

# Autoreferat

## 1. Imię i nazwisko.

**Agata Buchwał**

*Instytut Geoekologii i Geoinformacji  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza*

ORCID: 0000-0001-6879-6656

Scopus Author ID: 36194929400

Web of Science ResearcherID: F-5516-2013

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

**8. Czerwca 2010 r. - doktor Nauk o Ziemi w zakresie Geografii** nadany uchwałą Rady Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu z dnia 8. Czerwca 2010 r.

Tytuł pracy doktorskiej: *Wpływ ruchu turystycznego na przekształcenia rzeźby masywu Babiej Góry - zapis dendrogeomorfologiczny*

Promotor pracy doktorskiej: prof. dr hab. Andrzej Kostrzewski

**14. Czerwca 2005 r. - magister kierunku Turystyka i Rekreacja;** Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Tytuł pracy magisterskiej: *Turystyczna antropopresja Tatr Zachodnich na przykładzie środowiska przyrodniczego szlaku na Nosal i w Dolinie Olczyskiej*

Promotor pracy magisterskiej: prof. dr hab. Andrzej Kostrzewski

## 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

*Zatrudnienie etatowe:*

**01.10.2010 r. - obecnie** adiunkt/pracownik badawczo-dydaktyczny (pełen etat), Pracownia Badań Kriosfery, Instytut Geoekologii i Geoinformacji, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

*Długoterminowe (tj. trzymiesięczne i dłuższe) stypendia:*

**1.10.2010 - 31.09.2011 r.** **post-doc/staż podoktorski** w ramach stypendium programu *Scientific Exchange Programme NMS-CH (Sciex), Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf-ZH, Szwajcaria*; projekt: *ArcDendro: Arctic Shrubs Dendrochronological Potential (Project No. 09.045)*; Mentorzy: Dr Holger Gärtner, Dr Paolo Cherubini

- 19.08.2014 - 30.04.2015 r.** **post-doc/staż podoktorski** w ramach stypendium Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta, *Senior Advanced Research Award, Department of Biological Sciences, University of Alaska Anchorage, Stany Zjednoczone*; projekt: *Exploring the ecological value of wood anatomy in Arctic tree-rings*; Mentor: Dr Jeffrey M. Welker
- 1.05.2015 - 30.04.2017 r.** **post-doc/staż podoktorski** w ramach stypendium Mobilność Plus Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, *Department of Biological Sciences, University of Alaska Anchorage, Stany Zjednoczone*; projekt: *Dendroecological potential of wood anatomy and tree-ring growth studies of arctic shrubs (Alaska)*; Mentor: Dr Jeffrey M. Welker
- 1.06.2018 r.- obecnie** *Affiliated Faculty, Department of Biology and Wildlife - College of Natural Science and Mathematics, University of Alaska Fairbanks, Stany Zjednoczone*; członkini *Graduate Advisory Committee* doktoranta Jackson'a Drew
- 1.09.2023 r. - obecnie** *Visiting Scholar* w ramach stypendium im. M. Bekkera Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (NAWA), *Tree-Ring Unit, Department of Geography, University of Cambridge, Wielka Brytania*; projekt: *Klimatyczne znaczenie niebieskich przyrostów jałowca karłowatego z arktycznej granicy lasów*; Mentor: Prof. Ulf Büntgen

- 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.**

#### **4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego**

### **Wpływ współczesnych zmian klimatu na wzrost krzewinek tundrowych w Arktyce - zapis dendrochronologiczny**

#### **4.2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych wraz z określeniem mojego wkładu**

Na osiągnięcie naukowe składa się cykl powiązanych tematycznie sześciu recenzowanych artykułów naukowych [A1, A1a, A2, A3, A4, A5] z lat 2013-2023. Wszystkie publikacje zostały przygotowane i opublikowane po nadaniu stopnia naukowego doktora. Wszystkie publikacje zostały wydane w czasopiśmie znajdujących się na liście *Journal Citation Reports* (JCR) oraz w czasopiśmie wykazanym w liście czasopiśmie naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych Ministra Edukacji i Nauki (MEiN; tj. zgodnie z załącznikiem do komunikatu MEiN z dnia 17. lipca 2023 r.). Pięć

publikacji tworzących cykl [A1, A2, A3, A4, A5] stanowią publikacje wieloautorskie i w czterech z nich jestem pierwszą autorką oraz autorką korespondencyjną. Jedna publikacja [A1a] to artykuł jednoautorski.

Dane naukometryczne dla każdej publikacji zestawiono podając aktualnie obowiązujący *Impact Factor* (IF), tj. IF za rok 2022 (źródło: *Journal Citation Reports*; Clarivate Analytics, 2023; [www.jcr.clarivate.com](http://www.jcr.clarivate.com)) oraz aktualną punktację czasopism naukowych Ministra Edukacji i Nauki (MEiN), tj. zgodnie z załącznikiem do komunikatu MEN z dnia 17. lipca 2023 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych. Liczba cytacji została podana za bazą Scopus (stan z dnia 25. Lipca 2023 r.).

Poniżej przedstawiam listę publikacji składających się na osiągnięcie wraz z wykazaniem mojego wkładu w powstanie danej publikacji.

**[A1] Buchwał 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(9), 1305-1318, doi: 10.1007/s00300-013-1349-x**  
IF = 2.198; Punkty MEiN = 70  
Liczba cytowań wg Scopus: 73 (bez autocytowań: 61)

Mój wkład w powstanie artykułu [A1] polegał na:

- a) opracowaniu koncepcji badań, zdefiniowaniu pytań badawczych i hipotez,
- b) zebraniu całości materiału badawczego, tj. wszystkich próbek krzewinek (całe rośliny) *Salix polaris* w ramach kilku ekspedycji polarnych w centralnym Spitsbergenie,
- c) wykonaniu seryjnego próbkowania krzewinek *Salix polaris*,
- d) wykonaniu barwionych przezroczych mikroskopowych krzewinek *Salix polaris* przy pomocy mikrotomu saneczkowego,
- e) wykonaniu pomiarów szerokości słoików przyrostowych *Salix polaris*,
- f) wykonaniu badań krzyżowych (ang. *cross-dating*) i konstrukcja chronologii *Salix polaris*,
- g) wykonaniu analiz dendrochronologicznych i dendroklimatycznych,
- h) współdziałanie w wykonaniu analiz statystycznych,
- i) interpretacji i dyskusji uzyskanych wyników,
- j) przygotowaniu tekstu manuskryptu,
- k) współprzygotowaniu wszystkich rycin i tabel (wspólnie z Fonti P.),
- l) przygotowaniu odpowiedzi na recenzję i finalnej wersji publikacji,
- m) uzyskaniu finansowania na badania (grant *Sciex Project No. 09.045* i grant MNiSW nr N N306 009139).

**[A1a] Buchwał A. (2014) Constraints on dendrochronological dating of *Salix polaris* from central Spitsbergen. *Czech Polar Reports*, 4(1), 73-79, doi: 10.5817/CPR2014-1-8**  
IF = 0.605; Punkty MEiN = 20  
Liczba cytowań wg Scopus: 4 (bez autocytowań: 2)

Mój wkład w powstanie artykułu [A1a] polegał na wykonaniu wszystkich czynności związanych z przygotowaniem i publikacją tego artykułu.

[A2] Hollesen J., Buchwał A., Rachlewicz G., Hansen B.U., Overgaard M., 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, 2410-2423, doi: 10.1111/gcb.12913  
IF = 13.211; Punkty MEiN = 200  
Liczba cytowań wg Scopus: 93 (bez autocytowań: 87)

Mój wkład w powstanie artykułu [A2] polegał na:

- a) opracowaniu koncepcji badań, zdefiniowaniu pytań badawczych i hipotez (wspólnie z Elberling B. i Hollesen J.),
- b) zebraniu (wspólnie z Rachlewicz G.) całości materiału badawczego, tj. wszystkich próbek krzewinek (całe rośliny) *Betula nana* w ramach ekspedycji polarnej w południowej części wyspy Disko (wschodnia Grenlandia),
- c) wykonaniu seryjnego próbkowania krzewinek *Betula nana*,
- d) wykonaniu barwionych przezroczki mikroskopowych krzewinek *Betula nana* przy pomocy mikrotomu saneczkowego,
- e) wykonaniu pomiarów szerokości słoików przyrostowych *Betula nana*,
- f) wykonaniu badań krzyżowych (ang. *cross-dating*) i konstrukcja chronologii *Betula nana*,
- g) wykonaniu analiz dendrochronologicznych i dendroklimatycznych,
- h) wykonaniu analiz statystycznych,
- i) interpretacji i dyskusji uzyskanych wyników (wspólnie z Elberling B., Hollesen J.),
- j) przygotowaniu tekstu manuskryptu (wspólnie z Elberling B., Hollesen J.),
- k) przygotowaniu Ryc. 2, 6, 7, 8 (tj. 50% rycin) oraz materiałów uzupełniających wraz z Ryc. S2, S12-S22 (tj. 55% rycin uzupełniających) oraz Tab. S1-S3 (tj. wszystkie tabele uzupełniające),
- l) współprzygotowaniu odpowiedzi na recenzję i finalnej wersji publikacji (wspólnie z Hollesen J.)
- m) uzyskaniu finansowania na badania (grant *INTERACT Transnational Access do Arctic Station*, wyspa Disko, zachodnia Grenlandia).

[A3] Buchwał A., Sullivan P.F., Macias-Fauria M., Post E., Myers-Smith I., Stroeve J. C., Blok D., Tape K. D., Forbes B. C., Ropars P., Lévesque E., Elberling B., Angers-Blondin S., Boyle J. S., Boudreau S., Boulanger-Lapointe N., Gamm C., Hallinger M., Rachlewicz G., Young A., Zetterberg P., Welker J.M. (2020) **Divergence of Arctic shrub growth associated with sea ice decline.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 33334-33344. doi: 10.1073/pnas.2013311117  
IF = 12.779; Punkty MEiN = 200  
Liczba cytowań wg Scopus: 36 (bez autocytowań: 32)

Mój wkład w powstanie artykułu [A3] polegał na:

- a) opracowaniu koncepcji tej syntezy badawczej (wspólnie z Sullivan P. F.), zdefiniowaniu pytań badawczych i hipotez,
- b) kierowaniu syntezą/badaniami,
- c) kontakcie ze współautorami i administrowanie przesłanych przez nich danych (tj. metadane, dane wzrostu radialnego krzewinek, chronologie krzewinek z obszaru Arktyki),
- d) testowaniu danych i przeglądzie protokołów zbioru danych wzrostu radialnego krzewinek z 32. stanowisk badawczych w Arktyce, a następnie wytypowaniu do dalszych badań 23. homogenicznych zbiorów danych (tj. 23 chronologii i tworzących je pojedynczych krzywych

wzrostu krzewinek spełniających progi statystyk opisowych (patrz: *Materials and Methods* w [A3]),

e) dostarczeniu do syntezy danych i chronologii z czterech autorskich stanowisk, tj.:

- 1) *Salix polaris* ze stanowiska Ebbadalen, centralny Spitsbergen (wspólnie z Rachlewicz G.);
- 2) *Betula nana* z wyspy Disko, zachodnia Grenlandia (wspólnie z Elberling B. i Rachlewicz G.);
- 3) *Salix arctica* z Ziemi Peary'ego, północna Grenlandia (wspólnie z Elberling B.);
- 4) *Betula nana* ze stanowiska Toolik Lake (wspólnie z Welker J. M.);

f) wykonaniu seryjnego próbkowania wszystkich krzewinek wchodzących w skład w/w chronologii (patrz pkt. e) chronologie 1-4),

g) wykonaniu barwionych przezroczki mikroskopowych dla wszystkich krzewinek wchodzących w skład trzech w/w chronologii (patrz pkt. e) chronologie 1-3); dodatkowo przy chronologii 4) przezroczka wykonana przy pomocy osób technicznych zatrudnionych w laboratorium prof. J. M. Welker'a na *UAA Alaska*,

h) wykonaniu pomiarów szerokości słoju przyrostowego dla wszystkich w/w próbek (patrz pkt. e) chronologie 1-4),

i) wykonaniu badań krzyżowych (ang. *cross-dating*) i konstrukcja chronologii dla wszystkich w/w próbek (patrz pkt. e) chronologie 1-4),

j) wykonaniu testów statystycznych, analiz dendrochronologicznych i dendroklimatycznych dla wszystkich analizowanych stanowisk (n = 23) z Arktyki (interpretacja wyników wspólnie z Sullivan P. F.),

k) pozyskaniu i przetwarzaniu danych meteorologicznych i klimatycznych, w tym danych dot. zlodzenia Oceanu Arktycznego oraz jego mórz (z pomocą Stroeve J.) dla wszystkich analizowanych stanowisk (n = 23) z Arktyki,

l) wykonaniu analiz statystycznych, w tym przeprowadzeniu modelowania równań strukturalnych (interpretacja wyników wspólnie z Sullivan P.F.),

m) interpretacji i dyskusji finalnych wyników syntezy (wspólnie z Sullivan P. F.),

n) przygotowaniu tekstu manuskryptu (wspólnie z Sullivan P. F., Macias-Fauria M., Post E., Welker J. M.) implementując uwagi wszystkich współautorów,

o) przygotowaniu wszystkich rycin (tj. Ryc. 1, 2, 3, 4, 5, 6) oraz materiałów uzupełniających wraz z Ryc. S1, S2, S4-S11 (tj. wszystkich rycin uzupełniających oprócz Ryc. S3) oraz Tab. S1-S14,

p) przygotowaniu odpowiedzi na recenzję i finalnej wersji publikacji,

r) przygotowaniu i udostępnieniu kodu (.R) użytego do analiz danych w syntezie (<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2013311117#supplementary-materials>),

s) przygotowaniu i udostępnieniu plików, tj. metadanych, surowych krzywych wzrostu dla krzewinek oraz chronologii użytych w syntezie w tzw. otwartym dostępie w repozytorium *Dryad* ([doi.org/10.5061/dryad.kh1893248](https://doi.org/10.5061/dryad.kh1893248); liczba odsłon/pobrań danych na dzień 20. lipca 2023 r. wyniosła 331/157),

t) uzyskaniu finansowania na badania (stypendium Polsko-Amerykańską Komisję Fulbrighta, stypendium Mobilność Plus MNiSW, grant ekspedycyjny INTERACT *Transnational Access* do *Toolik Research Station*).

[A4] Buchwał A., Bret-Harte M.S., Bailey H., Welker J.M. (2023) **From intra-plant to regional scale: June temperatures and regional climates directly and indirectly control *Betula nana* growth in Arctic Alaska.** *Ecosystems*, 26(3), 491-509, doi: 10.1007/s10021-022-00771-8

IF = 4.345; Punkty MEiN = 140

Liczba cytowań wg Scopus: 1 (bez autocytowań: 0)

Mój wkład w powstanie artykułu [A4] polegał na:

- a) opracowaniu koncepcji badań, zdefiniowaniu pytań badawczych i hipotez,
- b) zebraniu (wspólnie z Welker J. M.) materiału badawczego, tj. całych krzewinek *Betula nana* w rejonie Toolik Lake, Północna Alaska,
- c) wykonaniu seryjnego próbkowania *Betula nana*,
- d) wykonaniu (przy pomocy osób technicznych zatrudnionych w laboratorium prof. J. M. Welker'a na UAA Alaska) barwionych przezroczy mikroskopowych dla wszystkich próbek karłowatych krzewinek *Betula nana* przy użyciu mikrotomu saneczkowego,
- e) wykonaniu pomiarów szerokości słoju przyrostowego dla wszystkich próbek krzewinek *Betula nana*,
- f) wykonaniu badań krzyżowych (ang. *cross-dating*) i konstrukcja chronologii dla wszystkich próbek *Betula nana*,
- g) wykonaniu analiz dendrochronologicznych i dendroklimatycznych,
- h) pozyskaniu i przetwarzaniu danych meteorologicznych i klimatycznych,
- i) wykonaniu analiz statystycznych,
- j) interpretacji i dyskusji uzyskanych wyników,
- k) przygotowaniu tekstu manuskryptu,
- l) przygotowaniu Ryc. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 oraz materiałów uzupełniających wraz z Ryc. S1, S2, S3, S4 (tj. wszystkich rycin i tabel w manuskrypcie oprócz Ryc. 7 i uzupełniającej Ryc. S5 i S6);
- m) przygotowaniu odpowiedzi na recenzję i finalnej wersji publikacji,
- n) przygotowaniu i udostępnieniu plików (tj. surowe krzywe wzrostu dla wszystkich krzewinek) oraz chronologii *Betula nana* z siedliska suchego (BESP - ITRDB AK190) i wilgotnego (BESP - ITRDB AK189) w tzw. otwartym dostępie w *International Tree-Ring Data Bank* (ITRDB),
- o) uzyskaniu finansowania na badania (stypendium Polsko-Amerykańską Komisję Fulbrighta, stypendium Mobilność Plus MNiSW, grant ekspedycyjny INTERACT *Transnational Access* do *Toolik Research Station*).

[A5] Buchwał A., Rachlewicz G., Heim B., Juhls B. (2023) **Trees on the tundra: warmer climate might not favor prostrate *Larix* tree but *Betula nana* shrub growth in Siberian tundra (Lena River Delta)**. *Agricultural and Forest Meteorology*, 339, 109543, doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109543  
IF = 6.424; Punkty MEiN = 200  
Liczba cytowań wg Scopus: 0 (bez autocytowań: 0)

Mój wkład w powstanie artykułu [A5] polegał na:

- a) opracowaniu koncepcji badań, zdefiniowaniu pytań badawczych i hipotez,
- b) zebraniu (wspólnie z Rachlewicz G. i Heim B.) materiału badawczego, tj. całych krzewinek *Betula nana* oraz karłowatych drzew *Larix dahurica* w ramach ekspedycji badawczej w delcie rzeki Leny,
- c) wykonaniu seryjnego próbkowania *Betula nana* oraz *Larix dahurica*,
- d) wykonaniu barwionych przezroczy mikroskopowych dla wszystkich próbek karłowatych drzew *Larix dahurica* oraz większości (ok. 90%) krzewinek *Betula nana* przy pomocy mikrotomu saneczkowego,
- e) wykonaniu pomiarów szerokości słoju przyrostowego dla wszystkich próbek karłowatych drzew *Larix dahurica* oraz większości (ok. 90%) krzewinek *Betula nana*,

- f) wykonaniu badań krzyżowych (ang. *cross-dating*) i konstrukcja chronologii dla wszystkich próbek *Betula nana* oraz *Larix dahurica*,
- g) wykonaniu analiz dendrochronologicznych i dendroklimatycznych obu badanych gatunków,
- h) pozyskaniu i przetwarzaniu danych meteorologicznych i klimatycznych (wspólnie z Heim B. i Juhls B.),
- i) wykonaniu analiz statystycznych,
- j) interpretacji i dyskusji uzyskanych wyników,
- k) przygotowaniu tekstu manuskryptu,
- l) przygotowaniu Tab. 1, Ryc. 1B-D oraz Ryc. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, oraz materiałów uzupełniających wraz z Ryc. A1, A2, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12 (tj. wszystkich rycin i tabel w manuskrypcie oprócz Ryc. 1A i uzupełniającej Ryc. A3),
- m) przygotowaniu odpowiedzi na recenzję i finalnej wersji publikacji,
- n) przygotowaniu i udostępnieniu plików (tj. surowe krzywe wzrostu dla wszystkich krzewinek i drzew) oraz chronologii *Betula nana* (BESP - ITRDB RUS393) i *Larix dahurica* (LAGM - ITRDB RUS394) w tzw. otwartym dostępie w *International Tree-Ring Data Bank* (ITRDB),
- o) uzyskaniu finansowania na badania terenowe (grant ekspedycyjny INTERACT *Transnational Access* EU-F7P (262693) do *Samoylov Research Station*.

