

Arktida a její reakce na globální oteplování – příběh české vědy

Tento příspěvek byl inspirován velmi přehledným článkem prof. Marcela Rejmánka v loňském ročníku *Živa* (2020, 5: 210–214). Ale vraťme se nejprve na začátek, do 90. let 20. století, kdy se u nás začal formovat polární (arktický i antarktický) ekologický výzkum. Hlavní motivací byla a je participace na řešení globálních problémů naší Země, především v souvislosti s antropogenně podmiňným globálním oteplováním. Tehdy jsme informovali v Akademickém bulletinu AV ČR (1997, 12: 6–7) o nově se rodícím českém výzkumu polárních oblastí. V této zprávě jsme trochu smutně konstatovali, že vyšla více než tisíci-stránková kolokviální kniha *Climate Change 1995*, na jejímž sepsání se podílely téměř dva tisíce autorů. Nenašli jsme však mezi nimi ani jednoho Čecha. Autorský kolektiv byl skutečně mezinárodní, spoluautoři byli zástupci jak tradičních vědeckých velmocí, tak středoevropských a východoevropských států i zemí rozvojových. Navzdory nepřilíhající vstřícné politické atmosféře, kdy někteří vrcholní politici využili svého postavení k popření antropogenně podmiňného globálního oteplování, vzniklo v České republice mnoho velmi erudovaných akademických i univerzitních vědeckých pracovišť (jmenujme např. největší a asi nejznámější z nich, ústav Akademie věd CzechGlobe – Ústav výzkumu globální změny), která se zaměřují na detekci a popis oteplování a řadu souvisejících ekologických problémů spojených se změnou klimatu. Součástí celosvětového trendu výzkumu a globální ochrany Země se stal také český polární výzkum, a to na domácím i zahraničním poli. Arktida a Antarktida jsou považovány za indikátory globálních změn a některé jejich oblasti silně postihuje oteplování, což je podle našich dnešních znalostí palčivý problém se značně negativními důsledky i pro ostatní části naší planety.

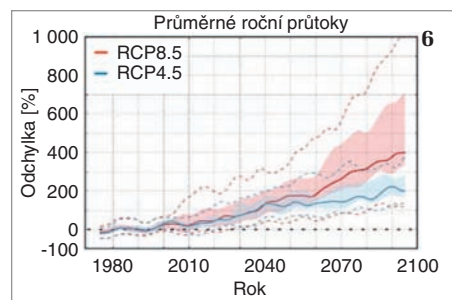
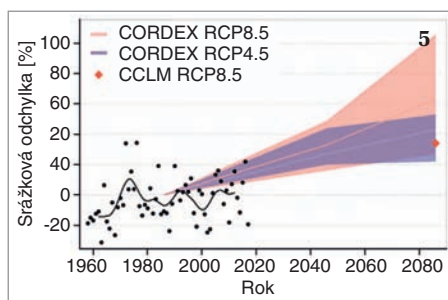
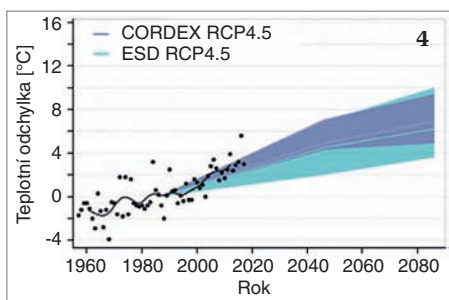
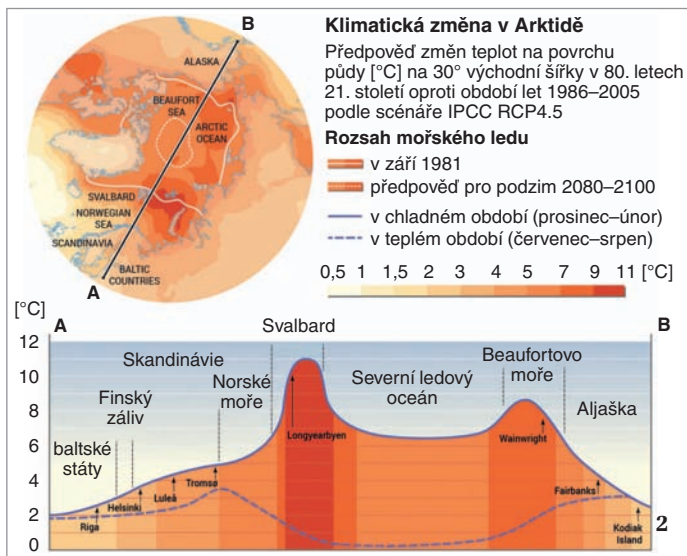
Arktida – nejrychleji se oteplující oblast Arktidu definujeme jako oblast, která se nachází severně od severního polárního kruhu, tedy 66°33' severní šířky, nebo jako

