

## LETOKRUHY ZA HRANICÍ LESA: PŘÍPADOVÁ STUDIE Z GRÓNSKA

## THE ANNUAL GROWTH RINGS BEYOND THE TREE LINE: A CASE STUDY FROM GREENLAND

JIŘÍ LEHEJČEK<sup>1) 2)</sup> ✉ - MIROSLAV SVOBODA<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6 - Suchdol, Czech Republic<sup>2)</sup>Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta logistiky a krizového řízení, Studentské nám. 1532, 686 01 Uherské Hradiště, Czech Republic

✉ e-mail: jirilehejcek@gmail.com

## ABSTRACT

In the paper we present findings on benefits of *Juniperus communis* annual growth rings from the Low Arctic, Greenland. To our knowledge, this is the most robust study with respect to depth of sample. Annual rings of *Juniperus communis* proved to be good Arctic proxy archive in case the quality of the dataset does not allow to investigate the sufficient amount of samples for the cell parameters measurements. Reasons for such setting can be partial decay of plant tissues, slope mass movements, environmental limitations, little amount of plants in population, less experienced operator in wood anatomical cross-sectioning, or combination of those. From all tested climate variables, only mean summer temperature showed strong and significant positive relationship to mean annual ring increments. We reconstructed development of mean summer temperatures and linked it with the trends from other archives (ice cores, census of local population). The end of Little Ice Age is visible in our reconstruction.

**Klíčová slova:** *Juniperus communis*; letokruhy; rekonstrukce klimatu; Grónsko**Key words:** *Juniperus communis*; annual rings; climate reconstructions; Greenland

## ÚVOD

Využití dendrochronologie v arktických oblastech, kde neroste zapojený les, bylo donedávna poměrně sporé. Přestože letokruhy byly u arktických dřevin pozorovány již před více než sto lety (ROSENTHAL 1904; KANNGISSER 1906, 1909, 1914), jejich potenciál byl popsán mnohem později Warrenem-Wilsonem (WARREN-WILSON 1964), který studoval růst vrby polární (*Salix arctica* Wahlenb.). Teprve o několik dekád později byly předloženy první rekonstrukční studie (SHAVER 1986; WOODCOCK, BRADLEY 1994), které byly velkým krokem vpřed, avšak nebyly dostatečně robustní v důsledku objektivních technických nedostatků tehdejších měření, resp. jejich časové náročnosti. Extrémní klimatické podmínky totiž způsobují velice pomalý růst tamních dřevin, což vede často k vytvoření letokruhu o malém počtu buněčných řad, příp. vklíněných nebo dokonce úplně chybějících letokruhů (SCHWEINGRUBER, POSCHLOD 2005). Zájem o problematiku tak roste především v novém tisíciletí, kdy technologická vylepšení zpracování vzorků (shrnutí např. SCHNEIDER, GÄRTNER 2013; GÄRTNER, SCHWEINGRUBER 2013) a aktualizované softwarové prostředky (Regent Instruments 2011; ARX, CARRER 2014) vedly k rychlejšímu a spolehlivějšímu získání sérií parametrů anatomické stavby dřeva těchto pomalu rostoucích dřevin. I díky tomu je možné rozšiřovat potenciál dendrochronologie do vyšších nadmořských výšek i zeměpisných šířek. Mezi nejčastěji využívané druhy patří různé

druhy vrb (*Salix sp.*, SCHMIDT et al. 2006; BUCHWAL et al. 2013) či šíchy (*Empetrum sp.*, BÄR et al. 2007). Pro svou dlouhověkost a cirkumpolární rozšíření se mezi tuto nepočetnou skupinu zařadil i jalovec obecný (*Juniperus communis* L.) (LEHEJČEK et al. 2016; BURAS et al. 2017).

Většina studií se omezila na využití letokruhů pro klimatické rekonstrukce v Arktidě (SCHMIDT et al. 2006; BUCHWAL et al. 2013; MYERS-SMITH et al. 2015) a s výjimkou prací BÄR et al. (2008) a LEHEJČEK et al. (2016) nechává stranou ostatní buněčné parametry dřevin. Toto „opomíjení“ zřejmě vychází z několika důvodů. Jednak je měření a analyzování buněčných parametrů přes všechny technické i technologické inovace časově stále mnohem náročnější. Za druhé, i při dobré vůli je mnohdy nemožné buněčné parametry změřit v odpovídajícím rozsahu, jelikož část pletiva může být shnilá, nebo jinak deformovaná, což by vedlo k nepřesným výsledkům, zatímco takové problémy většinou neohroží dostatečnou přesnost měření šířek letokruhů. Například ve studii LEHEJČEK et al. (2016) byla v tomto smyslu využita méně než polovina všech vzorků. Tento nepříznivý poměr vede k dalšímu důvodu, a sice že na některých lokalitách není možné odebrat dostatečné množství reprezentativních vzorků, a to z příčin ochrannářských, selekčních, či jednoduše kvůli celkové početnosti druhu na stanovišti. To platí obzvláště pro jalovec, které přes výše zmíněné výhody téměř nikdy nejsou dominantním druhem

a v Arktidě se vyskytují především v častěji disturbovaných lokalitách či v místech se slabší konkurencí (kamenné moře, sušší rozsochy, jinak chudší stanoviště).

Přestože v práci LEHEJČEK et al. (2016) bylo doloženo, že tloušťka buněčných stěn jalovců v Grónsku je s klimatem nejlépe korelovaná proměnná, domníváme se, že samostatné posouzení šířek letokruhů, resp. jejich významu pro paleoenvironmentální rekonstrukce, má z výše zmíněných objektivních důvodů opodstatnění.

Rekonstrukce klimatu ve vysokých zeměpisných šířkách i nadmořských výškách jsou klíčovými články k porozumění globálních klimatických změn (BRADLEY 1999), jelikož v těchto oblastech jsou instrumentální meteorologická pozorování sporá a krátká (ATKINSON, GAJEWSKI 2002; RAYBACK, HENRY 2005; BÄR et al. 2006). Hledání vhodných archivů, které by umožnily nahlédnutí do minulosti, je z toho důvodu nezbytné. Bylo by proto potenciálně nešťastné zavrhout výzkum jalovců na některých méně vhodných lokalitách jen kvůli tomu, že neposkytnou dostatek vzorků umožňujících změřit buněčné parametry.

Cílem této práce je proto určit, zda jsou šířky letokruhů jalovce obecného použitelné jako klimatické proxy.