#### **4.2.1. Wprowadzenie i motywacja**

Moje zainteresowanie metodą dendrochronologiczną rozwinęłam w trakcie realizacji pracy doktorskiej, w ramach której analizowałam denudację antropogeniczną i odsłonięte korzenie świerka na szlakach turystycznych masywu Babiej Góry w Beskidzie Żywieckim. Analiza przyrostu radialnego korzeni drzew z umiarkowanej strefy klimatycznej, wykonywanej zawsze na przezroczach mikroskopowych, dały mi niewątpliwie solidną podstawę do przeprowadzania pomiarów wysoce nieregularnych przyrostów radialnych karłowatych roślin drzewiastych z obszarów polarnych.

Moje zainteresowanie dendrochronologią arktyczną rozpoczęło się wraz z moją pierwszą wizytą w Arktyce, tj. XII Ekspedycją Polarną Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w rejon Zatoki Petunia, w której wzięłam udział latem 2007 roku. To wtedy poczyniłam pierwsze obserwacje krzewinek tundrowych i rozpoczęłam przegląd literatury na temat analiz dendrochronologicznych krzewinek z obszaru Arktyki. Trzeba przyznać, iż na początku XXI wieku było jeszcze niewiele prac prezentujących chronologie słoju przyrostowych z obszarów polarnych. Inspiracją do własnych badań dendrochronologicznych w Arktyce były lektury pierwszych prac dendrochronologicznych z obszarów Arktyki, takich jak:

- a) G. Kraus (1874) i jego dokumentacja ponad 100-letnich okazów *Salix arctica* czy 90-letnich krzewinek *Betula nana* z rejonu *Sabine Island* (NE Grenlandia) pobranych w ramach Drugiej Niemieckiej Wyprawy Polarnej w latach 1869-1870;
- b) N. Polunin (1955) i jego obserwacje przyrostów brakujących w *Salix arctica* pobranych z dryfującej góry lodowej *Ice Island T-3*, pochodzącej najprawdopodobniej z rejonu Wyspy Ellesmere'a albo Grenlandii; wraz z pierwszymi przekrojami poprzecznymi *Salix arctica* przeanalizowanymi z tej góry lodowej (Polunin, 1958);
- c) D. Savile (1979) i pomiary radialne dwóch fosylnych okazów *Salix arctica* pobranych z okolic *Lake Hazen* z Wyspy Ellesmere'a (81°50' N);
- d) Arktyka Kanadyjska i prace z obszaru Wysp Cornwallisa (Resolute, 74°41' N; Warren Wilson, 1964), Axela Heiberga (ok. 79° N; Beschel and Webb, 1963) i Ellesmere'a (82°50' N; Woodcock and Bradley, 1994).

Te pierwsze badania, mimo ich przyczynowości i czasami braku prezentacji pełnych chronologii badanych gatunków, pokazały mi, że nawet na krańcach lądów Półkuli Północnej słoje przyrostowe są wykształcane dla kilkudziesięcioletnich okresów i są one mierzalne metodą dendrochronologiczną. Co więcej, studiowanie prac pierwszych analiz dendrochronologicznych arktycznych krzewinek zarysowały lukę w wiedzy i pokazały mi, że Arktyka czeka na dalszą eksplorację naukową (w tym konstrukcję chronologii przyrostowych krzewinek), której mogą być częścią. Silna tradycja badań polarnych na Naszej *Alma Mater* i doświadczenia polskich polarników utwierdziły mnie w przekonaniu, że taka eksploracja (przynajmniej pod kątem logistycznym) jest możliwa. Dodatkowo, dokumentacja zachodzącej zmiany klimatu w rejonie Arktyki (Niedźwiedź, 2003; Przybylak, 2007; Marsz and Styszyńska, 2011) wskazywała na ważność tematu oraz konieczność rozpoznania, jaki wpływ te współczesne zmiany klimatu będą miały na najstarsze rośliny drzewiaste rosnące w Arktyce, tj. krzewinki tundrowe.

Badania dendrochronologiczne mają silną tradycje na gruncie krajowym i studiowanie klasycznych, tj. tych prowadzonych na drzewach, opracowań dendrochronologicznych (m. in. Feliksik and Wilczynski, 1996; Cedro, 2001; Krąpiec and Zielski, 2004; Bednarz and Muter, 2010; Koprowski and Zielski, 2006; Malik and Wistuba, 2012; Wilczyński and Szymański, 2014; Kaczka et al., 2018) było dla mnie cenną nauką i inspiracją. Warto wspomnieć, iż równolegle w Polsce rozwijane były badania dendrochronologiczne arktycznych krzewinek w ośrodku wrocławskim, a ich głównym nurtem były badania dendrogeomorfologiczne (m. in. Owczarek, 2010a, 2010b), a następnie badania dendroklimatyczne prowadzone wspólnie z ośrodkiem śląskim (m. in. Opała et al., 2016; Opała-Owczarek et al., 2020, 2018; Owczarek et al., 2022, 2021; Owczarek and Opała, 2016).

Planując moje arktyczne badania dendrochronologiczne stopniowo poszukiwałam źródeł finansowania, które umożliwiły mi realizację założonych celów badawczych. Oprócz grantu MNiSW (lata 2010-2013) finansującego ekspedycje badawcze w rejon centralnego Spitsbergenu, kluczowe było uzyskanie dwóch staży podoktorskich. I tak, w latach 2010-2011 miałam możliwość przeprowadzenia analiz dendrochronologicznych krzewinek *Salix polaris* (centralny Spitsbergen) w laboratorium WSL Birmensdorf w Szwajcarii. Podczas tego stażu miałam ogromne szczęście poznać prof. Fritz'a Schweingrubera będącego wielkim autorytetem w dendrochronologii i pionierem badań dendrochronologicznych krzewinek (Schweingruber and Poschlod, 2005). Wspólna praca w laboratorium przy ścinaniu próbek dała mi wspaniałą możliwość nauki dendrochronologii i dyskusowania z Fritzem zawłości przyrostu radialnego wysoce wąskosłoiowych okazów *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu.

Następnie, w latach 2014-2017, miałam możliwość przeprowadzić badania terenowe nad krzewinkami tundrowymi (m. in. *Betula nana*) z północnej Alaski w *Department of Biology, Univeristy of Alaska Anchorage*, w Stanach Zjednoczonych. Dodatkowo, na przeprowadzone przeze mnie (wraz z zespołem) badania terenowe w Arktyce, zdobyłam sześć grantów ekspedycyjnych w ramach *INTERACT Transnational Access*, które dały mi unikatową możliwość zaznajomienia się z wysoce różnorodnymi ekosystemami tundrowymi w Arktyce niskiej i wysokiej. Prace terenowe w atlantyckim i pacyficznym sektorze Arktyki, jak również prace w strefie północnej Syberii, umożliwiły mi poznanie różnorodnych uwarunkowań klimatycznych, zmarzlinowych i ekologicznych wzrostu radialnego krzewinek tundrowych w rozległym biomie Arktyki.

Ostatnie dwie dekady, to nie tylko silny rozwój badań dendrochronologicznych krzewinek tundrowych, ale również okres najsilniejszych trendów wzrostu temperatury jaki jest obserwowany w Arktyce w okresie instrumentalnych pomiarów meteorologicznych. Najnowsze badania wskazują, że w latach 1979-2021 duża część Oceanu Arktycznego ocieplała



się szybciej niż o 0,75 °C na dekadę, z maksymalnym ociepleniem w eurazjatyckim sektorze Oceanu Arktycznego (tj. 1,25 °C na dekadę), w pobliżu Svalbardu i Nowej Ziemi (Rantanen et al., 2022). Również i wcześniejsze badania polskich klimatologów (Niedźwiedź, 2003; Przybylak, 2007; Marsz and Styszyńska, 2013; Osuch and Wawrzyniak, 2017; Przybylak and Wyszyński, 2020; Araźny et al., 2021) raportowały wzrost temperatury powietrza w Arktyce.

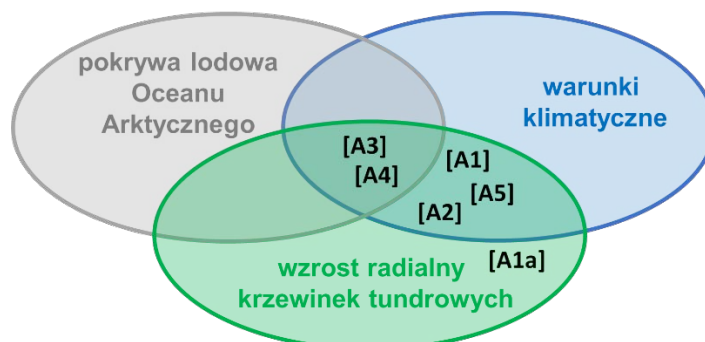
Uwarunkowania termiczne są kluczowe dla wzrostu tundry w Arktyce (Billings and Mooney, 1968; Billings, 1987). Obserwowane współcześnie zmiany klimatu w Arktyce, w tym zmiany temperatury powietrza i sprzężony z nimi kurczący się zasięg pokrywy lodowej na Oceanie Arktycznym (Stroeve et al., 2007), kształtują warunki klimatyczne kluczowe dla wzrostu najdalej na północ rosnących roślin drzewiastych (tj. krzewinek tundrowych) i wymagają szczegółowego rozpoznania. Rozpoznanie to jest ważne na kilku poziomach funkcjonowania ekosystemu Arktyki, jak również obszaru poza nią, mianowicie:

- a) krzewinki tundrowe, jako dominująca formacja roślinna w Arktyce, są silnym medium obiegu/wymiany ciepła i wilgoci pomiędzy powierzchnią terenu (w tym wieloletnią zmarzliną oraz pokrywą śnieżną) a przypowierzchniową warstwą atmosfery ( Sturm et al., 2001; Chapin et al., 2005). Rozpoznanie wzorców wzrostu radialnego i jego zależności względem klimatu (w tym temperatury, opadów, pokrywy śnieżnej, wilgotności podłoża) daje podstawy do modelowania zmian wymiany ciepła i wilgoci i dokładniejszych prognoz zmian klimatu;
- b) krzewinki tundrowe mają potencjał wiązania i uwalniania węgla (Weintraub and Schimel, 2005); dowiedziono, iż pozytywny wzrost radialny krzewinek i stymulacja wzrostu pierwotnego pozytywnie wpływa na zacienienie powierzchni gruntu oraz konserwację wieloletniej zmarzliny i mniejsze uwalniania gazów cieplarnianych (Blok et al., 2010);
- c) krzewinki tundrowe stanowią kluczowe pożywienie wielu roślinożerców, są zatem regulatorem bioróżnorodności ekosystemu Arktyki (Post et al., 2023), jak również umożliwiają zrównoważoną gospodarkę pasterską rdzennej ludności zamieszkującej obszar Arktyki (Forbes et al., 2006).

W niniejszym osiągnięciu podjęłam się analizy wpływu zmieniających się warunków klimatycznych, w tym szczególnie wpływu temperatury powietrza na wzrost radialny krzewinek w wybranych obszarach Arktyki. Podstawą osiągnięcia było w pierwszej kolejności wypracowanie protokołu poboru, mierzenia oraz przeprowadzania badania krzyżowego krzewinek tundrowych [A1, A1a], w tym szczególnie charakterystyka ilościowa przyrostów brakujących i wyklinowujących. Następnie, dla każdego pojedynczego gatunku określono w ramach niniejszego osiągnięcia wrażliwość klimatyczną, tj. wpływ warunków termicznych i pluwialnych na wzrost radialny krzewinek tundrowych pochodzących z określonej lokalizacji geograficznej [A1: Spitsbergen, A2: Grenlandia, A4: Alaska, A5: Syberia]. Punktem kulminacyjnym było przeprowadzenie syntezy klimat-wzrost na zbiorze 23 chronologii krzewinek tundrowych z gatunku *Salix spp.* i *Betula spp.* z obszaru wokół arktycznego (zwanego dalej Pan-Arktyką) w kontekście zmieniającego się klimatu (tj. temperatury powietrza, opadów i indeksu suszy) i zanikającego zasięgu pokrywy lodowej w basenie Oceanu Arktycznego [A3]. Dodatkowo, badania terenowe przeprowadzone w delcie rzeki Leny, dały możliwość wykonania porównawczej analizy wrażliwości klimatycznej wybranego gatunku krzewinki (tj. *Betula nana*) z karłowatym gatunkiem drzewa (tj. *Larix Mill.*) [A5], którego siedlisko zostało zidentyfikowane przeze mnie wraz z zespołem ekspedycyjnym w obrębie tundry (72°17'N) latem 2018 roku.

#### **4.2.2. Hipoteza i cel główny**

Problematyka osiągnięcia habilitacyjnego pozycjonowana jest na pograniczu kilku nauk: dendrochronologii i ekologii obszarów polarnych, klimatologii oraz oceanologii (tj. w zakresie badań zlodzenia Oceanu Arktycznego) (Ryc. 1). Praca zawiera również elementy biogeografii, a dokładniej fitogeografii w zakresie badań północnej części Holarktyki i obszaru cyrkumborealnego.



Ryc. 1. Schematyczne przedstawienie zakresu tematycznego przeanalizowanych interakcji w publikacjach [A1, A1a, A2, A3, A4, A5] wchodzących w skład przedkładanego osiągnięcia.

W osiągnięciu zweryfikowałam następującą hipotezę: **wzrost temperatury powietrza w Arktyce, jako główny przejaw współczesnej zmiany klimatu w tym regionie, pozytywnie wpływa na wzrost radialny krzewinek tundrowych w Arktyce.** Jednocześnie, przyjęto założenie, że **pozytywny wpływ temperatury na wzrost radialny krzewinek tundrowych może być ograniczony przez ilość dostępnej wilgoci** w danej lokalizacji arktycznej. Dodatkowo, w artykule [A3] i [A4] zbadalam wpływ zmiany klimatu w skali pan-regionalnej i zmian zasięgu zlodzenia Oceanu Arktycznego na klimat lokalny i warunki siedliskowe krzewinek tundrowych. W przypadku pracy [A3] relacje te prześledziłam dla dziewiętnastu wybranych lokalizacji w Arktyce. Dolną granicę współczesnego ocieplenia Arktyki przyjęto za Marszem i Styszyńską (2011) na rok 1980, jednak należy zaznaczyć, iż analizy dendroklimatyczne w wybranych lokalizacjach przeprowadzono dla dłuższych serii czasowych (tj. odpowiadającym długości danej chronologii, patrz poniżej).

Celem głównym cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych [A1, A1a, A2, A3, A4, A5] było **określenie zależności pomiędzy zmieniającymi się warunkami klimatycznymi a wzrostem radialnym krzewinek tundrowych w Arktyce.** Należy zaznaczyć, iż w artykułach [A1] i [A1a] wypracowałam podstawy metodyczne analizy dendrochronologicznej krzewinek tundrowych, a w artykułach [A2, A3, A4, A5] zaadresowałam cel główny *sensu stricto*.

Kiedy rozpoczynałam pracę nad przedstawianym osiągnięciem naukowym w literaturze brak było szczegółowych opracowań metodycznych dotyczących pomiarów wysoce nieregularnego wzrostu radialnego krzewinek tundrowych. Dlatego też, w pierwszej kolejności podjęłam się próby skwantyfikowania stopnia nieregularności przyrostów rocznych krzewinek z obszaru tundry. Było to kluczowe zadanie, gdyż jak się okazało, niemal jedna czwarta przyrostów krzewinek z rejonu wysokiej Arktyki (Spitsbergen) posiadała nieregularne przyrosty (tj. przyrosty brakujące lub częściowo brakujące). Fakt ten może stanowić poważne utrudnienie w konstrukcji chronologii przyrostowych krzewinek w najdalej na północ wysuniętych częściach lądu na Półkuli Północnej.

Cel główny osiągnięcia został osiągnięty poprzez realizację następujących **celów szczegółowych:**

- 1) **rozpoznanie nieregularności przyrostu radialnego** krzewinek tundrowych (tj. wybranego gatunku) i ilościowe przedstawienie udziału przyrostów całkowicie i częściowo brakujących [A1, A1a];
- 2) **skonstruowanie chronologii przyrostowych** dla wybranych lokalizacji w Arktyce i dla dominujących w nich gatunków krzewinek, jeśli to możliwe, dla tych gatunków, które powszechnie występują na obszarze Arktyki [A1, A2, A3, A4, A5];
- 3) **scharakteryzowanie wrażliwości klimatycznej** wybranych gatunków krzewinek tundrowych, tj. przeprowadzenie analizy-klimat wzrost, **ze szczególnym uwzględnieniem wpływu współczesnych zmian klimatu na wzrost radialny** krzewinek [A1, A2, A3, A4, A5];
- 4) **rozpoznanie całościowej reakcji wzrostu radialnego krzewinek** (tj. wzrost radialny pędów nadziemnych *versus* pędy podziemne) na zmieniające się warunki klimatyczne [A1, A4];
- 5) **rozpoznanie wpływu zmniejszającego się zasięgu pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego na klimat** wybranych regionów w Arktyce **i wzrost radialny** krzewinek w tych regionach [głównie A3, A4, częściowo A2].

Dla każdego poddanego badaniom gatunku krzewinek przeprowadziłam analizę klimat-wzrost, tj. rozpoznałam relację pomiędzy średnią szerokością przyrostów rocznych krzewinek a wartościami elementów klimatycznych (np. średnią dzienną lub miesięczną temperaturą powietrza). Określiłam jakie czynniki i elementy klimatyczne mają istotny statystycznie wpływ na wzrost radialny krzewinek. Szczególną częścią badań w osiągnięciu było rozpoznanie zmienności zależności klimat-wzrost w czasie. Zasięg czasowy dla którego przeprowadziłam badania zależny był od długości chronologii skonstruowanej dla danego obszaru badań w ramach osiągnięcia (patrz poniżej) i wyniósł on maksymalnie ok. 100 lat.

