

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Radosław Puchalka

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

2004 r. – ukończenie studiów magisterskich na Wydziale Biologii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Praca magisterska pt. „Rozmieszczenie flory naczyniowej wzdłuż linii kolejowej na odcinku Gutowo Pomorskie-Klonowo (Górznieńsko-Lidzbarski Park Krajobrazowy)” przygotowana pod kierunkiem dr hab. Tomasza Załuskiego.

2005 r. – ukończenie studiów podyplomowych „Hodowla Lasu” na Wydziale Leśnym Akademii Rolniczej w Poznaniu (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy).

2013 r. – obrona pracy doktorskiej pt. „Taksonomia i ewolucja owoców w rodzaju *Ferula* (Apiaceae) [Taxonomy and fruit evolution in the genus *Ferula* (Apiaceae)”, przygotowanej na Wydziale Biologii i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, pod opieką promotorską prof. dr hab. Krzysztofa Szpili.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

2005-2007 – pracownik techniczny (specjalista, a następnie starszy specjalista) w Katedrze i Zakładzie Farmakognozji na Wydziale Farmaceutycznym Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Bydgoszczy, autonomicznej jednostce UMK, funkcjonującej do 24 października 2024 jako Akademia Medyczna w Bydgoszczy.

2007-2011 – stypendium doktoranckie na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, słuchacz studium doktoranckiego na Wydziale Biologii i Ochrony Środowiska.

2011-2016 – pracownik techniczny w Katedrze Geobotaniki i Planowania Krajobrazu na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

2016-2018 – asystent w Katedrze Ekologii i Biogeografii na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

2018-obecnie – adiunkt w Katedrze Ekologii i Biogeografii na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Ponadto od 2019 członek międzywydziałowego Centrum Badań zmian Klimatu na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

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 2020 r. poz. 85 z późn. zm.)

Jako *osiągnięcie naukowe*, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ww. ustawy, wskazuję cykl pięciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.:

„Wpływ zmian klimatycznych na czasowe i przestrzenne występowanie roślin leśnych: znaczenie czynników klimatycznych w kształtowaniu się ich zasięgów”

Cykl prac omówiony został omówiony z kolejnością powstawania manuskryptów i pojawiających się kolejno pytań badawczych. Natomiast kolejność ukazania się publikacji jest wypadkową różnego nakładu pracy przy poszczególnych badaniach i długości procesu recenzji. We wszystkich pracach byłem pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym. Brałem udział we wszystkich etapach przygotowania prac, od opracowania koncepcji i metodyki, poprzez zbiór danych i ich walidację, analizy statystyczne, wizualizację wyników po przygotowanie pierwszych wersji maszynopisów i poprawianie ich po recenzjach.

1. **Puchałka, R.**, Dyderski, M., Vítková, M., Sádlo, J., Klisz, M., Netsvetov, M., Prokopuk, Y., Matisons, R., Mionskowski, M., Wojda, T., Koprowski, M., Jagodziński, A.M., 2021. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) range contraction and expansion in Europe under changing climate. *Glob. Chang. Biol.* 27, 1587–1600. <https://doi.org/10.1111/gcb.15486>

IF₂₀₂₁=13,212, pkt MNiSW₂₀₂₁=200

2. **Puchałka, R.**, Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A., Sádlo, J., Vítková, M., Klisz, M., Koniakin, S., Prokopuk, Y., Netsvetov, M., Nicolescu, V., Zlatanov, T., Mionskowski, M., Dyderski, M., 2023. Predicted range shifts of alien tree species in Europe. *Agric. For. Meteorol.* 341, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109650>

IF₂₀₂₂=6,2, pkt MNiSW₂₀₂₃=200

3. **Puchalka, R.**, Paż-Dyderska, S., Woziwoda, B., Dyderski, M., 2023. Climate change will cause climatic niche contraction of *Vaccinium myrtillus* L. and *V. vitis-idaea* L. in Europe. *Sci. Total Environ.* 892, 164483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164483>

IF₂₀₂₃=8,2, pkt MNiSW₂₀₂₃=200

4. **Puchalka, R.**, Paż-Dyderska, S., Dylewski, Ł., Czortek, P., Vítková, M., Sádlo, J., Klisz, M., Koniakin, S., Čarni, A., Rašomavičius, V., De Sanctis, M., Dyderski, M.K. 2023. Forest herb species with similar European geographic ranges may respond differently to climate change. *Sci. Total Environ.* 905: 167303 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167303>.

IF₂₀₂₃=8,2, pkt MNiSW₂₀₂₃=200

5. **Puchalka, R.**, Klisz, M., Koniakin, S., Czortek, P., Dylewski, Ł., Paż-Dyderska, S., Vítková, M., Sádlo, J., Rasomavičius, V., Čarni, A., De Sanctis, M., Dyderski, M., 2022. Citizen science helps predictions of climate change impact on flowering phenology: A study on *Anemone nemorosa*. *Agric. For. Meteorol.* 325, 109133. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109133>

IF₂₀₂₃=5,6, pkt MNiSW₂₀₂₃=200

Wprowadzenie

Warunki klimatyczne należą do najważniejszych składników ekologicznej niszy fundamentalnej, zwanej również niszą potencjalną. Sezonowy i przestrzenny rozkład warunków termicznych i opadowych silnie determinuje warunki glebowe i hydrologiczne, decydując o geograficznym (dostępności biotopów) i sezonowym (fenologicznym) występowaniu gatunków i ich cykli życiowych (Colwell and Rangel, 2009; Ponti and Sannolo, 2023). W ciągu historii Ziemi klimat zmieniał się wielokrotnie, stając się chłodniejszym lub cieplejszym oraz suchszym lub wilgotniejszym. Jednak, zmiany te, za wyjątkiem czasu wystąpienia zjawisk o charakterze katastroficznym, zachodziły zwykle bardzo powoli, dając poszczególnym gatunkom zróżnicowaną szansę na kolonizację przesuwających się nisz potencjalnych lub też dostosowanie swoich cech funkcjonalnych w drodze ewolucji do zmieniających się warunków klimatycznych (Wake et al., 2009).

Rozwój ludzkiej cywilizacji rozpoczął nową epokę geologiczną, zwaną Antropocenem (Ruddiman, 2013). Charakteryzuje się ona bezprecedensowym w historii Ziemi tempem zmian

w ekosystemach, powodowanym przez pojedynczy gatunek, jakim jest człowiek rozumny *Homo sapiens* L. Obserwowane w niej ocieplenie klimatu przypisywane jest głównie nadmiernej emisji dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych, wynikających z intensywnej eksploatacji środowiska (IPBES, 2019; IPCC, 2022; Steffen et al., 2015). Antropocen jest również epoką zmian zasięgów geograficznych gatunków wskutek nadmiernego pozyskiwaniem niektórych gatunków, fragmentacji ekosystemów oraz celowej lub przypadkowej introdukcji obcych gatunków, które obecnie mogą pokonywać bariery naturalnie dla nich niemożliwe do przekroczenia środkami transportu (Capinha et al., 2015; IPBES, 2019; Pouteau et al., 2021; Steinbauer et al., 2018). Według Thuillera i in. (2005), spośród ponad 1300 analizowanych europejskich gatunków roślin ponad połowa może być zagrożona wyginięciem do roku 2080. Jednocześnie w Europie wciąż pojawiają się nowe gatunki obce (Seebens et al., 2017). Wiele z nich szybko się rozprzestrzenia, zajmując często znaczne obszary, na których często stają się gatunkami dominującymi, zmieniającymi warunki siedliskowe, obieg pierwiastków i w konsekwencji skład gatunkowy oraz różnorodność funkcjonalną i filogenetyczną ekosystemów (Castro-Díez et al., 2019; Liendo et al., 2021; Wohlgemuth et al., 2022). Zmiany klimatyczne mogą również spowodować różną odpowiedź fenologiczną współwystępujących gatunków, co dodatkowo może prowadzić do zanikania dotychczasowych interakcji ekologicznych i powstawania nowych, często między gatunkami, które ewoluowały dotąd w różnych obszarach geograficznych (Moyano et al., 2020; Nuñez and Dickie, 2014). Fenologia jest również ważną cechą gatunków decydującą o kształtowaniu się ich zasięgów (Chaine and Beaubien, 2001). Utrata synchroniczności może negatywnie wpłynąć na przykład na populacje foliofagów (Forkner et al., 2008), zależnych od określonych faz fenologicznych drzew lub sukces reprodukcyjny roślin, których kwitnienie może różnić się z okresami dostępności zapylaczy (Kudo and Cooper, 2019). Zmiany klimatyczne mogą mieć również niekorzystny wpływ na zapylenie i sukces reprodukcyjny gatunków wiatropylnych (Bogdziewicz et al., 2020). Stąd miejsce obecnych ekosystemów mogą zająć nowe układy ekologiczne, zdominowane często przez gatunki nie mające dotąd wspólnej historii ewolucyjnej, tzw. *novel ecosystems* (Evers et al., 2018; Hobbs et al., 2006).

O tym jak będą funkcjonować przyszłe ekosystemy wiemy wciąż niewiele, ponieważ nawet wiedza o obecnym rozmieszczeniu gatunków i ich fenologii jest dalece niekompletna (Brummitt et al., 2021; Park et al., 2021). W zrozumieniu zasięgów geograficznych gatunków pomocne są modele matematyczne, które z wykorzystaniem predyktorów, jakimi są mapy zawierające informacje o zmienności warunków środowiskowych, pozwalają na oszacowanie przestrzennej dostępności obszarów odpowiednich do kolonizacji, tak zwanej niszy

fundamentalnej (Colwell and Rangel, 2009). Badania Svenninga i Skova (2007, 2006, 2004) pokazały, że za pomocą zmiennych klimatycznych można tłumaczyć obecne rozmieszczenie gatunków roślin w Europie, a niewypełnienie nisz w obszarach północnych kontynentu przez gatunki starych lasów (AFIS - Ancient Forest Indicator Species) można objaśniać ich ograniczeniami dyspersyjnymi. Innymi słowy, nie zdążyły one skolonizować wszystkich optymalnych klimatycznie obszarów od czasu ustąpienia ostatniego zlodowacenia. Modele potencjalnego rozmieszczenia gatunków są również z powodzeniem wykorzystywane do predykcji obszarów zagrożonych inwazją gatunków obcych (Dyderski et al., 2018) lub do oceny stabilności warunków klimatycznych dla uprawy roślin (Thurm et al., 2018). Mimo szybkiego rozwoju baz danych gromadzących informacje o występowaniu gatunków, wielkoobszarowe badania napotykać wciąż na ograniczenia związane z nierównomiernym wysiłkiem w mapowaniu różnorodności biologicznej w różnych częściach świata, a w wielu miejscach nawet brakiem informacji o jej rozmieszczeniu (Cornwell et al., 2019). Stąd badania obejmujące większe obszary takie jak kontynenty, dla bardziej reprezentatywnego próbkowania danych klimatycznych wymagają wykorzystania dodatkowych źródeł o stanowiskach gatunków, takich jak recenzowane i nierecenzowane artykuły naukowe, raporty, inwentaryzacje zasobów leśnych i inne niepublikowane materiały (Puchałka et al., 2023a, 2023b, 2021).

Sezonowe występowanie gatunków i ich faz fenologicznych, które decyduje o tym, czy zachodzą interakcje między współwystępującymi gatunkami stanowi większe wyzwanie badawcze ze względu na to, że poznanie odpowiedzi fenologicznej gatunków na zmienne warunki temperaturowe i opadowe wymaga długich serii powtarzalnych obserwacji, a więc dyspozycyjności badacza. Z tych też powodów badania na stałych powierzchniach prowadzone są dość rzadko i na ograniczonej liczbie gatunków. Prowadzone na przykład obserwacje na stałych powierzchniach w Puszczy Białowieskiej od lat 60. dwudziestego wieku stanowią unikatową i najdłuższą serię obserwacji fenologicznych na świecie (Faliński, 2001). W większej skali przestrzennej informacje o fenologii możliwe są do uzyskania z obserwatoriów meteorologicznych, które jednak skupiają się na wybranych gatunkach. Innym źródłem danych fenologicznych są materiały zielnikowe. Prawidłowo wykonany arkusz zawiera oprócz okazu rośliny w danym stanie fenologicznym także informację o dacie i miejscu zbioru. Takie dane z użyciem map bioklimatycznych są użyteczne do wielkoobszarowych badań fenologicznych (Willems et al., 2022). Obecnie coraz częściej w badaniach bioklimatycznych wykorzystywane są fotografie cyfrowe roślin udostępnianie przez miłośników przyrody w bazach internetowych, takich jak iNaturalist (www.inaturalist.org). Data i miejsce obserwacji oraz udokumentowane

na fotografii stan fenologiczny pozwalają na ustalenie terminu, np. kwitnienia lub owocowania, podobnie jak materiały zielnikowe (Barve et al., 2020; Fitzpatrick et al., 2021). W odróżnieniu od materiałów zielnikowych, które nie zawsze są zdigitalizowane i skatalogowane, materiały cyfrowe dostarczane przez wolontariuszy do baz internetowych umożliwiają znacznie szybsze opracowanie danych fenologicznych do celów badawczych. Dzięki dużej popularności nauki obywatelskiej (*citizen science*) rozmieszczenie wielu gatunków stało się na tyle dobrze rozpoznane, że możliwe jest prowadzenie badań nad rozmieszczeniem i fenologią gatunków na znacznie szerszych obszarach niż umożliwiają to same dane zbierane przez naukowców.

Szybko zwiększające się zasoby danych o rozmieszczeniu gatunków bazy internetowe, takie jak np. Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (www.gbif.org), oraz opublikowane nowsze scenariusze zmian klimatycznych dają również możliwość wykonania ponownych badań dla niektórych gatunków z wykorzystaniem pełniejszego próbkowania danych klimatycznych z uaktualnionymi scenariuszami zmian klimatycznych (Riahi et al., 2017). Do takich gatunków należą na przykład badane przez Dyderskiego i in. (2018) obce gatunki drzew, a także gatunki leśnych roślin zielnych w Europie, analizowane z użyciem znacznie starszych scenariuszy zmian klimatycznych i danych o rozmieszczeniu dostępnych wówczas w rozdzielczości 50×50 km (Skov and Svenning, 2004; Svenning and Skov, 2006). Rozmieszczeniu roślin zielnych generalnie poświęcono mniej uwagi niż drzewom, lecz stosunkowo dużo badań prowadzono na temat ich fenologii. Zainteresowanie fenologów przyciągały szczególnie gatunki wczesnowiosenne, których terminy kwitnienia są dobrymi wskaźnikami zmian klimatycznych (Kehrberger and Holzschuh, 2019; Kwembeya, 2021; Wang et al., 2015). Większość badań fenologicznych prowadzona była jednak na niewielkiej liczbie powierzchni badawczych, a badania odnośnie synchroniczności faz fenologicznych dawały sprzeczne wyniki. Jedne z nich pokazywały, że zmienność warunków meteorologicznych i zmiany klimatyczne nie wpływają znacząco na synchroniczność faz fenologicznych współwystępujących gatunków i nie wpłyną one istotnie na interakcje międzygatunkowe (Sevenello et al., 2020). Inne, że zmiany klimatyczne mogą spowodować nierównomierne przesunięcia występowania faz fenologicznych roślin i zwierząt, co może nieść negatywne skutki dla sukcesu reprodukcyjnego roślin oraz negatywnie wpływać na różnorodność biologiczną zapylaczy (Kehrberger and Holzschuh, 2019; Kudo and Cooper, 2019; Kudo and Ida, 2013). Badania wykonane na materiałach zielnikowych pokazały, że w Europie rośliny wiosenne lasów kwitną wcześniej niż kilkadziesiąt lat temu, lecz zmiany te zachodzą bardzo nierównomiernie (Willems et al., 2022). Dotąd jednak nie podjęto próby wykorzystania podobnych danych do predykcji fenologii roślin w przyszłych warunkach

klimatycznych, które by mogły pomóc ocenić na ile zmiany fenologiczne wynikające ze zmian klimatycznych mogą być synchroniczne, a jeśli nie to jakie czynniki środowiskowe mogą to determinować. Potencjalnie wydaje się możliwe uzyskanie odpowiedzi na to pytanie, a za razem oszacowanie potencjalnych zmian w interakcjach międzygatunkowych z wykorzystaniem danych gromadzonych w bazach internetowych takich jak iNaturalist (www.inaturalist.org), analizując zmienność odpowiedzi fenologicznych w całych zasięgach geograficznych. Badania przesunięć występowania gatunków w czasie (fenologia) oraz przestrzeni, dlatego staje się pilną potrzebą dla zrozumienia jak będzie w przyszłości kształtować się struktura gatunkowa i funkcjonowanie ekosystemów leśnych. Przygotowanie się na nieuchronne zmiany jest jednym z największych wyzwań dla biologii środowiskowej, a także nauk stosowanych wykorzystujących wyniki tych badań w leśnictwie i ochronie przyrody. Postawione cele nawiązują do pytań wyróżnionych jako kluczowe przy planowaniu dalszego rozwoju infrastruktury badań nad ekosystemami (Musche et al., 2019): *“Q1. How do changes in species diversity, functional diversity and community composition affect ecosystem functioning?”*, *“Q6. How will climate change affect the carbon cycle and what are the consequences for the provision of ecosystem services?”*, *“Q13. What are the most promising management options to foster adaptation of ecosystems to climate change?”* oraz *“Q18. How can we reduce uncertainties in climate change projections provided by Earth system models?”*.