Domníváme se, že se jedná o studii posuzující nejrozsáhlejší vzorek jalovců z arktických podmínek pro využití v paleoklimatologii.

## MATERIÁL A METODIKA

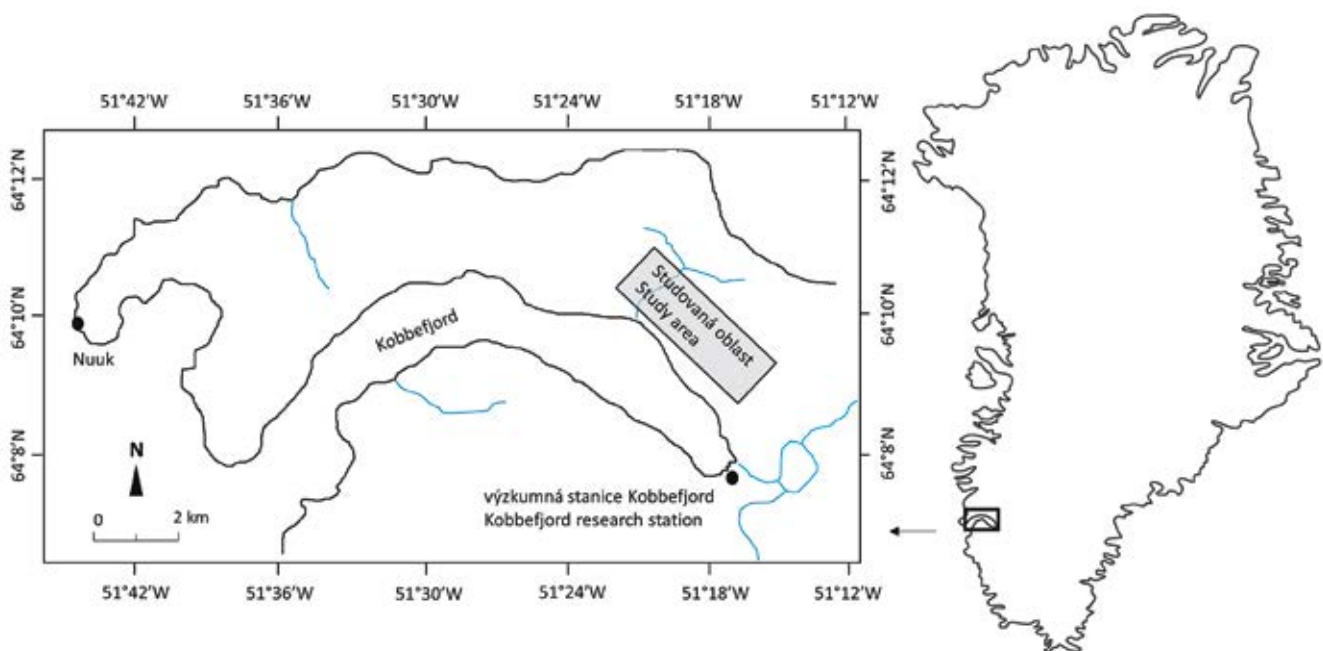
Terénní práce proběhly na jihozápadním pobřeží Grónska v zátocě Kobbefjord (64°10'N; 51°19'E; obr. 1). Lokalitě dominují archaické horniny – jedny z nejstarších na Zemi. Jde převážně o amfibolity a metasedimenty ruly, ortoruly, ruly, post-tektonické žulové komplexy a post-tektonické mafické intruze (ESCHER et al. 1995). Půdy jsou v zátocě tvořeny nejčastěji mělkými litozeměmi, méně potom slabě vyvinutými kambizeměmi (POLICKÁ 2014). Klima této oblasti, která přísluší do tzv. Nízké Arktidy, je ovlivňováno Severoatlantským proudem, jehož větev zde dosahuje 66° severní šířky. Díky němu je podnebí na arktické poměry relativně mírné, s průměrnými ročními srážkami

777 mm, průměrnou roční teplotou 1,3 °C a průměrnou letní teplotou (červen – srpen) 5,8 °C (meteorologická stanice Nuuk 4250, období 1981–2010; CAPPELEN 2013).

Během letní sezóny 2013 bylo na severní straně fjordu odebráno 38 vzorků z živých jalovců obecných a 3 vzorky ze souší. Všechny keře se nacházely na relativně suchých stanovištích, na místech s podobnou orientací (JZ – JV) a nadmořskou výškou (20–150 m n. m.), na svazích se sklonem 15–30°. Za účelem získání co nejrepresentativnějšího souboru jedinců byla vytvořena pravidelná síť v místě výskytu jalovců. Vzorky keřů byly potom odebírány z náhodně zvolených ok této sítě. Aby byl získán materiál s maximálním počtem letokruhů, byly odebírány kotouče kořenových krčků (SCHWEINGRUBER et al. 2013).

Podél nejdelší osy kotouče byly změřeny šířky letokruhů. Nejprve však byly z kotoučů získány takové kusy dřeva, které byly seříznuty kolmo na tracheidy a současně obsahovaly jeho nejdelší osu. Tyto kusy byly následně upevněny do posuvného laboratorního mikrotonového nože. Na povrch příčného řezu byl aplikován roztok kukuřičného škrobu a vody za účelem stabilizace anatomických struktur a předejití jejich zborcení během řezání (SCHNEIDER, GÄRTNER 2013). Následně byly pořízeny 15–20 mikrometrů silné plátky. Pro odbarvení byl použit chlornan sodný, který byl posléze vymyt vodou. Vzorky byly následně obarveny roztokem (1 : 1) safraninu a astrablue (dle SCHWEINGRUBER et al. 2013) po dobu pěti minut a znovu promyty vodou. Pro dehydrataci vzorků byly využity vzrůstající koncentrace ethanolu (70%, 90%, resp. 98%). Nakonec byl aplikován xylén pro závěrečné ověření případné zbývající vody. Poté byly vzorky zařizovány pryskyřicí (Canada balsam) mezi podložní a krycí sklíčko (SCHWEINGRUBER et al. 2008) a po dobu 12 hodin na teplotu 60 °C vysušeny v troubě.

