

Vznik a vývoj arktických jezer

Arktida prošla během kvartéru výraznými změnami. Na vrcholu poslední doby ledové (LGM) před cca 20 tisíci lety byla značná část Arktidy pokryta ledovci, průměrné teploty byly místy až o 20 °C nižší než dnes. K pochopení současného stavu Země je nesmírně důležitá znalost vývoje přírody po skončení poslední doby ledové, a právě v Arktidě téměř všudypřítomná jezera nám v tom pomáhají. Jezerní sedimenty umožňují výborně rekonstruovat klima a přírodní podmínky především holocénu (posledních asi 11 700 let) a zasadit tak současnou klimatickou změnu do širšího rámce (Miller et al., 2010). Za použití paleolimnologických metod se také získávají informace o vzniku a vývoji jezer, která se v Arktidě během posledních 20 tisíc let překotně objevovala a proměňovala. Nejrozšířenější typy jezer a způsob jejich vzniku jsou představeny v tomto článku.

Síla ledu

Glaciální neboli ledovcová jezera se nalézají všude tam, kde se v minulosti vyskytoval (nebo dosud existuje) ledovec. Ledovcem hrazená jezera jsou v kontaktu s ledovcem a Cohen (2003) do této skupiny řadí jezera supraglaciální (vznikající během letního tání na povrchu ledovce), englaciální (jsou cele obklopena ledovcem) a subglaciální (leží na bázi ledovce mezi ledem a jeho podloží). Voda v subglaciálním jezeře nezamrzá díky geotermálnímu teplu a také hydrostatické rovnováze (na vodu v kapalném stavu tlačí obrovskou vahou ledovec, jenž tak nemůže zmrznout v led s větším objemem). Příkladem podledovcového jezera v Arktidě je Grímsvötn na Islandu, které se nachází pod 300 m mocnou ledovcovou čapkou Vatnajökull.

Posledním typem ledovcem hrazených jezer jsou jezera terminoglaciální, jež přiléhají k ledovcovému štítu nebo ledovci. Vyskytují se hojně např. v Grónsku nebo na Svalbardu, ale během deglaciacie se tato jezera tvořila před ustupujícími ledovcovými štíty, v Severní Americe to byla rozsáhlá jezera Agassiz a Missoula či v Evropě Baltské ledové jezero. Zajímavým typem jsou epishelfová jezera, jež jsou hrazena plovoucím

šelfovým ledovcem ze strany blíže k moři a pevninou (Pienitz et al., 2008). Pod šelfovým ledovcem tak pod jezero proniká mořská voda, která se však v důsledku rozdílu hustot nemísí s výše ležící sladkou vodou z pevniny a vytváří tak unikátní ekosystémy sladkovodních i mořských společenstev.

Postglaciální jezera vznikla ledovcovou erozí a/nebo akumulací na území dříve zaledněném, v některých oblastech Arktidy tak jezera zaujímají až 20 % celkové rozlohy. Mezi jezera, jejichž pánve modeloval ledovec, patří jezera v ledovcových údolích, karech a fjordech (Pienitz et al., 2008). Dále se do skupiny postglaciálních jezer řadí jezera hrazená ledovcovými uloženinami, tedy např. morény či eskery. Jezera hrazená morénou jsou velmi častá v oblastech hranice maximálního zalednění. Po roztátí mrtvého ledu vznikají jezera zahloubená.

V rozsáhlých nížinách arktické Kanady, Aljašky a Sibiře vyplňují deprese vznikající degradací permafrostu termokrasová jezera (French, 2007). Díky současnému oteplování těchto jezer mírně přibývá, zejména v oblastech souvislého permafrostu. Půdy v zóně permafrostu jsou významnou zásobárnou metanu, velmi silného skleníkového

plynu, který se uvolňuje v nově se tvořících termokrasových jezerech. Podle práce Walter et al. (2006) je následkem pozitivní zpětné vazby, neboť metan zesiluje skleníkový efekt atmosféry a v důsledku oteplení se opět rychleji tvoří termokrasová jezera.

Původ jezer uvnitř Země i mimo ni

Jezera nemusí vzniknout jen exogenními činiteli, jako jsou led a mráz. Stejně tak se v Arktidě projevují endogenní procesy, jejichž energie pochází z nitra Země a dává vzniknout jezerům tektonickým a vulkanickým. Na Islandu lze tyto procesy pozorovat nejzřetelněji, jak dokládají nejrozsáhlejší jezera ostrova, Thingvallavatn a Thórisvatn, která vznikla vyplněním depresí příkopové propadliny v zóně divergence na Středoatlantském hřbetu. Na ostrově ledu a ohně se projevuje také sopečná činnost, např. pod výše zmíněným subglaciálním jezerem Grímsvötn, jež vyplňuje kalderu aktivní stejnojmenné sopky. Vulkanická aktivita zde často způsobuje katastrofické povodně neboli (z islandštiny) jökulhlaupy (viz článek Z. Engela v Geografických rozhledech, roč. 16, č. 2).