oblast na severní polokouli, v níž průměrná teplota ani v nejteplejším měsíci v roce (červenci) nepřesáhne 10 °C. Má rozlohu 20–30 milionů km² (podle zeměpisného,



nebo izotermického hlediska) a je geograficky, ekologicky i klimaticky velmi různorodá. Arktida se otepluje dvakrát rychleji než zbytek Země (ACIA – Arctic Climate Impact Assessment 2005). Zatímco globální teplota celé planety se za posledních zhruba 100 let zvýšila o 0,5 °C, v Arktidě to bylo o 2 až 2,5 °C. Podle všeobecně rozšířené představy jde o nevládné, izolované, málo osídlené území, které je minimálně využíváno lidmi. Její centrální a největší část tvoří stále ještě ledem pokrytý Severní ledový oceán a jeho lokální moře, omývající kus eurasijské a severoamerické pevniny s mnoha ostrovy. Díky cirkulaci mořských a vzdušných proudů a blízkosti průmyslových oblastí severní polokoule Země je Arktida otevřenou a relativně dostupnou oblastí. Globální oteplování, způsobené především antropogenními emisemi oxidu uhličitého a ostatních skleníkových plynů, představuje dlouhodobý proces, který velmi intenzivně ovlivňuje mořský i pevninský ekosystém Arktidy. Tento proces je postupný a odezva na něj velmi různorodá a často těžko dokumentovatelná (ACIA 2005). Nárůst teploty napříč arktickou oblastí v zimním a letním období a klesající pokrytí Severního ledového oceánu mořským ledem ukazuje obr. 2 (Schoolmeester a kol. 2019). Největší teplotní nárůst je zaznamenáván v zimní sezoně, což má za následek zkracování období, v němž krajina pokrývá sníh. To se projevuje větším pohlcováním všech složek slunečního záření zemským povrchem (snížením albeda – odrazivosti) a zpětným zvyšováním teplot. Nárůst teploty způsobuje tání permafrostu (trvale zmrzlé půdy), postupnou dekompozici staré, původně zmrzlé organické hmoty s následným uvolňováním metanu a ostatních skleníkových plynů do atmosféry, prodloužení vegetačního období a celkové změny ve složení a rozšíření vegetace. Oteplování je také v některých oblastech, především v částech vysoké Arktidy (pouště a polopouště), spojeno se zvýšením množství srážek, což způsobuje rozšiřování vegetace – zazeleňování (greening of the Arctic). V jiných částech Arktidy, zejména v kontinentální subarktické oblasti, naopak dochází k vysychání tundry – hnědnutí (browning of the Arctic), tání permafrostu a rozšiřování velkoplošných požárů. Všechny tyto změny dramaticky působí na socioekonomické a životní podmínky původních obyvatel Arktidy.

Oteplující se Arktida ovlivňuje atmosférickou vzdušnou cirkulaci, termohalinní výměník mořských proudů (oceánický výměník je systém mořských proudů, který zajišťuje přenos různě teplé a slané vody napříč planetou Země), rozšíření vegetace a cyklus uhlíku nejen v rámci biomu tundry, ale i globálně, a to hlavně v sousedících oblastech, v našem případě v Evropě. Děje se to hlavně kvůli úloze Arktidy v globálním atmosférickém cyklu a globálním cyklu mořských proudů – pohlcování nadbytečného tepla přicházejícího z jižních částí severní polokoule. Funkce arktické „ledničky“ či „mrazničky“ napomáhá k ochlazení a vyrovnávání globální teploty, v důsledku oteplování Arktidy se však její úloha snižuje, což se v eurasijském i severoamerickém mírném pásu projevuje nej-