Pomocí digitálního fotoaparátu (Canon EOS 650D) připevněného k mikroskopu (Olympus BX41) byly pořízeny fotografie o stonásobném zvětšení. Tyto fotografie byly následně analyzovány v programu WinCell Pro 2011 (Regent Instruments 2011). V tomto programu byly manuálně měřeny šířky letokruhů. Ty byly následně standardizovány v programu R (R CORE TEAM 2015). Řady šířek letokruhů všech 41 rostlin byly následně křížově datovány v programu PAST4 (KNIBBE 2007) a současně byla provedena vizuální inspekce mající za cíl odha-



**Obr. 1.**  
Umístění studijní plochy sběru kořenových krčků jalovce obecného  
**Fig. 1.**  
Location of *Juniperus communis* root collar discs collection

lit případně chybějící letokruhy (SCHWEINGRUBER et al. 1990). Bylo vloženo pouze 10 chybějících letokruhů (0,16%) do celého datasetu 41 vzorků. Z toho důvodu nebyla použita metoda porovnávání kotoučů z různých částí kmene/větvi (KOLISHCHUK 1990; BUCHWAL et al. 2013) ani měření více os v rámci jednoho kotouče (WILMKING et al. 2012; BURAS, WILMKING 2014). Detrendování bylo provedeno pomocí metody RCS – „regional curve standardisation“ (ESPER et al. 2003). Z výsledné standardní chronologie byla odstraněna autokorelace (reziduální chronologie) a ta byla využita k dalšímu statistickému zpracování.

Experimentálně měřená klimatická data průměrných měsíčních teplot, srážek a sněhového pokryvu pro meteorologickou stanici v Nuuku byla získána od Dánského meteorologického ústavu (DMU; <http://research.dmi.dk/data/>). Klimatické řady se liší svojí délkou: průměrné měsíční teploty (1873–2012), průměrné měsíční srážky (1904–2012) a počet dní se souvislou sněhovou pokrývkou (1942–1981).

Reziduální chronologie šířek letokruhů byla následně prověřena Spearmanovým korelačním koeficientem (nenormální rozdělení) ve vztahu k výše zmíněným klimatickým řadám pro všechny kalendářní měsíce zvláště (leden – září) a současně pro vegetační sezónu dohromady (červen – srpen, JJA). V důsledku relativně vysoké meziroční variability dat byl spočítán koeficient koincidence – Gleichläufigkeit (glk; např. BURAS, WILMKING 2015). Citlivost řady (*mean sensitivity*) byla využita pro ověření spolehlivosti chronologie pro klimatickou rekonstrukci. Nejlépe korelovaná klimatická proměnná s šířkami letokruhů byla rekonstruována pomocí lineární interpolace a regrese. Stabilita klimatického signálu v chronologii byla testována pomocí klouzavých korelací. Pro samotnou rekonstrukci byl využit křížový kalibračně-verifikační přístup, kdy byla obě období křížově využita jednak jako verifikační, jednak jako kalibrační: nejprve 1961–1991 jako kalibrace a 1931–1961 jako jeho verifikace, a pak obráceně. Pro regresní model bylo vypočteno  $R^2$  a Akaiikovo informační kritérium (AKAIKE 1976). Analýzy byly provedeny v programu „R“ (R CORE TEAM 2015) za využití balíčku 'dplR' (BUNN 2008), některé vizualizace v programu MS Excell 2013.

## VÝSLEDKY

Získána byla 341 let dlouhá chronologie, nejstarší letokruh se datuje do roku 1672, nicméně hloubka vzorku obsahující alespoň 4 jedince začíná teprve v roce 1810 (obr. 2). Střední šířka letokruhu činila 205,8  $\mu\text{m}$ , směrodatná odchylka  $\sigma = 90$ , *mean sensitivity* = 0,31.

Ze všech klimatických proměnných byly pouze letní průměrné teploty (JJA) významně korelovány se šířkou letokruhů ( $\text{TempJJA}$ ;  $r = 0,51$ ,  $t_{1,137} = 7,02$ ,  $p < 0,001$ ,  $glk = 0,6$ ). Koeficient koincidence nad (pro pozitivní korelace) 0,5 indikuje vysokofrekvenční shodnost mezi šířkami letokruhů a letními teplotami. Jelikož byl vztah letních teplot a šířek letokruhů ze zkoumaných nejsilnější a současně jediný statisticky významný, posloužil k dalšímu statistickému zpracování. Obr. 3a zobrazuje korelaci průměrných měsíčních klimatických proměnných a šířek letokruhů. Obr. 3b zobrazuje klouzavé šedesátileté okno pro letní teplotu a obr. 3c potom blíže popisuje vztah letních teplot a šířky letokruhu. Kvalitativní hodnoty regresního modelu jsou následující:  $R^2 = 0,26$  a  $\Delta\text{AIC} = +20$ . Rekonstrukce letních teplot pomocí lineární regrese, včetně trendů dalších nezávislých archivů pro srovnání, je zobrazena na obr. 4.

## DISKUSE

Doposud nejrobustnější prezentovaná chronologie jalovce obecného z Arktidy, včetně významného vztahu jeho růstu k letním teplotám posiluje postavení tohoto druhu mezi klimatickými proxy archivy Arktidy.