Celem moich badań było (i) opracowanie modeli potencjalnego rozmieszczenia najważniejszych ekologicznie i gospodarczo w klimacie umiarkowanym Europy zdomowionych gatunków drzew; (ii) opracowanie modeli potencjalnego rozmieszczenia sześciu pospolitych i szeroko rozmieszczonych gatunków roślin runa europejskich lasów; (iii) określenie, które ze zmiennych klimatycznych najsilniej kształtują zasięgi geograficzne gatunków z próbą objaśnienia znaczenia poszczególnych zmiennych dla biologii badanych gatunków; (iv) przetestowanie użyteczności fotografii roślin dokumentujących obserwacje ich występowania, zamieszczonych w bazach tworzonych w ramach nauki obywatelskiej do wielkoskalowego modelowania terminów wystąpienia faz fenologicznych w obecnych i w przyszłych warunkach klimatycznych.

Postawiłem następujące hipotezy: (i) dotąd opublikowane predykcje rozmieszczenia gatunków mogą być w pewnym stopniu niedoszacowane ze względu na niedostępność danych o rozmieszczeniu gatunków w bazach danych, z których pobierano dane do analiz w szczególności z Europy centralnej, południowo-wschodniej i wschodniej; (ii) użycie zaktualizowanych współczesnych danych klimatycznych oraz nowych scenariuszy zmian klimatycznych może również wpłynąć na wyniki predykcji potencjalnego rozmieszczenia w

teraźniejszości i w przyszłości; (iii) dane fenologiczne z baz tworzonych w ramach nauki obywatelskiej dają możliwość oszacowania zmienności fenologicznej w czasie i w przestrzeni, a wraz z interpolowanymi danymi klimatycznymi umożliwią obliczenie terminów faz fenologicznych w lokalizacjach, gdzie obserwacji fenologicznych nie prowadzono; (iv) możliwe jest wykorzystanie danych przestrzennych o fazach fenologicznych do obliczenia terminów ich występowania w przyszłych warunkach klimatycznych.

Materiały i metody

Dane o przestrzennym występowaniu gatunków użyte w pracach 1-4

Większość danych wejściowych do modelowania potencjalnych zasięgów gatunków stanowiły współczesne (udokumentowane od 1970 r.) współrzędne geograficzne ich stanowisk na obszarze Europy, które uzyskaliśmy z bazy danych Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (www.gbif.org). Ze względu na nierównomierne wysiłki poszczególnych krajów w mapowaniu gatunków i udostępnianiu danych w niniejszej bazie, dla wszystkich badanych gatunków za wyjątkiem *Vaccinium myrtillus* i *Vaccinium vitis-idaea* niezbędne było próbkowanie danych klimatycznych w oparciu o zbiór danych uzupełniony przez stanowiska z innych baz danych, np. Botanical Information and Ecology Network (BIEN) (Enquist et al., 2009), European Vegetation Archive (EVA) (Chytrý et al., 2016), UkrBIN (<https://ukrbin.com>), iNaturalist (www.inaturalist.org), Plantarium (www.plantarium.ru) oraz o dane z inwentaryzacji leśnych, szarej i naukowej literatury oraz niepublikowanych materiałów autorów. Wykaz źródeł danych o rozmieszczeniu gatunków zamieszczono w załącznikach opublikowanych prac nr 1, 2 i 4.

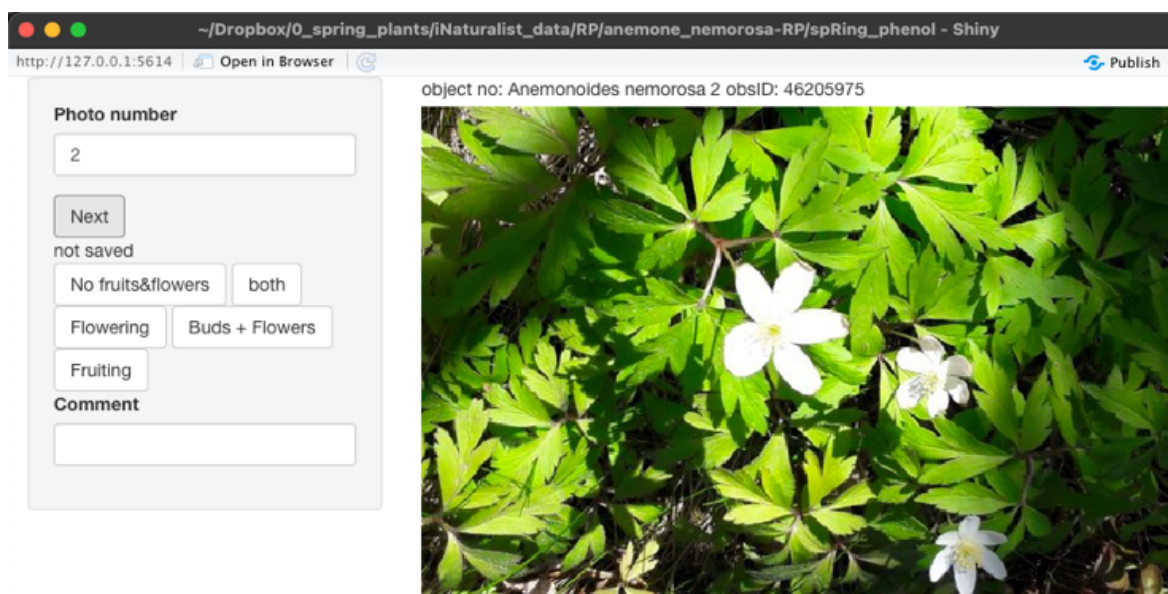
Potencjalny błąd wynikający z nierównomiernego pokrycia danymi o rozmieszczeniu, wynikający z nadreprezentacji stanowisk gatunków w niektórych regionach i niedostateczną reprezentacją w innych, zredukowaliśmy poprzez losowy wybór poszczególnych miejsc z użyciem siatki wektorowej z rozdzielczością $0,25^\circ$ (Rocchini and Garzon-Lopez, 2017). Metoda ta pozwoliła nam uzyskać bardziej reprezentatywne dane dla gatunków w porównaniu ze zbiorami danych wejściowych, przy jednoczesnym zachowaniu liczby stanowisk wystarczających do analiz MaxEnt (van Proosdij et al., 2016).

Dane o czasowym (fenologicznym) występowaniu *Anemone nemorosa*

Wstępnie badania miały objąć wszystkie cztery gatunki geofitów (*Anemone nemorosa*, *A. ranunculoides*, *Convallaria majalis* i *Maianthemum bifolium*), dla których wykonywaliśmy modelowanie potencjalnych zasięgów (praca 4). Jednak ze względu na wówczas niedostateczną

liczbę obserwacji dla poszczególnych gatunków i ich faz fenologicznych, uniemożliwiająca obliczenie 95% przedziałów ufności dla terminu kwitnienia w większej liczbie pikseli, która pozwoliłaby na opracowanie wiarygodnych modeli matematycznych, ostatecznie w pracy nr 5 wykorzystano jedynie najliczniej reprezentowany zbiór obserwacji, jakim były dane o terminach kwitnienia *A. nemorosa*.

Do badań wykorzystaliśmy głównie obserwacje zamieszczone w bazie iNaturalist (www.inaturalist.org) (97,2%). Pozostałe dane pochodziły z innych baz danych, np. UkrBIN (<https://ukrbin.com>) oraz publikacji i niepublikowanych materiałów autorów. Ze względu na to, że obserwatorzy dodając fotografie roślin na stronę iNaturalist rzadko zamieszczają informacje o stanie fenologicznym, a struktura strony tej bazy nie sprzyja ergonomicznemu wprowadzaniu informacji o fenologii, do uzyskiwania danych o terminach wystąpienia faz fenologicznych przygotowaliśmy własną aplikację działającą w środowisku R (R Core Team 2022) i pakiecie Shiny (Chang et al. 2021). Ta aplikacja (Puchałka et al. 2022, Appendix A) umożliwiła przeanalizowanie 9804 fotografii wczytywanych z listy zamieszczonej w pliku tekstowym w ciągu zaledwie kilku dni (Ryc. 1).



Ryc. 1. Okno aplikacji przygotowanej aplikacji w środowisku R i pakiecie Shiny do zbierania danych fenologicznych z bazy iNaturalist. Photo numer przedstawia numer analizowanej obserwacji, Przyciski „No fruits&flowers”, „both”, „Flowering”, „Buds+Flowers” i „Fruiting” umożliwiają zapis stanu fenologicznego do pliku *.csv. Przycisk „Next” umożliwia przejście do kolejnej obserwacji po zapisie danych.

Rezultatem pracy z aplikacją była tabela zawierająca współrzędne geograficzne, datę obserwacji i stan fenologiczny (rośliny w stadium pąków, kwitnące, owocujące lub z nieustalonym stadium fenologicznym).

Dane klimatyczne

W pracy 1 do modelowania obecnego potencjalnego rozmieszczenia *R. pseudoacacia* metodą MaxEnt (Elith et al., 2011; Phillips et al., 2004) użyliśmy wówczas wciąż powszechnie używanych zmiennych bioklimatycznych z bazy Worldclim 1.4 z rozdzielczością 2,5' (www.worldclim.org Hijmans et al., 2005). Użycie tych map pozwoliło nam ocenić na ile znacząco wpłynie na uzyskany wynik uzupełnienie danych o występowaniu tego gatunku w Europie południowo-wschodniej i wschodniej, które nie były dostępne we wcześniejszych badaniach (Dyderski et al., 2018). Natomiast w pracach 2-5 jako predyktorów potencjalnego rozmieszczenia gatunków i fenologii *A. nemorosa* wykorzystaliśmy zaktualizowane zmienne bioklimatyczne z bazy danych WorldClim2.1 (<https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html>) (Fick and Hijmans, 2017), z rozdzielczością 2,5'. We wszystkich badaniach określiliśmy współliniowość zmiennych za pomocą współczynnika korelacji r Pearsona. Następnie usunęliśmy te, które były najbardziej skorelowane z innymi zmiennymi, ustalając jako wartość progową $|r| > 0,7$ (Brun et al., 2020). W ten sposób w każdej z analiz został wykorzystany zestaw zredukowany do kilku zmiennych (Tabela 1). W badaniach nad fenologią *A. nemorosa* wzięliśmy także pod uwagę minimalne temperatury marca i maja, które według wcześniejszych badań determinują czas kwitnienia tego gatunku (De Frenne et al., 2011; Fox and Jönsson, 2019).

Tabela 1. Zmienne klimatyczne (Fick and Hijmans, 2017; Hijmans et al., 2005) wykorzystane w modelowaniu potencjalnych zasięgów i fenologii.

Zmienna bioklimatyczna	Praca				
	1	2	3	4	5
bio1 - średnia roczna temperatura [°C]					+
bio2 - średni zakres dobowy temperatur * (średnia miesięczna * (temp. maks. - temp. min.)) [°C]	+	+	+	+	
bio4 - sezonowość temperatur (odchylenie standardowe * 100)					+
bio7 - roczny zakres temperatur (Bio5-Bio6) [°C]		+	+	+	
bio8 - średnia temperatura najwilgotniejszego kwartału [°C]	+	+	+	+	
bio10 - średnia temperatura najcieplejszego kwartału [°C]	+				
bio11 - średnia temperatura najzimniejszego kwartału [°C]	+	+	+	+	

bio12 - roczna suma opadów [mm]					+
bio15 – sezonowość opadów (wyrażona jako współczynnik zmienności)	+	+	+	+	+
bio16 – suma opadów w najwilgotniejszym kwartale [mm]	+	+		+	
bio18 – suma opadów w najcieplejszym kwartale [mm]	+	+	+	+	
bio19 – suma opadów w najzimniejszym kwartale [mm]	+		+		
Minimalna temperatura marca [°C]					+
Minimalna temperatura maja [°C]					+

Modelowanie przyszłego rozmieszczenia *Robinia pseudodoacia* wykonaliśmy w oparciu o scenariusze nasilenia zmian klimatycznych z 5. raportu IPCC (5th Assessment Report) opracowane jako RCP (representative concentration pathways), określające wielkość wymuszenia radiacyjnego w każdym z nich. Scenariusz RCP4.5 zakładał umiarkowany wzrost stężenia CO₂, podczas gdy scenariusz RCP8.5 – najgorszy możliwy scenariusz. Każdą prognozę przygotowaliśmy z uwzględnieniem zmienności pomiędzy trzema różnymi globalnymi modelami cyrkulacyjnymi (ang. *Global Circulation Models*), tj. HadGEM2-ES (Jones et al., 2011), IPSL – CM5A-LR (Dufresne et al., 2013) i MPI-SM-LR (Giorgetta et al., 2013). Do modelowania zmian potencjalnych zasięgów innych gatunków drzew, krzewinek i geofitów oraz fenologii kwitnienia *A. nemorosa* w przyszłych warunkach klimatycznych wykorzystaliśmy najnowszy, szósty raport IPCC (6th Assessment Report), na którego potrzeby opracowano scenariusze socjoekonomiczne nasilenia zmian klimatycznych (ang. *Shared Socioeconomic Pathways; SSP*; (Riahi et al., 2017). Uwzględniliśmy cztery SSP do modelowania potencjalnych zasięgów: SSP126 (zakładający zrównoważony rozwój, najbardziej optymistyczny scenariusz odzwierciedlający RCP2.6 z piątego raportu), SSP245 (scenariusz pośredni, umiarkowany, odzwierciedlający RCP4.5), SSP370 (rywalizacja regionalna skutkująca wzrostem emisji gazów cieplarnianych, uwzględniona dopiero w szóstym raporcie) i SSP585 (dominacja spalania paliw kopalnych, najgorszy możliwy scenariusz, odzwierciedlający RCP8.5).

Algorytm MaxEnt, którego użyliśmy w pracach 1-4 do modelowania potencjalnego rozmieszczenia gatunków, opiera się na danych dotyczących samej ich obecności. Zamiast danych o ich nieobecności używa pseudoabsencji. Wystąpienia gatunków w analizie MaxEnt były dzielone na zbiór treningowy (75%) i zbiór testowy (25%), w celu walidacji otrzymanego modelu na niezależnym zbiorze obserwacji. Liczba pseudoabsencji dla każdego gatunku wynosiła 10 000. Analizę MaxEnt wykonano z domyślnymi ustawieniami algorytmu. Jakość modelu była oceniana na podstawie wartości Area Under Receiver-Operator Curve (AUC) (Elith et al., 2011). Wskaźnik ten reprezentuje proporcję współczynników „prawdziwie

„dodatnich” i „prawdziwie ujemnych”. W analizie MaxEnt są to wskaźniki pozytywnego i ujemnego nakładania się rzeczywistego i przewidywanego rozmieszczenia gatunków. Za pomocą tej metody uzyskano mapy rastrowe, których komórki reprezentują wartości optimum klimatycznego dla gatunków. Są one wskaźnikiem prawdopodobieństwa że badany gatunek mógłby w danym miejscu występować w określonych warunkach klimatycznych. Oszacowaliśmy również procentowy udział zmiennych środowiskowych w modelach potencjalnego rozmieszczenia, dostarczając informacji o tym, które z nich determinują kształtowanie zasięgów gatunkowych. Analizy statystyczne zostały wykonane przy użyciu oprogramowania R (R Core Team, 2022). Do modelowania potencjalnego rozmieszczenia wykorzystaliśmy pakiet "dismo" (Hijmans et al., 2020). Przetwarzanie danych geoprzestrzennych przeprowadziliśmy z wykorzystaniem pakietów 'raster' i 'sf' (Hijmans, 2020; Pebesma, 2018). Uzyskane dla każdego gatunku mapy obecnego potencjalnego zasięgu i mapy dla każdego RCP lub SSP oraz odpowiednio dla nich każdego z GCM, następnie uśredniliśmy wewnątrz czterech SSP dla dwóch okresów – 2050 i 2070. Niepewność związaną z zastosowanym GCM w oszacowaniach modeli obliczyliśmy za pomocą wartości odchylenia standardowego pomiędzy predykcjami dla danego SSP i okresu w ramach różnych GCM (Goberville et al., 2015; Paż-Dyderska et al., 2021; Thuiller et al., 2019). Ze względu na dużą liczbę wyników zostały one zamieszczone w załącznikach prac 1-4. W podobny sposób uśredniane były wyniki i oszacowywana niepewność predykcji zmian fenologii kwitnienia *A. nemorosa* w pracy 5.