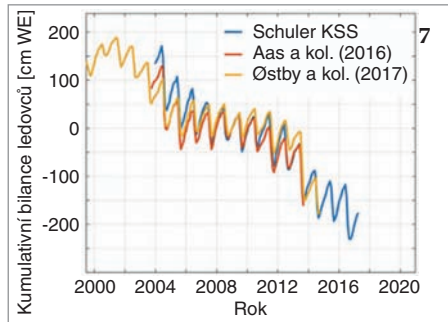
1 Centrální část ostrova Špicberk (souostroví Svalbard), Billefjorden, zátoka Petunia, předpolí ledovce Hørbye

2 Nárůst teploty napříč arktickou oblastí. Blíže v textu. Podle: T. Schoolmeester a kol. (2019; www.grida.no)

3 Ekoton – nestabilní přílivová oblast s jemným ledovcovým sedimentem v zátocce Petunia. Zde se v závislosti na přílivu a odlivu střídá mořský a terestrický ekosystém.

4 až 6 Matematické modely podle scénářů IPCC – nárůst teploty (obr. 4), srážek (5) a průtoků řek (6) na Svalbardu mezi lety 1960/70 až 2080/2100. Blíže v textu

7 Kumulativní bilance ledovců na Svalbardu podle modelů v letech 2000–2020 (WE – vodní ekvivalent, množství vody vznikající táním). Podle: I. Hanssen-Bauer a kol. (ed., 2019; obr. 4–7)



a 81° severní šířky a mezi 10° a 34° východní délky. Podle Smlouvy o Špicberkách, podepsané v Paříži 9. února 1920, patří souostroví pod přímou správu Norska a podle zákona ze 17. června 1925 je součástí Norského království (tvoří jeho nejsevernější část). Československo přistoupilo k této smlouvě 9. července 1930 a díky tomu mohou občané naší republiky vyvíjet na Svalbardu hospodářské a vědecké aktivity. Z hlediska zaměstnanosti zajišťované norským státem dnes na Svalbardu působí kromě pracovníků dolů na těžbu uhlí společnosti Store Norske Spitsbergen Kulkompani (SNSK) hlavně zaměstnanci služeb, včetně podpory turismu (v období před pandemií covidu-19 navštívilo Svalbard ročně kolem 80 tisíc turistů). Značný počet osob pracuje také v akademickém sektoru – Norsko každoročně investuje do výzkumu přibližně 350 milionů norských korun a největší část je zaměřena na obory živé i neživé přírody související se změnami klimatu.

Jak jsme uvedli výše, souostroví Svalbard je oblastí nejvíce postiženou oteplováním (v období let 1971–2017 tam došlo ke zvýšení teploty o 3 až 5 °C; obr. 2), a to se všemi důsledky, které proces oteplování doprovázejí. Rekonstrukce a předpověď

vývoje klimatu na Svalbardu (Hanssen-Bauer a kol., ed., 2019) vychází ze závěrů Mezinárodního klimatického panelu (IPCC 2013), které definují tři možné scénáře na základě množství emisí skleníkových plynů do r. 2100. Pro potřeby tohoto článku jsme použili scénář a model označovaný RCP4.5, který se v současné době jeví jako nejpravděpodobnější a který předpokládá, že se do r. 2040 sníží emise skleníkových plynů o 45 %, což způsobí zvýšení globální průměrné roční teploty maximálně o 2 °C. Teplota na Svalbardu přitom stoupne o 7 °C a současně dojde k 45% navýšení srážek, které se budou vyskytovat v častých silných lijáčkách (obr. 4 a 5). To bude mít za následek dramatické zvýšení průtoků řek (obr. 6) a tání ledovců. Dojde i ke zkrácení období, kdy je krajina Svalbardu pokryta sněhem, a častěji nastane zimní obleva. V návaznosti na zvyšující se teplotu vzduchu vzroste teplota okolní mořské vody o 1 °C a sníží se její salinita. Zvýšení teploty a srážek významně prodlouží vegetační sezonu (ze 3 na 6 měsíců) a zkrátí zimní periodu (z 9 na 6 měsíců).

Velmi komplikovaný systém také tvoří pevninské ledovce, jejichž dlouhodobé chování je podmíněno interakcí s klimatem. Na Svalbardu se chování pevninských ledovců monitoruje od druhé poloviny 19. století a s využitím řady metod se vývoj zalednění rekonstruuje za období od začátku holocénu (posledních zhruba 11 700 let). Měření přispělo ke zpřesnění celkové bilance ledovců na Svalbardu, kde za posledních 32 let odtálo přibližně 7 % pevninských ledovců (průměrně 0,2 % ročně; obr. 7). Žádný pevninský ledovec na souostroví v současné době neztvrdne svou plochu zalednění.