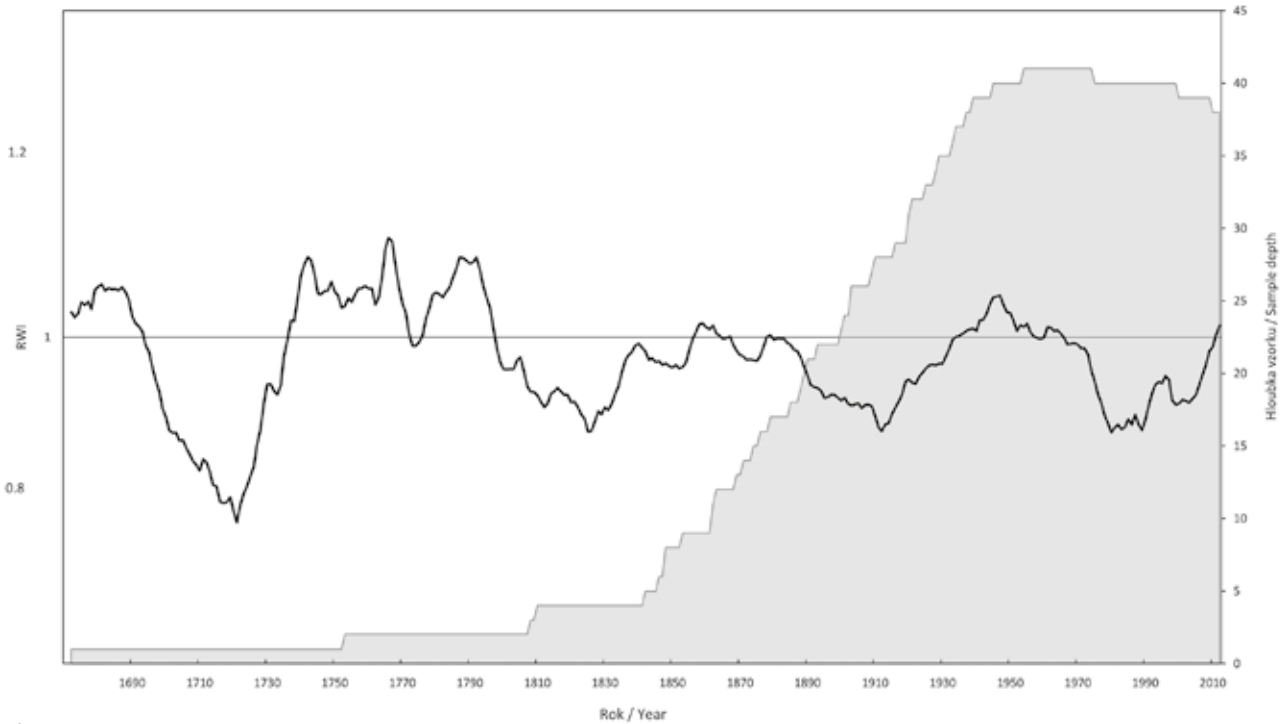
Kladné korelace šířek letokruhů s letními teplotami jsou ve všeobecné shodě s jinými výsledky z Arktidy a sub-Arktidy, které potvrzují, že letní teploty jsou většinou nejdůležitějším faktorem ročního přírůstu (např. WARREN-WILSON 1964; HAVSTRÖM et al. 1995; RAYBACK, HENRY 2005, 2006; BÄR et al. 2008; ROZEMA et al. 2009; HALLINGER et al. 2010; HANTEMIROV et al. 2011; BLOK et al. 2011; WEIJERS et al. 2010, 2012; BUCHWAL et al. 2013; MYERS-SMITH et al. 2015). To ukazuje na potenciál spárování růstu jalovce s významnými klimatickými činiteli (např. Severoatlantická oscilací) v dalších studiích.

Žádná z výše zmíněných studií však nezkoumala jalovec, a jak již bylo uvedeno, tento druh je relativně opomíjený. Ani toto srovnání však není zcela vhodné, jelikož materiál, z něhož práce vycházejí, je částečně shodný. Jak zmíněno v úvodu, kvalita vzorků rozhoduje o tom, zda je možné je použít pouze k měření šířek letokruhů, anebo i buněčných parametrů. V případě vzorků z lokality Kobbefjord tímto filtrem prošlo pouze 20 z celkových 41 výřezů. 41 vzorků tedy představuje dvojnásobně robustní sbírku, jejíž možnosti při rekonstrukci klimatu sahají dále do minulosti. Obdobný vztah platí i na jiných lokalitách, jelikož je nepravděpodobné, že by veškerý zkoumaný materiál dosahoval dostatečné kvality pro analýzu buněčných parametrů. A tak přestože se buněčné parametry (tloušťka buněčných stěn) ukázaly jako důvěryhodnější proxy, ne vždy je možné je v plném rozsahu uplatnit. Především zde tkví význam této práce, která doporučuje, resp. nezavrhne využití vzorků i z potenciálně méně vhodných lokalit.

Je nicméně vhodné diskutovat o některých odlišnostech ve výsledcích obou prací. V této práci je korelační koeficient šířek letokruhů a letních teplot nepatrně nižší než v publikaci LEHEJČEK et al. (2016). Zatímco v práci LEHEJČEK et al. (2016) se v korelačních vztazích pracovalo pouze s obdobím 1937–2012, nyní tento vztah reprezentuje celé období meteorologické řady (1873–2012). To se samozřejmě muselo promítnout do hloubky vzorku, která po roce 1937 relativně strmě klesá, aby v roce 1873 dosáhla pouhých 14 záznamů. Druhým důvodem může být fakt, že klimatická stanice v Nuuku disponuje opravdu kvalitním meteorologickým záznamem až od roku 1958, kdy byla zlepšena a změněna metodika i technologie zaznamenávání (CAPPELEN 2013). Je zřejmé, že tato skutečnost se více promítne do období, které zasahuje výrazně hlouběji do minulosti.

Statisticky nevýznamné a slabé korelace šířek letokruhů s ostatními klimatickými proměnnými považujeme za důsledek kombinace konkrétní sezóny a zvláštní polohy stanoviště, na kterém jalovec v zátoce roste. U teplot v jiných než letních měsících není překvapivé, že neovlivňují tloušťku letokruhu, který se tvoří pouze během vegetační sezóny. To by naopak nemuselo platit pro srážky či sněhovou pokrývkou, jejichž vliv přetrvává déle v podobě půdní vlhkosti. Zde hraje pravděpodobně roli především popisovaná pozice lokality v suché a stanovištně relativně chudé části zátoky, na drobné kamenité rozsoše (POLICKÁ 2014). Voda je odtud poměrně rychle odvedena pryč, a tak ani zvýšené srážky nemají na růst velký vliv. Naopak, vzhledem k tomu, že na této lokalitě jalovec na rozdíl od zbytku zátoky dominoval, je pravděpodobné, že dlouhodobé pozměněné podmínky ve prospěch vyšší vlhkosti by vedly k rozvoji jeho konkurence a postupnému zániku tohoto termofilního druhu. Přestože existují případy, kdy mimo-vegetační klimatické trendy (teplé zimy) ovlivňovaly růst arktických keřů (HOLLENSSEN et al. 2015: *Betula nana* L., ostrov Disco, Grónsko), jde o poměrně ojedinělé pozorování.