Aby uzyskać informacje o obecności i braku obecności gatunków w różnych scenariuszach zmian klimatycznych, obliczyliśmy progową wartość prawdopodobieństwa o najwyższym sumarycznym wskaźniku czułości (*true positive rate*) i specyficzności (*true negative rate*) (Fielding and Bell, 1997). Dla każdej komórki rastra na mapie przeprowadziliśmy porównanie obecnego potencjalnego rozmieszczenia z przyszłymi prognozami w celu określenia: (i) obszarów, które nie nadają się do kolonizacji zarówno w obecnych warunkach, jak i w przyszłych scenariuszach zmian klimatu; (ii) obszary, które w przyszłości staną się optymalne do kolonizacji; (iii) obszary, które są obecnie optymalne, ale w przyszłości staną się nieodpowiednie; oraz (iv) obszary, które są optymalne zarówno obecnie, jak i w przyszłych warunkach klimatycznych (Dyderski et al., 2018). Następnie podsumowaliśmy liczbę pikseli reprezentujących każdy z czterech stanów przesunięć niszy, aby ocenić, jaka część z nich reprezentuje kurczenie, rozszerzanie się zasięgu i jego utrzymanie w ramach każdego SSP i okresu, aby oszacować wielkość przesunięć nisz klimatycznych.

W części fenologicznej badań (Praca 5) użyliśmy dodatkowo danych meteorologicznych z bazy danych E-OBS (Cornes et al., 2018; Haylock et al., 2008) o dobowej rozdzielczości dla każdej z 177 lokalizacji, gdzie liczba obserwacji w komórce siatki wynosiła co najmniej 10. Ekstrakcja obejmowała lata 2015–2020, z których pochodziła większość obserwacji. Do predykcji przestrzennej zmienności fenologii kwitnienia w obecnych warunkach klimatycznych, wykorzystaliśmy dane klimatyczne dostępne z bazy WorldClim 2.1, z rozdzielczością przestrzenną 5', które nie były silnie skorelowane ($|r| < 0,7$) z innymi zmiennymi: bio1, bio4, bio12 i bio15 (Tabela 1). Do modelowania fenologii *A. nemorosa* w przyszłych warunkach klimatycznych użyliśmy dwóch scenariuszy (SSP245 i SSP585). Ponadto każdy SSP został przeanalizowany pod kątem czterech losowo wybranych modeli globalnej cyrkulacji (GCM): IPSL-CM6A-LR (Francja), MRI-ESM2-0 (Japonia), CanESM5 (Kanada), BCC-CSM2-MR (Chiny). Użycie większej liczby GCMs miało na celu oszacowanie niepewności predykcji rozmieszczenia potencjalnego gatunków i fenologii między różnymi scenariuszami zmian klimatu.

Nasze predykcje uwzględniały obecne warunki klimatyczne oraz prognozy dla lat 2041-2060 oraz 2061-2080.

Ograniczenia badawcze

1. Liczba gatunków możliwych do zbadania.

Stan rozpoznania rozmieszczenia większości gatunków w Europie i dostępność tych danych w bazach gromadzących informacje o różnorodności biologicznej nie pozwala wciąż na uzyskanie reprezentatywnych wyników próbkowania danych klimatycznych dla większości gatunków. Praca nr 1 pokazała jak ważne jest prowadzenie takich badań w oparciu o najszersze możliwe próbkowanie danych z całego zasięgu gatunku. Z tego względu również w kolejnych pracach dołożyliśmy starań, nad uzupełnianiem danych o rozmieszczeniu z dodatkowych, często trudno dostępnych źródeł, takich jak na przykład czerwone księgi mniejszych jednostek administracyjnych na terenie Rosji czy literatura pisana w lokalnych językach narodowych. Większy nacisk na przygotowanie reprezentatywnych danych o rozmieszczeniu wiąże się z ograniczeniem liczby badanych gatunków, do tych dla których dodatkowe źródła danych są osiągalne i są one możliwe do opracowania dla zespołu autorów pod względem nakładów pracy.

2. Dobór gatunków.

Nasze badania rozpoczęły się od analiz rozmieszczenia *R. pseudoacacia*, gatunku nad którym wówczas prowadziliśmy badania dendrochronologiczne. Uzyskane wyniki sugerowały potrzebę wykonania podobnych badań w przypadku innych gatunków introdukowanych. Jako kryterium wyboru wybraliśmy najważniejsze gospodarczo i ekologicznie zadomowione w Europie gatunki drzew według ogólnoeuropejskich podsumowań prac Akcji COST NNEXT (FP1403), dla których było możliwe uchwycenie górnego zakresu tolerancji warunków termicznych w Europie, a tym samym uchwycenie nie tylko możliwości ekspansji ale również kurczenia się zasięgu. Jest to ważne dlatego, że wiele z nich jest uważanych za alternatywy dla gatunków rodzimych w przyszłych warunkach klimatycznych (np. Thurm et al. 2018). Ze względu na różnice funkcjonalne do pracy 2 wybraliśmy konsekwentnie po sześć gatunków liściastych i iglastych, żeby uzyskać bardziej zbalansowane i możliwe do dyskusji wyniki. Nie włączyliśmy do analiz gatunków europejskich drzew ze względu na to, że są one przedmiotem badań opisywanych w innym artykule (Dyderski et al. w recenzji). Natomiast w przypadku roślin runa wybraliśmy gatunki pospolite, łatwe w identyfikacji dla których możliwe było skompletowanie możliwie najpełniejszych danych o rozmieszczeniu. Ze względu na masowe występowanie są to gatunki ważne ekologicznie, pełniące kluczową rolę w funkcjonowaniu warstwy zielnej ekosystemów leśnych. Dotąd jednak nie były badane w całych zasięgach w kontekście zmian potencjalnych nisz w aktualnych scenariuszach zmian klimatycznych. Z uwagi na wciąż niedostatecznie dużą ilość danych badania nad modelowaniem zmian fenologicznych, na czas prowadzenia badań możliwe były do wykonania tylko na najpospolitszym z nich, *Anemone nemorosa*.

3. Dobór zmiennych środowiskowych.

Nasze badania opierały się wyłącznie na zmiennych klimatycznych, które również determinują inne warunki środowiskowe, np. warunki glebowe. Nie używaliśmy w naszych badaniach zmiennych glebowych, typu pokrycia terenu i innych ze względu na to, że dostępne dane o rozmieszczeniu nie zawsze mają wystarczającą precyzję pozwalającą na ekstrakcję zgodnych z rzeczywistymi warunków środowiskowych dla punktów (stanowisk gatunków). Z drugiej strony dostępne mapy ze zmiennymi środowiskowymi przedstawiają uśrednione wartości dla komórek rastra lub wartość dominującą na jego powierzchni w przypadku danych kategorycznych. Z obu tych powodów istniało duże ryzyko uzyskania wyników ekstrakcji dalekich od wartości rzeczywistych. Ponadto zmienne inne niż klimatyczne nie mają

opracowanych predykcji dla przyszłych warunków klimatycznych, a można z góry założyć, że zmiany klimatu z pewnością wpłyną pokrycie terenu i sposób jego użytkowania.

Omówienie wyników poszczególnych prac

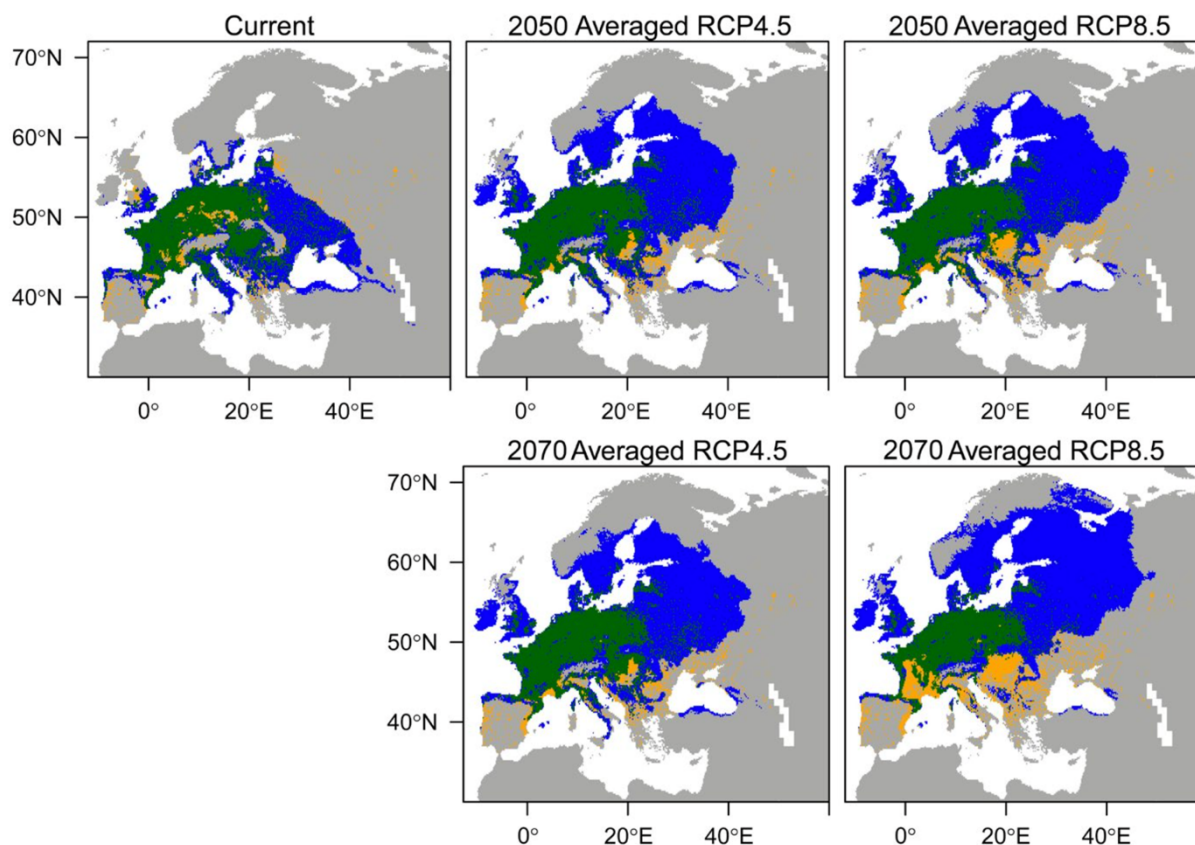
Praca 1. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) range contraction and expansion in Europe under changing climate

Badania skupiały się na określeniu potencjalnego rozmieszczenia robinii akacjowej *R. pseudoacacia* L. (Fabaceae) w Europie, w obecnych i w przyszłych warunkach klimatycznych. Ten północnoamerykański gatunek drzewa jest szeroko uprawiany w Europie jako drzewo dostarczające twardego i odpornego na rozkład mikrobiologiczny drewna oraz jako roślina ozdobna i miododajna. Ponadto, z uwagi na niewielkie wymagania glebowe ten pionierski gatunek drzewa sadzony jest w celu utrwalania gleb, w celu zapobiegania erozji oraz do rekultywacji zdegradowanych terenów (Cierjacks et al., 2013; Nicolescu et al., 2018). Poprzez zdolność do wiązania azotu atmosferycznego i zmianę reżimu świetlnego jest to gatunek silnie zmieniający warunki siedliskowe, przez co przyczynia się do silnego przekształcania leśnych i trawiastych zespołów ekologicznych w kierunku zbiorowisk ruderalnych (Sitzia et al., 2012; Slabejová et al., 2019). Ponadto, szeroka skala jego uprawy oraz zdolność do kolonizacji zaburzonych siedlisk sprawia, że jest to jeden z gatunków uważanych za największe zagrożenie dla różnorodności biologicznej ekosystemów lądowych w Europie (Campagnaro et al., 2018).

Motywacja do podjęcia badań pojawiła się podczas badań dendrochronologicznych nad tym gatunkiem, których celem pierwotnie miało być również określenie północno-wschodnich granic zasięgu występowania tego gatunku w Europie wschodniej (Klisz et al., 2021). Wówczas wstępne analizy bioklimatyczne uzupełnione o dotąd niedostępne dane o rozmieszczeniu *R. pseudoacacia* sugerowały, że potencjalny zasięg występowania tego gatunku jest znacznie szerszy niż wskazywały to poprzednie badania (Dyderski et al., 2018). Do współpracy nad nową predykcją rozmieszczenia *R. pseudoacacia*, zostali zaproszeni wiodący autorzy poprzednich badań oraz naukowcy z Europy wschodniej i południowo-wschodniej, dzięki którym udało się zestawić zbiór danych o występowaniu niniejszego gatunku z próbkowaniem danych klimatycznych obejmujących cały jego europejski zasięg.

Uzyskany model potencjalnego rozmieszczenia MaxEnt dla *R. pseudoacacia* uzyskał dobre dopasowanie do zestawu walidacyjnego (AUC = 0,860). Wartość progowa dla obecności gatunku wynosiła 0,41. Według uzyskanych wyników, czynnikami mającymi największy wpływ na rozmieszczenie *R. pseudoacacia* były ilość opadów w najcieplejszym kwartale

(bio18) i średnia temperatura najzimniejszego kwartału (bio 11) oraz średnia temperatura najcieplejszego kwartału (bio10). Udział każdej z pozostałych zmiennych w objaśnianiu modelu był mniejszy niż 10%. Uzyskane wyniki pokazały, że większość obecnych stanowisk *R. pseudoacacia* występuje w optymalnym dla tego gatunku klimacie. Jednak nadal istnieją rozległe obszary nieskolonizowane obszary, zwłaszcza na terytorium Białorusi, Ukrainy, północnej Turcji, południowej Szwecji i południowej Anglii (Ryc. 2).



Ryc. 2. Aktualne i uśrednione przewidywane zasięgi *Robinia pseudoacacia* dla dwóch scenariuszy zmian klimatu: optymistycznego (RCP4.5) i pesymistycznego (RCP8.5) odpowiednio na lata 2050 i 2070. Zielony obszar reprezentuje nakładanie się obecnych i przyszłych prognozowanych zasięgów, niebieski - potencjalne rozszerzenie zasięgu, a pomarańczowy - potencjalne zmniejszenie zasięgu.

Natomiast część stanowisk w Europie Wschodniej i na obszarach górskich w Europie środkowej znajduje się poza optimum klimatycznym dla tego gatunku. Prognozy na lata pięćdziesiąte XXI wieku wykazały rozszerzenie zasięgu w Europie północnej, zachodniej i wschodniej oraz zmniejszenie zasięgu w południowo-zachodniej i południowej części obecnego rozmieszczenia, zwłaszcza w Portugalii, na Węgrzech, Bułgarii, Rumunii, Grecji i

Hiszpanii. W scenariuszu pesymistycznym nawet w latach 50. XXI wieku obecne rozmieszczenie na większości obszaru nizinnych Węgier, Rumunii i Bułgarii, a także w strefy stepowej w Ukrainie, znajdzie się poza optymalnymi warunkami klimatycznymi. Natomiast stanowiska górskie i podgórskie w Europie Środkowej osiągną optimum klimatyczne. W latach 70. XXI wieku, w scenariuszu optymistycznym, większość obecnych nizinnych stanowisk *R. pseudoacacia* w Bułgarii, Hiszpanii, Portugalii, Rumunii, Węgrzech i Ukrainie, może znaleźć się poza warunkami optymalnymi. W scenariuszu pesymistycznym, natomiast, prawie wszystkie stanowiska w Europie południowo-wschodniej będą poza optimum klimatycznym, podobnie jak większość obszaru Włoch, Hiszpanii, Portugalii i południowej Francji. W tych regionach *R. pseudoacacia* uzyska nowe potencjalne rozmieszczenie tylko w wyższych położeniach górskich. Natomiast większość północnej i północno-wschodniej Europy będzie objęta potencjalnym zasięgiem tego gatunku.