V Arktidě je velmi rozšířený permafrost, a to i v některých částech mořského šelfu.



Trvale zmrzlá půda pokrývá 22 % povrchu naší planety (na severní polokouli 15 milionů km²) a je v ní obsaženo 1 500 bilionů tun uhlíku – dvakrát více než v atmosféře Země. Procesy spojené s fyzikálními, chemickými a biologickými změnami permafrostu podmíněné a způsobené oteplováním jsou velmi intenzivně studovány a monitorovány ve všech částech Arktidy.

Ve vysoké Arktidě včetně Svalbardu probíhá oteplování permafrostu nejrychleji. Jeho mocnost na Svalbardu dosahuje kolem 100 m v údolích a 400 až 500 m v horských oblastech. V centrální části kolísá sezonní teplota na povrchu půdy od -1,3 do -4,1 °C a v hloubce neovlivněné sezonními výkyvy se pohybuje od -2,6 do -5,2 °C. Ve vrtech, v nichž se měří teplota permafrostu, je od r. 2000 zaznamenáván její postupný nárůst o 0,06 až 0,15 °C v hloubkách od 10 do 20 m. Postupně se také zvyšuje hloubka aktivní vrstvy, která se pohybuje od 49 do 300 cm, v období mezi lety 1999–2018 to bylo o 1,6 cm ročně. Zmíněný matematický model na základě těchto údajů předpovídá, že permafrost bude do konce století v některých oblastech Svalbardu v určitých hloubkách a v některých typech substrátu degradovat. Postupná degradace bude mít velký vliv na celý geo- a ekosystém ostrovů a bude se projevovat především ve svahových a příbřežních oblastech vznikem sněhových, sněhově-bahenních a sněhově-kamenných sesuvů, zvýšenou soliflukcí (půdotokem; obr. na 4. str. obálky) a dalšími geomorfologickými jevy spojenými s nestabilitou zvodnělé povrchové aktivní vrstvy půdy.

Závěrem ještě několik slov o kontaminaci. Znečištění všeho druhu působí především lokálně, kvůli mořským a vzdušným proudům a také vyústění velkých sibiřských a severoamerických řek do arktické oblasti. Arktida včetně Svalbardu se stává „skládkou“ odpadu, který se tam dostává z celého světa. Jedovaté látky pocházející ze znečištění jsou obsaženy ve vzduchu, vodě, sněhu, v ledu, půdě i živých organismech. Některé z nich se dostávají do potravních řetězců a způsobují zdravotní problémy lidem, kteří v Arktidě dlouhodobě žijí. Velmi nebezpečné jsou jedovaté průmyslově vyráběné organické látky, např. pesticidy a produkty jejich rozkladu. Ačkoli se v arktické oblasti používají jen výjimečně, dostávají se tam přenosem na dlouhé vzdálenosti, hromadí se a jsou uskladněny po dlouhé období. Jejich zvýšená koncentrace společně s vysokým obsahem rtuti je



zdokumentována jako toxická součást tkání některých organismů na Svalbardu.

Ze socioekonomického hlediska znamená největší problém současnosti znečištění Arktidy velmi malými částicemi plastů (mikro- a nanoplasty). Ve světových oceánech a mořích se dnes nachází asi 150 milionů tun plastů (včetně jejich mikroskopických částic), které se mořskými a vzdušnými proudy dostávají i do geograficky nejizolovanějších částí světa. Převážná většina plastů znečišťujících Svalbard pochází z jiných oblastí, lokální příspěvek je velmi malý, významně přispívá pouze místní průmyslový rybolov.

Budoucnost českého polárního výzkumu je v našich rukou

Polární výzkum u nás začal již ve 40. letech 20. století (Emil Hadač 1946 ad.) a výrazný rozvoj zaznamenal po sametové revoluci, kdy český stát začal významně finančně podporovat vědecké aktivity v Arktidě i Antarktidě. Nejprve vznikla na ostrově Jamese Rosse Česká antarktická vědecká infrastruktura – Stanice Johanna Gregora Mendela, kterou zřídila a provozuje Masarykova univerzita v Brně. Na Svalbardu následovala v návaznosti na antarktickou stanici Česká arktická vědecká infrastruktura – Stanice Josefa Svobody, již celoročně provozuje Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vznik a provoz stanic byl podpořen v rámci programu velkých vědeckých infrastruktur.