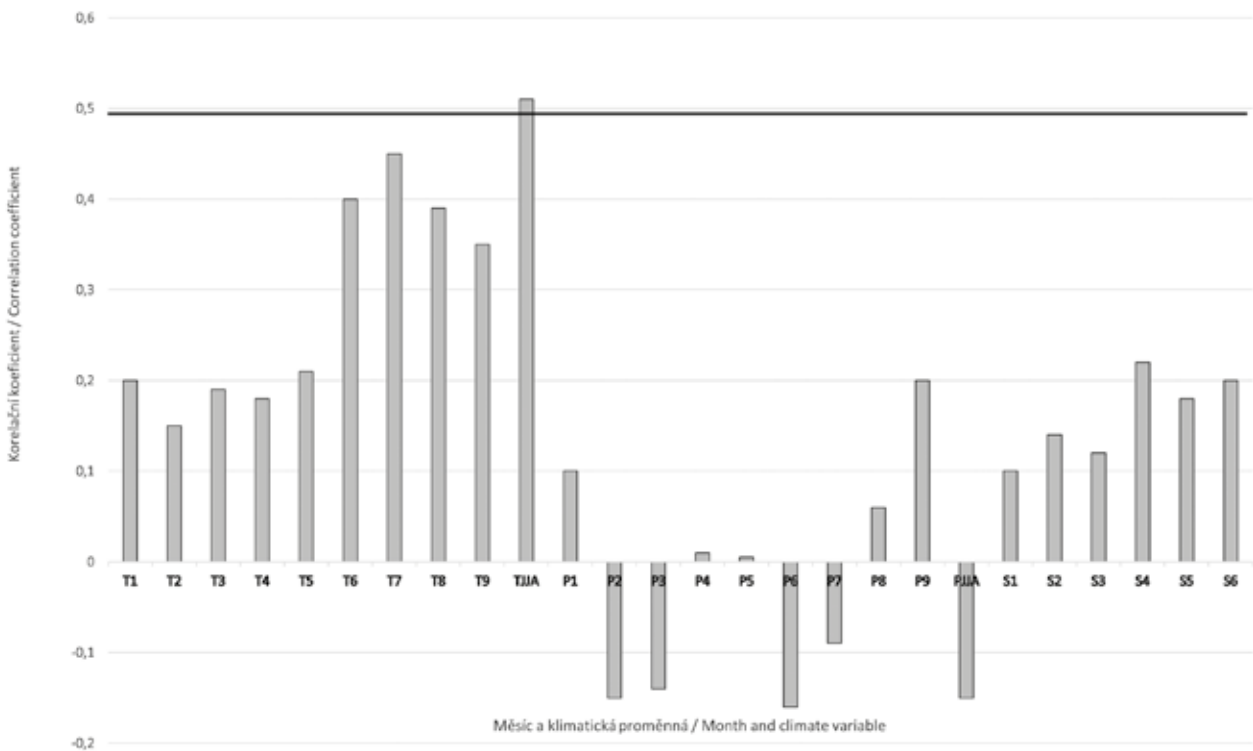
Rekonstrukce samotná významně prodlužuje řadu letních teplot před počátek meteorologických měření v Nuuku. S dalším odběrem vzorků by patrně bylo možné rekonstrukci protáhnout ještě více do minulosti. V tuto chvíli relevantní hloubka vzorku (4 jedinci) začíná až v roce 1810. Do obr. 4 byly pro vizuální srovnání doplněny trendy dalších dvou nezávislých proxy archivů hodnoty izotopu deuteria z grónské-

**Obr. 2.**

Standardizovaná jalovcová chronologie (1672–2012) pro zátoku Kobbefjord v jihozápadním Grónsku (červená silná linie) a hloubka vzorku (šedivá plocha); v důsledku zařazení subfosilních vzorků je největší hloubka vzorku posunuta do minulosti

**Fig. 2.**

Standardized *Juniperus communis* chronology (1672–2012) for Kobbefjord, south-western Greenland (red bold line) and depth of sample (grey area); decreasing number of cross sections in the recent years is due to inclusion of sub-fossil samples into dataset

**Obr. 3a.**

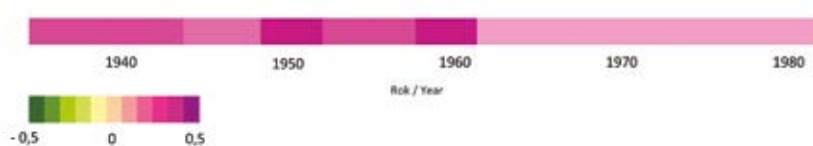
Korelace měsíčními klimatickými proměnnými (T – teplota; P – srážky; S – sněhová pokrývka; číslo označuje kalendářní měsíc) a šířkami letokruhů; modrá vodorovná linie značí hladinu významnosti  $p < 0,01$

**Fig. 3a.**

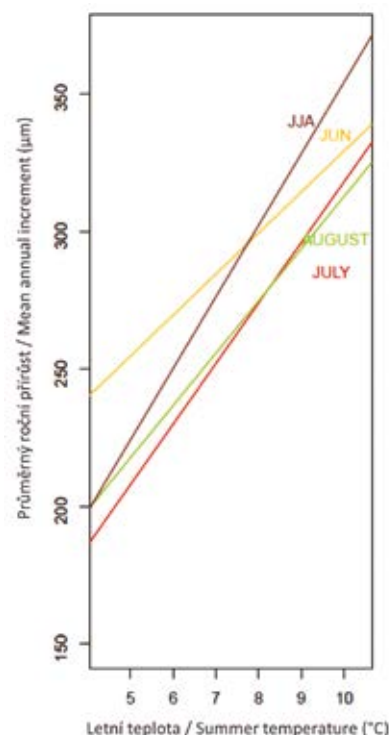
Correlation coefficient between monthly climate variables (T – temperature; P – precipitations; S – snow cover; the number denotes the month of the year) and annual growth increments; blue horizontal line represents the significance level of  $p < 0.01$

ho ledovcového vrhu (BARLOW et al. 1997) a sčítání populace Inuitů mezi roky 1789–1901 (SØRENSEN 2006). V proxy archivech je relativně patrný konec malé doby ledové. Zajímavé srovnání nabízí i census populace Inuitů, respektive jejich míra růstu jejich populace, která odpovídala trendům letních teplot rekonstruovaných pomocí šířek letokruhů jalovce obecného. Tento ukazatel není promítnut dále do 20. st., jelikož vliv kolonizujících Dánů byl v té době už příliš velký (zavlečené nemoci, resp. na to navazující rychlé zkvalitnění zdravotní péče později).

