kas tiek uzskatītas par klimata pārmaiņu un leduslaikmetu–starpleduslaikmetu mijas primāro cēloni. Sinonīms – Milankoviča cikli.

oss – garš, līkumots valnis vai grēda, kas sastāv galvenokārt no glaciofluviālajiem nogulumiem.

paraglaciālie procesi – procesi, kurus nosaka apledojums un deglaciācija, bet kuri nav saistīti ar tiešu ledāja darbību. Paraglaciālie procesi un veidojumi ir uzskatāmi par pārejošiem, jo paraglaciālā vide ir pakļauta ātrām izmaiņām, kuras regulē ledāja atkāpšanās ātrums.

periglaciāls – ārpusledāja apgabals, kuram raksturīgi specifiski procesi un reljefa formas, kas veidojas auksta klimata ietekmē. Periglaciālie procesi ir īpaši raksturīgi pieledāja teritorijām, kuru būtiska iezīme ir grunts sasalums.

pieledāja ezers (baseins) – ar ūdeni pildīts pazeminājums (depresija) ledāja malas priekšā. Ja ezeru no vienas puses nosprosto ledāja malas, to dēvē par ledāja sprostezeru.

pilienakmens – atsevišķa iežu atlūza smalkgraudainākos nogulumos (parasti glaciolimniskos jeb pieledāja ezeru nogulumos), kura izgulsnējusies vai izkususi no ūdenī ieplūstoša ledāja pamatnes daļas vai aisberga.

pjedmonta (priekškalnu) ledājs – ielejas ledājs vai izvadledājs, kurš izplūst lēzenā priekškalnu līdzenumā un veido plašu leduslobu.

pleistocēns – kvartāra perioda senākā epoha, kas sākās pirms 2,588 miljoniem gadu un beidzās pirms 117 000 gadu, sākoties holocēnam. Pleistocēnā sākās Zemes vēsturē jaunākais leduslaikmets, tā sauktais lielais leduslaikmets.

plastiska ledus deformācija – ledus iekšējā deformācija, ko izraisa sprieguma atšķirības ledāja ķermenī. Tās rezultātā notiek ledus kristālu iekšējās struktūras pārkārtošanās, kristālu formas un orientācijas izmaiņas, kā arī pārvietojums starp atsevišķiem kristāliem, kas kopā rada ledus kustību.

politermālais ledājs – ledājs, kurā sastopams gan aukstais, gan siltais ledus jebkādās proporcijās.

plaisu aizpildījuma grēdas – pie pulsējošiem ledājiem plaši izplatītas reljefa formas, kas veidojas, ledāja gultnes materiālam tiekot iespiestam bazālajās plaisās ledāja aktīvās uzvirzīšanās (galvenokārt – uzplūdu) nobeigumā.

porūdens spiediens – ledāja gultnes nogulumos esošā ūdens spiediens. Ja tas pārsniedz pārsedzošā ledus spiedienu, ledājs atkabinās no gultnes un pārvietojas bazālās slīdēšanas veidā.

reželācija – ledus spiedienkušana (kušana noteiktā spiedienā) pirms bazālā šķēršļa un atkārtota ledājūdeņu sasalšana aiz tā.

Rētlisbergera tuneļi (R tuneļi) – ledāja bazālajā daļā izskaloti tuneļi, kas raksturīgi efektīvai zemledāja noteces sistēmai. Lielākā daļa tiek aizpildīti ar glaciofluviālajiem nogulumiem, kas, ledājam atkāpjoties, ainavā parādās kā līkumoti vaļņi – osi. Nosaukti pēc to atklājēja zinātnieka uzvārda (*Hans Röthlisberger*).

sandri – zarotu ledājūdeņu straumju sanestā materiāla (glaciofluviālo nogulumu) veidoti līdzenumi pie mūsdienu un pagātnes ledājiem.

starpleduslaikmets (interglaciāls) – periodi Zemes vēsturē starp leduslaikmetiem, kad globālās gaisa temperatūras paaugstināšanās dēļ segledāji sarūk un var saglabāties tikai polārajos apgabalos (kā mūsdienās).

siltais ledājs – ledājs, kurā ledus temperatūra viscaur sasniedz kušanas punktu (siltais ledus), tādējādi starp ledus kristāliem ir ūdens.

sniega līnija – līnija, virs kuras sniegs saglabājas visu gadu. Sniega līnija nosaka ledāju veidošanās augstumu, jo sākotnēji ledāji veidojas tikai virs sniega līnijas. Ledus plūsmas dēļ ledāja mēle bieži noplūst zem sniega līnijas.