#### **4.2.3. Metody badań**

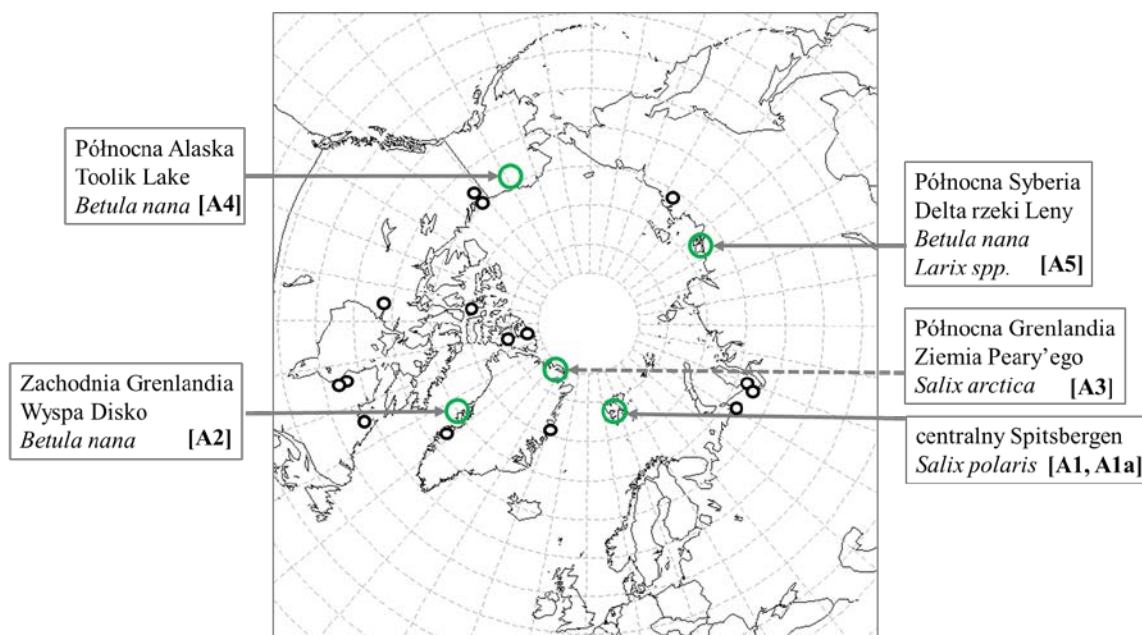
Główne analizy klimat-wzrost przeprowadziłam dla liściastych gatunków krzewinek tundrowych z rodziny *Salix* [A1, A1a] i *Betula* [A2, A4, A5] oraz jednego gatunku drzewa *Larix* rosnącego w obrębie tundry syberyjskiej [A5]. W syntezie [A3] zbadałam łącznie 23 chronologie krzewinek z gatunku *Salix* i *Betula*. Obszary badań szczegółowych zlokalizowane były w Arktyce niskiej i wysokiej, tak aby obejmowały wszystkie kontynenty zlokalizowane w Arktyce, tj. Europę z archipelagiem Svalbard, Amerykę Północną z Grenlandią i Azję z północną Syberią. Taki wybór stanowisk zapewnił zróżnicowane pod kątem klimatycznym jak i roślinnym analiz klimat-wzrost krzewinek tundrowych z Arktyki.

W ramach osiągnięcia skonstruowałam i/lub przeanalizowałam autorskie chronologie słoików przyrostowych trzech gatunków krzewinek tundrowych (oraz jednego gatunku karłowatego drzewa, patrz punkt 5.) z następujących lokalizacji:

- 1) centralny Spitsbergen (78°43'N; 16°37'E), *Salix polaris* (1941-2010; długość chronologii - 70 lat), publikacja [A1], [A1a] i [A3];
- 2) Wyspa Disko, Zachodnia Grenlandia (69°15'N; 53°31'W), *Betula nana* (1888-2011; 124 lat), publikacja [A2] i [A3];
- 3) Ziemia Peary'ego, Północna Grenlandia, *Salix arctica* (1925-2014; 90 lat), publikacja [A3]. Chciałabym zaznaczyć, że ta chronologia powstała w ramach publikacji nie włączonej bezpośrednio do osiągnięcia (Buchwał et al., 2019), ale została przeanalizowana i udostępniona w ramach syntezy [A3];
- 4) Toolik Lake, Północna Alaska (68°38'N, 149°38'W), *Betula nana* (1905-2016; 112 lat), publikacja [A3] i [A4];

- 5) Północna Syberia, delta rzeki Leny (72°17'N, 126°08'E), *Betula nana* (1934-2018; 85 lat) oraz *Larix dahurica* (1933-2018; 86 lat), publikacja [A5].

Przestrzenny rozkład badanych stanowisk przedstawiłam na Ryc. 2.



Ryc. 2. Lokalizacja zbadanych przeze mnie stanowisk i gatunków roślin drzewiastych w obrębie Arktyki w ramach przedłożonego osiągnięcia, tj. cyklu publikacji [A1-A5]. Duże zielone okręgi przedstawiają lokalizację, dla których stworzyłam i/lub udostępniłam (patrz: Ziemia Peary'ego) chronologie przyrostowe w ramach osiągnięcia. Małe czarne okręgi przedstawiają pozostałe lokalizację, z których pochodzą chronologie innych współautorów przeanalizowane przeze mnie w ramach syntezy [A3].

W ramach publikacji [A1-A5] składających się na osiągnięcie, skonstruowałam i/lub przeanalizowałam sześć autorskich chronologii, do których włączyłam finalnie 139 krzewinek (plus jeden gatunek karłowatego drzewa z Syberii) i 639 przekrojów poprzecznych roślin (Tab. 1). Warto nadmienić, iż łączna liczba przeanalizowanych (tj. ściętych, zabarwionych i zmierzonych) krzewinek była znacznie wyższa. Do finalnych chronologii włączyłam jedynie próbki, które nie posiadały rozległych blizn czy dużych supresji wzrostu oraz krzewinki, które po pomiarach przyrostu radialnego i badaniu krzyżowym spełniały określone wymogi statystyczne (tj. posiadały dodatnią korelację z pozostałymi osobnikami). I tak np. spośród ponad 50. okazów *Betula nana* pobranych w delcie rzeki Leny, finalnie w chronologii uwzględniono 37, a z ok. 90 krzewinek *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu do chronologii uwzględniono 10 okazów. Wysoką nieregularność przyrostu radialnego krzewinek tundrowych należy bezwzględnie wziąć pod uwagę przy planowaniu ekspedycji badawczych i protokołu poboru próbek w obszarach arktycznych. Niestety pełną ocenę wzorca przyrostowego krzewinek i nieregularności wzrostu można dokonać dopiero po ścięciu i wybarwieniu próbki, tj. przygotowaniu przezrocza mikroskopowego.

Miarą wzrostu radialnego krzewinek była międzyroczna zmienność szerokości słoików przyrostowych krzewinek. Krzewinki charakteryzowały się wysoką wąskosłistością oraz powszechnym występowaniem słoików wypadających/brakujących (ang. *missing rings*) i słoików niepełnych/wyklinowujących (ang. *wedging rings*). Najmniejsza **średnia szerokość słoików wyniosła ok. 0,05 mm w centralnym Spitsbergenie (*Salix polaris*)**, a w pozostałych badanych lokalizacjach **średnia szerokość słoików oscylowała blisko wartości 0,1 mm.**

publikacja	lokalizacja	gatunek	liczba krzewinek	liczba przekrojów poprzecznych
[A1]	centralny Spitsbergen	<i>Salix polaris</i>	10	142
[A1a]	centralny Spitsbergen	<i>Salix polaris</i>	j.w.	j.w.
[A2]	wyspa Disko (zachodnia Grenlandia)	<i>Betula nana</i>	15	135
[A3]	Ziemia Peary'ego (północna Grenlandia)	<i>Salix arctica</i>	10*	24*
[A4]	Toolik Lake (północna Alaska)	<i>Betula nana</i>	30	161
	Toolik Lake (północna Alaska)	<i>Betula nana</i>	30	108
[A5]	Delta rzeki Leny (północna Syberia)	<i>Larix dahurica</i>	17	53
	Delta rzeki Leny (północna Syberia)	<i>Betula nana</i>	37	40
<b>SUMA</b>			<b>139</b>	<b>639</b>

Tab. 1. Zestawienie analizowanych lokalizacji arktycznych oraz gatunków krzewinek tundrowych (oraz jednego gatunku drzewa, patrz [A5]) wraz z liczbą osobników i przekrojów poprzecznych (tj. efektu seryjnego próbkowania) składających się na każdą chronologię. \* - liczba ta obejmują jedynie krzewinki z Ziemi Peary'ego, ale finalnie do syntezy [A3] włączono również moje autorskie chronologie krzewinek (tj. te z [A1], [A2], [A4]) oraz 19 chronologii krzewinek skonstruowanych przez pozostałych współautorów syntezy [A3].

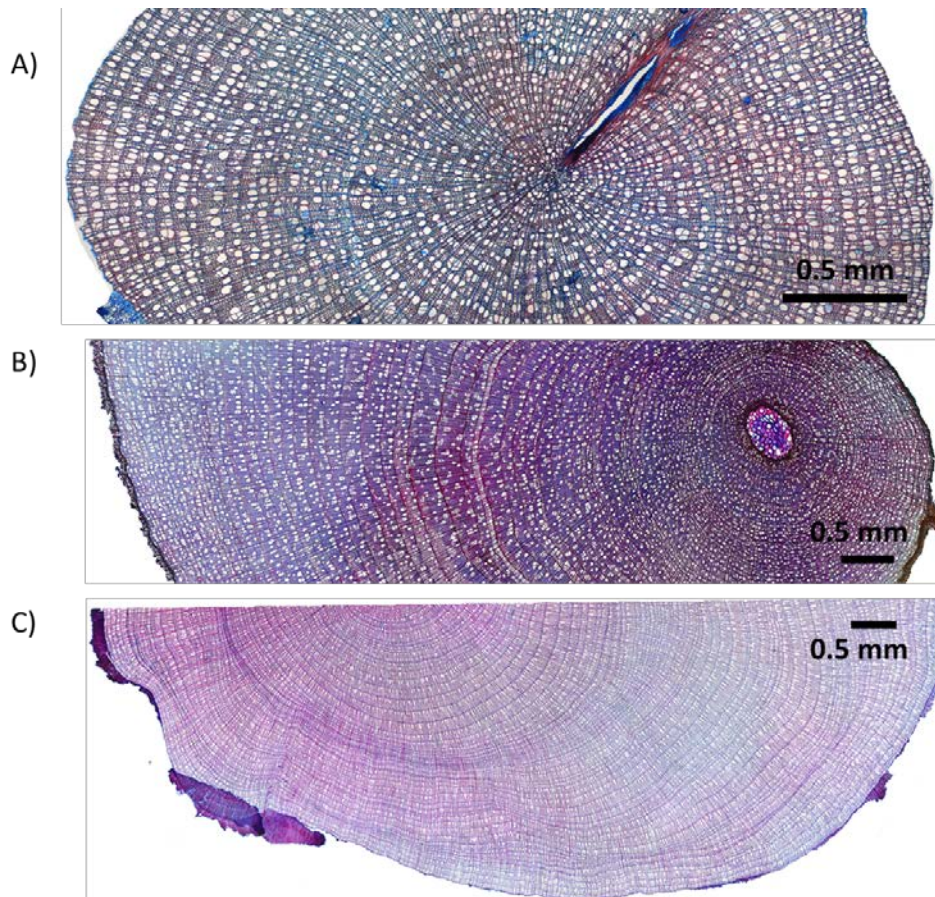
Z uwagi na tak niskie wartości wszystkie analizy szerokości słoju przyrostowych wykonałam na barwionych (mieszaniną Astra Blue i safraniny) przezroczach mikroskopowych (Ryc. 3). Każda krzewinka była ścinana na mikrotomie saneczkowym GSL-1 na plaster o grubość ok. 15-30 mikronów. Wszystkie próbki krzewinek (oprócz tych z Ziemi Peary'ego) były pobrane przeze mnie osobiście w terenie. Większość próbek była również ścięta, zabarwiona i przygotowana przeze mnie (za wyjątkiem części próbek *Betula nana* z obszaru Alaski oraz pojedynczych próbek *Betula nana* z północnej Syberii). Wszystkie ujęte w osiągnięciu próbki krzewinek były pomierzone przeze mnie przy użyciu funkcji *Manual Path*, tj. poprzez ręczny pomiar szerokości słoju przyrostowych, w programie WinCell (*Regent Instruments, Canada*). Samodzielnie wykonałam badania krzyżowe i skonstruowałam chronologie przyrostowe dla wszystkich pięciu głównych obszarów badań. Dodatkowo w syntezie [A3] analizowałam próbki pochodzące łącznie z 19 lokalizacji w Arktyce.

Czynniki i elementy klimatyczne, jakie wzięłam pod uwagę w badaniach, obejmowały głównie średnią temperaturę powietrza [A1-A5], opady [A1-A5], pokrywę śnieżną [A2, A5], temperaturę gruntu [A2, A5] czy wskaźnik standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego SPEI (ang. *Standardized Precipitation Evaporation Index*) [A3-A5]. W analizach zastosowano zarówno instrumentalne dane klimatyczne z najbliższych (względem obszaru badań) stacji meteorologicznych (tj. Svalbard Airport [A1], Arctic Station [A2], Toolik Research Station [A4]) oraz gridowe dane klimatyczne (CRU TS 4.01 i 4.02, *Climate Research Unit*, (Harris and Jones, 2019); [A3-A5]), czy dane klimatyczne z re-analiz (ERA5-Land data (Muñoz-Sabater, 2019) [A4, A5]. W pracy [A5] użyłam dodatkowo zmiennych charakteryzujących pośrednio ilość dostępnej wilgoci w gruncie, takich jak: a) ekwiwalent wodny (ang. *equivalent water thickness*, EWT, źródło danych: GRACE; Landerer and Swenson, 2012) oraz b) objętościową zawartość wody w glebie (ang. *volumetric soil water content*, VSW, źródło danych: ERA5-Land data).

Szczególnym przypadkiem jest artykuł [A3], który stanowi Pan-Arktyczną syntezę, w którym głównymi zmiennymi wyjaśniającymi wzrost radialny krzewinek oprócz temperatury powietrza i indeksu SPEI był zasięg pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego. Dodatkowo w

pracy [A4] wzięto pod uwagę indeksy Oscylacji Arktycznej (AO) i Dekadowej Oscylacji Pacyficznej (PDO).

W osiągnięciu zastosowano analizy statystyczne takie jak: regresja prosta, analiza korelacji, w tym korelację bootsrapową i funkcję odpowiedzi, korelacja ruchoma (ang. *moving correlation*), modelowanie równań strukturalnych (ang. *structural equation modeling*) czy korelację przestrzenną (ang. *spatial correlation*).



Ryc. 3. Przykłady fragmentów barwionych przeźroczy mikroskopowych prezentujących słoje przyrostowe analizowanych przez mnie w ramach osiągnięcia krzewinek tundrowych z Arktyki: A) *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu; B) *Salix arctica* z Ziemi Peary'ego (N Grenlandia), C) *Betula nana* z Toolik Lake (N Alaska).

#### **4.2.4. Opis osiągnięcia - wyniki badań**

[A1] Buchwał 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(9), 1305-1318. doi: 10.1007/s00300-013-1349-x

Przed podjęciem się zadania konstrukcji chronologii przyrostowej krzewinek z obszaru Arktyki postanowiłam szczegółowo rozpoznać stopień nieregularności przyrostu radialnego wybranego gatunku. Ten jakże istotny etap pozwolił mi określić zarówno potencjał jak i ograniczenia zastosowania dendrochronologii w wysokich szerokościach geograficznych.

W pracy [A1] podjęłam pierwszą, według mojej wiedzy, próbę oceny ilościowej przyrostów brakujących (MR, ang. *missing rings*) oraz przyrostów wyklinowujących/częściowo brakujących (PMR, ang. *partially missing rings*) dla dominującego gatunku krzewinki tundrowej *Salix polaris* w centralnym Spitsbergenie, w wysokiej Arktyce. Z uwagi na wysoce nieregularny wzrost radialny tego gatunku, etap ten był konieczny do zrealizowania jako pierwszy, tj. przed dokonaniem analizy klimat-wzrost.

**Celem pracy [A1]** było 1) ilościowe określenie wzorców wzrostu radialnego krzewinek arktycznych na przykładzie gatunku liściastego krzewinek *Salix polaris* Wahlenb. rosnącego na północnej granicy zasięgu wzrostu roślin drzewiastych; 2) rozpoznanie relacji wzrost radialny krzewinek (w tym rozgraniczenie na wzrost radialny pędów nadziemnych i podziemnych krzewinek) a klimat; 3) lepsze zrozumienie całościowej reakcji wzrostu krzewinek (tj. wzrost radialny pędów nadziemnych *versus* pędy podziemne) na zmieniające się warunki klimatyczne.

W ramach pracy [A1] skonstruowałam chronologię *Salix polaris* dla centralnego Spitsbergenu dla okresu 1941-2010. Dla celów konstrukcji tej chronologii przeanalizowałam, przy zastosowaniu seryjnego próbkowania (ang. *serial sectioning*) (Kolishchuk, 1990), łącznie 142 przekroje poprzeczne z 10 krzewinek *Salix polaris*. Należy dodać, że tych 10 okazów pochodziło z większej puli krzewinek (tj. ponad 90. osobników) i stanowiło reprezentację względnie regularnie przyrastających roślin, tj. okazy bez blizn i silnych supresji wzrostu (ang. *growth suppression*).

Analizy klimat-wzrost przeprowadziłam odrębnie dla 1) chronologii *Salix polaris* skonstruowanej na podstawie pomiarów szerokości słoików przyrostowych przy szyjce korzeniowej (ang. *root collar*), 2) chronologii występowania przyrostów MR oraz PMR w pędach nadziemnych oraz 3) w pędach podziemnych krzewinek *Salix polaris*. Analizy klimat-wzrost przeprowadziłam dla okresu (1975-2010) używając średnich wartości miesięcznych temperatury powietrza ze stacji meteorologicznej z okolicy Longyearbyen (Svalbard Airport). Dodatkowo, chronologię *Salix polaris* skonstruowaną na podstawie pomiarów szerokości słoików przyrostowych przy szyjce korzeniowej skorelowałam z sumą miesięczną opadów ze stacji Svalbard Airport.

W pracy [A1] wykazałam, że:

- 1) krzewinki *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu charakteryzują się bardzo wąskimi przyrostami radialnymi. Średnia szerokość słoików *Salix polaris* była większa w częściach podziemnych niż nadziemnych krzewinek i wyniosła odpowiednio 0,060 i 0,048 mm. Słoje *Salix polaris* są zatem jednymi z najwęższych słoików przyrostowych opisanych do tej pory w literaturze, w oparciu o które skonstruowałam chronologię.
- 2) wzrost radialny *Salix polaris* w centralnej części Spitsbergenu jest wysoce nieregularny, co może być problematyczne przy konstrukcji chronologii tego gatunku i analizach klimat-wzrost. Z łącznej liczby 5299 słoików przyrostowych przeanalizowanych w ramach konstrukcji chronologii *Salix polaris* 24,8 % stanowiły przyrosty całkowicie (MR; 11,2 %) lub częściowo brakujące (PMR; 13,6 %). Udział przyrostów MR był wyższy w częściach podziemnych (12,5 %) niż nadziemnych (8,8 %) roślin. Natomiast liczba przyrostów PMR była wyższa w częściach nadziemnych niż w częściach podziemnych krzewinek (tj. 16,0 % w porównaniu z 12,1 %). W ostatnich dwóch analizowanych dekadach zaobserwowałam niewielki wzrost przyrostów PMR przy jednoczesnym spadku występowania przyrostów MR;

- 3) dominujący wpływ na wzrost radialny krzewinek miała temperatura okresu letniego. Średnia szerokość przyrostów rocznych *Salix polaris* przy szyjce korzeniowej była najsilniej skorelowana ze średnią temperaturą powietrza okresu czerwiec-sierpień ( $r = 0,70$ ;  $P < 0,01$ ). Z kolei korelacja pomiędzy wzrostem radialnym krzewinek a opadami była ujemna, w szczególności z opadami okresu czerwiec-sierpień ( $r = -0,39$ ;  $P < 0,01$ ). Dodatkowo, wykazałam dodatnią korelację pomiędzy chronologią *Salix polaris* a opadami listopada poprzedzającego okres wegetacyjny ( $r = 0,45$ ;  $P < 0,01$ );
- 4) frekwencja występowania przyrostów MR była negatywnie skorelowana ze średnią temperaturą powietrza okresu czerwiec-sierpień. Korelacja ta wyniosła odpowiednio  $r = -0,45$  ( $P < 0,01$ ) i  $r = -0,53$  ( $P < 0,01$ ) dla części nadziemnych i podziemnych *Salix polaris*. Dla kontrastu, na większą frekwencję występowania przyrostów PMR zarówno w pędach nadziemnych jak i podziemnych pozytywny wpływ miały temperatury powietrza w maju (odpowiednio  $r = 0,36$  i  $r = 0,37$ ;  $P < 0,01$ ) oraz szereg miesięcy w roku poprzedzającym wzrost radialny;
- 5) chronologia różnicowa, tj. chronologia przyrostu radialnego *Salix polaris* uzyskana z różnicy pomiędzy średnią wartością wzrostu radialnego pędów podziemnych i średnią wartością wzrostu radialnego pędów nadziemnych była dodatnio skorelowane ze średnią temperaturą powietrza okresu czerwiec-sierpień ( $r = 0,41$ ,  $P < 0,01$ ) oraz negatywnie z temperaturami powietrza okresu marzec-maj ( $r = -0,34$ ,  $P < 0,05$ ).