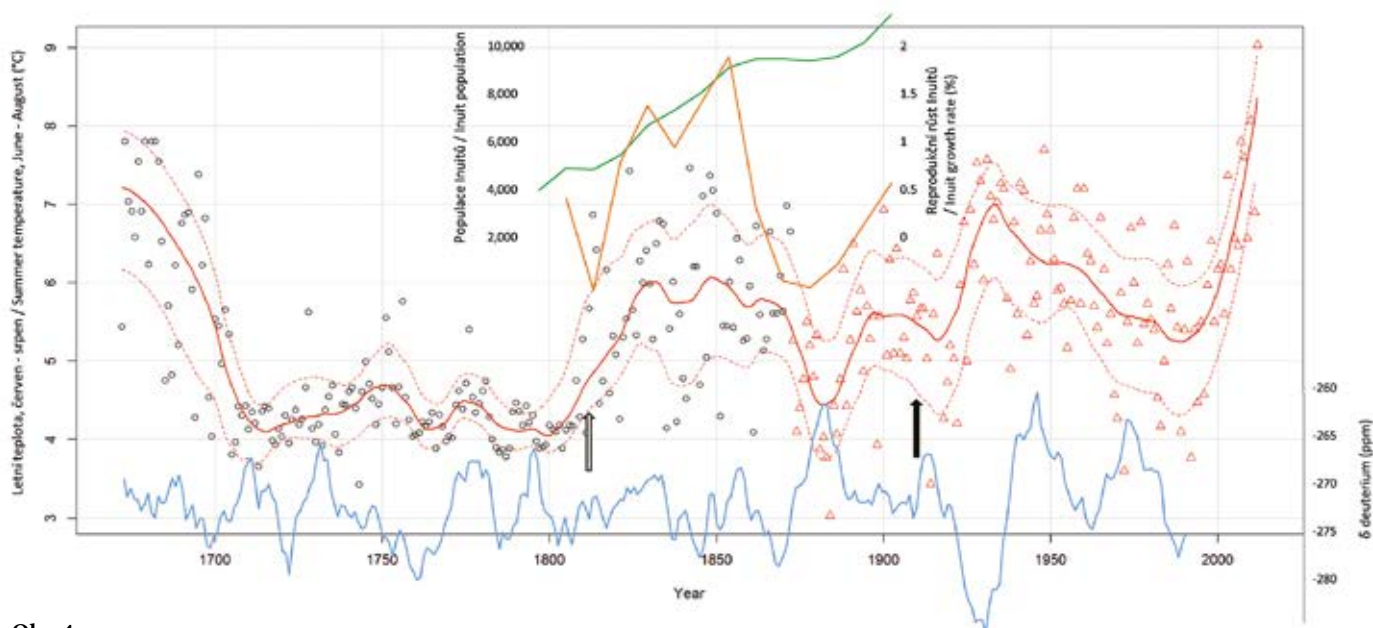
Naše studie potvrdila význam letokruhů jalovce obecného za hranicí leša. Tento dlouhověký (až 700 let) cirkumpolární druh tak představuje ideální proxy pro klimatické rekonstrukce v Arktidě, kde je délka instrumentálním meteorologických měření obvykle mnohonásobně kratší (LEHEJČEK 2015).



**Obr. 3b.**  
 Klouzavé korelační okno pro letní teploty a šířku letokruhu  
**Fig. 3b.**  
 Moving window correlation for JJA temperature and mean annual increment



**Obr. 3c.**  
 Vztah mezi středními ročními přírůsty a letními teplotami  
**Fig. 3c.**  
 The relationship between mean annual increment and summer temperatures



**Obr. 4.**  
 Rekonstrukce průměrných letních teplot (červená linie) na základě ročních přírůstů jalovce. Skutečné teploty (červené trojúhelníky) a rekonstruované teploty (černé kroužky) jsou vyneseny stejně tak jako interval spolehlivosti (přerušovaná červená čára). Konec malé doby ledové je označen černou šipkou a rok, kdy hloubka vzorku nabyde hodnoty 4, šedivou šipkou. Srovnání s jinými proxy archivech nabízí záznam izotopu vodíku (delta deuterium) z ledovcového jádra GISP2 (BARLOW et al. 1997; modrá linie) a vývoj domorodé populace Inuitů (SØRENSEN 2006; zelená linie – celkový počet Inuitů, oranžová linie – relativní nárůst populace Inuitů)

**Fig. 4.**  
 The mean summer temperature reconstruction (red line) based on the *J. communis* mean annual increments. Real temperatures (red triangles) and reconstructed past temperature range (black circles) are plotted together with the confidence intervals (dashed red line). Note the indication of the Little Ice Age end (black arrow) and the year where the depth of the sample gets to four (grey arrow). For comparison with other archives delta deuterium record by BARLOW et al. (1997) from GISP2 ice core (blue line) and Inuit population development (total number of Inuits – green line; Inuit growth rate – orange line) by SØRENSEN (2006) are plotted

## ZÁVĚR

Tato práce přináší poznatky o možnosti využití letokruhů jalovce obecného v Arktidě. Jde o nejobtustnější studii co do počtu vzorků tohoto druhu za hranicí lesa. Letokruhy se ukázaly jako vhodný proxy klimatický archiv, pokud kvalita materiálu neumožňuje využití buněčných parametrů ke klimatickým rekonstrukcím. Takový případ může nastat z důvodů částečné hniloby, svahových procesů, ochranných činností či pouze malého množství jedinců v populaci – případně jejich kombinací. Ze všech klimatických proměnných se jako jediná vhodná pro rekonstrukce ukázala průměrná letní teplota. Rekonstruovaný průběh jejich hodnot je v souladu s trendy z jiných proxy archivů (ledovcová jádra, sčítání domorodého obyvatelstva) a mj. je z něho patrný konec malé doby ledové.

### Poděkování:

Rádi bychom poděkovali Interní grantové agentuře FLD ČZU (projekt č. B02/15) a Celouniverzitní grantové agentuře ČZU v Praze (projekt č. 20154304) za materiální podporu. Dále děkujeme grantu INTERACT (projekt č. 262693), financovanému ze 7. rámcového programu Evropského společenství, za logistickou podporu a přístup na výzkumnou stanici Kobbefjord. V neposlední řadě patří velký dík i Katrine Randrup za její stálou podporu nejen v terénu a Danielu Nývltovi a Petře Polické za pomoc se sběrem vzorků.