Ve spolupráci s těmito infrastrukturami, na jejichž programech se podílejí experti

8 Letecký snímek Svalbardu z března 2018. Krajina je pokryta sněhem, mořské pobřeží bez zimního zámruzu.

9 Výstavba terénní stanice Nostoc ve vysoké Arktidě. Zátoka Petunia

10 Kopečková tundra – kopečky (tufury) aktivně vytváří vegetace v podmáčené tundře. Jde o nejproduktivnější společenstvo vysoké Arktidy. Zátoka Petunia

11 V údolí Bjørndalen jsme studovali schopnost přežívání vláknité řasy *Tribonema minus* v zimním období.

12 Manipulační experiment s otevřenými komorami, který modifikuje teplotní a vlhkostní poměry v kopečkové tundře.

13 Ze souostroví Svalbard bylo popsáno 12 druhů taxonomicky velmi komplikované skupiny rodu chudina (*Draba* spp.). Některé druhy jsou ekologicky výrazně plastické a vyskytují se v nově odledněných územích.

14 Lomikámen trsnatý (*Saxifraga cespitosa*). Lomikamenovitě (*Saxifragaceae*) jsou čeledi dvouděložných rostlin, která má velmi bohatou diverzitu a četnost v arkticko-alpínském prostředí.

15 Vrba polární (*Salix polaris*) – běžný druh ve vysoké Arktidě včetně Svalbardu

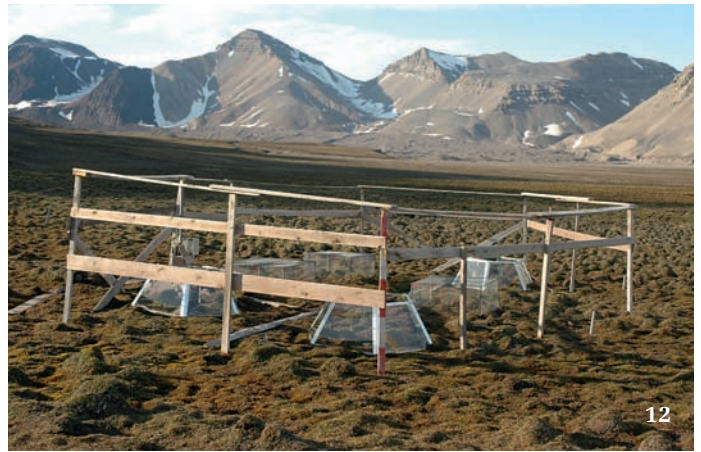
16 Tuleň vousatý (*Erignathus barbatus*) žije osaměle, nejčastěji v místech, kde se pohybují volné ledové kry a kde je hloubka 100 až 200 m. Loví převážně benthické živočichy z měkkého dna, přičemž využívá svyky specifických dlouhých vousů. Snímky z archivu Centra polární ekologie Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích

z dalších akademických a univerzitních pracovišť, především z ústavů Akademie věd ČR, Univerzity Karlovy, České zemědělské univerzity v Praze, Univerzity Palackého v Olomouci a dalších institucí, vznikly a vznikají další vědecké skupiny, které pracují v jiných částech Arktidy (Grónsko, Island, Sibiř, Aljaška) i Antarktidy. Na Islandu a Faerských ostrovech probíhají geologické výzkumné projekty Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem a jejího nově založeného Institutu Julia von Payera pro výzkum Arktidy a Subarktidy. Institut plánuje v příštích letech rozšířit portfolio aktivit i do dalších oborů – zejména ekologie a biologie. Tyto vědecké programy jsou organizovány buď samostatně, nebo v návaznosti na některou zahraniční instituci.