Kierowane przeze mnie badania wykazały, że wzrost radialny *Salix polaris* w centralnym Spitsbergenie nie jest jednorodnie rozłożony w obrębie pędów nadziemnych i podziemnych krzewinek oraz że ta rozbieżna alokacja wzrostu radialnego jest zależna od temperatury powietrza. Uśredniony pozytywny trend liniowy wzrostu radialnego tego gatunku w naszych badaniach wyniósł 1,19 mikrona/rok ( $P < 0,01$ ). Zwiększony wzrost radialny i malejąca liczba przyrostów MR zaobserwowane w chronologii *Salix polaris* sugerują, że produktywność tego gatunku krzewinek w centralnej części Spitsbergenu rośnie w odpowiedzi na ocieplenie klimatu.

**Jednym z głównych osiągnięć pracy [A1]** jest wskazanie, że temperatura powietrza jest odpowiedzialna za kontrolowanie wzrostu radialnego wewnątrz krzewinek *Salix polaris*, tj. pomiędzy pędami nadziemnymi a podziemnymi rośliny. Uzyskane wyniki sugerują, że ciepłe okresy letnie (charakteryzujące się wysoką temperaturą powietrza okresu czerwiec-sierpień) sprzyjają większym różnicom we wzroście radialnym pomiędzy częściami podziemnymi (tj. korzeniami) a częściami nadziemnymi krzewinek i powodują zwiększoną alokację zasobów w pędy podziemne krzewinek. Dzieje się odwrotnie podczas zimnych wiosen, tj. chłodnej temperatury powietrza w okresie marzec-maj, kiedy to promowany jest wzrost radialny pędów nadziemnych.

Alokacja zasobów w obrębie różnych części krzewinek w postaci przyrostu radialnego wydaje się zatem zależeć od pory roku i charakteryzującej ją średniej temperatury powietrza. Promowanie wzrostu w częściach podziemnych *Salix polaris* podczas ciepłych okresów letnich winno być zatem wzięte pod uwagę w modelowaniu procesu obiegu węgla na tundrze w warunkach zmieniającego się klimatu. Szczególnie, sekwestracja węgla przez krzewinki tundrowe w cieplejszym klimacie może być zatem wyższa niż ta oszacowana wyłącznie na podstawie analizy nadziemnych części roślin.

**[A1a] Buchwał A. (2014) Constraints on dendrochronological dating of *Salix polaris* from central Spitsbergen. *Czech Polar Reports* 4(1), 73-79, doi: 10.5817/CPR2014-1-8**



Praca [A1a], stanowiąca uzupełnienie pracy [A1], to krótki komunikat prezentujący istotne założenia metodyczne przyjętej metody badawczej, tj. badania krzyżowego (ang. *cross-dating*) *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu. **Celem pracy** było wykazanie potencjału dendrochronologicznego *Salix polaris* ze środkowego Spitsbergenu ze szczególnym przedstawieniem (i) nieregularności wzrostu radialnego (tj. przyrostów wyklinowujących i przyrostów brakujących) oraz (ii) omówieniem typowych problemów badania krzyżowego (ang. *cross-dating*) wzrostu radialnego krzewinek arktycznych.

Analizie poddano 10 krzewinek *Salix polaris*, z których pobrano i przeanalizowano minimum 10 przekrojów poprzecznych pochodzących zarówno z pędów nadziemnych jak i podziemnych krzewinek. Większość analizowanych w tej pracy okazów krzewinek pokrywała się z materiałem analizowanym w pracy [A1]. Badanie krzyżowe każdej próbki wykonałam w trzech etapach: 1) porównując pomiary przyrostów radialnych przeprowadzone w obrębie czterech promieni w obrębie każdego przekroju poprzecznego krzewinki i prezentując średnią krzywą wzrostu dla danego przekroju; 2) porównując średnie krzywe wzrostu pomiędzy podziemnymi i nadziemnymi częściami danej krzewinki i prezentując średnią krzywą wzrostu danej krzewinki; 3) porównując średnie krzywe wzrostu wszystkich krzewinek i prezentując chronologię *Salix polaris* dla centralnego Spitsbergenu.

Wykonując seryjne próbkowanie połączone z trzyetapowym badaniem krzyżowym wykazałam, że przyrosty brakujące i wyklinowujące mogą występować naprzemiennie i nawet sąsiadujące ze sobą przekroje poprzeczne (tj. te oddalone od siebie o 3 cm, licząc wzdłuż głównej osi wzrostu korzenia) mogą wykazywać dużą zmienność w przyroście radialnym. W pracy wykazałam, że granice sąsiadujących przyrostów często na siebie nachodzą i wymagana jest analiza przyrostów rocznych w obrębie całego obwodu słoja przyrostowego na barwionym preparacie mikroskopowym.

**Głównym osiągnięciem pracy [A1a]** było wskazanie, iż pomimo powszechnej nieregularności wzrostu radialnego krzewinek *Salix polaris* pomiar słoików przyrostowych w obrębie czterech promieni, połączony z seryjnym próbkowaniem i porównaniem wzrostu pomiędzy pędami podziemnymi i nadziemnymi, umożliwia pełną detekcję przyrostów brakujących i konstrukcję chronologii przyrostowej tego gatunku.

[A2] Hollesen J., Buchwał A., Rachlewicz G., Hansen B.U., Overgaard M., 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, 2410-2423.  
doi: 10.1111/gcb.12913

Wpływ ocieplenia klimatu wyrażający się wzrostem temperatury powietrza w okresie zimowym na wzrost radialny krzewinek tundrowych jest rzadko badany. To warunki sezonu wegetacyjnego (tj. okresu lata) są powszechnie uznawane za główny czynnik wpływający na wzrost radialny krzewinek tundrowych i to one są najczęściej badane (Blok et al., 2011; Forbes et al., 2010; Hallinger et al., 2010). Analizy dendroklimatyczne dają możliwość powiązania wzrostu wtórnego (w tym wypadku krzewinek tundrowych) zarówno z międzyroczną jak i wewnątrz roczną zmiennością klimatu w dłuższych skalach czasowych.

W pracy [A2] postanowiłam rozpoznać wpływ zmieniających się warunków klimatycznych okresu zimowego na wzrost radialny *Betula nana* w ponad stuletniej skali czasowej. W pracy zrealizowałam, wraz ze współautorami, następujące **cele badawcze**:

- 1) rozpoznanie warunków klimatycznych w południowej części wyspy Disko, położonej w zachodniej Grenlandii i określenie współczesnych zmian klimatycznych (w tym trendów zmian temperatury powietrza);

- 2) rozpoznanie przyrostu radialnego dominującego gatunku krzewinki tundrowej, tj. *Betula nana*, i skonstruowanie chronologii przyrostu radialnego *Betula nana* dla południowej części wyspy Disko w zachodniej Grenlandii;
- 3) rozpoznanie zależności pomiędzy klimatem a wzrostem radialnym *Betula nana* dla południowej części wyspy Disko, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu temperatury powietrza okresu zimowego;
- 4) rozpoznanie znaczenia zmian temperatury gruntu, zasięgu lodu morskiego i grubości pokrywy śnieżnej na wzrost radialny *Betula nana* w ostatnich dwóch dekadach.

W ramach [A2] skonstruowałam ponad 100-letnią chronologię *Betula nana* (1888-2011), w którą włączyłam 116 przekrojów poprzecznych z 15 krzewinek. Średnia szerokość przyrostów rocznych przy szyjce korzeniowej wyniosła od 0,05 do 0,40 mm. Przyrosty wyklinowujące były liczne i często odpowiadały im (tj. były wykształcone w tym samym roku kalendarzowym) przyrosty brakujące zidentyfikowane w innych częściach tej samej krzewinki.

W pracy [A2] wraz ze współautorami wykazaliśmy następujące zmiany czynników klimatycznych dla okresu 1991-2011 dla południowej części wyspy Disko, zachodnia Grenlandia:

- 1) średnia roczna temperatura powietrza południowej części wyspy Disko wzrosła o 0,2 °C/rok, ale z dużymi wahaniami sezonowymi, ponieważ temperatury zimą (od grudnia do lutego) wzrosły o 0,4 °C/rok, temperatury wiosenne (od marca do maja) o 0,3 °C/rok, temperatury letnie (od czerwca do sierpnia) o 0,1 °C/rok, a temperatury jesienne o ok. 0,1 °C/rok. Porównując pierwsze 10 lat analizowanego okresu (1991-2000) z ostatnimi 10 latami (2002-2011), średnia roczna liczba stopniodni zamarzania (FDD, ang. *freezing degree days*) spadła z 2240 do 1585, a liczba stopniodni rozmarzania (TDD, ang. *thawing degree days*; TDD >0°C) i suma temperatur efektywnych (GDD, ang. *growing degree days*; >5°C), wzrosły odpowiednio z 680 do 912 (dla TDD) i ze 160 do 284 (dla GDD);
- 2) grubość pokrywy śnieżnej w ostatnich latach analizowanego okresu wykazała tendencje spadkowe. Wydłużył się okres bezśnieżny, tj. ze 120 dni (1991-2000) do 145 dni w ciągu ostatnich 10 lat (2002-2011). Początek okresu bezśnieżnego przesunął się z początku czerwca do połowy/początku maja;
- 3) temperatura gruntu charakteryzowała się podobnym wzrostem i trendami, jak temperatura powietrza zarówno w ujęciu rocznym, jak i sezonowym. Temperatura gruntu zimą, w wyniku zmniejszania się miąższości pokrywy śnieżnej w ostatnich latach, stała się bardziej zależna od temperatury powietrza. Porównując pierwsze 10 lat (1991-2000) z ostatnimi 10 latami poddanymi analizie (2002-2011) wykazaliśmy, że zimowe i wiosenne temperatury gruntu stały się wyraźnie cieplejsze, pomimo mniejszej miąższości pokrywy śnieżnej.

Wykonane przez mnie analizy dendroklimatyczne w ramach pracy [A2] wykazały:

- 1) wzrost radialny *Betula nana* jest istotnie i pozytywnie skorelowany ze średnią temperaturą powietrza zarówno okresu letniego (czerwiec-lipiec;  $r = 0,53$ ;  $P < 0,05$ ) jak i zimowego (poprzedzający grudzień-styczeń;  $r = 0,42$ ;  $P < 0,05$ ) w ciągu ostatniego stulecia (1910-2011). Pozytywne znaczenie temperatury powietrza okresu zimowego dla wzrostu radialnego *Betula nana* był szczególnie wyraźny w okresach 1910-1930 oraz 1990-2011, w których to odnotowano znaczne ocieplenie zimowe;

- 2) Celem wyjaśnienia istotnego statystycznie znaczenia temperatury powietrza zimą na wzrost radialny *Betula nana* scharakteryzowałam znaczenie różnych czynników środowiskowych, takich jak np. temperatury gruntu w latach 1991-2011. Wykazałam silną pozytywną reakcję wzrostu radialnego *Betula nana* na sumę temperatur efektywnych (GDD oraz TDD) oraz temperatury gruntu w okresie wiosennym;
- 3) Zidentyfikowałam ujemną reakcję wzrostu radialnego *Betula nana* na zmiany zasięgu lodu morskiego, gdzie mniejszy zasięg lodu morskiego otoczenia południowego wybrzeża wyspy Disko promował większy wzrost radialny *Betula nana*. W naszych badaniach wskazaliśmy na możliwy związek pomiędzy zmianami zasięgu zlodzenia w regionie Zatoki Disko a lokalną zmianą klimatu i tempem wzrostu radialnego *Betula nana*;
- 4) Badania wykazały również wyraźną zmianę w wynikach analizy klimat-wzrost w ciągu ostatnich 20. lat, tj. od okresu o dużej miąższości pokrywy śnieżnej (1991-1996) i jej pozytywnego wpływu na wzrost radialny *Betula nana*, do okresu z ogólnie bardzo małą miąższością pokrywy śnieżnej (1997-2011) i braku jej znaczącej roli na wzroście radialnym *Betula nana*. W tym najbardziej współczesnym okresie zimowe i wiosenne temperatury gleby znacznie wzrosły, co sugeruje, że większy wzrost radialny *Betula nana* jest stymulowany cieplejszymi zimowymi i wiosennymi temperaturami powietrza oraz wcześniejszym tajaniem pokrywy śnieżnej, które pozwalają gruntowi szybciej się nagrzewać się i stymulować wzrost we wcześniejszej fazie okresu wegetacyjnego.

**Głównym osiągnięciem pracy [A2]** jest konstrukcja ponad 100-letniej chronologii *Betula nana* dla zachodniej Grenlandii i wykazanie istotnego znaczenia ocieplenia w okresie zimowym dla wzrostu radialnego krzewinek. Praca [A2] zwróciła uwagę na znaczenie czynników klimatycznych występujących przed okresem wegetacyjnym dla wzrostu krzewinek w Arktyce. Uzyskane wyniki mogą pomóc w wyjaśnieniu procesu tzw. „zazielenienia tundry” (ang. *tundra greening*), które może postępować w przyszłych latach z powodu zarówno bezpośrednich, jak i pośrednich skutków zimowego ocieplenia (tj. ocieplenia w okresie zimowym) w wybranych częściach Arktyki.

**[A3] Buchwał A., Sullivan P.F., Macias-Fauria M., Post E., Myers-Smith I., Stroeve J. C., Blok D., Tape K. D., Forbes B. C., Ropars P., Lévesque E., Elberling B., Angers-Blondin S., Boyle J. S., Boudreau S., Boulanger-Lapointe N., Gamm C., Hallinger M., Rachlewicz G., Young A., Zetterberg P., Welker J.M. (2020) Divergence of Arctic shrub growth associated with sea ice decline. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(52), 33334-33344. doi: 10.1073/pnas.2013311117**

W artykule [A3], będącym swego rodzaju syntezą, zbadalam wraz z zespołem wpływ zmniejszającej się pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego i warunków klimatycznych okresu letniego na wzrost radialnym krzewinek w skali całej Arktyki, zwanej dalej Pan-Arktyką. **Głównym celem pracy** było rozpoznanie relacji pomiędzy malejącym zasięgiem zlodzenia Oceanu Arktycznego, zmieniającym się klimatem i wzrostem radialnym krzewinek w skali całej Arktyki. Wcześniejsze badania przeprowadzone były jedynie na wybranym obszarze Arktyki, tj. Grenlandii i Svalbardu (Forchhammer, 2017). Artykuł [A3] stanowi zatem pierwsze opracowanie, w którym wraz z zespołem zbadalam relacje pomiędzy zmianami zlodzenia Oceanu Arktycznego a wzrostem radialnym krzewinek w skali całego biomu tundry.

W pracy postawiłam hipotezę, że wzrost krzewinek w całym biomie tundry będzie promowany przez spadek zasięgu zlodzenia Oceanu Arktycznego poprzez pozytywne sprzężenie zwrotne między zmniejszającą się pokrywą lodową a rosnącą temperaturą powietrza. Spodziewaliśmy się tego z uwagi na mechanizm, w którym to zmniejszająca się pokrywa lodowa wzmacnia lokalne ocieplenie klimatu poprzez większą absorpcję światła słonecznego na powierzchni otwartych obszarów wodnych (tj. tych nie pokrytych lodem morskim) (Serreze et al., 2009), co prowadzi do lokalnego ocieplenia klimatu, a w konsekwencji może sprzyjać wzrostowi radialnemu krzewinek tundrowych.

W syntezie [A3] wykorzystałam 23 chronologie przyrostowe krzewinek tundrowych gatunków *Salix* i *Betula* z 19. szeroko rozmieszczonych lokalizacji (tj. od 56°N do 83°N). Przeanalizowałam łącznie wzrost radialny 641 krzewinek (tj. 20 336 słoików przyrostowych) w odniesieniu do zmian 1) wokół arktycznego (tj. zlodzenia całego basenu Oceanu Arktycznego) i 2) regionalnego zasięgu lodu morskiego (dane miesięczne i sezonowe) oraz 3) czasu cofania się i formowania lodu morskiego (ang. *timing of sea ice retreat and freeze-up*; Stroeve et al., 2016) w poszczególnych regionach Oceanu Arktycznego. Większość analiz klimat-wzrost i relacji zlodzenie Oceanu Arktycznego-wzrost wykonałam dla wspólnego okresu 1979-2008 reprezentowanego przez większość chronologii krzewinek oraz homogeniczne dane zlodzenia Oceanu Arktycznego. W pracy [A3] przeanalizowałam relację wzrost radialny krzewinek a zmieniający się zasięg pokrywy lodowej dla całego basenu Oceanu Arktycznego i poszczególnych jego regionów (wg. delimitacji zaproponowanej przez *National Snow and Ice Data Center*, NSIDC, Stroeve et al., 2016), tj. Morza Baffina, Zatoki Hudsona, Morza Beauforta, Morza Grenlandzkiego, Morza Wschodniosyberyjskiego, Morza Karskiego, Morza Barentsa, akwenów morskich Archipelagu Arktyki Kanadyjskiej oraz Centralnej Arktyki.

W pracy [A3] zbadalam relacje pomiędzy zmniejszającym się zasięgiem lodu morskiego Oceanu Arktycznego a zmianami klimatu w poszczególnych regionach Arktyki i wzrostem krzewinek tundrowych w tych regionach. Szczególną uwagę zwróciłam na relację zmniejszającego się zasięgu lodu morskiego a temperaturą i dostępną dla wzrostu radialnego krzewinek wilgotnością w okresie letnim, w tym uśrednioną trzymiesięczną wartością wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego SPEI (ang. *Standardized Precipitation Evaporation Index*). W pracy użyłam modelowania równań strukturalnych (ang. *structural equation models*, SEMs) oraz liniowych modeli mieszanych (ang. *linear mixed effects* (LME) *models*). Analizy przeprowadziłam w środowisku programistycznym R przy użyciu pakietów 'piecewiseSEM' (Lefcheck, 2016) oraz 'nlme' (Pinheiro et al., 2013).