## LITERATURA

- ARX G. VON, CARRER M. 2014. ROXAS – a new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers. *Dendrochronologia*, 32: 290–293. DOI: 10.1016/j.dendro.2013.12.001
- AKAIKE H. 1976. An information criterion (AIC). *Mathematical Science*, 14:5–9.
- ATKINSON D., GAJEWSKI K. 2002. High-resolution estimation of surface air temperature in the Canadian High Arctic. *Journal of Climatology*, 15: 3601–3614.
- BARLOW L.K., ROGERS J.C., SERREZE M.C., BARRY R.G.. 1997 Aspects of climate variability in the North Atlantic sector: Discussion and relation to the Greenland Ice Sheet Project 2 high-resolution isotopic signal. *Journal of Geophysical Research*, 102(C12), 26333–26344. DOI: 10.1029/96JC02401
- BÄR A., BRÄUNING A., LÖFFLER J. 2006. Dendroecology of dwarf shrubs in the high mountains of Norway – a methodological approach. *Dendrochronologia*, 24: 17–27.
- BÄR A., BRÄUNING A., LÖFFLER J. 2007. Ring-width chronologies of the alpine dwarf shrub *Empetrum hermaphroditum* from the Norwegian mountains. *IWA Journal*, 28: 325–338.
- BÄR A., PAPE R., BRÄUNING A., LÖFFLER J. 2008. Growth-ring variations of dwarf shrubs reflect regional climate signals in alpine environments rather than topoclimatic differences. *Journal of Biogeography*, 35: 625–636.
- BLOK D., SASS-KLAASSEN U., SCHAEPMAN-STRUB G., HEIJMANS M.M.P.D., SAUREN P., BERENDSE F. 2011. What are the main climate drivers for shrub growth in Northeastern Siberian tundra? *Biogeosciences*, 8: 1169–1179.
- BRADLEY R.S. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructing climates of the quaternary*. San Diego, Academic Press: 613 s.
- BUCHWAL A., RACHLEWICZ G., FONTI P., CHERUBINI P., GÄRTNER H. 2013. Temperature modulates intra-plant growth of *Salix polaris* from a High Arctic site (Svalbard). *Polar Biology*, 36: 1305–1318. DOI: 10.1007/s00300-013-1349-x
- BUNN A. 2008. A dendrochronology program library in R (dpIR). *Dendrochronologia*, 26: 115–124. DOI: 10.1016/j.dendro.2008.01.002
- BURAS A., WILMKING M. 2014. Straight lines or eccentric eggs? A comparison of radial and spatial ring width measurements and its implications for climate transfer functions. *Dendrochronologia*, 32: 313–326.
- BURAS A., WILMKING M. 2015. Correcting the calculation of Gleichläufigkeit. *Dendrochronologia*, 34: 29–30. DOI: 10.1016/j.dendro.2015.03.003
- BURAS A., LEHEJČEK J., MICHALOVÁ Z., MORRISSEY R., SVOBODA M., WILMKING M. 2017. Shrubs shed light on 20th century Greenland Ice Sheet melting. *Boreas*, DOI: 10.1111/bor.12244
- CAPPELEN J. (ed.) 2013. Greenland – DMI historical climate data collection 1873–2012. Danish Meteorological Institute: 75 s. Technical report 13-04. Dostupné na/Available on: <http://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr13-04.pdf>
- ESCHER J.C. et al. 1995. Geological map of Greenland. 1 : 2 500 000. Copenhagen, Geological Survey of Greenland: 1 mapa.
- ESPER J., COOK E.R., KRUSIC P.J., PETERS K., SCHWEINGRUBER F.H. 2003. Tests of the RCS method for preserving low-frequency variability in long tree-ring chronologies. *Tree-Ring Research*, 59: 81–98.
- GÄRTNER H., SCHWEINGRUBER F. H. 2013. Microscopic preparation techniques for plant stem analysis. Remagen-Oberwinter, Kessel: 78 s.
- HALLINGER M., MANTHEY M., WILMKING M. 2010. Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phytologist*, 186: 890–899.
- HANTEMIROV R., SHIYATOV S., GORLANOVA L. 2011. Dendroclimatic study of Siberian juniper. *Dendrochronologia*, 29: 119–122.
- HAVSTRÖM M., CALLAGHAN T.V., JONASSON S., SVOBODA J. 1995. Little ice age temperature estimated by growth and flowering differences between subfossil and extant shoots of *Cassiope tetragona*, an arctic heather. *Functional Ecology*, 9: 650–654.
- HOLLESEN J., BUCHWAL A., RACHLEWICZ G., HANSEN B.U., HANSEN M.O., STECHER O., ELBERLING B. 2015. Winter warming as an important co-driver for *Betula nana* growth in western Greenland during the past century. *Global Change Biology*, 21(6): 2410–2423. DOI: 10.1111/gcb.12913
- KANNGIESSER F. 1906. Einiges über Alter und Dickenwachstum von Jenenser Kalksträuchern. *Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaften*, 41: 472–482.
- KANNGIESSER F. 1909. Zur Lebensdauer der Holzpflanzen. *Flora*, 99: 414–435.
- KANNGIESSER F. 1914. Über Lebensdauer von Zwergsträuchern aus hohen Höhen des Himalaya. *Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, 58: 198–202.
- KNIBBE B. 2007. Past4: personal analysis system for tree-ring research. Version 4.2. Vienna, SCIE: 161 s.
- KOLISHCHUK V.G. 1990. Dendroclimatological study of prostrate woody plants. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (eds.): *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences*. Dordrecht, Kluwer: 51–55.
- LEHEJČEK J. 2015. Dwarf tundra shrubs growth as a proxy for late Holocene climate change. *Czech Polar Reports*, 5 (2): 185–199.
- LEHEJČEK J., BURAS A., SVOBODA M., WILMKING M. 2016. Wood-anatomy of *Juniperus communis*: a promising proxy for paleoclimate reconstructions in the Arctic. *Polar Biology*, first online 02 August 2016. DOI: 10.1007/s00300-016-2021-z
- MYERS-SMITH I.H., ELMENDORF S.C., BECK P.S.A., WILMKING M., HALLINGER M., BLOK D., TAPE K.D., RAYBACK S.A., MACIAS-