Jedním z dlouhodobých výzkumných směrů Centra polární ekologie PřF JU, Centra pro algologii Botanického ústavu AV ČR



11



12



13



14



15

a katedry ekologie PřF UK je studium diverzity a ekofyziologických vlastností vybraných skupin sinic a řas v polárních oblastech. Probíhá mimo jiné zimní sběr populace vláknité řasy *Tribonema minus* s následným testováním buněčné odolnosti vůči stresu vysychání a vymrzání (obr. 11). V průběhu arktického léta se rostliny, živočichové i mikroorganismy připravují – otužují (frost hardening) – na zimní období. S tím souvisí řada otázek: Které ekologické parametry pomáhají s přípravou na stesy spojené se zimním obdobím? Jak ovlivní přežívání rostlin, živočichů a mikroorganismů stále častější zimní oblevy? Dokážou se lokální organismy přizpůsobit rychlým změnám, ke kterým dochází v Arktidě v souvislosti s oteplováním? Přizpůsobí se oteplování klimatu lépe domácí endemické polární genotypy, nebo naopak začnou v lokální konkurenci vítězit invazní nově přichozí organismy? Více se lze dozvědět v odborných článcích, jejich přehled najdete na webu Živy.

Na řešení socioekonomických otázek arktické oblasti včetně problematiky původních obyvatel se kromě přírodovědných pracovišť a oborů podílí mnoho dalších institucí – Masarykova univerzita, Univerzita Karlova, Univerzita Hradec Králové, Etnologický ústav AV ČR a další.

Obě výše uvedené nejvýznamnější české polární stanice byly až do konce r. 2019 součástí systému velkých českých vědeckých infrastruktur a spolupracovaly na společném projektu Česká polární výzkumná infrastruktura (2016–19, financovaném Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy), který zajišťoval provoz stanic a podporoval dlouhodobý polární výzkum.

S velkou radostí můžeme konstatovat, že v období po sametové revoluci prošlo vzděláváním v českých i zahraničních institu-

cích – často skutečně špičkových – mnoho mladých vědců, kteří navazují na otce zakladatele našeho novodobého polárního výzkumu – emeritního profesora Torontské univerzity a rostlinného ekologa vysoké kanadské Arktidy Josefa Svobodu, emeritního profesora Jihočeské univerzity Jiřího Komárka, taxonoma a tvůrce systému prokaryotických sinic, který přispěl ke studiu diverzity sinic a řas polárních oblastí, a emeritního profesora Masarykovy univerzity Pavla Proška, klimatologa a zakladatele České antarktické výzkumné infrastruktury. Na nastupující generaci bude záležet rozvoj výzkumu v příštích letech.

Státní podpora polárních infrastruktur však bohužel skončila a Masarykova univerzita i Jihočeská univerzita se nyní potýkají s finanční zátěží, která je k provozu a rozvoji stanic nutná. Na stanici na Svalbardu pracovalo před pandemií covidu-19

díky podpoře státu ročně 150 až 180 vědců a studentů, v r. 2020 v době bez státní podpory a kvůli omezením způsobeným pandemií byla stanice pro českou vědu víceméně uzavřena. Masarykova univerzita pokračuje v podpoře Českého antarktického výzkumného programu, založeného především na infrastruktuře stanice J. G. Mendela. V r. 2019 navíc ve spolupráci s Českým antarktickým nadačním fondem vyčistila a zakonzervovala bývalou soukromou základnu založenou v r. 1988 Jaroslavem Pavlíčkem na antarktickém ostrově Nelson, která nyní jako CZ*ECO Nelson čeká na rekonstrukci, aby mohla sloužit vědecké komunitě.

V současné době je nezbytné posílit koordinaci institucí provádějících výzkum v polárních oblastech, která byla zahájena r. 2008 založením Národního centra výzkumu polárních oblastí (www.sci.muni.cz/NCVPO/). Dále bude nutné vyřešit diplomaticko-vědecké zastupování zájmů České republiky na mezinárodní úrovni v polárním i globálním výzkumu zaměřeném na dlouhodobý udržitelný vývoj na Zemi. V neposlední řadě půjde také o státní podporu provozu a rozvoje polárních infrastruktur, které reprezentují naši vědu a republiku v zahraničí.

Bližší informace o projektech, publikačních výstupech, o zapojení českých vědců a logistiků do mezinárodních struktur a organizací koordinujících výzkum v Arktidě, stejně jako o největším každoročním setkání arktických vědců – Týdnu arktické vědy (Arctic Science Summit Week) – najdete v článku na str. XXI kuléru této Živy.

Seznam použité literatury uvádíme na webu Živy. K dalšímu čtení např. Živa 2003, 6: 262–264; 2012, 4: 188–189 nebo 2019, 4: XCIV–XCVI.



16