W prognozach na lata pięćdziesiąte i siedemdziesiąte XXI wieku wszystkie warianty zakładają ekspansję zasięgu szerszą niż obecny obszar potencjalnie nadający się do kolonizacji. W latach 50. XXI wieku według wyników uzyskanych z dwoma GCM, w scenariuszu pesymistycznym przewidywane rozszerzenie zasięgu będzie większe niż w scenariuszu optymistycznym, natomiast MPI-SM-LR wykazuje podobne wartości. Przewidywane kurczenie się zasięgu zarówno w scenariuszu pesymistycznym, jak i optymistycznym są podobne. Z kolei prognozy na lata 70. XXI w. wskazują na większe rozszerzenie zasięgu w scenariuszu pesymistycznym niż optymistycznym we wszystkich wariantach. Ponadto można spodziewać się znacznie większych strat zasięgów na południu Europy w wariantach pesymistycznych niż optymistycznych. Wyniki uzyskane w oparciu o HadGEM2-E wykazały największe zmniejszenie zasięgu, natomiast IPSL-CM5A-LR największe rozszerzenie zasięgu.

Praca 2. Predicted range shifts of alien tree species in Europe

Wyniki badań uzyskane w badaniach potencjalnym rozmieszczeniem *R. pseudoacacia* (Puchałka et al., 2021), wskazywały na potrzebę aktualizacji modeli potencjalnego rozmieszczenia innych obcych gatunków drzew w Europie oraz zbadania potencjalnych zasięgów gatunków dotąd nie badanych. Szczególnie dla taksonów, które mają duże znaczenie ekonomiczne i są powszechnie wprowadzane do lasów oraz uznawane za zdomowione lub inwazyjne. Z najpowszechniejszych obcych gatunków drzew w Europie (Pötzelsberger et al., 2021, 2020), pomijając wcześniej zbadaną *R. pseudoacacia*, wybraliśmy sześć gatunków iglastych (*Abies grandis*, *Picea sitchensis*, *Pinus contorta*, *Pinus strobus*, *Pseudotsuga menziesii* i *Thuja plicata*) i sześć gatunków liściastych (*Acer negundo*, *Ailanthus altissima*,

Fraxinus pennsylvanica, *Juglans nigra*, *Prunus serotina* i *Quercus rubra*), dla których w Europie występują prawdopodobnie w pełnym zakresie tolerancji warunków temperaturowych i opadowych, tak by uchwycić możliwie pełną zmienność ich niszy klimatycznych. Podobnie jak w przypadku badań nad *R. pseudoacacia*, ze względu na niedostateczną reprezentację danych o rozmieszczeniu tych gatunków w Europie centralnej, wschodniej, a szczególnie południowo-wschodniej, zbiór danych uzupełniliśmy o dane z inwentaryzacji leśnych, lokalnych baz danych, literatury naukowej oraz raportów. Szczegółowy wykaz źródeł zamieszczony został w załączniku artykułu (Puchałka et al., 2023b).

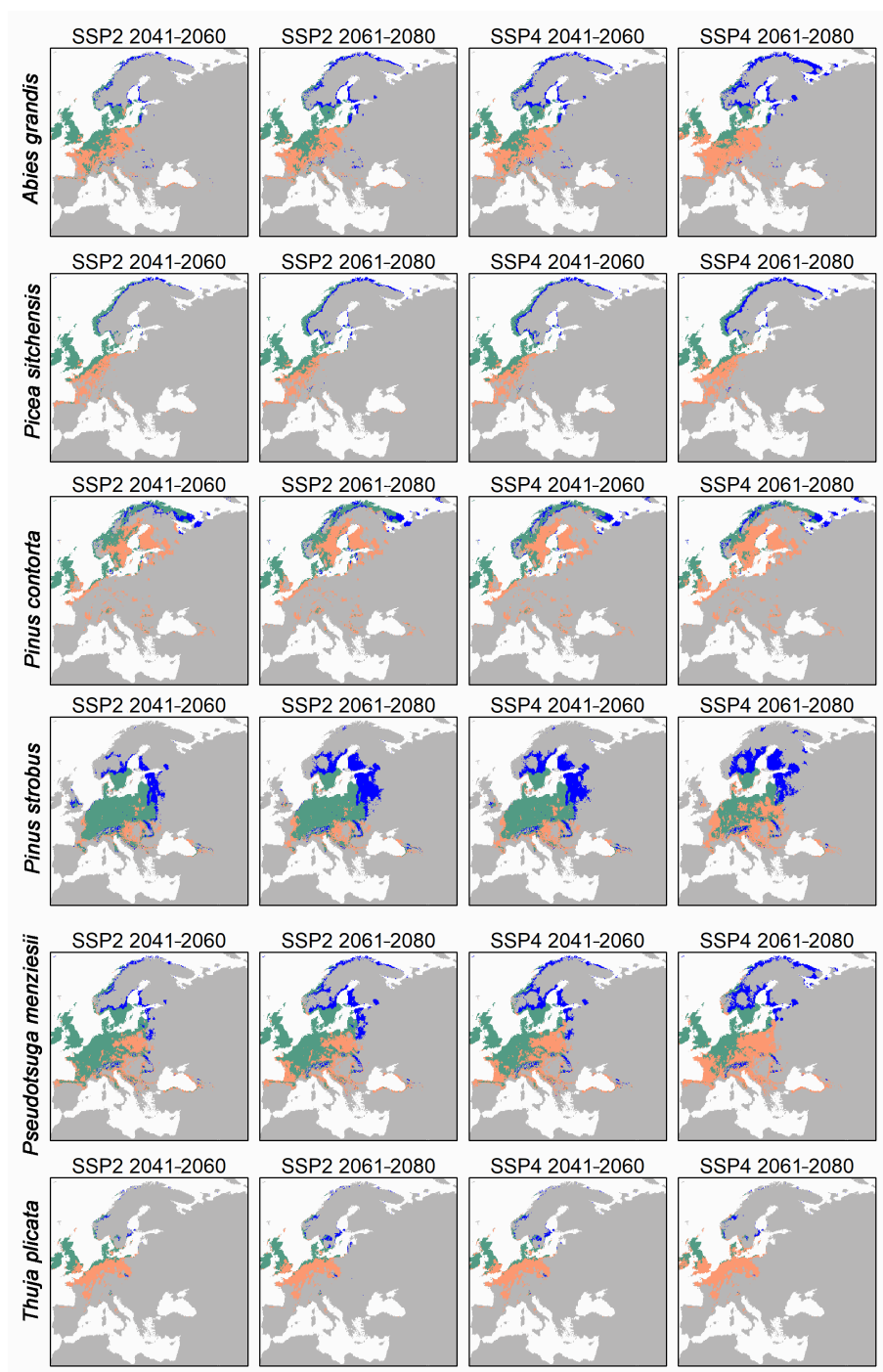
Jakość modeli potencjalnego rozmieszczenia MaxEnt mierzona wartościami AUC wahała się od 0,90 do 0,98 (średnio $0,95 \pm 0,02$). Modele dla każdego gatunku różniły się pod względem znaczenia zmiennych bioklimatycznych kształtujących ich zasięgi (Tabela 2). W przypadku gatunków iglastych najważniejszą zmienną był roczny zakres temperatur (bio7), za wyjątkiem *P. strobus*, gdzie średnia temperatura najzimniejszego kwartału (bio11) i opady najcieplejszego kwartału (bio18) miały większe znaczenie. Dla czterech z sześciu badanych gatunków liściastych opady w najcieplejszym z kwartałów były najważniejszym czynnikiem objaśniającym potencjalne zasięgi, podczas gdy dla *A. altissima* i *J. nigra* były drugim w kolejności czynnikiem objaśniającym, po średniej temperaturze najzimniejszego kwartału.

Tabela 2. Znaczenie zmiennych bioklimatycznych (%) dla kształtowania się zasięgów poszczególnych gatunków. Akronimy zmiennych bioklimatycznych objaśniono w Tabeli 1.

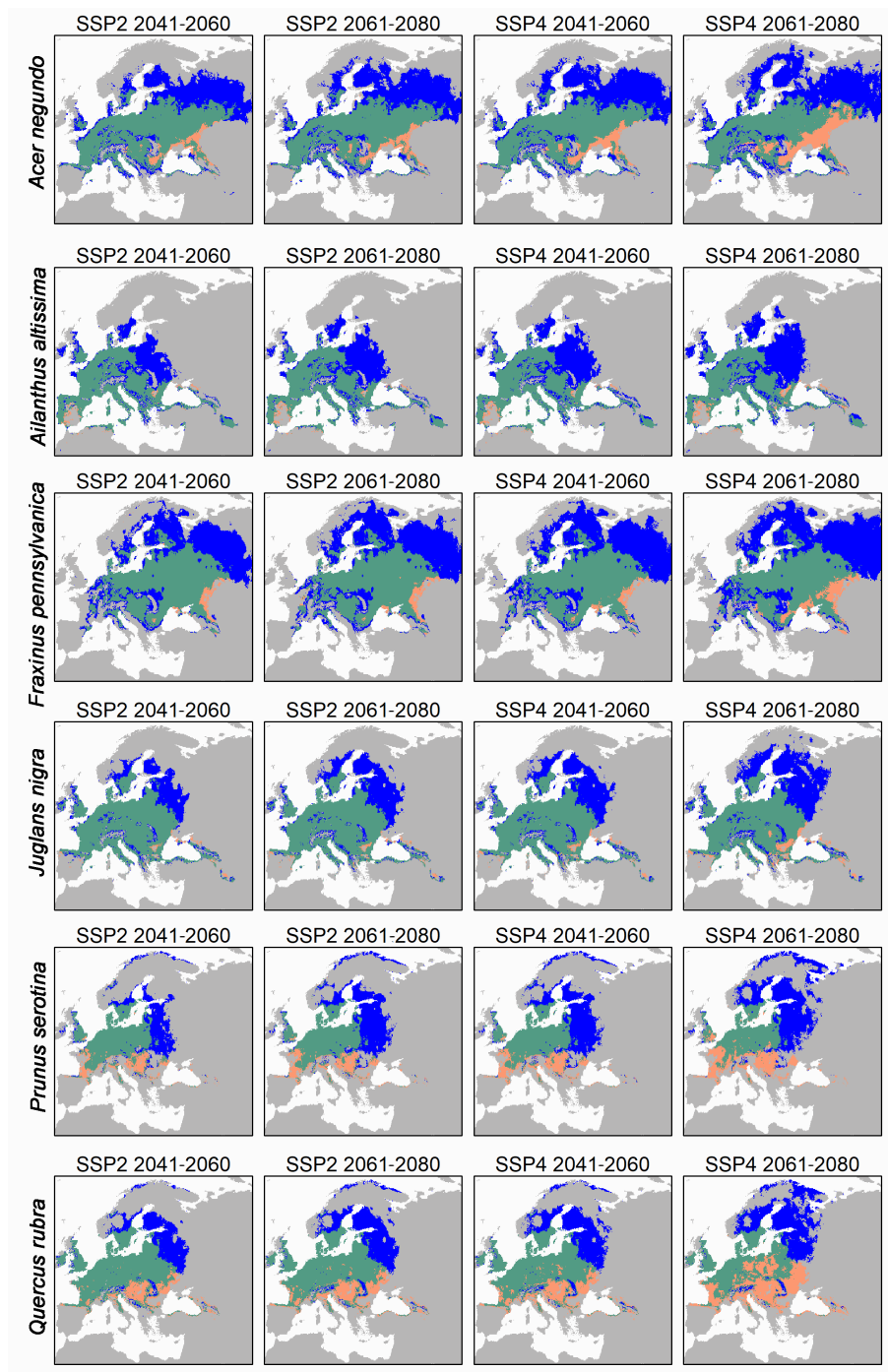
Gatunek	bio2	bio7	bio8	bio11	bio15	bio16	bio18
<i>Abies grandis</i>	0.65	49.65	1.54	17.41	3.47	0.88	26.40
<i>Picea sitchensis</i>	1.65	74.99	0.50	3.36	0.50	0.28	18.73
<i>Pinus contorta</i>	3.56	35.61	20.08	5.85	2.15	1.36	31.38
<i>Pinus strobus</i>	1.56	23.31	2.76	30.45	0.07	0.79	41.05
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0.85	42.29	1.09	21.83	0.36	0.57	33.00
<i>Thuja plicata</i>	2.87	42.10	0.75	24.68	1.21	0.84	27.54
<i>Acer negundo</i>	4.40	2.04	11.93	23.87	1.43	2.68	53.64
<i>Ailanthus altissima</i>	3.22	6.94	2.87	55.71	1.24	7.02	23.01
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	0.96	0.82	37.25	16.96	3.58	0.77	39.66
<i>Juglans nigra</i>	5.89	11.23	4.85	39.48	1.09	1.25	36.21
<i>Prunus serotina</i>	2.08	15.98	1.37	37.09	0.73	3.10	39.65
<i>Quercus rubra</i>	1.70	4.35	2.36	39.59	0.08	1.60	50.32

Nasze modele przewidują niewielkie przesunięcia zasięgu badanych gatunków iglastych na północ i wschód we wszystkich analizowanych scenariuszach i ramach czasowych, z największym wzrostem na wschód w przypadku *P. strobus* i *P. menziesii*. Z ich wyjątkiem obce

gatunki iglaste, z zmniejszą swój zasięg w Europie środkowej oraz śródlądowych obszarach Europy zachodniej. Potencjalny zasięg *A. grandis*, *P. contorta*, *P. sitchensis* i *T. plicata* będzie ograniczony do Wysp Brytyjskich, przybrzeżnej Skandynawii, Danii, Holandii i północno-zachodnich Niemiec. W przypadku *P. menziesii* modele przewidują utrzymanie się optymalnych warunków klimatycznych w zachodnich Niemczech, północnej Francji, Finlandii, Szwecji i pasmach górskich (Ryc. 3).



Ryc. 3. Obecne i przewidywane zasięgi sześciu badanych gatunków drzew iglastych. Objaśnienia: zielony+pomarańczowy - obecne potencjalne rozmieszczenie, zielony – obszary, gdzie zasięg potencjalny zostanie utrzymany, pomarańczowy – obszary przyszłych strat zasięgu, niebieski – obszary przyszłego rozszerzenia zasięgu, szary – obszary obecnie i w przyszłości nieodpowiednie klimatycznie.



Ryc. 4. Obecne i przewidywane zasięgi sześciu badanych gatunków drzew liściastych. Objaśnienia: zielony+pomarańczowy - obecne potencjalne rozmieszczenie, zielony – obszary, gdzie zasięg potencjalny zostanie utrzymany, pomarańczowy – obszary przyszłych strat zasięgu, niebieski – obszary przyszłego rozszerzenia zasięgu, szary – obszary obecnie i w przyszłości nieodpowiednie klimatycznie.

gdzie zasięg potencjalny zostanie utrzymany, pomarańczowy – obszary przyszłych strat zasięgu, niebieski – obszary przyszłego rozszerzenia zasięgu, szary – obszary obecnie i w przyszłości nieodpowiednie klimatycznie.

Najmniejszą utratę optimum klimatycznego spośród gatunków iglastych przewidujemy dla *P. strobus*, która utrzymałaby się na większości obszarów swojego obecnego potencjalnego zasięgu. Stwierdziliśmy, że wszystkie badane gatunki drzew liściastych rozszerzą swój zasięg w kierunku północno-wschodnim, z największymi zyskami dla *A. negundo* i *F. pennsylvanica* (Ryc. 4). Najdalsze przesunięcia na północ przewidywaliśmy dla *P. serotina* i *Q. rubra*. Wszystkie badane gatunki liściaste za wyjątkiem *A. altissima* utracą swój południowo-wschodni zasięg, zwłaszcza *A. negundo* i *F. pennsylvanica*. W przypadku *Q. rubra* i *P. serotina* spodziewamy się również utraty południowej i południowo-zachodniej części obecnego zasięgu klimatycznego.