Jezera vulkanického původu se nacházejí též na Aljašce a patří sem kráterová, větší kalderová i maarová jezera. Některá jezera v kalderách způsobila obrovské povodně, např. kráter sopky Aniakhak zadržoval značný objem vody, který se katastroficky vyliil před asi 3400 lety po provalení okraje kaldery, a průtok odhadovaný až v řádu milionu m³/s přemísťoval skalní bloky o průměru desítek metrů (Waythomas et al., 1996). Další jezera vyplňují maary, což jsou mělké, široké krátery s nízkým okrajem, jež vznikají při explozivních erupcích, během kterých dochází ke kontaktu magmatu s podpovrchovou vodou. Na Sewardově poloostrově na Aljašce se ale magma střetlo s permafrostem a vzájemně interagovaly dostatečně dlouho na to, aby ve svrchním pleistocénu vznikly největší známé maary na světě, tzv. Espenbergovy maary o průměru 4–8 km.

U kráterů vyplněných jezery ještě zůstaneme, ovšem podíváme se na ty, jež vznikly dopadem meteoritu, přestože jsou v Arktidě poměrně vzácné. V Arktidě se nacházejí dva meteoritické krátery na Sibiři (El'gygytyn a Popigai) a dva v Québecu (Lac à l'Eau Claire a Pingualuk). Jezero Pingualuk vzniklo v pleistocénu a bylo opakovaně přikryto



Obr. 1: Malé závrťové jezero v Mathiesondalenu, Svalbard, vzniklo krasověním v sádrovcích během posledních 50 let, což prokázalo porovnání leteckých snímků z let 1961 a 2009, a dokládá tak aktivitu krasových procesů ve Vysoké Arktidě. Kromě několika dalších jezer se v této lokalitě nachází ponor a slepé údolí. Foto: L. Krajcarová

V ZORNÉM POLI GEOGRAFŮ

kontinentálním ledovcem, ovšem i kvůli velké hloubce jeho vody nezamrzly. Jezero El'gygytgyn vzniklo impaktem v Čukotském pohorí, které bylo součástí tehdejší Beringie. Tuto oblast výrazněji kvartérní zalednění naopak nepostihlo, sloužila coby pevninský most pro migraci flóry, fauny i lidí mezi Asií a Amerikou (Brigham-Grette et al., 2013).

V období glaciálů byly rozsáhlé části zemské kůry hluboko zatlačeny masou ledu místy až v řádu stovek metrů procesem zvaným glaciostáze (Gornitz, 2009). Zároveň v důsledku vázání vody v ledovcích poklesla hladina oceánů, během LGM ležela až o 120 m níže než dnes. Při deglaciaci se nejprve rychle zvýšila hladina oceánů a zatopila rozsáhlé oblasti, zatímco stlačená zemská kůra reagovala na odlehčení se zpožděnou odezvou a pomalu se začaly vynořovat pláže či mořské terasy. Na těchto terasách se tvoří nová jezera, jejichž voda se postupně mění ze slané na sladkou. Stáří takových jezer nepřesahuje 6–5 tisíc let, kdy se výzdvih hladiny světového oceánu výrazně zpomalil.

Působení tekoucí vody

Kromě jezer na mořských terasách se na březích Arktidy hojně vyskytují deltová jezera. Nejvíce se jich nachází v rozsáhlých deltách řek Mackenzie a Leny. Deltová jezera se řadí mezi jezera fluvialní, která vznikla akumulací (v tomto případě) nebo erozní činností tekoucí vody. Velmi podobná deltovým jezerům jsou i zpravidla mělká nivní jezera, která se tvoří podél meandrujících nebo anastomózních toků. Vznikají v opuštěných ramenech meandrů nebo za agradačními valy. Erozní činnost řek má v Arktidě menší význam než akumulací, ale přesto by bylo vhodné zmínit se o evorzních jezerech, která se tvoří pod vodopády a kaskádami nebo během průvalových povodní. Při katastrfickém vylití jezera Missoula hraze-



Obr. 2: Jezero Garmaksla, ležící nad zálivem Billefjorden, Svalbard, lze z geomorfologického hlediska považovat za jezero vzniklé sesuvem. Z geologického hlediska je možné jej řadit mezi tektonická, neboť leží na zlomové poruše, podél které zřejmě rotačním smykovým sesuvem poklesl blok hornin a vzniklou depresi nyní vyplňuje voda. Pozadí snímku dominuje hora Pyramiden a ledovec Norden-skiöld telící se do moře. Foto: M. Roman

ného Kordillerským ledovcem tak byla vymodelována krajina *Channeled Scablands* (stát Washington, USA) a několik evorzních jezer, dosahujících hloubky až 50 m.