Wykonane przez mnie analizy dendroklimatyczne w ramach pracy [A3] wykazały:

- 1) Wyraźnie zaznaczoną, od połowy lat 90. XX wieku, rozbieżność wzrostu radialnego krzewinek tundrowych stowarzyszoną z zanikającym zasięgiem paku lodowego w obrębie Oceanu Arktycznego. Wykazałam dwie grupy krzewinek: 1) **krzewinki o zwiększonym wzroście radialnym** (ang. *increasers*), tj. krzewinki, które wraz ze zmniejszającą się pokrywą lodową Oceanu Arktycznego (oraz regionalnych mórz) zwiększały swój wzrost radialny oraz 2) **krzewinki o zmniejszonym wzroście radialnym** (ang. *decreasers*), tj. krzewinki, które wraz ze spadkiem zlodzenia Oceanu Arktycznego charakteryzowały się zmniejszonym wzrostem radialnym. Dominowała pierwsza grupa krzewinek, tj. 57% chronologii przyrostowych krzewinek wykazało rosnące wartości wzrostu radialnego, a 39% chronologii wykazało malejące wartości wzrostu radialnego wraz ze zmniejszającą się pokrywą lodową Oceanu Arktycznego. Tylko jedna chronologia (tj. 4% badanych chronologii krzewinek) nie wykazała istotnych statystycznie zależności ze zmianami zasięgu zlodzenia Oceanu Arktycznego;

- 2) Zarówno trendy spadku jak i wzrostu przyrostu radialnego krzewinek, postępujące wraz ze spadkiem zasięgu pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego, były silniejsze dla a) krzewinek młodszych (tj. <40 lat) oraz b) krzewinek rosnących w obrębie siedlisk wilgotnych. Silniejsze pozytywne trendy wzrostu wykazałam dla krzewinek z gatunku *Betula* niż dla gatunku *Salix*. Podczas gdy negatywne trendy wzrostu dla krzewinek z grupy *decreasers* nie różniły się istotnie pomiędzy krzewinkami *Betula* a *Salix*. Rozbieżność wzrostu radialnego krzewinek tundrowych postępującą wraz z zanikającym zasięgiem paku lodowego w obrębie Oceanu Arktycznego potwierdzono dodatkowo przy zastosowaniu: 1) liniowych modeli mieszanych, w których użyto pojedynczych krzywych wzrostu krzewinek (zamiast chronologii siedliskowych), oraz 2) przy zastosowaniu tzw. podwójnej detrendyzacji analizowanych szeregów czasowych, tj. gdy dane dotyczące zarówno zlodzenia Oceanu Arktycznego, jak i dane dotyczące przyrostu radialnego krzewinek poddane zostały detrendyzacji celem zachowania jedynie zmienności międzyrocznej;
- 3) Modele równań strukturalnych wykazały, że w lokalizacjach gdzie wraz ze spadkiem zasięgu pokrywy lodowej (SIE, ang. *sea ice extent*) Oceanu Arktycznego krzewinki zwiększały swój wzrost radialny (*increasers*), spadek SIE (i wcześniejsze cofanie się zasięgu zlodzenia Oceanu Arktycznego w ujęciu regionalnym) był związany ze wzrostem zarówno średniej temperatury powietrza latem ( $\beta = -0,46$ ;  $P < 0,001$ ) jak i opadów w okresie letnim ( $\beta = -0,21$ ;  $P < 0,001$ ), co w konsekwencji nie powodowało stresu suszy. Spadek wartości SPEI nie był w tych lokalizacjach istotny statystycznie ( $P = 0,096$ ). Wzrost radialny krzewinek w tych lokalizacjach był pozytywnie związany ze średnią temperaturą okresu czerwiec-sierpień ( $\beta = 0,42$ ; SE = 0,02; df = 370;  $P < 0,001$ ); gdzie:  $\beta$  - oszacowanie parametru efektu stałego modelu mieszanego, SE - błąd standardowy, df - liczba stopni swobody,  $P$  - poziom istotności statystycznej). Wzrost radialny krzewinek z grupy *increasers* nie był zależny od wartości SPEI latem ( $P = 0,591$ );
- 4) Modele równań strukturalnych wykazały, że w lokalizacjach gdzie wraz ze spadkiem zasięgu pokrywy lodowej (SIE, ang. *sea ice extent*) Oceanu Arktycznego krzewinki zmniejszały swój wzrost radialny (*decreasers*), spadek SIE (i wcześniejsze cofanie się zasięgu zlodzenia Oceanu Arktycznego w ujęciu regionalnym) był związany ze wzrostem temperatury powietrza latem ( $\beta = -0,53$ ;  $P < 0,001$ ) ale wartości opadów w okresie letnim nie ulegały wzrostowi ( $\beta = -0,04$ ;  $P = 0,537$ ), co w konsekwencji powodowało stres suszy i gorsze warunki dla wzrostu krzewinek. Spadek wartości SPEI dla okresu czerwiec-sierpień w tych lokalizacjach był istotny statystycznie ( $P = 0,042$ ). Wzrost radialny krzewinek w tych lokalizacjach nie był skorelowany ze średnią temperaturą okresu czerwiec-sierpień ( $P = 0,07$ ), natomiast był dodatnio skorelowany ze SPEI ( $\beta = 0,23$ ; SE = 0,05; df = 255;  $P < 0,01$ ). Oznacza to, że bardziej wilgotne lata (tj. te reprezentowane przez wyższą wartość SPEI) promowały większy wzrost radialny krzewinek tundrowych, a ciepłe i suche okresy letnie (tj. reprezentowane przez niskie wartości SPEI) powodowały niski wzrost radialny krzewinek.

Nasze odkrycie wskazuje, że kurczący się zasięg lodu morskiego na Oceanie Arktycznym powodują istotne zmiany warunków klimatycznych, a tym samym warunków siedliskowych i wzrostu radialnego krzewinek tundrowych w Arktyce. **Najważniejsze odkrycie dotyczy** wykazania istotnych statycznie spadków dostępnej wilgoci do wzrostu krzewinek postępujących wraz z zanikiem pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego w wybranych lokalizacjach Arktyki. W pracy [A3] wykazałam, że ta zależność może hamować

pozytywne efekty ocieplenia klimatu na wzrost radialny krzewinek tundrowych w wielu miejscach w Arktyce, komplikując w ten sposób prognozy zmian wzrostu roślinności tundrowej i przyszłej produktywności tundry.

**[A4] Buchwał A., Bret-Harte M.S., Bailey H., Welker J.M. (2023) From intra-plant to regional scale: June temperatures and regional climates directly and indirectly control *Betula nana* growth in Arctic Alaska. *Ecosystems* 26(3), 491-509, doi: 10.1007/s10021-022-00771-8**

W trakcie prowadzonych badań dendroklimatycznych w różnych regionach Arktyki poszerzała się moja lista pytań i koncepcji uszczegółowienia otrzymywanych wyników analiz klimat-wzrost krzewinek tundrowych. Z uwagi na jakże odmienną formę wzrostu krzewinek (często płożących się, z nieregularną formą wielu pędów nadziemnych) w stosunku do drzew wykształcających zazwyczaj jeden pień - postanowiłam rozwinąć zakres analiz dendrochronologicznych. Rozwinięcie to dotyczyło konstrukcji oraz analizy chronologii przyrostowych reprezentujących wzrost radialny poszczególnych części roślin (tj. pędy nadziemne *versus* podziemne roślin). Badania przeprowadziłam, wraz z zespołem, na krzewinkach *Betula nana* w północnej Alasce, w otoczeniu *Toolik Lake* (68°N).

Krzewinki tundrowe w szerokości słoików przyrostowych zapisują wrażliwość klimatyczną, a ta określana jest zazwyczaj na podstawie przyrostu radialnego i pomiarów szerokości słoików z podstawy głównego pędu nadziemnego. Chronologie przyrostowe konstruowane dla poszczególnych części krzewinek, takich jak pędy podziemne *versus* pędy nadziemne, są bardzo rzadko używane w badaniach klimat-wzrost (Ropars et al., 2017). Równie rzadko chronologie krzewinek tundrowych są implementowane do badań klimatu w skali ponadregionalnej. W opracowaniu [A4] podjęłam, wraz z zespołem, próbę zniwelowania tych luk w wiedzy, analizując wpływ klimatu w skali regionalnej i ponadregionalnej na wzrost krzewinek *Betula nana* w północnej Alasce. Zależności te określiłam dla dwóch siedlisk *Betula nana* w północnej Alasce zróżnicowanych pod względem warunków wilgotnościowych i zmarzlinowych. Dla każdego siedliska skonstruowano pięć chronologii przyrostowych reprezentujących daną część krzewinki.

W pracy [A4] postawiłam następujące **pytania badawcze**:

1) Jakie są zależności między klimatem a wzrostem radialnym *Betula nana* w północnej Alasce i jak te zależności różnią się pomiędzy krzewinkami rosnącymi w siedlisku suchym i wilgotnym? Postawiłam hipotezę, że krzewinki z siedliska suchego są mniej wrażliwe na temperaturę powietrza okresu letniego niż krzewinki z siedliska wilgotnej tundry, ponieważ ich wzrost jest bardziej ograniczony dostępną wilgotnością, a nie temperaturą powietrza;

2) Czy reakcja słoików wzrostu *Betula nana* na klimat różni się w zależności od części/organu rośliny, to znaczy między chronologią skonstruowaną ze słoików wykształconych w obrębie nadziemnych w odróżnieniu od podziemnych części krzewinki? Postawiłam hipotezę, że wzrost radialny i jego reakcja na warunki klimatyczne w podziemnych i nadziemnych częściach roślin nie jest idealnie sprzężony i homogeniczny, ze względu na potencjalne różnice w alokacji wzrostu pomiędzy pędami podziemnymi i nadziemnymi w trakcie sezonu wegetacyjnego;

3) Czy słoje *Betula nana* są odpowiednim *proxy* (tj. wskaźnikiem pośrednim) lokalnego i/lub regionalnego klimatu? Założyłam, że poprzez potencjalne sprzężenie między lokalnymi i pan-arktycznymi zjawiskami klimatycznymi (takimi jak indeks PDO (tj. Dekadowa Oscylacja

Pacyficzna), AO (tj. Oscylacja Arktyczna) czy zasięg lodu morskiego), chronologie słoju przyrostowych *Betula nana* są odpowiednim *proxy* klimatu w skali regionalnej.

W badaniu użyłam po 30 krzewinek *Betula nana* z siedliska wilgotnego i suchego. Stosując seryjne próbkowanie w każdym siedlisku przeanalizowałam odpowiednio 161 (siedlisko suche) i 104 (siedlisko wilgotne) przekroje poprzeczne krzewinek. Chronologie przyrostowe skonstruowałam dla następujących części krzewinek: górna część korzenia (przekroje poprzeczne roślin pobrane w poletku suchym i wilgotnym odpowiednio do 20 i 10 cm poniżej szyjki korzeniowej, tzw. chronologia 'Root'), dolna część korzenia (tj. przekroje pobrane odpowiednio od 20 i 10 cm poniżej szyjki korzeniowej, tzw. 'Root2'), podstawa głównego pędu nadziemnego (pobrana tuż powyżej szyjki korzeniowej w obu siedliskach, tzw. 'Stem'), dolna część pędów nadziemnych (tj. do 20 cm wysokości pędu w obu siedliskach, tzw. 'Branch') oraz górna część pędów nadziemnych (przekroje pobrane powyżej 20 cm wysokości pędu w obu siedliskach, tzw. 'Branch2'). Do analiz klimat-wzrost (1989-2014) użyłam, oprócz miesięcznych danych klimatycznych, również dane (tj. średnia temperaturę powietrza i sumy opadów pomierzone na stacji *Toolik Research Station*, tj. < 1 km od badanych siedlisk).

Kierowane przez mnie badania w ramach pracy [A4] wykazały:

- 1) Wzrost radialny *Betula nana* w obu siedliskach były przede wszystkim pozytywnie zależny od średniej temperatury powietrza w czerwcu. Ta dodatnia zależność wyniosła  $r = 0,68$  (przedziały ufności (CI) = [0,39;0,84]) dla krzewinek *Betula nana* z siedliska suchego i  $r = 0,67$  (CI = [0,52;0,80]) dla krzewinek z siedliska wilgotnego. Siła tych relacji wzrosła nieznacznie przy wyższej sumie temperatur efektywnych (GDD, ang. *growing degree days*) w czerwcu, przy czym największy wzrost radialnym *Betula nana* zaobserwowano w siedlisku suchym przy  $GDD > 7\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $r = 0,73$ ;  $P < 0,05$ ) oraz w siedlisku wilgotnym przy  $GDD > 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $r = 0,72$ ;  $P < 0,05$ ). Określiłam, przy udziale modeli prosta regresji liniowej (okres badań: 1989-2014), że na każdy wzrost temperatury powietrza w czerwcu o  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  szerokość słoju przyrostowych krzewinek *Betula nana* (chronologia indeksowana) wzrasta o 11,1% (SE = 3%) i 12,2% (SE = 3%) odpowiednio dla stanowiska suchego i wilgotnego;
- 2) Zależność pomiędzy wzrostem radialnym *Betula nana* a temperaturą powietrza w czerwcu dla siedliska suchego jest nieliniowa. Wykazałam, że przy wyższych wartościach temperatury powietrza w czerwcu siła korelacji między wzrostem radialnym *Betula nana* a temperaturą w czerwcu zaczyna spadać przy temperaturach  $GDD > 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  w siedlisku suchym, podczas gdy korelacja ta jest nadal wysoka i stabilna dla krzewinek rosnących w siedlisku wilgotnym dla  $GDD > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $r = 0,72$ ,  $P < 0,05$ );
- 3) Większość chronologii skonstruowanych dla danych części krzewinek (tj. pędy nadziemne *versus* podziemne) wykazała najsilniejszą korelację ze średnią dobową temperaturą powietrza w okresie między 8 a 20 czerwca. Najsilniejszą statystycznie zależność pomiędzy wzrostem radialnym krzewinek a temperaturą powietrza wykazano dla chronologii wzrostu górnej części pędów nadziemnych w poletku suchym ( $r = 0,78$ ;  $P < 0,05$ ) dla okresu połowy czerwca ( $DOY = 167$ , tj. 16 czerwca; ang. *DOY, day-of-the-year*). Dla poletka wilgotnego najwyższą korelację uzyskałam również dla chronologii wzrostu górnej części pędów nadziemnych ( $r = 0,75$ ;  $P < 0,05$ ) dla  $DOY = 160$ , tj. okresu 9 czerwca. Dodam, że obie wartości współczynnika korelacji są najwyższymi, jakie udało mi się uzyskać we wszystkich dotychczasowych analizach dendroklimatycznych krzewinek w obrębie tundry arktycznej;

- 4) Dodatkowo, obie chronologie wzrostu pędów podziemnych (tj. 'Root' i 'Root2') z siedliska wilgotnego były dodatnio skorelowane ze średnią dobową temperaturą powietrza pod koniec czerwca poprzedniego roku (chronologia 'Root2':  $r = 0,57$ ;  $P < 0,05$ ; pDOY = 173);
- 5) Wzrost radialny krzewinek *Betula nana* w północnej Alasce jest pośrednio powiązany z klimatem w skali pan-regionalnej, w tym z zasięgiem zlodzenia Morza Beauforta oraz indeksami oscylacji atmosferycznej, tj. indeksem AO i PDO. Modelowanie równań strukturalnych (SEM) wykazało złożone relacje pomiędzy lokalną (tj. tą zarejestrowaną w okolicy Toolik Lake) temperaturą powietrza w okresie letnim (czerwiec-sierpień), klimatem regionalnym a wzrostem radialnym krzewinek *Betula nana*. Wzrost radialny *Betula nana* w siedlisku suchym był pozytywnie zależny od średniej temperatury powietrza latem (czerwiec-sierpień) ( $\beta = 0,53$ ;  $P = 0,003$ ; gdzie  $\beta$  - oszacowanie parametru modelu,  $P$  - poziom istotności statystycznej). Temperatura powietrza latem w okolicy Toolik Lake była negatywnie zależna od zasięgu paku lodowego na Morzu Beauforta w okresie letnim ( $\beta = -0,31$ ;  $P = 0,050$ ) jak i w okresie jesieni (tj. wrzesień-listopad poprzedniego roku kalendarzowego) ( $\beta = -0,36$ ;  $P = 0,023$ ). Dodatkowo, wykazano pozytywny wpływ indeksu PDO ( $\beta = 0,32$ ;  $P = 0,022$ ) i indeksu AO ( $\beta = 0,47$ ;  $P = 0,001$ ) latem (tj. czerwiec-sierpień) na zasięg pokrywy lodowej Morza Beauforta w okresie letnim.

W pracy [A4] wykazałam, że wzrost radialny krzewinek *Betula nana* zarówno z siedliska suchego jak i wilgotnego jest ujemnie skorelowany z indeksem suszy SPEI dla okresu letniego (czerwiec-sierpień). Sugeruje to, że wzrost radialny *Betula nana* nie był ograniczony dostępnością wilgoci w analizowanym okresie badań (1989-2014). Badania wykazały zatem heterogeniczny charakter zmian klimatu w Arktyce. Już w poprzednich badaniach sygnalizowano (Hobbie et al., 2017), iż trendy zmian temperatury powietrza dla obszaru Toolik Lake dla okresu (1989-2014) nie są istotne statystycznie. Zatem warunki wzrostu dla krzewinek *Betula nana* w otoczeniu Toolik Lake mogą być stosunkowo bardziej stabilne niż w innych regionach Arktyki, gdzie ocieplenie klimatu jest bardziej widoczne, tj. charakteryzowane jest przez istotne statystycznie trendy wzrostu temperatur powietrza i zmiany sum opadów.

Jednakże, nasze badania wykazały spadek korelacji pomiędzy wzrostem radialnym *Betula nana* a wyższą temperaturą powietrza w czerwcu. W siedlisku suchym ten spadek korelacji zaznaczył się wraz z temperaturą GDD  $> 8$  °C, natomiast w siedlisku wilgotnym próg ten wyniósł GDD  $> 10$  °C. Nasze wyniki wskazują, że przy cieplejszym klimacie temperatura czerwca może stać się czynnikiem limitującym wzrost krzewinek w pierwszej kolejności w siedlisku suchym, w którym to ilość dostępnej wilgoci jest ograniczona. Zatem pomimo dużej spójności wyników i pozytywnej odpowiedzi wzrostu radialnego *Betula nana* na temperaturę powietrza w czerwcu w obu siedliskach, przyszłe badania nie powinny pomijać znaczenia ilości dostępnej wilgoci dla wzrostu krzewinek na tundrze.

**Jednym z najważniejszych wyników pracy [A4]** jest wykazanie silnej zależności wzrostu radialnego *Betula nana* w północnej Alasce (w tym chronologii zarówno pędów nadziemnych jak i podziemnych) od temperatury powietrza wczesnej fazy wegetacji (tj. połowy czerwca). Fakt ten wskazuje na wysoce skoordynowaną alokację zasobów do wzrostu tkanki i promocji przyrostu radialnego, co może zwiększyć przewagę tego gatunku nad innymi gatunkami krzewinek tundrowych w szybko zmieniającym się klimacie arktycznym.