Obszar potencjalnej niszy klimatycznej dla wszystkich gatunków liściastych i *P. strobus* we wszystkich badanych scenariuszach zmian klimatu będzie szerszy niż w obecnych warunkach. Przewidujemy największe rozszerzenie zasięgu dla *P. serotina* i *A. altissima*, a najmniejsze - dla *P. contorta*, *P. sitchensis* i *T. plicata*, a największe kurczenie się zasięgów dla tych trzech gatunków. Stwierdziliśmy również najwyższe wielkości zmian zasięgu w scenariuszach SSP485 i najniższe w scenariuszach SSP126. W przypadku zarówno gatunków liściastych, jak i iglastych, większość zmian przewidywanych na lata 2061-2080 nastąpi już w latach 2041-2060. W szczególności dla badanych gatunków iglastych będzie to ok. 75% przewidywanych zmian.

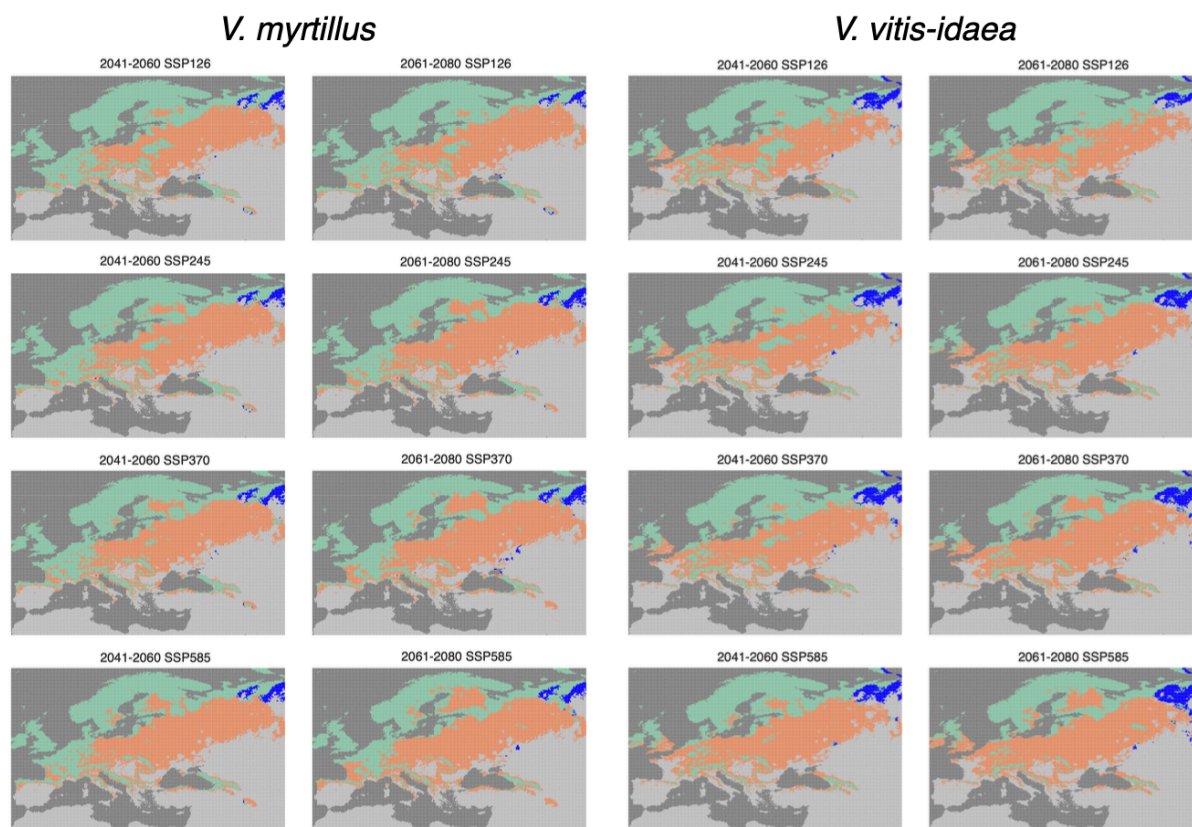
Praca 3. Climate change will cause climatic niche contraction of *Vaccinium myrtillus* L. and *V. vitis-idaea* L. in Europe

Borówka czernica *V. myrtillus* i borówka brusznica *V. vitis-idaea* (Ericaceae) są szeroko rozmieszczonymi w Europie i pospolitymi krzewinkami związanymi ekologicznie z lasami iglastymi i mieszanymi oraz ekosystemami tundrowymi. Ze względu na masowe występowanie pełną ważną rolę w strukturze ekosystemów, obiegu pierwiastków, a także jako źródło pokarmu dla wielu gatunków zwierząt oraz surowiec kulinarny i farmaceutyczny dla człowieka (Ritchie, 1956, 1955). Niektóre wcześniejsze badania sugerowały, że obu tym gatunkom silnie zagraża przemiana składu gatunkowego z iglastych na liściaste, wynikająca zarówno ze zmian w prowadzeniu gospodarki leśnej, ale również indukowana zmianami klimatu. W zależności, od gatunku drzewa może prowadzić do różnokierunkowych, negatywnych zmian w niszach

ekologicznych borówek, polegających na przykład w przypadku *R. pseudoacacia* na negatywnych zmianach w ilości nutrientów i chemizmie gleby (Piwczyński et al., 2016), lub w silnym zacieleniu powodowanym przez *Q. rubra* (Woziwoda et al., 2021, 2019). Obydwa obce gatunki drzew powodujące pogorszenie się warunków do występowania borówek, według naszych badań będą zyskiwać nowe obszary do kolonizacji, również na obszarach w których dominują ubogie piaszczyste gleby, preferowane przez borówki (Puchałka et al., 2023b, 2021). Dotąd jednak nie zbadano w szerszej skali jak na same zmiany klimatyczne zareagują borówki *V. myrtillus* i *V. vitis-idaea*. Stąd celem badań było modelowanie zasięgu obecnych i przyszłych nisz klimatycznych *V. myrtillus* i *V. vitis-idaea* w Europie oraz określenie, które czynniki klimatyczne kształtują ich zasięgi. Mając na uwadze ich pokrywające się silnie z rozmieszczeniem *Picea abies* i *Pinus sylvestris*, pod okapem których znajdują optymalne warunki do występowania (Ritchie, 1956, 1955), a których zasięgi znacznie się zmniejszą wskutek zmian klimatycznych (Dyderski et al. 2028; Bombi et al. 2017), postawiliśmy hipotezę, że podobnie jak wymienione drzewa iglaste, obydwie gatunki borówek będą przegranymi zmian klimatycznych. Skala tego zmniejszenia zasięgów będzie zależała od ram czasowych i scenariusza zmian klimatu.

Wartości AUC >0,8 dla uzyskanych modeli MaxEnt wskazują na dobre właściwości predykcyjne modeli rozmieszczenia gatunków dla obu gatunków borówek. Zmienną bioklimatyczną o największym znaczeniu sięgającym >60% dla *V. myrtillus* i *V. vitis-idaea* były opady w najcieplejszym kwartale (bio18). Modelowane optimum klimatyczne obu badanych gatunków rosło do wartości 250 mm, a następnie utrzymywało stały trend. Kolejne dwie zmienne, średnia temperatura najbardziej wilgotnego kwartału (bio8; 15,2% dla *V. myrtillus* i 12,5% dla *V. vitis-idaea*) i roczna amplituda temperatur (bio7; 13,2% dla *V. myrtillus* i 12,5% dla *V. vitis-idaea*), wyjaśniają po kilka procent modele potencjalnego rozmieszczenia obu gatunków. Wzrost rocznej amplitudy temperatur zmniejszył optimum klimatyczne badanych gatunków, podczas gdy wzrost średniej temperatury najbardziej wilgotnego kwartału zwiększył optimum klimatyczne do 15°C, a następnie drastycznie zmniejszył. Znaczenie średniej temperatury najzimniejszego kwartału (bio11) wynosi 8,2% dla *V. vitis-idaea* i 1,9% dla *V. myrtillus*. Następnie średni zakres dobowy temperatur (bio2), 3,4% dla *V. vitis-idaea* i 3,5% dla *V. myrtillus*, sezonowość opadów (bio15) 0,4% dla *V. vitis-idaea* i 0,2% dla *V. myrtillus*. Najmniejsze znaczenie dla modeli potencjalnego rozmieszczenia miały opady w najzimniejszym kwartale (bio19). Wynosiły one odpowiednio 0,1% dla *V. vitis-idaea* i 0,03% dla *V. myrtillus*.

Obecne potencjalne europejskie zasięgi *V. myrtillus* i *V. vitis-idaea* w dużym stopniu się pokrywają (Ryc. 5).



Ryc. 5. Obecne i przewidywane potencjalne zasięgi *Vaccinium myrtillus* i *V. vitis-idaea* w latach 2041-60 i 2061-80 w ramach czterech scenariuszy: SSP126, SSP245, SSP370 i SSP585. Zielony obszar oznacza utrzymywanie się (nakładanie się obecnej i przewidywanych optimum klimatycznych), pomarańczowy – obszary utraty potencjalnego zasięgu w przyszłości, niebieski – obszary przyszłego rozszerzania się zasięgu, szary – obszary nieodpowiednie w obecnych i przyszłych przewidywanych warunkach klimatycznych.

Oczekiwane zmiany klimatyczne spowodują niewielkie zmniejszenie pokrywania się potencjalnych zasięgów gatunków. We wszystkich scenariuszach zmian klimatu dla obu analizowanych okresów, *V. vitis-idaea* utraci większe obszary w Europie zachodniej niż *V. myrtillus*. Generalnie, w bardziej pesymistycznych scenariuszach spodziewane są większe przesunięcia optimum klimatycznego. Zmiany klimatyczne dla obu gatunków przyczynią się do tego, że większość wcześniej odpowiednich klimatycznie obszarów, zwłaszcza we wschodniej i środkowej Europie, stanie się niekorzystna dla występowania obu gatunków. Zmiany klimatyczne spowodują również fragmentację potencjalnych nisz borówek w

południowej Europie. Tam obszary optymalne dla ich występowania będą ograniczone głównie do regionów górskich i Wysp Brytyjskich. Tereny, które pozostaną odpowiednie dla występowania obu gatunków, są rozmieszczone w północnej Europie, głównie w Skandynawii. Tylko niewielkie obszary w północno-wschodniej Europie, które są obecnie zbyt zimne, staną się optymalne do kolonizacji przez obydwa gatunki.

Różnice w przestrzennym przesunięciu potencjalnych zasięgów borówek oraz kurczeniu się, utrzymywaniu i rozszerzaniu zasięgu są znacznie większe między SSP niż między analizowanymi ramami czasowymi. W związku z tym największe zmiany w niszach klimatycznych nastąpią od teraźniejszości do okresu 2040-2060. Natomiast zmiany w potencjalnych zasięgach między latami 2040-2060 i 2061-2080 będą w stosunku do poprzedniego okresu niewielkie. W najbardziej pesymistycznym scenariuszu SSP585 na lata 2061-2080 *V. myrtillus* straci około 54%, a *V. vitis-idaea* około 61% swojego obecnego potencjalnego zasięgu. Najmniejsze straty zasięgu dla *V. myrtillus* spodziewane są w najbardziej optymistycznych scenariuszach SSP126 i wynoszą około 39% dla obu okresów. Najmniejszy spadek zasięgu dla *V. vitis-idaea*, blisko 40%, jest również oczekiwany w łagodniejszych scenariuszach zmian klimatu. Natomiast ekspansja zasięgu w większości analizowanych scenariuszy dla obu gatunków nie przekracza 0,1% obszaru odpowiadającego obecnemu potencjalnemu rozmieszczeniu. Najwyższy odsetek obecnie zajmowanego obszaru w przyszłych warunkach klimatycznych dla obu gatunków wynosi około 60% w scenariuszu SSP126 dla okresu 2041-2060, a najniższy w SSP585 wynosi około 47% dla *V. myrtillus* i około 39% dla *V. vitis-idaea*.

Praca 4. Forest herb species with similar European geographic ranges may respond differently to climate change

Niektóre z roślin leśnych, szczególnie wczesnowiosenne geofity, ze względu na ich silną reakcję na warunki termiczne uważane są za dobre indykatory zmian klimatycznych. Stąd często były przedmiotem badań fenologicznych (Büntgen et al., 2022; Mondoni et al., 2009; Willems et al., 2022). Potencjalnemu rozmieszczeniu roślin zielnych lasów poświęcono znacznie mniej badań niż gatunkom drzewiastym prawdopodobnie ze względu na ich bezpośrednie mniejsze znaczenie dla gospodarki. Jedyne prace podejmujące ten temat w skali całej Europy poprzedzające nasze badania opublikowano (Skov and Svenning, 2004; Svenning and Skov, 2006) z użyciem dostępnych wówczas danych z map Atlas Florae Europaeae (Jalas and Suominen, 1989) i dostępnych wówczas map klimatycznych. Mimo szybkiego rozwoju internetowych baz danych gromadzących i udostępniających dane o rozmieszczeniu gatunków,

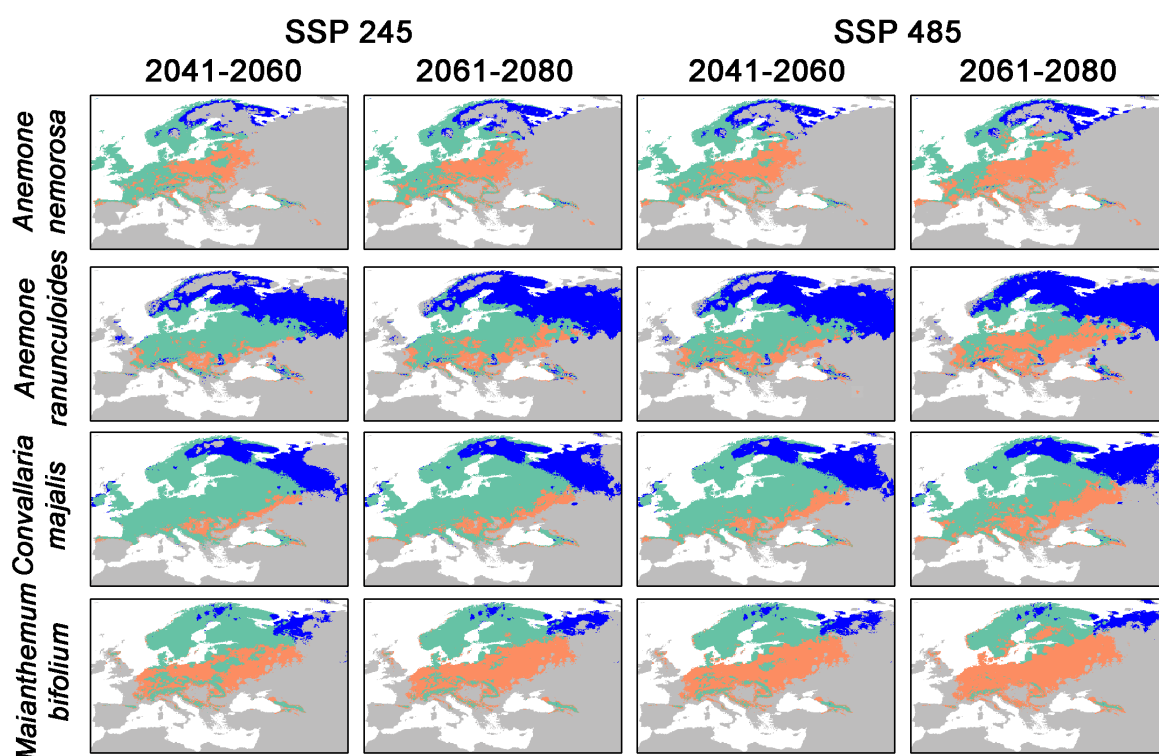
wciąż wiele obszarów ma niedostatecznie udokumentowaną florę, co wciąż stanowi największe ograniczenie badań chorologicznych w skali Europy. Bazując na wcześniej uzyskanych wynikach w przypadku drzew i krzewinek (Puchałka et al., 2023b, 2023c, 2021), postawiliśmy hipotezy, że (i) gatunki o podobnych zasięgach geograficznych powinny podobnie reagować na zmiany klimatu pod względem kierunku przesunięcia niszy oraz magnitudy utraty i zysku obszarów optymalnych klimatycznie, (ii) gatunki wczesnowiosenne, których rozwój silnie zależy od wiosennych temperatur, mogą być silnie zagrożone wskutek wzrostu temperatur w okresie przypadającym na ich cykle życiowe. Druga z hipotez wynikała z obserwacji związanych ze zmianami klimatycznymi, takimi jak „fałszywe wiosny”, po których mogą następować okresy z dużymi spadkami temperatur, zwiększenie frekwencji przymrozków wiosennych, mogących powodować uszkodzenie organów nadziemnych roślin (Sangüesa-Barreda et al., 2021; Zohner et al., 2020).