Jezera krasového původu se nenalézají v Arktidě často, protože zde není hojnost rozpustných hornin a kvůli rozšíření permafrostu je omezena infiltrace vody do půdy a horninového podloží, proto se nemohou vyvinout systémy podzemní vody. Na druhou stranu se ale uhlíčená vápenatá snadněji rozpouští s klesající teplotou, tento jev však nepřeváží výše zmíněné faktory. Podmínky vhodné pro krasování se vyskytují např. na Sibiři nebo na Svalbardu (viz obr. 1).

Samozřejmě existuje celá řada dalších způsobů vzniku jezer, např. eolickými procesy či hrazená sesuvy (viz obr. 2), jsou ale mnohem méně časté. Kromě jezer jsou dalším významným hydrologickým prvkem

(hlavně Nízké) Arktidy mokřady, jejichž výskyt souvisí s pomalým odtokem vody v plochem terénu a nepropustným permafrostem. A přestože je Arktida téměř neobydlená, až sem také zasáhla činnost člověka a na vodních tocích byly vybudovány umělé vodní nádrže za účelem produkce elektrické energie, např. na řece Jenisej či v Québecu. V následujících letech ale budeme moci sledovat další přímé i nepřímé dopady lidské činnosti na arktická jezera, např. v podobě globálního oteplování či zvýšeného zájmu lidské společnosti o Arktidu v souvislosti s výskytem nerostných surovin. Snad tyto zásahy budou aspoň částečně kontrolovány a nezpůsobí takové environmentální škody jako v mnoha jiných částech světa.

Matěj Roman, PřF UK v Praze
matěj.roman@gmail.com

The Origin and Evolution of Arctic Lakes. Climatic and environmental changes in the Arctic, following the Last Glacial Maximum, have caused the formation of a large number of diverse lakes. These are predominantly lakes of glacial origin, thermokarst lakes, fluvial lakes or lakes on raised beaches. Less common lake types include volcanic and tectonic lakes, impact crater lakes and lakes of karst origin. The article explains the origin and evolution of the most important lakes.

LITERATURA A ZDROJE DAT:

- BRIGHAM-GRETTE, J. et al. (2013): Pliocene warmth, polar amplification, and stepped Pleistocene cooling recorded in NE Arctic Russia. *Science*, 340, s. 1421–1427.
- COHEN, A. S. (2003): *Paleolimnology: the history and evolution of lake systems*. Oxford University Press Inc., New York, 500 s.
- FRENCH, H. M. (2007): *The Periglacial Environment*. Third edition. John Wiley & Sons, Chichester, 458 s.
- GORNITZ, V. (2009): *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer, XXVIII, 1049 s.
- MILLER, G. H. et al. (2010): Temperature and precipitation history of the Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 29, s. 1679–1715.
- PIENITZ, R. DORAN, P. T., LAMOUREUX, S. F. (2008): Origin and geomorphology of lakes in the polar regions. In Vincent, W. F., Laybourn-Parry, J. (eds.): *Polar Lakes and Rivers*. Oxford University Press, New York, s. 25–41.
- WALTER, K. M. et al. (2006): Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 443, s. 71–75.

WAYTHOMAS, C. F. et al. (1996): A catastrophic flood caused by drainage of a caldera lake at Aniakchak Volcano, Alaska, and implications for volcanic hazards assessment. *Geological Society of America Bulletin*, 108, s. 861–871.

APLIKACE DO VÝUKY:

1. Zamyslete se nad rozložením a hustotou jezer na Zemi. Vysvětlete, proč jsou v Arktidě tak hojná a naopak v jiných zeměpisných šířkách méně častá. Jmenujte nejčastější typy jezer na Zemi.
2. Diskutujte, jaký dopad by mohlo mít globální oteplování na Arktidu, včetně jejích jezer (zejména se zaměřte na termokrasová a ledovcová jezera a mokřady). Myslíte si, že člověk ovlivňuje podnebí, nebo je oteplování přirozený proces jako např. konec doby ledové? Pokuste se vyhledat si informace o jezeru Agassiz a jeho zániku, který měl významný dopad na klima severní polokoule.