šelfa ledājs – ledus vairoga turpinājums jūrā, kurš veidojas no vairākām ledus lielplūsmām vai izvadledājiem. Šelfa ledāji ir uzpeldējuši (atrodas virs ūdens), tādēļ to kušana nepaaugstina jūras līmeni.

šļūdonis – kalnu vai ielejas ledājs.

termohalinā cirkulācija – ūdens cirkulācija okeānos, ko izraisa ūdens sāļuma, temperatūras un blīvuma atšķirības. Cirkulāciju galvenokārt rada auksta un blīva ūdens iegrimšana okeānos polārajos apgabalos un siltā virsūdens migrācija virzienā uz lielajiem platuma grādiem.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Achberger, A. M., Christner, B. C., Michaud, A. B., Priscu, J. C., Skidmore, M. L., Vick-Majors, T. J., Adkins, W., Anandkrishnan, S., Barbante, C., Barcheck, G. and Beem, L. (2016). Microbial community structure of subglacial lake Whillans, West Antarctica. *Frontiers in microbiology*, 7, 1457.
2. Arnold, N. S., Conway, S. J., Butcher, F. E. and Balme, M. R. (2019). Modeled subglacial water flow routing supports localized intrusive heating as a possible cause of basal melting of Mars' south polar ice cap. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124(8), 2101–2116.
3. Āboltiņš, O. (2010). *No leduslaikmeta līdz globālajai sasilšanai. Dabas vides pagātne un tagadne Latvijā*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 128 lpp.
4. Barr, I. D., Dokukin, M. D., Kougkoulos, I., Livingstone, S. J., Lovell, H., Małeck, J. and Muraviev, A. Y. (2018). Using ArcticDEM to analyse the dimensions and dynamics of debris-covered glaciers in Kamchatka, Russia. *Geosciences*, 8(6), 216. <https://doi.org/10.3390/geosciences8060216>
5. Bauder, A., Funk, M. and Huss, M. (2007). Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46, 145–149.
6. Benn, D. I., Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers and glaciation*. 2nd. ed. London: Hodder Education, 802 p.
7. Bennett, M., Glasser, N. (2009). *Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms*. Oxford: Wiley, 385 p.
8. Björnsson, H. (2016). The glaciers of Iceland: A historical, cultural and scientific overview. *Atlantis Advances in Quaternary Science* 2, 613 p. DOI 10.2991/978-94-6239-207-6.
9. Björnsson, H., Gjessing, Y., Hamran, S. E., Hagen, J. O., Liestøl, O., Pálsson, F. and Erlingsson, B. (1996). The thermal regime of sub-polar glaciers mapped by multi-frequency radio-echo sounding. *Journal of Glaciology*, 42(140), 23–32.
10. Björnsson, H., Pálsson, F., Sigurdsson, O. and Flowers, G. E. (2003). Surges of glaciers in Iceland. *Annals of Glaciology*, 36, 82–90.
11. Blackburn, T., Edwards, G. H., Tulaczyk, S., Scudder, M., Piccione, G., Hallet, B., McLean, N., Zachos, J. C., Cheney, B. and Babbe, J. T. (2020). Ice retreat in Wilkes Basin of East Antarctica during a warm interglacial. *Nature*, 583(7817), 554–559.
12. Bolch, T., Kulkarni, A., Käab, A., Huggel, C., Paul, F., Cogley, J. G., Frey, H., Kargel, J. S., Fujita, K., Scheel, M. and Bajracharya, S. (2012). The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336(6079), 310–314.
13. Boulton, G. S. (1996). Theory of glacial erosion, transport and deposition as a consequence of subglacial sediment deformation. *Journal of Glaciology*, 42, 43–62.