Ze względu na niedostateczne dane w bazach GBIF i BIEN, szczególnie w przypadku południowo-wschodniej i wschodniej Europy, realne było wykonanie badań z próbkowaniem klimatu z całych zasięgów tylko dla kilku gatunków (*A. nemorosa*, *A. ranunculoides*, *C. majalis* i *M. bifolium*), dla których możliwe było zestawienie danych z dodatkowych źródeł wymienionych w załączniku niniejszej pracy. Wschodnie krańce zasięgów, które były najtrudniejsze do ustalenia, zostały zweryfikowane na podstawie informacji zawartych w Czerwonych Księgach Białorusi i Ukrainy oraz mniejszych jednostek administracyjnych Rosji.

Wartości AUC dla potencjalnych modeli MaxEnt dla rozmieszczenia czterech badanych gatunków geofitów wahały się od 0,878 do 0,883. Dla wszystkich modeli zmienną o największym znaczeniu były opady w najcieplejszym kwartale (bio18), które osiągnęły najniższą wartość dla *A. nemorosa* (58,0%) i najwyższą dla *C. majalis* (75,3%). Znaczenie tej zmiennej dla obu gatunków *Anemone* silnie wzrosło do około 250 mm, po czym również wzrastało, ale znacznie mniej. Dla *C. majalis* i *M. bifolium* wzrosło do 200 mm, osiągając plateau. Kolejne dwie zmienne miały znacznie mniejsze znaczenie dla modeli, od 5,1% dla *A. ranunculoides* do 29,6% u *A. nemorosa* dla rocznego zakresu temperatur (bio7) i od 6,1% dla *M. bifolium* do 20,8% dla *A. ranunculoides* dla średniej temperatury najzimniejszego kwartału (bio11). Optimum klimatyczne dla *A. nemorosa* zmniejszało się wraz ze wzrostem rocznej zakresu temperatur. Dla *A. ranunculoides* zmniejszało się, podczas gdy dla *C. majalis* i *M. bifolium* wykazywały jednomodalną odpowiedź, która osiągnęła szczyt przy 25 °C. Dla *A. nemorosa* optimum klimatyczne wzrastało do 5°C średniej temperatury najzimniejszego kwartału, a następnie nieznacznie spadało. Dla *A. ranunculoides* i *M. bifolium* silnie wzrosło do progu 5°C, a następnie silnie spadło. Dla *C. majalis* wynosiło zero do -10°C, a następnie

uzyskało stały poziom 0,66. Pozostałe zmienne miały znikomy wpływ na potencjalne modele rozmieszczenia i tylko dla *M. bifolium* znaczenie średniej temperatury najbardziej wilgotnego kwartału (bio8) było większe niż 5%. Optimum klimatyczne dla *M. bifolium* zwiększało się do wartości 13°C, a następnie silnie malało.

Obecne potencjalne rozmieszczenie wszystkich czterech badanych gatunków silnie się pokrywa, z wyjątkiem Półwyspu Iberyjskiego, Wysp Brytyjskich, Skandynawii i niektórych regionów Europy wschodniej. Różnice dotyczą głównie *M. bifolium*, która nie występuje tak daleko na zachód, jak inne badane gatunki. Potencjalny obecny zasięg tego gatunku również rozciąga się dalej na północ. Predykcje rozmieszczenia nisz klimatycznych w przyszłych warunkach klimatycznych pokazują najmniejsze zmiany w SSP245 dla lat 2041-2060 i największe w SSP585 dla lat 2061-2080. Podczas gdy wielkość zmian zasięgu dla SSP245 dla lat 2061-2080 i SSP585 dla lat 2041-2060 jest porównywalna (Ryc. 6).



Ryc. 6. Obecne i przewidywane potencjalne zasięgi badanych gatunków dla SSP245 i SSP485. Zielony obszar oznacza utrzymywanie się (nakładanie się obecnej i przewidywanych optimum klimatycznych), pomarańczowy – obszary utraty potencjalnego zasięgu w przyszłości, niebieski – obszary przyszłego rozszerzenia się zasięgu, szary – obszary nieodpowiednie w obecnych i przyszłych przewidywanych warunkach klimatycznych.

A. nemorosa, w przyszłych warunkach klimatycznych, utraci potencjalne nisze, głównie w południowej i wschodniej części swojego obecnego zasięgu. Obszary obecnie skolonizowane przez ten gatunek w Europie zachodniej, z wyjątkiem Półwyspu Iberyjskiego i zachodniej Francji, w większości pozostaną w jego optimum klimatycznym. Nowe optymalne obszary do kolonizacji pojawią się głównie w północnej Skandynawii oraz w kilku lokalizacjach w Alpach i na Kaukazie. *A. ranunculoides* utrzyma optima klimatyczne w Europie środkowej w nadchodzących dekadach, z wyjątkiem najbardziej pesymistycznego scenariusza (SSP585 na lata 2061-2080). Gatunek ten utraci głównie południowe i zachodnie części swojego potencjalnego obecnego zasięgu. Jego potencjalna przyszła nisza będzie obejmować prawie całą Skandynawię, z wyjątkiem obszarów wysokogórskich i większości północno-wschodniej Europy. W górzystych regionach południowej Europy i na Wyspach Brytyjskich pozostaną niewielkie optymalne klimatyczne obszary dla tego gatunku. Zmiany w potencjalnym zasięgu *C. majalis* będą podobne do tych przewidywanych dla *A. ranunculoides*. Jednak we wszystkich scenariuszach gatunek ten traci mniej obszarów na niżu w Europie środkowej. Ponadto utrzyma swój zasięg na całych Wyspach Brytyjskich. Natomiast jego potencjalna nisza przesunie się mniej w kierunku północno-wschodnim. Spośród wszystkich badanych gatunków, *M. bifolium* utraci większość obszarów swojego obecnego potencjalnego zasięgu w zachodniej i środkowej Europie. Gatunek ten ustąpi z tych obszarów w najbardziej pesymistycznym scenariuszu (SSP585 na lata 2061-2080). Optymalne warunki dla tego gatunku będą występować w większości Skandynawii i niewielkiej części północno-wschodniej Europy nad Morzem Barentsa.

Procentowe wartości kurczenia się, rozszerzania i utrzymywania zasięgu różnią się dla każdego gatunku pomiędzy analizowanymi okresami oraz SSP. Generalnie wszystkie badane gatunki tracą więcej w okresie 2061-2080 niż w 2041-2060 oraz w bardziej pesymistycznych scenariuszach zmian klimatu niż w mniej pesymistycznych. Wszystkie gatunki będą miały wyższe wartości utrzymania zasięgów we wcześniejszym okresie. Wielkość ekspansji zasięgu dla *C. majalis* i *M. bifolium* jest porównywalna między tymi dwoma okresami. Natomiast *A. nemorosa* i *A. ranunculoides* zyskają więcej obszarów optymalnych do kolonizacji w latach 2061-2080 niż w latach 2041-2060. Utrata potencjalnych nisz będzie największa w przypadku *M. bifolium*, następnie *A. nemorosa*, *A. ranunculoides* i najmniejsza w przypadku *C. majalis*. Najmniejsze potencjalne rozszerzenie zasięgu spodziewane jest dla *M. bifolium* i *C. majalis*, a następnie *A. nemorosa*. *A. ranunculoides* najbardziej zyska na ociepleniu klimatu. Procent zajmowanego obszaru w obu przyszłych okresach będzie najniższy dla *M. bifolium*, następnie

dla *C. majalis* i *A. nemorosa*, a najwyższy dla *A. ranunculoides*. Będzie on również najniższy w latach 2061-2080 niż w latach 2041-2060 dla wszystkich gatunków.

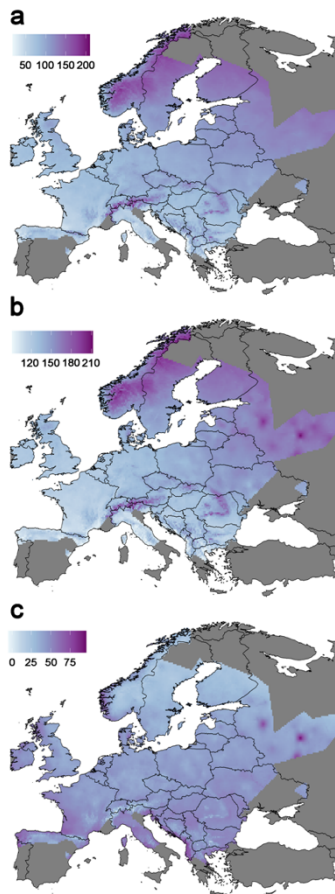
Praca 5. Citizen science helps predictions of climate change impact on flowering phenology: A study on *Anemone nemorosa*

Oprócz przesunięcia zasięgów geograficznych, ocieplenie klimatu przyczynia się do zmian w sezonowym występowaniu gatunków lub ich faz fenologicznych (Schwartz et al., 2006; Willems et al., 2022). Pomimo długiej historii prowadzenia badań fenologicznych, wiedza o zmienności czasowej i przestrzennej faz fenologicznych organizmów jest bardzo fragmentaryczna i niespójna. Tradycyjnie do badań fenologicznych podchodzono obserwując w wybranych miejscach przebieg sezonowości roślinności lub wybranych gatunków. Takie podejścia ma pewne ograniczenia, wynikające z dyspozycyjności badaczy i niewielkiej możliwości prowadzenia badań w wielu lokalizacjach równocześnie. Najdłuższe dotąd udokumentowane regularne obserwacje fenologiczne prowadzone są nieprzerwanie od lat 60. w Puszczy Białowieskiej (Faliński, 2001). Inne podejście, które pozwala na rozpoznanie zmienności fenologicznej w dużej przestrzeni polega na zbieraniu często nieregularnie dokumentowanych faz fenologicznych, np. na podstawie analizy zbiorów zielnikowych lub doniesień dotyczących np. kwitnienia, owocowania roślin lub wędrówek ptaków z publikacji lub obserwacji niecelowo opisanych lub udokumentowanych np. fotografiami faz fenologicznych. Mimo, że obserwacji z takich źródeł jest dość dużo, to są one często niedostateczne dla udokumentowania zmienności czasowej i przestrzennej. W przypadku gatunków szerzej reprezentowanych w zbiorach muzealnych wykazano, że można jednak zidentyfikować pewne trendy (Willems et al., 2022). Współczesny rozwój fotografii cyfrowej oraz dostępności internetu i sygnału GPS przyczynił się do szybkiego rozwoju baz internetowych gromadzących informacje o występowaniu gatunków wraz z dokumentacją fotograficzną i datą obserwacji. Daje to możliwość wydajnej analizy danych fenologicznych na dużych zbiorach danych. Ograniczeniem tej metody była (na czas prowadzenia badań) wciąż niedostateczna liczba obserwacji, która uniemożliwiała określenie początku i końca kwitnienia w oparciu o 95% przedział ufności bazujący na rozkładzie Weibulla wymodelowanym dla zestawu obserwacji kwitnących osobników (Belitz et al., 2020). Do dokładnego określenia początku i końca kwitnienia konieczne było minimum dziesięć obserwacji na komórkę siatki o rozdzielczości 0.25°, co uniemożliwiała przeprowadzenie badań na większej liczbie gatunków. Stąd *A. nemorosa*, ze względu na jego szerokie rozmieszczenie, dużą ilość obserwacji, łatwość w identyfikacji został wybrany jako gatunek modelowy do testowania użyteczności

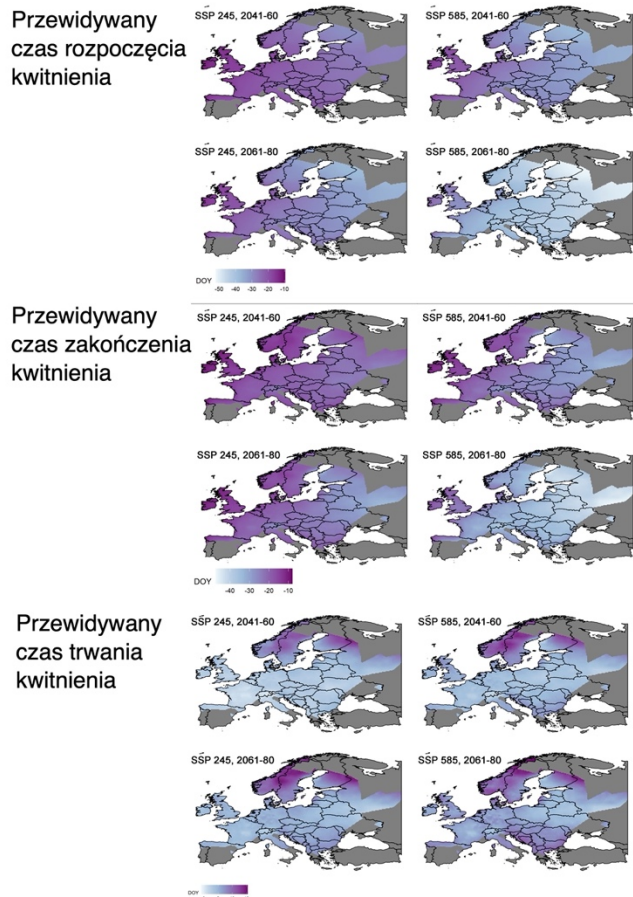
zaproponowanej przez nas metody modelowania fenologii dla obecnych i przyszłych warunków klimatycznych. Ponadto, podobnie jak inne geofity wczesnowiosenne, jest to gatunek którego fenologię silnie determinują warunki meteorologiczne wczesnej wiosny (Fox and Jönsson, 2019), a więc jest również dobrym indykatorem zmian klimatycznych. Dla tego gatunku znaleźliśmy jednak tylko 236 (2,4%) obserwacji owocowania i 440 (4,5%) obserwacji z pąkami kwiatowymi. W obrębie 2409 komórek siatki liczba obserwacji wahała się od jednego do 239 rekordów na komórkę siatki, przy medianie dwóch rekordów i trzecim kwartylu siedmiu rekordów. Tylko 177 (7,35%) komórek siatki obejmowało więcej niż 10 obserwacji z kwitnącymi roślinami, co umożliwiło oszacowanie początku i końca kwitnienia w oparciu o przyjęte metody.

Modele początku i zakończenia kwitnienia wyjaśniły odpowiednio 63,3% i 66,0% zmienności tych cech. Początek kwitnienia był ujemnie skorelowany ze średnią roczną temperaturą (bio1) i rocznymi opadami (bio12), zmniejszając się o $8,3 \pm 0,5$ dnia na 1°C i $0,017 \pm 0,004$ dnia na 1 mm. Zakończenie kwitnienia było ujemnie skorelowane ze średnią roczną temperaturą (bio1), sezonowością temperatur (bio4), rocznymi opadami (bio12) i minimalną temperaturą marca, natomiast dodatnio z minimalną temperaturą maja. Szacowany początek kwitnienia wahał się od 11. do 244. dnia roku, z medianą 101. dnia roku, podczas gdy szacowany koniec kwitnienia wahał się od 87 do 229, z medianą 143. dnia roku (Ryc. 7).