[A5] Buchwał A., Rachlewicz G., Heim B., Juhls B. (2023) **Trees on the tundra: warmer climate might not favor prostrate *Larix* tree but *Betula nana* shrub growth in Siberian tundra (Lena River Delta)**. *Agricultural and Forest Meteorology* 339, 109543. doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109543

Tundra jest przede wszystkim siedliskiem krzewinek, a nie drzew, ale sporadycznie w literaturze znajdujemy informacje o wzroście drzew w subarktycznym regionie tundry (Abaimov, 2010; Kharuk et al., 2006; Kruse et al., 2020). W świetle zachodzących zmian klimatu badania wrażliwości klimatycznej wzrostu radialnego tych najdalej na Północ rosnących drzew są niezbędne do przewidywania 1) tempa potencjalnej ekspansji gatunków drzew lasu borealnego/tajgi na północne krańce kontynentów i 2) ich koegzystencji, tj. współwystępowania i ew. konkurencji z krzewinkami na tundrze.

W pracy [A5] przeanalizowałam wpływ współczesnych zmian klimatu na wzrost radialny krzewinek *Betula nana* oraz gatunku karłowatego drzewa *Larix dahurica* z obszaru tundry zlokalizowanego w południowej części delty rzeki Leny, Północna Jakucja, Syberia. Praca jest pierwszym opracowaniem porównawczym wzrostu radialnego gatunku krzewinki tundrowej wraz ze współwystępującym gatunkiem karłowatego drzewa rosnącym na tundrze. Przyczynkiem do takiej analizy porównawczej było odkrycie przez nasz zespół ekspedycyjny pojedynczej kohorty karłowatych drzew *Larix dahurica* rosnących w strefie tundry (72°17'N), tj. 60 km na północ od północnej linii drzew, której przebieg obecna literatura wyznacza na północnych rubieżach kontynentu azjatyckiego.

**Pytania badawcze** zrealizowane w niniejszej pracy to:

- 1) Jaka jest wrażliwość klimatyczna dwóch powszechnie występujących gatunków roślin drzewiastych rosnących na subarktycznej tundrze, tj. gatunku drzewa borealnego - karłowatego modrzewia (*Larix* Mill.) i brzozy karłowatej (*Betula nana* L.)?
- 2) Czy wrażliwość klimatyczna tych dwóch współwystępujących gatunków roślin drzewiastych zmienia się pod wpływem współczesnych zmian klimatycznych?

W pracy postawiono następującą hipotezę: wzrost radialny obu gatunków jest dodatnio skorelowany z temperaturą okresu letniego oraz wzrost radialny obu gatunków wzrasta wraz z postępującym ociepleniem klimatu. Zmiany czynników klimatycznych w tym artykule zostały prześledzone dla obszaru badań (południowa część delty rzeki Leny) dla wspólnego (dla obu gatunków) okresu 1980-2017 dla następujących zmiennych: temperatura powietrza i opady okresu letniego (tj. od czerwca do sierpnia), uśredniona trzymiesięczna wartość wskaźnika standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego SPEI (ang. *Standardized Precipitation Evaporation Index*) dla okresu od lipca do września.

Kierowane przez mnie badania w ramach pracy [A5] wykazały:

- 1) Czynniki klimatyczne, a tym samym warunki wzrostu roślin drzewiastych, uległy zmianie na badanym obszarze i kształtowały się następująco: a) wzrost średniej temperatury powietrza latem dla okresu badań 1980-2017 był istotny statystycznie ( $\alpha = 0,05$ ;  $r^2 = 0,15$ ;  $P = 0,016$ ); b) zmiany sum opadów letnich (tj. czerwiec-sierpień) nie były istotne statystycznie, ale zaobserwowano zmniejszającą się ilość opadów w ostatnich latach; c) wykazano statystycznie istotny wzrost suchości klimatu obszaru badań, co wyraża się spadkiem wartości SPEI (uśrednionym dla okresu trzech miesięcy, tj. lipiec-wrzesień);
- 2) Wzrost radialny obu badanych gatunków roślin drzewiastych (tj. krzewinek i drzew) był pozytywnie skorelowany ze średnią temperaturą powietrza w lipcu, jednak

zależność ta była stabilna w całym okresie badań (1980-2017) tylko dla chronologii *Betula nana*;

- 3) W ostatnich dwóch dekadach zauważono słabnącą zależność pomiędzy wzrostem radialnym drzew *Larix dahurica* na tundrze a temperaturą powietrza w lipcu. Jednocześnie w tym samym okresie wykazano, że wzrost radialny drzew tego gatunku jest ujemnie skorelowany z i) temperaturą powietrza poprzedniego lata (czerwiec-sierpień), oraz ii) pozytywnie skorelowany z warunkami wilgotnościowymi gleby. Wykazano, iż wzrost drzew *Larix dahurica* na tundrze w ostatnich latach jest pozytywnie skorelowany z wilgotnością objętościową gleby (źródło danych: *ERA5-Land*) w czerwcu oraz z miąższością ekwiwalentu wody (źródło danych: *GRACE*) w lipcu roku poprzedzającego wzrost drzew;
- 4) Zależność wzrostu radialnego od warunków wilgotnościowych w ostatnim latach pomiędzy drzewami *Larix* i krzewami *Betula nana* była przeciwstawna, przy czym generalnie wilgotniejsze warunki glebowe sprzyjały wzrostowi drzew *Larix* na tundrze, a warunki suchsze i cieplejsze sprzyjały wzrostowi krzewinek *Betula nana*;
- 5) W przeciwieństwie do drzew *Larix*, wzrost radialny krzewinek *Betula nana* był dodatnio skorelowany z temperaturą powietrza w lipcu przez cały okres badań bez oznak potencjalnego stresu wilgociowego, przynajmniej na obecnym etapie.

Podsumowując, z naszych badań wynika, że wzrost radialny drzew *Larix* w ostatnich latach jest bardziej wrażliwy na warunki wilgotnościowe niż na temperatury powietrza latem, podczas gdy wrażliwość krzewinek *Betula nana* na temperaturę powietrza (w tym głównie lipca) jest stabilna w czasie. **Jednym z najważniejszych wyników pracy [A5]** jest wykazanie wyższej odporności krzewinek *Betula nana* na cieplejszy i bardziej suchy klimat w porównaniu do drzew *Larix* rosnących na tundrze. Ta wyższa odporność krzewinek *Betula nana* będzie promować ich wzrost w tej części Arktyki w warunkach postępujących zmian klimatycznych.

Nasze badanie sugeruje, że drzewom z gatunku *Larix dahurica*, tj. najbardziej rozprzestrzenionym na północ i prawdopodobnie najbardziej odpornym na zimno gatunkowi drzew na Półkuli Północnej nie zagraża obecnie zimno (tj. niskie temperatury latem), ale raczej suche warunki i niedobór potrzebnej do wzrostu wilgoci. Warto zauważyć, że średni wiek badanych przeze mnie osobników *Larix* był znacznie młodszy niż we wcześniejszych badaniach tego gatunku przeprowadzonych na północnej (syberyjskiej) linii drzew, co może wskazywać, że badana kohorta drzew reprezentuje wczesny etap sukcesji drzew borealnych w biomie tundry, którego wzrost radialny, w warunkach współczesnych zmian klimatycznych, jest ograniczany niedoborem wilgoci.

#### **4.2.5. Podsumowanie**

Przeprowadzone przeze mnie badania umożliwiły zarówno czasową jak i przestrzenną analizę zmienności sygnału dendrochronologicznego krzewinek tundrowych w odniesieniu do zmieniającego się klimatu w Arktyce. Z uwagi na średni wiek krzewinek, analizy objęły okres 100 lat (wyspa Disko, zachodnia Grenlandia, [A2]) oraz od około 60 do 30 lat w pozostałych badanych obszarach [A1, A3, A4, A5]. W szczególności, w ramach przedstawianego osiągnięcia:

- w aspekcie metodycznym wykazałam, że wzrost radialny *Salix polaris* w centralnej części Spitsbergenu jest wysoce nieregularny, co może być problematyczne przy konstrukcji chronologii tego gatunku i analizach klimat-wzrost. Blisko jedna czwarta

analizowanych przyrostów *Salix polaris* stanowiła przyrosty całkowicie lub częściowo brakujące [A1]. Liczby te mogą stanowić poważne ograniczenie w konstrukcji chronologii przyrostowej krzewinek arktycznych i fakt ten winien być brany pod uwagę w planowaniu przyszłych badań dendrochronologicznych tego gatunku, jak i innych gatunków krzewinek rosnących w wysokiej Arktyce. Wykazałam, że w celu konstrukcji chronologii przyrostowej tego gatunku wymagane jest seryjne próbkowanie oraz szczegółowe badanie krzyżowe oraz pomiary przyrostów rocznych krzewinek wykonane na barwionych przezroczach mikroskopowych [A1, A1a]. W osiągnięciu wykazałam również, że mimo silnie nieregularnego wzrostu radialnego możliwe jest skonstruowanie ponad stuletniej chronologii przyrostowej *Betula nana* z obszaru zachodniej Grenlandii [A2], charakteryzującej się wysoką wrażliwością na zmiany klimatu. Wykazałam, że dla wielu obszarów w Arktyce (tj. tam, gdzie rosną krzewinki tundrowe), **możliwe jest prześledzenie wpływu zmian klimatu na wzrost krzewinek tundrowych w wysokiej rozdzielczości (tj. rocznej) słoju przyrostowych**. W ramach osiągnięcia skonstruowałam dla nauki pierwsze chronologie przyrostowe *Betula nana* dla obszaru Grenlandii [A2], Alaski [A4] i delty rzeki Leny [A5]. Dodatkowo, w ramach syntezy [A3] udostępniłam autorską chronologię *Salix arctica* z Peary Land (N Grenlandia), będącą (według mojej wiedzy) drugą najdalej na Północ skonstruowaną chronologią przyrostową krzewinek (tj. 82°N) (cf. Weijers et al., 2017).

- na podstawie badań szczegółowych przeprowadzonych w wybranych lokalizacjach Arktyki wykazałam pozytywny wpływ temperatury powietrza okresu letniego na wzrost radialny krzewinek w: centralnym Spitsbergenie (*Salix polaris*) [A1], wyspie Disko (zachodnia Grenlandia, *Betula nana*) [A2], północnej Alasce (*Betula nana*) [A4] oraz w delcie rzeki Leny (północna Syberia, *Betula nana*) [A5]. Dodatkowo dla krzewinek *Betula nana* z wyspy Disko określiłam pozytywny wpływ ocieplenia zimy na wzrost radialny krzewinek [A2]. Zwróciłam tym samym uwagę społeczności naukowej na istotne znaczenie warunków termiczno-pluwialnych okresu uśpienia (ang. *dormant season*), tj. okresu poprzedzającego okres wegetacji na wzrost radialny krzewinek. Poprzez pracę [A2] zasygnalizowałam **ważność całościowego spojrzenia na zmiany klimatu, które nie ograniczają się jedynie do ocieplenia okresu letniego** i fakt ten winien być wzięty pod uwagę w badaniach klimat-wzrost radialny krzewinek;
- określiłam wpływ zmniejszającej się pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego i sprzężonych z nią zmieniających się warunków klimatycznych na przyrost roczny krzewinek tundrowych z gatunku *Salix* i *Betula* w skali całego obszaru Arktyki [A3]. Wyniki naukowe pracy [A3] stały się, w moim odczuciu, cennym głosem w globalnej dyskusji na temat wpływu współczesnych zmian klimatu na ekosystem tundry arktycznej. W pracy [A3] wykazałam, że zmniejszający się zasięg lodu morskiego na Oceanie Arktycznym powoduje istotne zmiany warunków klimatycznych, a tym samym warunków siedliskowych i wzrostu radialnego krzewinek tundrowych w całej Arktyce. Skwantyfikowałam, że od połowy lat 90. XX wieku w Arktyce występuje rozbieżność wzrostu radialnego krzewinek tundrowych stowarzyszona z zanikającym zasięgiem pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego, rosnącymi temperaturami powietrza i stresem suszy. Wykazałam, że 39% badanych chronologii krzewinek tundrowych charakteryzowały malejące wartości wzrostu radialnego. Określiłam istotne statystycznie spadki dostępnej wilgoci dla wzrostu krzewinek postępujące wraz z zanikiem pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego w wybranych lokalizacjach Arktyki. Wskazałam na rosnącą rolę dostępnej wilgoci dla wzrostu krzewinek tundrowych. Poprzez syntezę [A3] oraz pracę [A4] wskazałam również jak ważny jest udział badań interdyscyplinarnych i

klimatu ponadregionalnego (np. warunków zlodzenia Oceanu Arktycznego czy indeksów oscylacji atmosferycznej AO, PDO) w rozpoznaniu uwarunkowań wzrostu radialnego krzewinek w ekosystemie tundry arktycznej. Niniejszym, zwróciłam uwagę na **silną potrzebę łączenia badań klimatycznych** (zarówno tych prowadzonych w skali regionalnej jak i ponadregionalnych) **z badaniami z zakresy ekologii lądowych ekosystemów arktycznych**, w tym badań dendrochronologicznych krzewinek tundrowych. Moim skromnym zdaniem, rozwój badań interdyscyplinarnych zwiększa szanse na odkrycia w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, a **badania dendroklimatyczne prowadzone w obszarach polarnych** stanowią ważny wkład w **rozwój dyscypliny nauk o Ziemi i środowisku**. To interdyscyplinarne podejście zastosowane w pracy [A3] umożliwiło mi zbadanie **interakcji elementów biotycznych i abiotycznych**, kluczowych dla funkcjonowania Arktyki.

- dominującą rolę temperatury powietrza okresu letniego w kształtowaniu wzrostu radialnego poszczególnych części krzewinek tundrowych (tj. pędy podziemne i nadziemne) wykazałam konstruując chronologie przyrostowe reprezentujące pięć głównych części roślin *Betula nana* w północnej Alasce [A4]. Pozytywny wpływ temperatury powietrza okresu letniego potwierdziłam dla krzewinek z siedliska suchego i wilgotnego, z zastrzeżeniem, że wraz z temperaturą  $GDD > 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  wzrost radialny krzewinek *Betula nana* w siedlisku suchym będzie malał. W siedlisku wilgotnym próg ten wyniósł  $GDD > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tj. powyżej tego progu termicznego zaobserwowałam spadek przyrostu radialnego *Betula nana* w obrębie siedliska wilgotnego. Wskazałam tym samym na **ważną rolę wykorzystania analiz dendrochronologicznych w prognozowaniu zmian środowiskowych obszarów polarnych** w świetle zmieniających się warunków klimatycznych;
- przy zastosowaniu dziennych danych temperatury powietrza w analizie klimat-wzrost dla północnej Alaski, określiłam precyzyjnie, która część okresu letniego ma największy wpływ na kształtowanie się przyrostu rocznego *Betula nana*. W północnej Alasce większość chronologii skonstruowanych dla danych części krzewinek (tj. pędy nadziemne *versus* podziemne) wykazała najsilniejszą korelację ze średnią dobową temperaturą powietrza w okresie między 8 a 20 czerwca [A4]. Wskazałam na **potencjał użycia dziennych danych meteorologicznych** w badaniach wrażliwości klimatycznej krzewinek **dla lepszego zrozumienia reakcji lądowych ekosystemów tundry na zachodzące zmiany klimatu**;
- dodatkowo, przeprowadzona przeze mnie porównawcza analiza klimat-wzrost wykonana między karłowatymi drzewami *Larix* a krzewinkami *Betula nana* w północnej Syberii (delta rzeki Lena) wykazała wyższą odporność krzewinek *Betula nana* na cieplejszy i bardziej suchy klimat w porównaniu z drzewami *Larix* rosnących na tundrze [A5]. W świetle tych wyników wzrost radialny krzewinek, nie drzew, będzie promowany w tej części Arktyki w warunkach postępujących zmian klimatycznych. Wykazałam, że klasyczne badania dendrochronologiczne (tj. te prowadzone na żyjących drzewach) mogą być zastosowane w obszarze Arktyki. Opracowanie [A5] jest **pierwszym przykładem synergijnych badań dendrochronologicznych przeprowadzonych w Arktyce zarówno na karłowatych drzewach jak i na krzewinkach tundrowych** w odniesieniu do postępujących zmian klimatu. Niniejszym, w osiągnięciu wskazałam na cenne zastosowanie analiz dendrochronologicznych **w badaniach biogeograficznych** prowadzonych w obrębie północnej granicy lasów.

Pomimo, że badania przeprowadziłam w kilku miejscach w Arktyce, w obszarach polarnych na każdym kontynencie Półkuli Północnej, chciałabym wskazać, iż wypracowane prawidłowości klimat-wzrost odnoszą się do analizowanych przedziałów czasowych i lokalizacji. Dla pełniejszego zrozumienia reakcji krzewinek tundrowych na współczesne zmiany klimatu, wymagane byłoby przeprowadzenie badań wrażliwości klimatycznej pozostałych gatunków krzewinek powszechnie występujących w Arktyce. Szczególnie, w ramach pracy [A1, A1a - tu w aspekcie metodycznym] oraz syntezy [A3 - tu w aspekcie zmiennych klimatycznych] wypracowałam swego rodzaju protokół, który może być zastosowany w badaniach zarówno pozostałych gatunków krzewinek tundrowych jak i pozostałych (tj. nie ujętych w syntezie) lokalizacji w Arktyce.

Wskazane jest, aby przyszłe badania rozwinąć o analizę współwystępujących na tundrze gatunków krzewinek pochodzących z siedlisk o różnym typie gleb, wilgotności czy zmiennej miąższości warstwy czynnej wieloletniej zmarzliny. W przyszłych analizach klimat-wzrost zalecane byłoby również dodanie zmiennych klimatycznych w skali synoptycznej w celu rozpoznania związku przyczynowego, ale często pośredniego, w relacjach między zmieniającym się klimatem a wzrostem radialnym krzewinek w danym obszarze tundry. Wskazane byłoby również użycie dziennych danych klimatycznych (co pokazałam w pracy [A4] i [A5]) celem szczegółowszego rozpoznania reakcji przyrostowych krzewinek na zmieniające się warunki klimatyczne.

Cenne byłoby również uaktualnienie badań w lokalizacjach, dla których skonstruowano już chronologie przyrostowe, ale nie przeprowadzono analiz klimat-wzrost w okresie ostatnich lat, w których to wzrost temperatury powietrza jest kontynuowany lub najwyższy w historii pomiarów instrumentalnych (Isaksen et al., 2016; Nordli et al., 2014; Przybylak and Wyszyński, 2020; Wawrzyniak and Osuch, 2020). Zadanie to wymagałoby uaktualnienia chronologii (tj. przedłużenia) i dodania najbardziej współczesnych lat do chronologii przyrostowej krzewinek skonstruowanych dla przeanalizowanych w ramach osiągnięcia lokalizacji w Arktyce.

**Wszystkie chronologie** przyrostowe krzewinek (wraz z jedną chronologią karłowatego drzewa) utworzone w ramach przedkładanego osiągnięcia **udostępniłam** do publicznego użytku dla celów naukowych zgodnie z polityką **otwartej nauki**. Wszystkie chronologie z syntezy [A3] udostępniłam na platformie *Dryad* (Buchwał et al. (2020), Data from: Divergence of Arctic shrub growth associated with sea ice decline, *Dryad*, Dataset, <https://doi.org/10.5061/dryad.kh1893248>). W repozytorium *Dryad* zdeponowałam cztery autorskie chronologie (ang. *raw chronologies*) z następujących lokalizacji opisanych w osiągnięciu naukowym: centralny Spitsbergen, zachodnia Grenlandia (Disko Island), północna Grenlandia (Peary Land) oraz północna Alaska, Toolik Lake.