- FAURIA M., FORBES B.C., SPEED J., BOULANGER-LAPOINTE N., RIXEN C., LÉVESQUE E., SCHMIDT N. M., BAITTINGER C., TRANT A., HERMANUTZ L., COLLIER L. S., DAWES M., LANTZ T., WEIJERS S., JØRGENSEN R. H., BUCHWAL A., BURAS A., NAITO A., RAVOLAINEN V., SCHAEPMAN-STRUB G., WHEELER J., WIPF S., GUAY K., HIK D.S., VELLEND M. 2015. Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome. *Nature Climate Change*, 5 (9): 887–891.
- POLICKÁ P. 2014. Soil properties in the Kobbefjord (Greenland) in relation to vegetation cover and exposition. Master thesis. Prague, Czech University of Life Sciences: 64 s.
- R Core Team. 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing.
- RAYBACK S.A., HENRY G.H.R. 2005. Dendrochronological potential of the Arctic dwarf-shrub *Cassiope tetragona*. *Tree-Ring Research*, 61: 43–53. DOI: 10.3959/1536-1098-61.1.43
- RAYBACK S.A., HENRY G.H.R. 2006. Reconstruction of summer temperature for a Canadian High Arctic site from retrospective analysis of the dwarf shrub, *Cassiope tetragona*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38: 228–238. DOI: 10.1657/1523-0430(2006)38[228:ROSTFA]2.0.CO;2
- Regent instruments WinRHIZO Pro 2011. Manual WinCELL Pro 2011. Regent Instruments INC, Quebec.
- ROSENTHAL M. 1904. Über die Ausbildung der Jahresringe an der Grenze des Baumwuchses in den Alpen. Berlin, W. Pormetter: 24 s.
- ROZEMA J., WEIJERS S., BROEKMAN R., BLOKKER P., BUIZER B., WERLEMAN C., EL-YAQINE H., HOOGEDOORN H., FUERTES M.M., COOPER E. 2009. Annual growth of *Cassiope tetragona* as a proxy for arctic climate: developing correlative and experimental transfer functions to reconstruct past summer temperature on a millennial time scale. *Global Change Biology*, 15: 1703–1715. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01858.x
- SHAVER G.R. 1986. Woody stem production in Alaskan tundra shrubs. *Ecology*, 56: 401–410.
- SCHMIDT M.N., BAITTINGER C., FORCHHAMMER R.C. 2006. Reconstructing century-long snow regimes using estimates of High Arctic *Salix arctica* radial growth. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38: 257–262. DOI: 10.1657/1523-0430(2006)38[257:RCSRUE]2.0.CO;2
- SCHNEIDER L., GÄRTNER H. 2013. The advantage of using non-Newtonian fluids to prepare micro sections. *Dendrochronologia*, 31: 175–178.
- SCHWEINGRUBER F.H., ECKSTEIN D., SERRE-BACHET F., BRÄKER O. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, 8: 9–38.
- SCHWEINGRUBER F.H., POSCHLOD P. 2005. Growth rings in herbs and shrubs: life span, age determination, and stem anatomy. *Forest Snow and Landscape Research*, 79: 195–415.
- SCHWEINGRUBER F.H., BÖRNER A., SCHULZE E.-D. 2008. Atlas of woody plant stems: evolution, structure, and environmental modifications. Berlin, Springer: 229 s.
- SCHWEINGRUBER F.H., HELLMANN L., TEGEL W., BRAUN S., NIEVERGELT D., BÜNTGEN U. 2013. Evaluating the wood anatomical and dendroecological potential of Arctic dwarf shrub communities. *IAWA Journal*, 34 (4): 485–497.
- SØRENSEN A.K. 2006. Denmark-Greenland in the twentieth century. Copenhagen, Danish Polar Center: 202 s. *Man & society*, 34.
- WARREN-WILSON J. 1964. Annual growth of *Salix arctica* in the High Arctic. *Annals of Botany*, 28: 71–76.
- WEIJERS S., BROEKMAN R., ROZEMA J. 2010. Dendrochronology in the High Arctic: July air temperatures reconstructed from annual shoot length growth of the circumpolar dwarf shrub *Cassiope tetragona*. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3831–3842. DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.09.003
- WEIJERS S., ALSOS I.G., EIDENSEN P.B., BROEKMAN R., LOONEN M.J.J.E., ROZEMA J. 2012. No divergence in *Cassiope tetragona*: persistence of growth response along a latitudinal temperature gradient and under multi-year experimental warming. *Annals of Botany*, 110: 653–665. DOI: 10.1093/aob/mcs123
- WILMKING M., HALLINGER M., BOGAERT R. VAN, KYNCL T., BABST F., HAHNE W., JUDAY G. P., LUIS M. DE, NOVAK K., VÖLLM C. 2012. Continuously missing outer rings in woody plants at their distributional margins. *Dendrochronologia*, 30: 213–222. DOI: 10.1016/j.dendro.2011.10.001
- WOODCOCK H., BRADLEY R.S. 1994. *Salix arctica* (Pall.): its potential for dendroclimatological studies in the High Arctic. *Dendrochronologia*, 12: 11–22.

## THE ANNUAL GROWTH RINGS BEYOND THE TREE LINE: A CASE STUDY FROM GREENLAND

### SUMMARY

Historically unprecedented environmental change in the Arctic ecosystems is often given into the context of its past and possible future development. In the region where instrumental observations are scarce, archives need to be investigated in order to address this issues. Although most commonly archives as glaciers or lake sediments are analysed, dendrochronology has been recently applied as well.

We present the study dealing with annual growth rings of long-live circumpolar evergreen *Juniperus communis* shrub. 41 individuals from southwest Greenland (Fig. 1) were investigated at the annual increment level (Fig. 2) to unhide its potential for environmental and climate reconstructions. Annual growth increments were confronted with the climate variable (temperature, precipitation, and snow cover). Statistical verification was applied to be able to use mean annual increment as a climate archive. Our findings are as follows:

- Of the tested climate parameters only mean summer temperatures (June – August) showed strong and significant positive correlation with mean annual increments ( $r = 0.51$ ,  $t_{1,137} = 7.02$ ,  $p < 0.001$ ,  $gk = 0.6$ , Fig. 3a ). Justification of the parameter for climate modelling is given by moving window correlation (Fig. 3b), and regression model supportive values ( $R^2 = 0,26$  a  $\Delta AIC = +20$ ).
- The reconstruction of mean summer temperatures is given in Fig. 4. It well corresponds with other proxy archives (ice cores or census of Inuit population) and clearly shows the end of Little Ice Age.
- In case that the quality of the dataset does not allow to investigate sufficient amount of samples for cell parameters measurements, the ring widths can only serve as a climate proxy. The reasons for such setting can be partial decay of plant tissues, slope mass movements, little amount of plants in population or combination those.

Fascinating species of *J. comunis* has confirmed to be a valuable proxy indicator, and due to its longevity and abundant distribution has a great potential to become an important player in the Arctic.

Zasláno/Received: 29. 07. 2016

Přijato do tisku/Accepted: 02. 02. 2017