Obliczona długość kwitnienia wahała się od 0 do 100 dni, a mediana wynosiła 42 dni. Dla modeli początku i zakończenia kwitnienia do przyszłych prognoz klimatycznych mediana początku kwitnienia przesunęła się od 24 (SSP245, 2041–60) do 41 (SSP585, 2061–80) dni wcześniej w stosunku do obecnych warunków klimatycznych (Ryc. 8). Największe zmiany w terminie rozpoczęcia kwitnienia przewidywane są w Europie wschodniej, najmniejsze zaś na Wyspach Brytyjskich. Szacowana mediana zakończenia kwitnienia wyniosła 19 (SSP245, 2041–60) do 34 (SSP585, 2061–80) dni wcześniej niż przewidywano dla obecnych warunków klimatycznych (Ryc. 8). Tu również największej różnicy przewidywane są w Europie wschodniej, najmniejsze natomiast na Wyspach Brytyjskich i w Skandynawii. Szacunkowa różnica w medianie długości kwitnienia wyniosła od 3 (SSP245, 2041–60) do 7 (SSP585, 2061–80) dni dłużej niż przewidywano dla obecnych warunków klimatycznych. Największego wydłużenia długości kwitnienia oczekuje się w Skandynawii w SSP245 i w SSP585 na Półwyspie Bałkańskim. Zmienność pomiędzy czterema zastosowanymi GCM była niska: odchylenie standardowe na piksel wynosiło od 4 do 10 dni w przypadku początku kwitnienia i od 2 do 7 dni w przypadku jego zakończenia.



Ryc. 7. Przewidywany w obecnych warunkach klimatycznych początek (a) zakończenie (b), oraz (c) długość kwitnienia oszacowana jako różnica między przesunięciem a początkiem. DOY oznacza dzień roku.



Ryc. 8. Przewidywana zmiana początku, zakończenia i trwania kwitnienia *A. nemorosa* dla okresów 2041-2060 i 2061-2080 i dwóch SSP (SSP 245 i SSP 585), uśredniona pomiędzy GCM. Zmiana jest obliczona w stosunku do obecnych warunków klimatycznych (Ryc. 7). DOY oznacza dzień roku.

Statystycznie istotne modele dla początku i końca kwitnienia sugerują (Tabela 3), że dane uzyskane w ramach projektów nauki obywatelskiej mogą być cennym źródłem informacji do modelowania fenologii roślin i zrozumienia skutków zmian klimatu dla bioróżnorodności i funkcjonowania ekosystemów. Niemniej jednak dokładniejsze poznanie użyteczności tych danych i metod wymaga szerszych badań oraz przetestowania również nieliniowych modeli.

Tabela 3. Modele liniowe dla początku ($AIC_{\text{final}}=1391.6$, $AIC_{\text{null}}=1567.0$, $RMSE=12.0$) i końca kwitnienia *A. nemorosa* ($AIC_{\text{final}}=1277.3$, $AIC_{\text{null}}=1462.4$, $RMSE=8.5$). Objaśnienia skrótów zmiennych bioklimatycznych podano w Tabeli 1.

Response (odpowiedź)	Variable (zmienna)	Estimate (estymator)	SE (błąd standardowy)	t value (wartość t)	Pr(> t)
Onset (początek kwitnienia)	Intercept (punkt przecięcia)	172.775	5.732	30.141	<0.001
	bio1	-8.302	0.486	-17.083	<0.001
	bio12	-0.017	0.004	-4.332	<0.001
Offset (koniec kwitnienia)	Intercept (punkt przecięcia)	182.403	10.047	18.155	<0.001
	bio1	-4.870	1.719	-2.833	0.005
	bio4	-0.078	0.025	-3.117	0.002
	bio12	-0.007	0.003	-2.323	0.021
	bio15	0.174	0.113	1.541	0.125
	Minimalna temperatura marca	-6.281	2.397	-2.620	0.010
	Minimalna temperatura maja	5.934	1.489	3.985	<0.001

Podsumowanie i wnioski

Przedstawione do oceny artykuły naukowe wnoszą nowe informacje dotyczące znaczenia czynników klimatycznych w kształtowaniu się zasięgów geograficznych, mających duże znaczenie ekologiczne i ekonomiczne introdukowanych gatunków drzew, oraz naturalnie występujących w Europie gatunków starych lasów (*AFIS*). Wyniki ostatniej z cyklu prac pokazują, że rozwijające się w szybkim tempie projekty nauki obywatelskiej mogą dostarczać wartościowych danych nie tylko do badań nad rozmieszczeniem gatunków, ale też nad ich fenologią. Przy odpowiedniej dużej pokryciu danymi możliwe jest również wykonywanie predykcji zmian fenologicznych w dużej skali, przestrzennej. Do niedawna było to trudno wykonalne lub niemożliwe, z uwagi na ograniczone zasoby zbiorów zielnikowych i niewielkiego tempa przyrostu liczby przechowywanych tam obserwacji. W przypadku baz danych zasilanych przez miłośników przyrody liczba rekordów rośnie w tempie wykładniczym. Niniejsze badania obejmowały gatunki, dla których udało się wykonać na tyle dokładne mapowanie stanowisk, by uchwycić zmienność warunków klimatycznych w jakich występują obecnie badane gatunki w Europie. Było to możliwe do zrealizowania dzięki szerokiej współpracy międzynarodowej pod moim kierunkiem, pozwalającej na weryfikację i uzyskiwanie danych ze źródeł pisanych w lokalnych językach narodowych. Poniżej

przedstawiam najważniejsze wnioski wynikające z przedstawionych do oceny osiągnięć naukowych:

- Wspólnym wynikiem niniejszych pięciu prac jest to, że **większość ze spodziewanych zmian w zasięgach potencjalnych nisz i fenologii prawdopodobnie nastąpi do 2050 r. Natomiast między 2050 i 2070 r. skala zmian będzie stosunkowo niewielka.** Sugeruje to, że czasu na podjęcie działań mających na celu ograniczenie tempa zmian klimatycznych oraz łagodzenie ich skutków jest znacznie mniej niż dotąd uważano. W większości poprzednich prac wcześniejszy okres (2050), w którym spodziewamy się największej dynamiki zmian, był często pomijany w badaniach. **Ma to istotne znaczenie dla planowania działań z zakresu ochrony przyrody oraz adaptacji gospodarki leśnej do przyszłych zmian klimatycznych.**
- W przypadku badanych gatunków drzew, **zwycięzcami zmian klimatycznych będą gatunki liściaste**, które już obecnie uznawane są za inwazyjne w Europie. Wśród nich są mające niewielkie wymagania względem żyzności gleby *P. serotina*, *Q. rubra* i *R. pseudoacacia*, które mogą zajmować siedliska borowe, konkurencyjnie wypierając rodzime gatunki szpilkowe, takie jak np. *Picea abies* i *Pinus sylvestris*, które za wyjątkiem północnej Europy i wyższych położeń górskich stracą optima klimatyczne. Obce gatunki liściaste będące zwycięzcami zmian klimatycznych mogą również wypierać rodzime gatunki liściaste, w przypadku których ocieplenie klimatu również nie zawsze będzie korzystne (Dyderski et al., 2023). Z uwagi na ich zdolność do przekształcania siedlisk i wpływ na funkcjonowanie ekosystemów (Castro-Díez et al., 2019; Wohlgemuth et al., 2022), stanowi to duże zagrożenie dla lasów strefy klimatu umiarkowanego i borealnego w Europie. **Uzyskane wyniki wskazują obszary wymagające priorytetyzacji w ocenie ryzyka inwazji i planowania działań ochronnych na rzecz wzmocnienia ich odporności na wkraczanie neofitów.**
- Filogenetycznie i funkcjonalnie podobne do europejskich gatunków, **zadomowione gatunki iglaste za wyjątkiem *P. strobus* będą głównie tracić nisze klimatyczne.** Tak więc, z jednej strony ryzyko ich inwazji powinno maleć wraz z ocieplaniem się klimatu. Z drugiej strony, w przypadku negatywnego scenariusza sugerującego utratę rodzimych gatunków iglastych, mogą one nie stanowić pewnej dla nich alternatywy, która by zapewniała zachowanie charakteru lasów szpilkowych, a także wysokiej produkcji drewna.
- Wyniki badań nad drzewami sugerują również, że **kurczenie się i rozszerzanie potencjalnych zasięgów jest prawdopodobnie silnie związane z niektórymi cechami funkcjonalnymi, takimi jak wielkość nasion, gęstość drewna i specyficzna powierzchnia liści (*specific leaf area*).** Generalnie gatunki liściaste mające większe wartości tych cech będą

zyskiwać nowe obszary optymalne klimatycznie, a iglaste mające najmniejsze wartości tych cech będą tracić nisze klimatyczne. W ten sposób uzyskane **wyniki dają pewną możliwość ekstrapolacji wniosków na inne gatunki o podobnych cechach funkcjonalnych.** Przyczynia się to lepszemu zrozumieniu mechanizmów odpowiedzialnych za odpowiedź poszczególnych gatunków na zmiany klimatyczne i daje podstawy do opracowania **generalnych strategii ochrony zasobów leśnych Europy.**

- **Cechy funkcjonalne poszczególnych gatunków mogą tłumaczyć różne wartości procentowej ważności zmiennych w objaśnianiu modeli potencjalnego rozmieszczenia. W przypadku drzew iglastych najwyższe wartości osiągają zmienne związane z temperaturami.** Być może można to wyjaśnić bardziej kserofitycznym charakterem liści niż u gatunków liściastych zrzucających liście na zimę. Budowa liści drzew iglastych jest również przystosowaniem do niedoboru wody zimą, podczas której niskie temperatury podobnie jak letnie susze powodują odwodnienie tkanek. **W przypadku drzew liściastych najwyższe wartości procentowe w objaśnianiu modeli uzyskiwały zmienne związane z opadami w sezonie wegetacyjnym. Zmienne opisujące wielkość opadów w sezonie wegetacyjnym mają jeszcze większą ważność przypadku badanych krzewinek i geofitów.** W ich przypadku można to wyjaśniać ich mniejszym dostępem do wód gruntowych wynikającym z płycej sięgającego systemu korzeniowego, stąd też większym uzależnieniem od wody opadowej.

- Przewidywane przesunięcia potencjalnych zasięgów *V. myrtillus* i *V. vitis-idaea* są porównywalne, prawdopodobnie dlatego, że obydwa gatunki głównie tracą i nie ma zbyt wielu terenów lądowych położonych bardziej na północ, które będą w przyszłości optymalne dla nich klimatycznie. Inaczej wyglądają predykcje gatunków wczesnowiosennych geofitów, sugerujące, że **gatunki blisko spokrewnione i podobne funkcjonalnie mogą w różny sposób odpowiedzieć na zmiany klimatyczne** jeśli chodzi o kierunek przesunięcia się potencjalnego zasięgu oraz magnitudy utraty obecnego zasięgu i zyskanie nowych obszarów optymalnych klimatycznie. W przypadku wszystkich gatunków roślin runa modele wskazują na to, że **ich przyszłe nisze w przypadku par podobnych gatunków będą się w mniejszym stopniu pokrywać niż obecnie.**

- Wykazane wycofywanie się roślin runa pod wpływem zmian klimatycznych będzie miało duże znaczenie dla funkcjonowania warstwy zielnej lasów w klimacie umiarkowanym i borealnym. Szczególnie, że przewidywane utraty zasięgów dotyczą nie tylko gatunków

rzadkich na cieplejszych i suchszych krańcach zasięgów, ale także gatunków najpospolitszych, jak *V. myrtillus*, *V. vitis-idaea*, *A. nemorosa*, *A. ranunculoides*, *C. majalis* i *M. bifolium*.

- **Różne magnitudy zmian zasięgów oraz różne czynniki kształtujące rozmieszczenie gatunków mogą spowodować bardzo nierównomierne przesuwanie się ekosystemów z jednoczesną utratą wielu gatunków nie mających adaptacji do długodystansowej dyspersji, co będzie prowadzić do zaniku wielu interakcji międzygatunkowych i powstania nowych między gatunkami które dotąd nie miały pokrywających się zasięgów.** Stąd dla oszacowania jak mogą kształtować się przyszłe ekosystemy niezbędne są dalsze badania chorologiczne na większej liczbie gatunków z możliwie najpełniejszym próbkowaniem danych środowiskowych z całych zasięgów geograficznych.

- **Obserwacje fotograficzne roślin dostarczane przez wolontariuszy oraz miłośników przyrody mogą dostarczyć wartościowych danych do badań fenologicznych.** Należy się jednak liczyć z tym, że dane te zawsze w jakiś sposób będą niepełne, ze względu na przykład na preferencje wykonujących je osób do dokumentowania bardziej zwracających na siebie uwagę gatunków, bądź ich faz fenologicznych. Stąd możemy przypuszczać, że na przykład w przypadku *A. nemorosa* dominowały obserwacje roślin kwitnących, a tylko niewielką ich część stanowiły rośliny owocujące, mające mniejsze walory dekoracyjne. Niemniej jednak szybko rozwijające się bazy internetowe gromadzące obserwacje występowania gatunków wraz z dokumentacją fotograficzną dają nadzieję na możliwość uzyskiwania danych pozwalających na modelowanie fenologii wielu gatunków oraz przestrzenne oszacowanie różnic w ich odpowiedzi na zmiany ich odpowiedzi na ocieplający się klimat. Opracowana przez nas metodyka modelowania zmian w fenologii oraz aplikacja służąca do weryfikacji fenofaz w oparciu o zdjęcia została zaadaptowana przez Klingera i in. (2023), którzy na tej podstawie opracowali schemat metodyczny badań fenologicznych roślin zielnych w oparciu o dane zbierane w ramach nauki obywatelskiej. Zaproponowana przez nas metodyka rekomendowana była również w innych publikacjach metodycznych podających zalecenia dla efektywnego prowadzenia badań fenologicznych (Primack et al., 2023), definiowania pór roku (Körner et al., 2023) oraz innych badaniach wykorzystujących fotografie gatunków zamieszczane przez miłośników przyrody w mediach społecznościowych (Katal et al., 2023; Mesaglio et al., 2023; Rzanny et al., 2024).

Przedstawione w osiągnięciu naukowy wyniki znacząco poszerzają wiedzę w zakresie dyscypliny nauki biologiczne, dotyczącej reakcji roślin na globalne zmiany klimatyczne. **Głównym walorem omawianych publikacji jest dostarczenie skwantyfikowanych prognoz wpływu zmian klimatycznych na rośliny leśne, uwzględniających główne źródła**

niepewności w modelowaniu tych wpływów. Każda z prac zawiera nie tylko mapy pokazujące w jaki sposób zmieni się zakres występowania badanych gatunków lub długość fazy kwitnienia *A. nemorosa*, lecz także szereg analiz niepewności oraz uwzględnienie różnych scenariuszy wielkości emisji gazów cieplarnianych. **Wyniki z tych prac stanowią podstawę dla rozwoju badań w zakresie określania mechanizmów odporności roślin na zmiany klimatyczne, wpływu tych zmian na różnorodność biologiczną i funkcjonowanie lasów, oraz relacji pomiędzy poszczególnymi komponentami ekosystemów.** Mimo krótkiego czasu który minął od ich opublikowania, omawiane artykuły były zacytowane już 106 razy (wg bazy Web of Science, wyłączając autocytowania, stan na 27 sierpnia 2024 r.). Mają także szerokie znaczenie aplikacyjne, dostarczając informacji o sile, kierunku oraz rozmieszczeniu zmian w potencjalnym zasięgu kluczowych gatunków. Dzięki temu pozwalają na opracowywanie zarówno regionalnych, jak i kontynentalnych strategii ochrony różnorodności biologicznej i adaptacji zasad hodowli lasu do zmian klimatycznych.