14. Bowling, J. S., Livingstone, S. J., Sole, A. J. and Chu, W. (2019). Distribution and dynamics of Greenland subglacial lakes. *Nature Communications*, 10(1),1–11.
15. Conway, H., Catania, G., Raymond, C. F., Gades, A. M., Scambos, T. and Englehardt, H. (2002). Switch of flow direction in an Antarctic ice stream. *Nature*, 419, 465–467.
16. Cuffey, K. M. and Paterson, W. S. B. (2010). *The physics of glaciers*. 4th ed. Elsevier, 693 p.
17. Evans, D. J., Storrar, R. D. and Rea, B. R. (2016). Crevasse-squeeze ridge corridors: diagnostic features of late-stage palaeo-ice stream activity. *Geomorphology*, 258, 40–50.
18. Evans, D. J. A., Rea, B. R. (1999). Geomorphology and sedimentology of surging glaciers: a landsystem approach. *Annals of Glaciology*, 28, 75–82.
19. Fisher, A. T., Mankoff, K. D., Tulaczyk, S. M., Tyler, S. W. and Foley, N. (2015). High geothermal heat flux measured below the West Antarctic Ice Sheet. *Science Advances*, 1(6), p.e1500093, DOI: 10.1126/sciadv.1500093
20. Foy, N., Copland, L., Zdanowicz, C., Demuth, M. and Hopkinson, C. (2011). Recent volume and area changes of Kaskawulsh Glacier, Yukon, Canada. *Journal of Glaciology*, 57(203), 515–525.
21. Fountain, A. G., Jacobel, R. W., Schlichting, R., Jansson, P. (2005). Fractures as the main pathways of water flow in temperate glaciers. *Nature*, 433, 618–621. <https://doi.org/10.1038/nature03296>
22. Fox, D. (2019). EXCLUSIVE: Tiny animal carcasses found in buried Antarctic lake. *Nature*, 565(7737), 405–407.
23. Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R. G., Blankenship, D. D., Casassa, G., Catania, G. and others. (2013). Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7(1), 375–393.
24. Galofre, A. G., Jellinek, A. M. and Osinski, G. R. (2020). Valley formation on early Mars by subglacial and fluvial erosion. *Nature Geoscience*, 13, 663–668.
25. Gulley, J. D., Benn, D. I., Müller, D., Luckman, A. (2009). A cut-and-closure origin for englacial conduits in uncrevassed regions of polythermal glaciers. *Journal of Glaciology*, 55(189), 66–80. <https://doi.org/10.3189/002214309788608930>
26. Hays, J. D., Imbrie, J. and Shackleton, N. J. (1976). Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 194(4270), 1121–1132.
27. Hirano, D., Tamura, T., Kusahara, K., Ohshima, K. I., Ushio, S., Simizu, D., Ono, K. and Aoki, S. (2020). Strong ice-ocean interaction at Shirase Glacier Tongue, East Antarctica. *Nature Communications*, 11, 4221.
28. Hodell, D. A. (2016). The smoking gun of the ice ages. *Science*, 354(6317), 1235–1236.