Dodatkowo, w repozytorium *the International Tree-Ring Data Bank* (ITRDB) udostępniłam surowe dane pojedynczych krzywych wzrostu krzewinek oraz chronologię *Betula nana* z obszaru Toolik Lake (północna Alaska) z siedliska suchego (<https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/36434>) oraz wilgotnego (<https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/36433>). W ITRDB udostępniłam również krzywe wzrostu krzewinek *Betula nana* z północnej Syberii (delta rzeki Leny) wraz z chronologią (<https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/38186>) oraz krzywe wzrostu karłowatych drzew *Larix* wraz z chronologią (<https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/38187>).

#### **4.2.6. Literatura**

- Abaimov, A.P., 2010. Geographical Distribution and Genetics of Siberian Larch Species, in: Osawa, A., Zyryanova, O.A., Matsuura, Y., Kajimoto, T., Wein, R.W. (Eds.), *Permafrost Ecosystems: Siberian Larch Forests, Ecological Studies*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 41–58. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9693-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9693-8_3)
- Arażny, A., Kejna, M., Wawrzyniak, T., Osuch, M., Plenzler, J., Budzik, T., 2021. Zmiany klimatu w ekosystemach Arktyki i Antarktyki. *Kosm. Ser. Biol. Pol. Tow. Przyr. Im Kopernika* 70, 579–595. [https://doi.org/10.36921/kos.2022\\_2836](https://doi.org/10.36921/kos.2022_2836)
- Bednarz, Z., Muter, E., 2010. Pionierska chronologia świerka *Picea abies* (L.) H. Karst. z Tatr Polskich autorstwa Profesora Karola Ermicha we współczesnym ujęciu metodycznym. *Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem*, tom II – Zakopane 2010.
- Beschel, R.E., Webb, D., 1963. Growth ring studies on arctic willows. *Muller F Ed Axel Heiberg Isl. Prelim. Rep. 1961-1962 McGill Univ. Montr.* 189–198.
- Billings, W.D., 1987. Constraints to Plant Growth, Reproduction, and Establishment in Arctic Environments. *Arct. Alp. Res.* 19, 357–365. <https://doi.org/10.1080/00040851.1987.12002616>
- Billings, W.D., Mooney, H.A., 1968. The Ecology of Arctic and Alpine Plants. *Biol. Rev.* 43, 481–529. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.1968.tb00968.x>
- Blok, D., Heijmans, M.M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C., Berendse, F., 2010. Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Glob. Change Biol.* 16, 1296–1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
- 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. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1169-2011>
- Buchwał, A., Weijers, S., Blok, D., Elberling, B., 2019. Temperature sensitivity of willow dwarf shrub growth from two distinct High Arctic sites. *Int. J. Biometeorol.* 63, 167–181. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1648-6>
- Cedro, A., 2001. Dependence of radial growth of *Pinus sylvestris* L. From western Pomerania on the rainfall and temperature conditions. *Geochronometria* 20, 69–74.
- Chapin, F.S., Sturm, M., Serreze, M.C., McFadden, J.P., Key, J.R., Lloyd, A.H., McGuire, A.D., Rupp, T.S., Lynch, A.H., Schimel, J.P., Beringer, J., Chapman, W.L., Epstein, H.E., Euskirchen, E.S., Hinzman, L.D., Jia, G., Ping, C.-L., Tape, K.D., Thompson, C.D.C., Walker, D.A., Welker, J.M., 2005. Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming. *Science* 310, 657–660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
- Feliksik, E., Wilczynski, S., 1996. Dendrochronologiczna charakterystyka sosny zwyczajnej [*Pinus sylvestris* L.] z Kotliny Kłodzkiej i Karpat. *Sylwan* 140, 77–84.
- Forbes, B.C., Bölter, M., Müller-Wille, L., Hukkinen, J., Müller, F., Gunsley, N., Konstantinov, Y., 2006. Reindeer management in northernmost Europe: linking practical and scientific knowledge in social-ecological systems. Springer.
- Forbes, B.C., Fauria, M.M., Zetterberg, P., 2010. Russian Arctic warming and ‘greening’ are closely tracked by tundra shrub willows. *Glob. Change Biol.* 16, 1542–1554. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02047.x>
- Forchhammer, M., 2017. Sea-ice induced growth decline in Arctic shrubs. *Biol. Lett.* 13, 20170122. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0122>
- 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 Phytol.* 186, 890–899. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03223.x>
- Harris, I.C., Jones, P.D., 2019. CRU TS4.02: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.02 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2017). <https://doi.org/10.5285/B2F81914257C4188B181A4D8B0A46BFF>
- Hobbie, J.E., Shaver, G.R., Rastetter, E.B., Cherry, J.E., Goetz, S.J., Guay, K.C., Gould, W.A., Kling, G.W., 2017. Ecosystem responses to climate change at a Low Arctic and a High Arctic long-term research site. *Ambio* 46, 160–173. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0870-x>
- Isaksen, K., Nordli, Ø., Førland, E.J., Łupikasza, E., Eastwood, S., Niedźwiedz, T., 2016. Recent warming on Spitsbergen—Influence of atmospheric circulation and sea ice cover. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 121, 11,913-11,931. <https://doi.org/10.1002/2016JD025606>

- Kaczka, R.J., Spyt, B., Janecka, K., Beil, I., Büntgen, U., Scharnweber, T., Nievergelt, D., Wilmking, M., 2018. Different maximum latewood density and blue intensity measurements techniques reveal similar results. *Dendrochronologia* 49, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.03.005>
- Kharuk, V.I., Ranson, K.J., Im, S.T., Naurzbaev, M.M., 2006. Forest-tundra larch forests and climatic trends. *Russ. J. Ecol.* 37, 291–298. <https://doi.org/10.1134/S1067413606050018>
- Kolishchuk, V., 1990. Dendroclimatological study of prostrate woody plant, in: *Methods of Dendrochronology Applications in the Environmental Sciences*. In: Cook E.R., Kairiukstis L.A. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 51–55.
- Koprowski, M., Zielski, A., 2006. Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. *Trees* 20, 383–390. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0051-9>
- Krąpiec, M., Zielski, A., 2004. *Dendrochronologia*.
- Kruse, S., Kolmogorov, A.I., Pestryakova, L.A., Herzschuh, U., 2020. Long-lived larch clones may conserve adaptations that could restrict treeline migration in northern Siberia. *Ecol. Evol.* 10, 10017–10030. <https://doi.org/10.1002/ece3.6660>
- Landerer, F.W., Swenson, S.C., 2012. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water Resour. Res.* 48, W04531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011453>
- Lefcheck, J.S., 2016. piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods Ecol. Evol.* 7, 573–579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Malik, I., Wistuba, M., 2012. Dendrochronological methods for reconstructing mass movements — An example of landslide activity analysis using tree-ring eccentricity. *Geochronometria* 39, 180–196. <https://doi.org/10.2478/s13386-012-0005-5>
- Marsz, A.A., Styszyńska, A., 2013. *Climate and Climate Change at Hornsund, Svalbard*. Gdynia Maritime University.
- Marsz, A.A., Styszyńska, A., 2011. Rozkład przestrzenny oraz skala ocieplenia Arktyki Atlantyckiej w 30-leciu 1980-1990 i jej porównanie z “wielkim ociepleniem Arktyki” lat 30. XX wieku. *Probl. Klimatol. Polarnej* 21, 91–114.
- Muñoz-Sabater, J., 2019. ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (<15.07.2022>), doi:10.24381/cds.68d2bb30 [WWW Document]. URL <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.68d2bb30?tab=overview>
- Niedźwiedź, T., 2003. Współczesna zmienność cyrkulacji atmosfery, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych na Spitsbergenie. *Probl. Klimatol. Polarnej* 79–92.
- Nordli, Ø., Przybylak, R., Ogilvie, A.E.J., Isaksen, K., 2014. Long-term temperature trends and variability on Spitsbergen: the extended Svalbard Airport temperature series, 1898-2012. *Polar Res.* <https://doi.org/10.3402/polar.v33.21349>
- Opała, M., Migała, K., Owczarek, P., 2016. Two centuries-long dendroclimatic reconstruction based on Low Arctic *Betula pubescens* from Tromsø Region, Northern Norway. *Pol. Polar Res.* 37, 457–476. <https://doi.org/10.1515/popore-2016-0024>
- Opała-Owczarek, M., Owczarek, P., Łupikasza, E., Boudreau, S., Migała, K., 2020. Influence of climatic conditions on growth rings of *Salix uva-ursi* Pursh from the southeastern shore of Hudson Bay, Subarctic Canada. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 52, 87–102. <https://doi.org/10.1080/15230430.2020.1722397>
- Opała-Owczarek, M., Pirożnikow, E., Owczarek, P., Szymański, W., Luks, B., Kępski, D., Szymanowski, M., Wojtuń, B., Migała, K., 2018. The influence of abiotic factors on the growth of two vascular plant species (*Saxifraga oppositifolia* and *Salix polaris*) in the High Arctic. *CATENA* 163, 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.018>
- Osuch, M., Wawrzyniak, T., 2017. Inter- and intra-annual changes in air temperature and precipitation in western Spitsbergen. *Int. J. Climatol.* 37, 3082–3097. <https://doi.org/10.1002/joc.4901>
- Owczarek, P., 2010a. Dendrochronological dating of geomorphic processes in the High Arctic. *Landf. Anal.* 14, 45–56.

- Owczarek, P., 2010b. Talus cone activity recorded by tree-rings of Arctic dwarf shrubs: a study case from SW Spitsbergen, Norway. *Geologija* 52, 34–39. <https://doi.org/10.2478/v10056-010-0003-3>
- Owczarek, P., Dagsson-Waldhauserova, P., Opała-Owczarek, M., Migąła, K., Arnalds, Ó., Schaetzl, R.J., 2022. Anatomical changes in dwarf shrub roots provide insight into aeolian erosion rates in northeastern Iceland. *Geoderma* 428, 116173. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116173>
- Owczarek, P., Opała, M., 2016. Dendrochronology and extreme pointer years in the tree-ring record (AD 1951–2011) of polar willow from southwestern Spitsbergen (Svalbard, Norway). *Geochronometria* 43, 84–95. <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0035>
- Owczarek, P., Opała-Owczarek, M., Migąła, K., 2021. Post-1980s shift in the sensitivity of tundra vegetation to climate revealed by the first dendrochronological record from Bear Island (Bjørnøya), western Barents Sea. *Environ. Res. Lett.* 16, 014031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd063>
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S.S., Sarkar, D., 2013. *Nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R Package Version 31-110* 3, 1–113.
- Polunin, N., 1958. The Botany of Ice-Island T-3. *J. Ecol.* 46, 323–347. <https://doi.org/10.2307/2257399>
- Polunin, N., 1955. Attempted Dendrochronological Dating of Ice Island T-3. *Science* 122, 1184–1186. <https://doi.org/10.1126/science.122.3181.1184>
- Post, E., Kaarlejärvi, E., Macias-Fauria, M., Watts, D.A., Bøving, P.S., Cahoon, S.M.P., Higgins, R.C., John, C., Kerby, J.T., Pedersen, C., Post, M., Sullivan, P.F., 2023. Large herbivore diversity slows sea ice-associated decline in arctic tundra diversity. *Science* 380, 1282–1287. <https://doi.org/10.1126/science.add2679>
- Przybylak, R., 2007. Recent air-temperature changes in the Arctic. *Ann. Glaciol.* 46, 316–324. <https://doi.org/10.3189/172756407782871666>
- Przybylak, R., Wyszynski, P., 2020. Air temperature changes in the Arctic in the period 1951–2015 in the light of observational and reanalysis data. *Theor. Appl. Climatol.* 139, 75–94. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02952-3>
- Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., Laaksonen, A., 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.* 3, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Ropars, P., Angers-Blondin, S., Gagnon, M., Myers-Smith, I.H., Lévesque, E., Boudreau, S., 2017. Different parts, different stories: climate sensitivity of growth is stronger in root collars vs. stems in tundra shrubs. *Glob. Change Biol.* 23, 3281–3291. <https://doi.org/10.1111/gcb.13631>
- Savile, D.B.O., 1979. Ring counts in *Salix arctica* from Northern Ellesmere Island. *Can. Field-Nat.* 93(1), 81–82.
- Schweingruber, F., Poschlod, P., 2005. Growth Rings in Herbs and Shrubs: Life Span, Age Determination and Stem Anatomy. *For. Snow Landsc. Res.* 79, 195–415.
- Serreze, M.C., Barrett, A.P., Stroeve, J.C., Kindig, D.N., Holland, M.M., 2009. The emergence of surface-based Arctic amplification. *The Cryosphere* 3, 11–19. <https://doi.org/10.5194/tc-3-11-2009>
- Stroeve, J., Holland, M.M., Meier, W., Scambos, T., Serreze, M., 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.* 34. <https://doi.org/10.1029/2007GL029703>
- Stroeve, J.C., Crawford, A.D., Stammerjohn, S., 2016. Using timing of ice retreat to predict timing of fall freeze-up in the Arctic. *Geophys. Res. Lett.* 43, 6332–6340. <https://doi.org/10.1002/2016GL069314>
- Sturm, M., Racine, C., Tape, K., 2001. Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411, 546–547. <https://doi.org/10.1038/35079180>
- Warren Wilson, J., 1964. Annual growth of *Salix arctica* in the high-arctic. *Ann. Bot.* 28, 71–76.
- Wawrzyniak, T., Osuch, M., 2020. A 40-year High Arctic climatological dataset of the Polish Polar Station Hornsund (SW Spitsbergen, Svalbard). *Earth Syst. Sci. Data* 12, 805–815. <https://doi.org/10.5194/essd-12-805-2020>
- Weijers, S., Buchwał, A., Blok, D., Löffler, J., Elberling, B., 2017. High Arctic summer warming tracked by increased *Cassiope tetragona* growth in the world's northernmost polar desert. *Glob. Change Biol.* 23, 5006–5020. <https://doi.org/10.1111/gcb.13747>



- Weintraub, M.N., Schimel, J.P., 2005. Nitrogen Cycling and the Spread of Shrubs Control Changes in the Carbon Balance of Arctic Tundra Ecosystems. *BioScience* 55, 408–415. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0408:NCATSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0408:NCATSO]2.0.CO;2)
- Wilczyński, S., Szymański, N., 2014. Lata wskaźnikowe świerka pospolitego w Beskidach Zachodnich. *Sylwan* 158, 883–892.
- Woodcock, H., Bradley, R.S., 1994. *Salix arctica* (Pall.): Its potential for dendroclimatological studies in the High Arctic. *Dendrochronologia* 12, 11–22.

## **5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.**

### **5.1. Analiza dendrochronologiczna *Salix polaris* z centralnego Spitsbergenu: Staż podoktorski (typu post-doc) w *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research* (WSL), Birmensdorf pod Zurychem, Szwajcaria**

Bezpośrednio po obronie pracy doktorskiej i uzyskaniu stopnia doktora Nauk o Ziemi (czerwiec 2010 r.) rozpoczęłam pierwszy staż podoktorski (typu post-doc) w *Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research* (WSL), zlokalizowanym w Birmensdorf pod Zurychem w Szwajcarii. Staż doktorski trwał 12 miesięcy, tj. od września 2010 do września 2011 roku i był finansowany przez *Scientific Exchange Programme NMS-CH* (Sciex, Szwajcaria). Podczas tego stażu realizowałam projekt pt. „*ArcDendro: Arctic Shrubs Dendrochronological Potential*”, a mentorami w tym projekcie byli dr. Holger Gärtner i prof. Paolo Cherubini. Był to kluczowy pobyt naukowy, podczas którego zdobyłam umiejętności i poznałam narzędzia z zakresu analiz dendrochronologicznych krzewinek tundrowych. Podczas tego stażu miałam wielką przyjemność dyskutować wyniki moich analiz dendrochronologicznych z prof. Fritz'em Schweingruber'em oraz podpatrywać jego warsztat badawczy. Prof. Schweingruber, niekwestionowany autorytet w dziedzinie dendrochronologii na świecie, wskazał mi na konieczność rozpoznania stopnia nieregularności wzrostu radialnego krzewinek (tj. przyrostów brakujących i wyklinowujących) i zastosowania seryjnego próbkowania w analizach krzewinek *Salix polaris* pobranych przeze mnie z obszaru centralnego Spitsbergenu. W tym zakresie jego kluczowa uwaga była zbieżna z tym, co wskazał mi cztery lata wcześniej prof. Marek Krąpiec, podczas mojego tygodniowego stażu realizowanego na AGH (podczas studiów doktoranckich), kiedy to analizowałam odsłonięte korzenie świerka z masywu Babiej Góry. Efektem stażu podoktorskiego w WSL były m. in. prace [A1] i [A1a].

### **5.2. Analiza dendrochronologiczna *Betula nana* i *Salix pulchra* z północnej Alaski: Staż podoktorski (typu post-doc) w *University of Alaska Anchorage, Department of Biological Sciences* w Stanach Zjednoczonych**

Drugi i trzeci staż podoktorski realizowałam na *University of Alaska Anchorage* (UAA), *Department of Biological Sciences* w Stanach Zjednoczonych w latach 2014-2017. W pierwszej kolejności realizowałam projekt pt. „*Exploring the ecological value of wood anatomy in Arctic tree-rings*”, finansowany w ramach Polsko-Amerykańskiej Komisji Fulbrighta (sierpień 2014-kwiecień 2015). Moim mentorem w tym projekcie (ale również i w następnym) był prof. Jeffrey Welker. W ramach tego projektu rozpoczęłam badania w stacji terenowej *Toolik Research Station* na północy Alaski i analizy dendrochronologiczne krzewinek *Betula nana* z tego obszaru. Badania te miały na celu konstrukcję pierwszej chronologii brzozy karłowatej dla obszaru Alaski i przeprowadzenie analizy wrażliwości klimatycznego tego gatunku ze

szczególnym zwróceniem uwagi na anatomię drewna krzewinek. Badania nad krzewinkami tundrowymi z obszaru *Toolik Lake* rozwinęłam w ramach następnego stażu podoktorskiego realizowanego na UAA. Podczas tego stażu (maj 2015 - kwiecień 2017) realizowałam projekt pt. „Dendroecological potential of wood anatomy and tree-ring growth studies of arctic shrubs (Alaska)”. Projekt ten był finansowany przez MNiSW w ramach programu Mobilność Plus. W ramach tego projektu kontynuowałam prace terenowe w stacji *Toolik Research Station*. Badania prowadziłam głównie na dwóch gatunkach krzewinek, tj. *Betula nana* i *Salix pulchra*. Badania obejmowały zarówno krzewinki przyrastające w naturalnym siedlisku (wilgotnym i suchym), ale również dla poletka eksperymentalne. Pierwsze poletko obejmowało stanowisko tzw. płotka śnieżnego (ang. *snow fence*), w którym krzewinki przyrastały przy zwiększonej miąższości pokrywy śnieżnej. Drugie poletko obejmowało stanowisko krzewinek poddanych pasywnemu ocieplaniu przy użyciu tzw. otwartych szklarni (ang. *open top chambers*, OTCs). Oba eksperymenty terenowe zostały założone przez prof. Welkera pod koniec lat 90., a więc dały możliwość prześledzenia zmian w przyroście radialnym i anatomii drewna krzewinek po ponad 20 latach trwania eksperymentu.

Głównym wynikiem moich badań na krzewinkach z północnej Alaski podczas stażu podoktorskiego w UAA było stworzenie chronologii brzozy karłowatej z siedliska tundry wilgotnej i suchej oraz wykazanie dominującej roli wpływu temperatury powietrza w okresie czerwca na wzrost radialny *Betula nana* w otoczeniu *Toolik Lake* [A4]. Chronologia została również włączona przeze mnie do pan-arktycznej syntezy [A3], w której analizowałam zmianę klimatu regionu i wzrost krzewinek w warunkach zmniejszającej się pokrywy lodowej Oceanu Arktycznego i Morza Beauforta [A4, A3]. Jest to jak do tej pory pierwsza chronologia *Betula nana* jaka została skonstruowana dla obszaru Alaski.

## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

### Działalność dydaktyczna

W pracy dydaktycznej jestem głęboką orędowniczką nauczania inkluzyjnego i nauczania opartego na badaniach naukowych (ang. *research-based learning*). Zdobyte doświadczenie naukowe w trakcie staży zagranicznych staram się wykorzystywać w pracach nad unacześnieniem programów studiów i tworzeniu nowych, interdyscyplinarnych ofert dydaktycznych. Cel ten realizuję jako **członkini następujących rad programowych**:

- 1) Rada Programowa kierunku Geografia wraz ze specjalnościami (WNGiG, UAM);
- 2) Rada Programowa kierunku „*Geohazards and Climate Change*” (studia dzienne II stopnia prowadzone w języku angielskim; WNGiG UAM);
- 3) Rady ds. umiędzynarodowienia WNGiG UAM;
- 4) Rady Tutorów WNGiG UAM.

W semestrze letnim roku akademickiego 2021/2022 ukończyłam kurs Szkoły Tutorów Akademickich prowadzony przez Collegium Wratislaviense, a w kolejnym roku akademickim przeprowadziłam pierwsze tutoriale.

W okresie po doktoracie prowadziłam m. in. następujące **zajęcia dydaktyczne**:

- 1) **wykłady (W) lub ćwiczenia (CW)**: Prognozowanie systemów przyrodniczych (W i CW), Modelowanie procesów przyrodniczych (CW), Regionalizacja geograficzna (CW), Geografia fizyczna (CW), Przyrodnicze uwarunkowania gospodarki

- przestrzennej (CW), Terminologia specjalistyczna geografii - język angielski (CW), Wpływ turystyki na środowisko górskich obszarów chronionych (W), Pozyskiwanie środków i planowanie projektów (CW), Laboratorium magisterskie (CW);
- 2) **wyklady monograficzne:** Obszary polarne, Człowiek w środowisku Arktyki i Antarktyki, Drzewa jako źródła wiedzy o środowisku;
  - 3) **zajęcia dla studentów programu Erasmus:** *Introduction to Dendrochronology* (W i CW), *Arctic in a Changing Climate* (W), *Geography of social and political conflicts in changing environment* (W), *Natural environment of Central Europe* (W);
  - 4) **autorskie zajęcia dla doktorantów Szkoły Nauk Przyrodniczej UAM** - *Arctic in a Changing Climate* (W) oraz zajęcia dla międzywydziałowego studium doktoranckiego - Dendrochronologia (W).

Dodatkowo, w grudniu 2019 roku, byłam członkiem jury Wydziałowego Konkursu prac licencjackich i magisterskich napisanych w roku akademickim 2018/2019 na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM.

Opiekowałam się m. in. następującymi pracami na stopień naukowy:

- 1) **promotor pomocniczy pracy doktorskiej** dr Pawła Matulewskiego (obrona: 2018 r.) WNGiG UAM), tytuł pracy: „Wpływ denudacji antropogenicznej na przyrosty radialne i anatomię drewna korzeni sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Studium przypadku z Pojezierza Brodnickiego”;
- 2) **członkini Graduate Advisory Committee** doktoranta Jackson’a Drew w *College of Natural Science and Mathematics, Department of Biology and Wildlife, University of Alaska Fairbanks*, Stany Zjednoczone, roboczy tytuł pracy: *Alnus viridis* spp. *fruticosa* modulates local conditions to influence intra and interspecies growth;
- 3) **promotor pracy licencjackiej** Katarzyny Oblńskiej (obrona: 2023 r.; kierunek Geografia, specjalność geo-grafika) WNGiG UAM, tytuł pracy: „Wizualizacja graficzna analizy dendrochronologicznej jałowca karłowatego (*Juniperus communis* L.) z północnej Skandynawii”.

### **Inne działania w zakresie dydaktyki i popularyzacji nauki**

Swoją rolę naukowca spełniam, z wielkim entuzjazmem, prowadząc wykłady otwarte, **wyklady popularnonaukowe i warsztaty** skierowane do uczniów i uczennic szkół podstawowych i średnich. Przykładem mogą być m. in.:

- 1) 20.04.2023 r. - prowadzenie warsztatów dendrochronologicznych dla szkół w ramach Dnia Geografa na WNGiG UAM;
- 2) 8.11.2022 r. - wykład w Instytucie Geologii UAM dla szkoły: Szkoła Podstawowa z Oddziałami Dwujęzycznymi im. A. i Wł. Niegolewskich w Opalenicy, wykład pt. „Przystanek Alaska - przyroda i życie na końcu świata”;
- 3) 4.06.2022 r. - promocja Stacji Polarnej UAM „Petuniabukta” na Festiwalu Polarnym w Warszawie (Amfiteatr Wolskiego Centrum Kultury; Organizator Festiwalu: Instytut Geofizyki PAN w ramach projektu EDU-ARCTIC.PL);
- 4) 12.04.2022 r. - wykład pt. ”Karłowate drzew i klimat w Arktyce” w ramach Kolorowego Uniwersytetu (nagranie na kanał YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=MK-IKsCTRwg>);

- 5) 2.03.2021 r. - wykład (A. Buchwał, G. Rachlewicz) pt. „Z nogami w zamrażarce - permafrost i krzewinki tundrowe w delcie Leny” w ramach Poznańskiego Tygodnia Geomorfologii;
- 6) 3.03.2020 r. - prowadzenie warsztatów dla szkół (A. Buchwał, P. Matulewski) pt. „Dendrogeomorfologia” w ramach Międzynarodowego Tygodnia Geomorfologii na WNGiG UAM;
- 7) 20.05.2019 r. - prowadzenie warsztatów (A. Buchwał, P. Matulewski) pt. „Hands-on dendrochronology” w ramach konferencji PalaeoArc: Processes and Palaeo-environmental changes in the Arctic: from past to present (20-24.05.2019 r.);
- 8) 14.05.2019 r. - prowadzenie warsztatów dla szkół (A. Buchwał, P. Matulewski) pt. „Badania dendrochronologiczne w Arktyce”. Warsztaty w ramach „Dzień Polarny - tam gdzie słońce nie zachodzi” na WNGiG UAM;
- 9) 8.01.2019 r., wykład dla szkoły patronackiej; I Liceum Ogólnokształcące im. Heliodora Świącickiego w Międzyrzeczu; wykład pt. „Przystanek Alaska - przyroda i życie na końcu świata”;
- 10) 17.12.2018 r., wykład w szkole patronackiej - I LO im. M. Kopernika w Puszczykowie; wykład pt. „Przystanek Alaska - przyroda i życie na końcu świata”;
- 11) 6.06.2018 r., wykład w szkole patronackiej - Szkoła Pijarów (klasą gimnazjum i liceum), Poznań; wykład pt. „Przystanek Alaska - przyroda i życie na końcu świata”;
- 12) 5.04.2018 r. - wygłoszenie referatu w Poznańskim Oddziale Polskiego Towarzystwa Geograficznego (A. Buchwał, M. Rogowski) pt. „Przystanek Alaska - Przyroda i życie na końcu świata”;
- 13) 27.11.2017 r., Szkoła Podstawowa w Węgorzynie i Gimnazjum im. Orła Białego, wygłoszenie prelekcji pt. „Bliskie i dalsze wyprawy do Arktyki... z gminy Węgorzyna”;
- 14) 29.09.2017 r. - prowadzenie warsztatów dla szkół (A. Buchwał, P. Matulewski) pt. „Spojrzenie w głąb drzewa - laboratorium dendrochronologiczne”. Warsztaty w ramach „Noc Naukowców” na WNGiG UAM;
- 15) 5.08.2016 r. - wygłoszenie referatu w *Alaska Public Lands Visitor Center* (Anchorage, Stany Zjednoczone) w ramach spotkań *Coffee with the Scientist*; tytuł referatu: ‘Are there trees in the tundra? A story of Arctic shrubs growth rings from Svalbard, Greenland and Alaska’;
- 16) 9.04.2014 r. - wygłoszenie wykładu (Rachlewicz G., Buchwał A.) pt. „Grenlandia - lodowce, tundra i ... piłka nożna”; oraz prowadzenie warsztatów „Z mikroskopem wśród skał i drzew” w ramach Festiwalu Nauki i Sztuki na WNGiG UAM.

Dzieliłam się również swoją pracą badawczą i wynikami m.in. na następujących **seminariach**:

- 1) 23.03.2021 r. - wygłoszenie referatu na seminarium **Instytutu Dendrologii PAN, Kórnik** (zdalnie via MS Teams); Tytuł: „Dendrochronologia w Arktyce - badania przyrostów rocznych i anatomii drewna krzewinek tundrowych w Arktyce niskiej i wysokiej”;
- 2) 31.05.2017 r. - wygłoszenie referatu w **Institute of Arctic Biology, University of Alaska Fairbanks, Alaska, Stany Zjednoczone**; Tytuł: ‘What can we learn from Arctic shrubs’ annual growth rings? Dendrochronological studies from Alaska North Slope and beyond’;
- 3) 21.04.2017 r. - wygłoszenie referatu na seminarium **Biological Science Seminar, University of Alaska Anchorage, Alaska, Stany Zjednoczone**; Tytuł: ‘What can we learn from Arctic shrubs’ annual growth rings? Dendrochronological studies from Alaska North Slope and beyond’;

- 4) 6.03.2015 r. - wygłoszenie referatu na seminarium *Biological Science Seminar, University of Alaska Anchorage, Alaska, Stany Zjednoczone*; Tytuł: 'Tundra plant responses to changes in climate: dendrochronological records of shrub growth from the High and Low Arctic';
- 5) 10.12.2015 r. - wygłoszenie referatu na seminarium *Laboratory of Tree-Ring Research (LTRR) w University of Arizona, Tucson, Stany Zjednoczone*; Tytuł: 'What can we learn from the arctic shrub(-rings)? Dendrochronological records of shrubs annual growth in High and Low Arctic sites (Spitsbergen, Greenland, Alaska)'.

## Doniesienia prasowe i media

Poniżej przedstawiam listę doniesień medialnych związane z pracą [A3], która podkreśla silne zainteresowanie szerokiego grona zarówno naukowców jak i społeczeństwa badaniami interdyscyplinarnymi:

- 1) EurekaAlert!; Stany Zjednoczone: [https://www.eurekaalert.org/pub\\_releases/2020-12/potn-asi120920.php](https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2020-12/potn-asi120920.php)
- 2) Arctic Today; Stany Zjednoczone: <https://www.arctictoday.com/how-tiny-growth-rings-revealed-the-secret-link-between-sea-ice-loss-and-tundra-greening-and-browning/> (3970 odsłon, stan na dzień 23.04.2021 r.)
- 3) Arctic Centre, University of Lapland, Finlandia: <https://www.arcticcentre.org/news/Declining-Arctic-sea-ice-drives-divergent-arctic-shrub-growth-/39649/b6390696-b8b3-40e0-9f76-c356707d2408>
- 4) University California Davis, Stany Zjednoczone: <https://climatechange.ucdavis.edu/what-can-i-do/as-sea-ice-disappears-a-greener-and-browner-arctic-emerges/#:~:text=A%20study%20of%20tundra%20shrubs,sensitive%20proxies%20of%20environmental%20change>
- 5) University of Manitoba, Kanada: <https://news.umanitoba.ca/declining-arctic-sea-ice-drives-divergent-arctic-shrub-growth/>
- 6) University of Copenhagen, Dania: <https://ign.ku.dk/english/news/2020/arctic-sea-ice-decline-and-plant-growth/>
- 7) University of Arctic, Oulu, Finlandia: <https://www.uarctic.org/news/2021/1/uarctic-chair-s-update-trees-of-the-arctic-record-sea-ice-loss-affects-around-the-north/>
- 8) Yale School of the Environment, Stany Zjednoczone: <https://e360.yale.edu/digest/study-of-growth-rings-in-tundra-shrubs-reveals-spread-of-arctic-browning>
- 9) University of Oxford, Wielka Brytania: <https://www.geog.ox.ac.uk/news/2021/20210111-declining-arctic-sea-ice-drives-divergent-arctic-shrub-growth.html>
- 10) TVN24: <https://tvn24.pl/poznan/krzewinki-tundrowe-zielony-bank-wiedzy-o-klimacie-4814873>
- 11) wywiad live dla stacji TVN24 (3.01.2021 r.)
- 12) Nauka w Polsce: <https://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C85389%2Carktyka-wielkie-zmiany-klimatu-z-perspektywy-malych-krzewinek.html>
- 13) Gazeta: Zmiany klimatu w Arktyce z perspektywy małych krzewinek. "Jeśli chcesz poznać drzewo - myśl jak drzewo";

<https://next.gazeta.pl/next/7,179892,27208675,zmiany-klimatu-w-arktyce-z-perspektywy-malych-krzewinek.html> (21.06.2021 r.)

- 14) EduArctic: Arktyczne słoje - czyli jak krzewinki tundrowe zapisują klimat w małych przyrostach rocznych; <https://edu-arctic.pl/artykuly/arktyczne-sloje-czyli-jak-krzewinki-tundrowe-zapisuja-klimat-w-malych-przyrostach-rocznych> (26.11.2021 r.)
- 15) EduArctic facebook: <https://www.facebook.com/eduarcticPL/posts/290181609785556> (29.11.2021 r.); statystyki na dzień 21.03.2022 r. to: >2800 wyświetleń; 63 komentarze, 141 udostępnień postu

#### **Inne doniesienia medialne:**

- 1) "Pożary zombie, czyli Alaska płonie dłużej i na większą skalę". Radio TOK FM (25.08.2022 r.); Wywiad w audycji Światopogląd w Radiu TOK FM; <https://audycje.tokfm.pl/podcast/127581,-Pozary-zombie-czyli-Alaska-plonie-dluzej-i-na-wieksza-skale>
- 2) „Płonie Syberia, Alaska i Grenlandia - potrzebujemy globalnej straży pożarnej?” Wywiad w Weekendowym Poranku Radia TOK FM (10.08.2019 r.); <https://audycje.tokfm.pl/gosc/12243,dr-Agata-Buchwal>
- 3) „Stuletnie lasy o wysokości 20 cm? Cieszymy się, póki są. Nadchodzi ocieplenie.” Wywiad dla portalu Nauka w Polsce MNiSW (05.11.2018 r.); <http://naukawpolsce.pap.pl/aktualnosci/news%2C31575%2Cstuletnie-lasy-o-wysokosci-20-cm-cieszymy-sie-poki-sa-nadchodzi-ocieplenie>

#### **7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

##### **Zrealizowane ekspedycje polarne i badania terenowe**

<b>Spitsbergen</b>	Petuniabukta: 08/2007, 08/2009, 07-08/2010, 07/2011, 08/2012, 06-07/2013 Adventdalen: 07/2014, 07/2015
<b>Grenlandia</b>	zachodnie wybrzeże: Disko Island, Arctic Station, 08/2011 zachodnie wybrzeże: Kobbefjord, Nuuk, 08/2013 wschodnie wybrzeże: Zackenberg, 08/2014
<b>Alaska</b>	Toolik Field Station: 08/2014, lato 2015, lato 2016
<b>Syberia</b>	Delta rzeki Leny, Samoylov Research Station: 08/2018
<b>Skandynawia</b>	N Szwecja: Tavvavuoma, 07/2019, 10/2020 NE Norwegia: NIBIO Svanhovd, Iskoras 8/2022 NE Finlandia: Varrjo Research Station, 8/2023

##### **Warsztaty dot. dendrochronologii i anatomii drewna**

- 1) *Winter School on Wood Anatomy of Tree-Rings*; 25.11-1.12.2007 r., Davos-Laret, Szwajcaria;
- 2) *22. International Dendroecologicalweek Fieldweek*, 14-20.09.2008 r., Loetschental, Szwajcaria;

- 3) *Monitoring seasonal dynamic of wood formation*; 20-22.04.2009 r., Otocec, Słowenia;
- 4) *Shrub Synthesis Workshop*; 13-19.09.2011 r., Davos, Szwajcaria;
- 5) *Introducing TreeRingJ: A tool to measure and record tree rings based on the free image-analysis platform ImageJ*; 8.05.2023 r. Coimbra, Portugalia
- 6) *Tools and techniques for analysis of xylogenesis and wood anatomical data*; 9.05.2023 r. Coimbra, Portugalia

### Nagrody

- 1) **2020 r.** - stypendium naukowe Rektora UAM;
- 2) **2019 i 2018 r.** - stypendium naukowe Rektora UAM dla nauczycieli akademickich za wybitne osiągnięcia w pracy naukowej w roku 2018, 2017;
- 3) **09/2018 r.** - Nagroda zespołowa III stopnia JM Rektora UAM za osiągnięcia w pracy dydaktycznej;
- 4) **09/2016 r.** - Indywidualna Specjalna Nagroda Naukowa I stopnia Rektora UAM dla nauczycieli akademickich za wybitny dorobek publikacyjny w 2015 roku;
- 5) **09/2015 - 09/2017 r.** - Stypendium naukowe dla wybitnych młodych naukowców, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego;
- 6) **04/2011 r.** - Dyplom im. Eugeniusza Romera za najlepszą pracę doktorską z zakresu geografii fizycznej obronioną w roku 2010, Komitet Nauk Geograficznych PAN.

Jestem **autorką lub współautorką łącznie 41 publikacji** (w tym 32 publikacji z listy JCR, 7 spoza listy JCR i 2 rozdziałów w monografiach). W 14 publikacjach jestem pierwszym autorem (tj. w 8 publikacjach z listy JCR, 5 publikacjach spoza listy JCR i w 2 rozdziałach w monografiach). Pełny wykaz publikacji przedstawiłam w **Wykazie osiągnięć naukowych (punkt II. 2 i punkt II. 4)**.

Brałam aktywny **udział w 40 konferencjach naukowych** (w tym 25 konferencjach po uzyskaniu stopnia naukowego doktora), na których wygłosiłam **32 referaty** i zaprezentowałam **12 postery** jako pierwszy autor. Na dwóch konferencjach wygłosiłam referat na zaproszenie organizatorów konferencji. Pełny wykaz wystąpień na konferencjach przedstawiłam w **Wykazie osiągnięć naukowych (punkt II. 7)**.

.....  
(podpis wnioskodawcy)