29. Howat, I. M. and Eddy, A. (2011). Multi-decadal retreat of Greenland's marine-terminating glaciers. *Journal of Glaciology*, 57(203), 389–396.
30. Hubbard, B., Glasser, N. F. (2005). *Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology*. Wiley-Blackwell, 412 p.
31. Hughes, T. (1986). The jakobshavn effect. *Geophysical Research Letters*, 13(1), 46–48.
32. Ingólfsson, Ó., Benediktsson, Í. Ö., Schomacker, A., Kjær, K. H., Brynjólfsson, S., Jonsson, S. A., Korsgaard, N. J. and Johnson, M. D. (2016). Glacial geological studies of surge-type glaciers in Iceland—Research status and future challenges. *Earth-Science Reviews*, 152, 37–69.
33. IPCC (2014). Climate change 2014: Synthesis report. In: Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.), Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (p. 151), IPCC.
34. Iverson, N. A., Lieb-Lappen, R., Dunbar, N. W., Obbard, R., Kim, E. and Golden, E. (2017). The first physical evidence of subglacial volcanism under the West Antarctic Ice Sheet. *Scientific Reports*, 7(1), 1–8.
35. Johnson, M. D., Schomacker, A., Benediktsson, Í. Ö., Geiger, A. J., Ferguson, A. and Ingólfsson, Ó. (2010). Active drumlin field revealed at the margin of Múlajökull, Iceland: a surge-type glacier. *Geology*, 38(10), 943–946.
36. Kalińska-Nartiša, E., Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Rečs, A., Meija, R. (2017). Fine-grained quartz from cryoconite holes of the Russell Glacier, southwest Greenland – a scanning electron microscopy study. *Baltica* 30(2), 63–73. doi.org/10.5200/baltica.2017.30.08
37. Kalińska, E., Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Rečs, A. and Ješkins, J. (2021). Does glacial environment produce glacial mineral grains? Pro-and supra-glacial Icelandic sediments in microtextural study. *Quaternary International*. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.029.
38. Karušs, J., Lamsters, K., Chernov, A., Krievāns, M., Ješkins, J. (2019). Subglacial topography and thickness of ice caps on the Argentine Islands. *Antarctic Science*, 31(6), 332–334. https://doi.org/10.1017/S0954102019000452
39. King, M. D., Howat, I. M., Candela, S. G., Noh, M. J., Jeong, S., Noël, B. P., van den Broeke, M. R., Wouters, B. and Negrete, A. (2020). Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 1–7.
40. Kjær, K. H., Korsgaard, N. J., Schomacker, A. (2008). Impact of multiple glacier surges—a geomorphological map from Brúarjökull, East Iceland. *Journal of Maps*, 4(1), 5–20.

41. Kjær, K. H., Larsen, E., van der Meer, J., Ingólfsson, Ó., Krüger, J., Benediktsson, I. Ö., Knudsen, C. & Schumacher, A. (2006). Subglacial decoupling at the sediment/bedrock interface: a new mechanism for rapid flowing ice. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2704–2712.
42. Krüger, T. (2013). *Discovering the ice ages: international reception and consequences for a historical understanding of climate*. Transl. by Hentschel, A. M. Leiden: Brill, 534 p.
43. Kutuzov, S., Lavrentiev, I., Smirnov, A., Nosenko, G. and Petrakov, D. (2019). Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. *Frontiers in Earth Science*, 7(153). <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153>
44. Lamsters, K. (2015). *Zemgales ledus loba subglaciālās reljefa formas un to uzbūve*. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 157 lpp.
45. Lamsters, K. (2019). Leduslaikmetu cēloņu teorijas. *Latvijas Nacionālā enciklopēdija* (elektroniskais izdevums), 2514. šķirklis, [https://enciklopedija.lv/skirklis/2514-leduslaikmetu-cēloņu-teorijas](https://enciklopedija.lv/skirklis/2514-leduslaikmetu-celoņu-teorijas)
46. Lamsters, K. (2020a). Antiglaciālisms. *Latvijas Nacionālā enciklopēdija* (elektroniskais izdevums), 2495. šķirklis, <https://enciklopedija.lv/skirklis/2495-antiglaciālisms>
47. Lamsters, K. (2020b). Glaciālā teorija. *Latvijas Nacionālā enciklopēdija* (elektroniskais izdevums), 2492. šķirklis, <https://enciklopedija.lv/skirklis/2492-glaciālā-teorija>
48. Lamsters, K. (2020c). Glacioloģija. *Latvijas Nacionālā enciklopēdija* (elektroniskais izdevums), 1998. šķirklis, <https://enciklopedija.lv/skirklis/1998>
49. Lamsters, K., Karušs, J., Rečs, A., Bērziņš, D. (2016). Detailed subglacial topography and drumlins at the marginal zone of Múlajökull outlet glacier, central Iceland: evidence from low frequency GPR data. *Polar Science*, 10(4), 470–475, <https://doi.org/10.1016/j.polar.2016.05.003>
50. Lamsters, K., Krievāns, M., Karušs, J. (2019a). Argentīnas salu (Vilhelma arhipelāgs, Antarktīka) ledus kupolu ģeofizikālie pētījumi. Grām.: Ījabs, I. (atb. red.). *Perpetuum mobile 2019*: Latvijas Universitātes fonda mecenātu atbalstīto pētnieku zinātniskais rakstu krājums. Rīga: LU Akadēmiskais apgāds.
51. Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Ješkins, J. (2019b). Application of unmanned aerial vehicles for glacier research in the Arctic and Antarctica. In: *Environment. Technology. Resources*. Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. Volume I. Rezekne, Latvia. 131–135. <http://dx.doi.org/10.17770/etr2019vol1.4130>
52. Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M. and Ješkins, J. (2020a). High-Resolution Surface and Bed Topography Mapping of Russell Glacier (sw Greenland) Using Uav and Gpr. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, 757–763.
53. Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Ješkins, J. (2020b). High-resolution orthophoto map and digital surface models of the largest Argentine Islands (the Antarctic)

from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Journal of Maps*, 16(2), 335–347. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1748130>

54. Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Ješkins, J. (2020c). The thermal structure, subglacial topography and surface structures of the NE outlet of Eyjabakkajökull, east Iceland. *Polar Science*, 26, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100566>
55. Lamsters, K., Ustinova, M., Birzniece, L., Silamiķelis, I., Gaidelene, J., Karušs, J., Krievāns, M., Kasparinskis, R., Fridmanis, D., Muter, O. (2020d). Bacterial and archaeal community structure in benthic sediments from glacial lakes at the Múlajökull Glacier, central Iceland. *Polar Biology*, 43(12), 2085–2099.
56. Lauro, S. E., Pettinelli, E., Caprarelli, G. et al. (2020). Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data. *Nature Astronomy*, 5, 63–70(2021). <https://doi.org/10.1038/s41550-020-1200-6>
57. Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20(1).
58. Menzies, J., Meer van der J. (2017). *Past Glacial Environments*. 2nd ed. Elsevier, 858 p.
59. Mesners, R. (2004). *Antarktida. Paradīze un pekle*. Rīga: AGB.
60. Mordret, A. (2018). Uncovering the Iceland hot spot track beneath Greenland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6), 4922–4941.
61. Mottram, R., Simonsen, S. B., Svendsen, S. H., Barletta, V. R., Sørensen, L. S., Nagler, T., Wuite, J., Groh, A., Horwath, M., Rosier, J. and Solgaard, A. (2019). An integrated view of Greenland ice sheet mass changes based on models and satellite observations. *Remote Sensing*, 11(12), 1407.
62. Naegeli, K., Lovell, H., Zemp, M., Benn, D. I. (2014). Dendritic subglacial drainage systems in cold glaciers formed by cut-and-closure processes. *Geografiska Annaler, Series A Physical Geography*, 96(4), 591–608. <https://doi.org/10.1111/geoa.12059>
63. Nienow, P. W., Sole, A. J., Slater, D. A. and Cowton, T. R. (2017). Recent advances in our understanding of the role of meltwater in the Greenland Ice Sheet system. *Current Climate Change Reports*, 3(4), 330–344.
64. Nimmo, F., Hamilton, D. P., McKinnon, W. B., Schenk, P. M., Binzel, R. P., Bierson, C. J., Beyer, R. A., Moore, J. M., Stern, S. A., Weaver, H. A. and Olkin, C. B. (2016). Reorientation of Sputnik Planitia implies a subsurface ocean on Pluto. *Nature*, 540(7631), 94–96.
65. Nussbaumer, S. U., Nesje, A. and Zumbühl, H. J. (2011). Historical glacier fluctuations of Jostedalbreen and Folgefonna (southern Norway) reassessed by new pictorial and written evidence. *The Holocene*, 21(3), 455–471.
66. Orosei, R., Lauro, S. E., Pettinelli, E., Cicchetti, A., Coradini, M., Cosciotti, B., Di Paolo, F., Flamini, E., Mattei, E., Pajola, M. and Soldovieri, F. (2018). Radar evidence of subglacial liquid water on Mars. *Science*, 361(6401), 490–493.

67. Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Khalsa, S. J. S. and Raup, B. (2005). *Illustrated GLIMS glacier classification manual*. Institut für Physische Geographie Freiburg, Germany, and National Snow and Ice Data Center, Boulder, USA, version, 1, 36 p.
68. Rignot, E., Mouginot, J. and Scheuchl, B. (2011). Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet. *Science*, 333(6048), 1427–1430.
69. Roer, I., Zemp, M. and van Woerden, J. (2008). *Global glacier changes: Facts and figures*. UNEP/Earthprint, World Glacier Monitoring Service, 88 p.
70. Schroeder, D. M., Blankenship, D. D., Young, D. A. and Quartini, E. (2014). Evidence for elevated and spatially variable geothermal flux beneath the West Antarctic Ice Sheet. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(25), 9070–9072.
71. Sevestre, H., Benn, D. I., Hulton, N. R. and Bælum, K. (2015). Thermal structure of Svalbard glaciers and implications for thermal switch models of glacier surging. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(10), 2220–2236.
72. Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., Van Den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G. and Nowicki, S. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558, 219–222.
73. Shreve, R. L. (1972). Movement of water in glaciers. *Journal of Glaciology*, 11(62), 205–214.
74. Shreve, R. L. (1985). Esker characteristics in terms of glacier physics, Katahdin esker system, Maine. *Geological Society of America Bulletin*, 96(5), 639–646.
75. Smith, A. M., Murray, T., Nicholls, K. W., Makinson, K., Adalgeirsdóttir, G., Behar, A. E. and Vaughan, D. G. (2007). Rapid erosion, drumlin formation, and changing hydrology beneath an Antarctic ice stream. *Geology*, 35(2), 127–130.
76. Stivrins, N., Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Rečs, A. (2018). Spheroidal carbonaceous particles in cryoconite sediment on the Russell glacier, Southwest Greenland. *Baltica* 31(2), 115–124. <https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.11>
77. Strass, V. H., Rohardt, G., Kanzow, T., Hoppema, M. and Boebel, O. (2020). Multidecadal Warming and Density Loss in the Deep Weddell Sea, Antarctica. *Journal of Climate*, 33(22), 9863–9881.
78. Sutherland, D. A., Jackson, R. H., Kienholz, C., Amundson, J. M., Dryer, W. P., Duncan, D., Eidam, E. F., Motyka, R. J. and Nash, J. D. (2019). Direct observations of submarine melt and subsurface geometry at a tidewater glacier. *Science*, 365(6451), 369–374.
79. Thompson, L. G., Brecher, H. H., Mosley-Thompson, E., Hardy, D. R. and Mark, B. G. (2009). Glacier loss on Kilimanjaro continues unabated. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(47), 19770–19775.
80. Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carelton, A. M., Jones, P. D., Lagun, V., Reid, P. A., & Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *International Journal of Climatology*, 25(3), 279–294.

81. Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. and Shrestha, A. B. (2019). *The Hindu Kush Himalaya assessment: mountains, climate change, sustainability and people*. Springer Nature, 267 p.
82. WGMS (2020, updated, and earlier reports). Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). Zemp, M., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Bannwart, J., Rastner, P., Paul, F., Hoelzle, M. (eds.), ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 274 p.
83. Williams, R. S. and Ferrigno, J. G. (eds.). (1993). Satellite image atlas of glaciers of the world. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1386*, US Government Printing Office.
84. Winkler, S., Elvehøy, H. and Nesje, A. (2009). Glacier fluctuations of Jostedalbreen, western Norway, during the past 20 years: the sensitive response of maritime mountain glaciers. *The Holocene*, 19(3), 395–414.
85. Wright, A. and Siegert, M. (2012). A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. *Antarctic Science*, 24, 659–664.
86. Zeebe, R. E. and Lourens, L. J. (2019). Solar System chaos and the Paleocene–Eocene boundary age constrained by geology and astronomy. *Science*, 365(6456), 926–929.
87. Zelčs, V. (2018). Pēdējā apledojuuma deglaciācija un reljefa attīstība. Grām.: *Latvija. Zeme, daba, tauta, valsts*, zin. red. Nikodemus, O., Kļaviņš, M., Krišjāne, Z., Zelčs, V., Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 174.–176. lpp.
88. Zelčs, V., Markots, A., Lamsters, K. (2018). Glaciālās reljefa vidējformas. Grām.: *Latvija. Zeme, daba, tauta, valsts*, zin. red. Nikodemus, O., Kļaviņš, Krišjāne, Z., Zelčs, V., Rīga: LU Akadēmiskais apgāds, 94.–109. lpp.

Kristaps Lamsters
MŪSDIENU LEDĀJI

Latvijas Universitātes Akadēmiskais apgāds
Aspazijas bulvāris 5, Rīga, LV-1050, Latvija
www.apgads.lu.lv



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**