Literatura

- Barve, V. V., Brenskelle, L., Li, D., Stucky, B.J., Barve, N. V., Hantak, M.M., McLean, B.S., Paluh, D.J., Oswald, J.A., Belitz, M.W., Folk, R.A., Guralnick, R.P., 2020. Methods for broad-scale plant phenology assessments using citizen scientists' photographs. *Appl. Plant Sci.* 8, e11315. <https://doi.org/10.1002/aps3.11315>
- Belitz, M.W., Larsen, E.A., Ries, L., Guralnick, R.P., 2020. The accuracy of phenology estimators for use with sparsely sampled presence-only observations. *Methods Ecol. Evol.* 11, 1273–1285. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13448>
- Bogdziewicz, M., Kelly, D., Thomas, P.A., Lageard, J.G.A., Hackett-Pain, A., 2020. Climate warming disrupts mast seeding and its fitness benefits in European beech. *Nat. Plants* 6, 88–94. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0592-8>
- Brummitt, N., Araújo, A.C., Harris, T., 2021. Areas of plant diversity—What do we know? *Plants, People, Planet* 3, 33–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ppp3.10110>
- Brun, P., Thuiller, W., Chauvier, Y., Pellissier, L., Wüest, R.O., Wang, Z., Zimmermann, N.E., 2020. Model complexity affects species distribution projections under climate change. *J. Biogeogr.* 47, 130–142. <https://doi.org/10.1111/jbi.13734>
- Büntgen, U., Piermattei, A., Krusic, P.J., Esper, J., Sparks, T.H., Crivellaro, A., 2022. Plants in the UK flower a month earlier under recent warming. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 289, 20212456. <https://doi.org/https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5800155>
- Campagnaro, T., Brundu, G., Sitzia, T., 2018. Five major invasive alien tree species in

- European Union forest habitat types of the Alpine and Continental biogeographical regions. *J. Nat. Conserv.* 43, 227–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnc.2017.07.007>
- Capinha, C., Essl, F., Seebens, H., Moser, D., Pereira, H.M., 2015. The dispersal of alien species redefines biogeography in the Anthropocene. *Science* (80-.). 348, 1248–1251. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8913>
- Castro-Díez, P., Vaz, A.S., Silva, J.S., van Loo, M., Alonso, Á., Aponte, C., Bayón, Á., Bellingham, P.J., Chiuffo, M.C., DiManno, N., Julian, K., Kandert, S., La Porta, N., Marchante, H., Maule, H.G., Mayfield, M.M., Metcalfe, D., Monteverdi, M.C., Núñez, M.A., Ostertag, R., Parker, I.M., Peltzer, D.A., Potgieter, L.J., Raymundo, M., Rayome, D., Reisman-Berman, O., Richardson, D.M., Roos, R.E., Saldaña, A., Shackleton, R.T., Torres, A., Trudgen, M., Urban, J., Vicente, J.R., Vilà, M., Ylioja, T., Zenni, R.D., Godoy, O., 2019. Global effects of non-native tree species on multiple ecosystem services. *Biol. Rev.* 94, 1477–1501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/brv.12511>
- Chuine, I., Beaubien, E.G., 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecol. Lett.* 4, 500–510. <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00261.x>
- Chytrý, M., Hennekens, S.M., Jiménez-Alfaro, B., Knollová, I., Dengler, J., Jansen, F., Landucci, F., Schaminée, J.H.J., Ačić, S., Agrillo, E., Ambarli, D., Angelini, P., Apostolova, I., Attorre, F., Berg, C., Bergmeier, E., Biurrun, I., Botta-Dukát, Z., Brisse, H., Campos, J.A., Carlón, L., Čarni, A., Casella, L., Csiky, J., Čušterevska, R., Dajić Stevanović, Z., Danihelka, J., De Bie, E., de Ruffray, P., De Sanctis, M., Dickoré, W.B., Dimopoulos, P., Dubyna, D., Dziuba, T., Ejrnæs, R., Ermakov, N., Ewald, J., Fanelli, G., Fernández-González, F., Fitzpatrick, Ú., Font, X., García-Mijangos, I., Gavilán, R.G., Golub, V., Guarino, R., Haveman, R., Indreica, A., Işık Gürsoy, D., Jandt, U., Janssen, J.A.M., Jiroušek, M., Kacki, Z., Kavgaci, A., Kleikamp, M., Kolomiychuk, V., Krstivojević Čuk, M., Krstonošić, D., Kuzemko, A., Lenoir, J., Lysenko, T., Marcenò, C., Martynenko, V., Michalcová, D., Moeslund, J.E., Onyshchenko, V., Pedashenko, H., Pérez-Haase, A., Peterka, T., Prokhorov, V., Rašomavičius, V., Rodríguez-Rojo, M.P., Rodwell, J.S., Rogova, T., Ruprecht, E., Rusiņa, S., Seidler, G., Šibík, J., Šilc, U., Škvorc, Ž., Sopotlieva, D., Stančić, Z., Svenning, J.C., Swacha, G., Tsiripidis, I., Turtureanu, P.D., Uğurlu, E., Uogintas, D., Valachovič, M., Vashenyak, Y., Vassilev, K., Venanzoni, R., Virtanen, R., Weekes, L., Willner, W., Wohlgemuth, T., Yamalov, S., 2016. European Vegetation Archive (EVA): An integrated database of European vegetation plots. *Appl. Veg. Sci.* 19, 173–180. <https://doi.org/10.1111/avsc.12191>

- Cierjacks, A., Kowarik, I., Joshi, J., Hempel, S., Ristow, M., von der Lippe, M., Weber, E., 2013. Biological flora of the british isles: *Robinia pseudoacacia*. *J. Ecol.* 101, 1623–1640. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12162>
- Colwell, R.K., Rangel, T.F., 2009. Hutchinson’s duality: The once and future niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 19651–19658. <https://doi.org/10.1073/pnas.0901650106>
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P.D., 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cornwell, W.K., Pearse, W.D., Dalrymple, R.L., Zanne, A.E., 2019. What we (don’t) know about global plant diversity. *Ecography (Cop.)*. 42, 1819–1831. <https://doi.org/10.1111/ecog.04481>
- De Frenne, P., Brunet, J., Shevtsova, A., Kolb, A., Graae, B.J., Chamberrie, O., Cousins, S.A.O., Decocq, G., Schrijver, A. De, Diekmann, M., Gruwez, R., Heiken, T., Hermy, M., Nilsson, C., Stanton, S., Tack, W., Willaert, J., Verheyen, K., 2011. Temperature effects on forest herbs assessed by warming and transplant experiments along a latitudinal gradient. *Glob. Chang. Biol.* 17, 3240–3253. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02449.x>
- Dufresne, J.L., Foujols, M.A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z.X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M., Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., Vuichard, N., 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5. *Clim. Dyn.* 40, 2123–2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Dyderski, M., Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A., Puchałka, R., 2023. Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change (submitted).
- Dyderski, M., Paż, S., Frelich, L.E., Jagodziński, A.M., 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Glob. Chang. Biol.* 24, 1150–1163. <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C.J., 2011. A statistical

- explanation of MaxEnt for ecologists. *Divers. Distrib.* 17, 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Enquist, B.J., Condit, R., Peet, R.K., Schildhauer, M., Thiers, B., 2009. The Botanical Information and Ecology Network (BIEN): Cyberinfrastructure for an integrated botanical information network to investigate the ecological impacts of global climate change on plant biodiversity.
- Evers, C.R., Wardropper, C.B., Branoff, B., Granek, E.F., Hirsch, S.L., Link, T.E., Olivero-Lora, S., Wilson, C., 2018. The ecosystem services and biodiversity of novel ecosystems: A literature review. *Glob. Ecol. Conserv.* 13, e00362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.e00362>
- Faliński, J.B., 2001. Phytophenological Atlas of the forest communities and species of Białowieża National Park. *Phytocoenosis* 8, 1–176.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J., 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 37, 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fielding, A., Bell, J., 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ. Conserv.* 24, 38–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0376892997000088>
- Fitzpatrick, L., Giambuzzi, P.J., Spreitzer, A., Reidy, B., Still, S.M., Rollinson, C.R., 2021. Improving phenology predictions for sparsely observed species through fusion of botanical collections and citizen-science. *Clim. Chang. Ecol.* 2, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100032>
- Forkner, R.E., Marquis, R.J., Lill, J.T., Corff, J. Le, 2008. Timing is everything? Phenological synchrony and population variability in leaf-chewing herbivores of *Quercus*. *Ecol. Entomol.* 33, 276–285. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2311.2007.00976.x>
- Fox, N., Jönsson, A.M., 2019. Climate effects on the onset of flowering in the United Kingdom. *Environ. Sci. Eur.* 31, 89. <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0271-4>
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.-H., Claussen, M., Marotzke, J., Stevens, B., 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 5, 572–597.

<https://doi.org/10.1002/jame.20038>

- Goberville, E., Beaugrand, G., Hautekèete, N.C., Piquot, Y., Luczak, C., 2015. Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models. *Ecol. Evol.* 5, 1100–1116. <https://doi.org/10.1002/ece3.1411>
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D., New, M., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113, D20119. <https://doi.org/10.1029/2008JD010201>
- Hijmans, R.J., 2020. raster: Geographic Data Analysis and Modeling (3.3-13) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J., 2020. dismo: Species Distribution Modeling (1.3-3) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>.
- Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P., Cramer, V.A., Epstein, P.R., Ewel, J.J., Klink, C.A., Lugo, A.E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D.M., Sanderson, E.W., Valladares, F., Vilà, M., Zamora, R., Zobel, M., 2006. Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 15, 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00212.x>
- IPBES, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn. <https://doi.org/doi:10.5281/zenodo.3831673>
- IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York. <https://doi.org/doi:10.1017/9781009325844>
- Jalas, J., Suominen, J., 1989. Atlas Florae Europaeae. Distribution of Vascular Plants in Europe. vol. 8. Nymphaeaceae to Ranunculaceae. The Comitette for Mapping the Flora of Europe and Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.
- Jones, C.D., Hughes, J.K., Bellouin, N., Hardiman, S.C., Jones, G.S., Knight, J., Liddicoat, S., O'Connor, F.M., Andres, R.J., Bell, C., Boo, K.O., Bozzo, A., Butchart, N., Cadule, P., Corbin, K.D., Doutriaux-Boucher, M., Friedlingstein, P., Gornall, J., Gray, L., Halloran, P.R., Hurtt, G., Ingram, W.J., Lamarque, J.F., Law, R.M., Meinshausen, M., Osprey, S.,

- Palin, E.J., Parsons Chini, L., Raddatz, T., Sanderson, M.G., Sellar, A.A., Schurer, A., Valdes, P., Wood, N., Woodward, S., Yoshioka, M., Zerroukat, M., 2011. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geosci. Model Dev.* 4, 689–763. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>
- Katal, N., Rzanny, M., Mäder, P., Römermann, C., Wittich, H.C., Boho, D., Musavi, T., Wäldchen, J., 2023. Bridging the gap : how to adopt opportunistic plant observations for phenology monitoring. *Front. Plant Sci.* 14, 1150956. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1150956>
- Kehrberger, S., Holzschuh, A., 2019. Warmer temperatures advance flowering in a spring plant more strongly than emergence of two solitary spring bee species. *PLoS One* 14, 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218824>
- Klinger, Y.P., Eckstein, R.L., Kleinebecker, T., 2023. iPhenology: Using open- - access citizen science photos to track phenology at continental scale. *Methods Ecol. Evol.* <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14114>
- Klisz, M., Puchałka, R., Netsvetov, M., Prokopuk, Y., Vítková, M., Sádlo, J., Matisons, R., Mionskowski, M., Chakraborty, D., Olszewski, P., Wojda, T., Koprowski, M., 2021. Variability in climate-growth reaction of *Robinia pseudoacacia* in Eastern Europe indicates potential for acclimatisation to future climate. *For. Ecol. Manage.* 492. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119194>
- Körner, C., Möhl, P., Hiltbrunner, E., 2023. Four ways to define the growing season. *Ecol. Lett.* <https://doi.org/10.1111/ele.14260>
- Kudo, G., Cooper, E.J., 2019. When spring ephemerals fail to meet pollinators: Mechanism of phenological mismatch and its impact on plant reproduction. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 286, 20190573. <https://doi.org/10.1098/rspb.2019.0573>
- Kudo, G., Ida, T.Y., 2013. Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology* 94, 2311–2320. <https://doi.org/10.1890/12-2003.1>
- Kwembeya, E.G., 2021. Tracking biological footprints of climate change using flowering phenology of the geophytes: *Pancratium tenuifolium* and *Scadoxus multiflorus*. *Int. J. Biometeorol.* 65, 577–586. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02052-2>
- Liendo, D., Biurrun, I., Campos, J.A., García-Mijangos, I., Pearman, P.B., 2021. Effects of disturbance and alien plants on the phylogenetic structure of riverine communities. *J. Veg. Sci.* 32, e12933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jvs.12933>
- Mesaglio, T., Sauquet, H., Coleman, D., Wenk, E., Cornwell, W.K., 2023. Photographs as an essential biodiversity resource: drivers of gaps in the vascular plant photographic record.

New Phytol. <https://doi.org/10.1111/nph.18813>

- Mondoni, A., Probert, R., Rossi, G., Hay, F., Bonomi, C., 2009. Habitat-related germination behaviour and emergence phenology in the woodland geophyte *Anemone ranunculoides* L. (Ranunculaceae) from northern Italy. *Seed Sci. Res.* 19, 137–144. <https://doi.org/10.1017/S0960258509990067>
- Moyano, J., Dickie, I.A., Rodriguez-Cabal, M.A., Nuñez, M.A., 2020. Patterns of plant naturalization show that facultative mycorrhizal plants are more likely to succeed outside their native Eurasian ranges. *Ecography (Cop.)*. 43, 648–659. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ecog.04877>
- Musche, M., Adamescu, M., Angelstam, P., Bacher, S., Bäck, J., Buss, H.L., Duffy, C., Flaim, G., Gaillardet, J., Giannakis, G. V, Haase, P., Halada, L., Kissling, W.D., Lundin, L., Matteucci, G., Meesenburg, H., Monteith, D., Nikolaidis, N.P., Pipan, T., Pyšek, P., Rowe, E.C., Roy, D.B., Sier, A., Tappeiner, U., Vilà, M., White, T., Zobel, M., Klotz, S., 2019. Research questions to facilitate the future development of European long-term ecosystem research infrastructures: A horizon scanning exercise. *J. Environ. Manage.* 250, 109479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109479>
- Nicolescu, V.-N., Hernea, C., Bakti, B., Keserű, Z., Antal, B., Rédei, K., 2018. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) as a multi-purpose tree species in Hungary and Romania: a review. *J. For. Res.* 29, 1449–1463. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0626-5>
- Nuñez, M.A., Dickie, I.A., 2014. Invasive belowground mutualists of woody plants. *Biol. Invasions* 16, 645–661. <https://doi.org/10.1007/s10530-013-0612-y>
- Park, D.S., Newman, E.A., Breckheimer, I.K., 2021. Scale gaps in landscape phenology: challenges and opportunities. *Trends Ecol. Evol.* 36, 709–721. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.04.008>
- Paź-Dyderska, S., Jagodziński, A.M., Dyderski, M., 2021. Possible changes in spatial distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in Europe under warming climate. *Reg. Environ. Chang.* 21, 18. <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01745-z>
- Pebesma, E., 2018. Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *R J.* 10, 439–446. <https://doi.org/10.32614/rj-2018-009>
- Phillips, S.J., Dudik, M., El, S.R., 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling, in: *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*. Banff, pp. 655–662.
- Piwczyński, M., Puchałka, R., Ulrich, W., 2016. Influence of tree plantations on the phylogenetic structure of understory plant communities. *For. Ecol. Manage.* 376, 231–

237. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.011>

- Ponti, R., Sannolo, M., 2023. The importance of including phenology when modelling species ecological niche. *Ecography (Cop.)*. 2023, 1–15. <https://doi.org/10.1111/ecog.06143>
- Pötzelsberger, E., Gossner, M., Beenken, L., Gazda, A., Petr, M., Ylioja, T., La Porta, N., Avtzis, D., Bay, E., De Groot, M., Drenkhan, R., Duduman, M.-L., Enderle, R., Georgieva, M., Hietala, A., Hoppe, B., Jactel, H., Jarni, K., Keren, S., Keseru, Z., Koprowski, M., Kormuťák, A., Lombardero, M., Lukjanova, A., Marozas, V., Mauri, E., Monteverdi, M., Nygaard, P., Ogris, N., Olenici, N., Orazio, C., Perny, B., Pinto, G., Power, M., Puchałka, R., Ravn, H., Sevillano, I., Stroheker, S., Taylor, P., Tsopelas, P., Urban, J., Voolma, K., Westergren, M., Witzell, J., Zborovska, O., Zlatkovic, M., 2021. Biotic threats for 23 major non-native tree species in Europe. *Sci. Data* 8, 210. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00961-4>
- Pötzelsberger, E., Spiecker, H., Neophytou, C., Mohren, F., Gazda, A., Hasenauer, H., 2020. Growing Non-native Trees in European Forests Brings Benefits and Opportunities but Also Has Its Risks and Limits. *Curr. For. Reports* 6, 339–353. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00129-0>
- Pouteau, R., Biurrun, I., Brunel, C., Chytrý, M., Dawson, W., Essl, F., Fristoe, T., Haveman, R., Hobohm, C., Jansen, F., Kreft, H., Lenoir, J., Lenzner, B., Meyer, C., Moeslund, J.E., Pergl, J., Pyšek, P., Svenning, J.C., Thuiller, W., Weigelt, P., Wohlgemuth, T., Yang, Q., van Kleunen, M., 2021. Potential alien ranges of European plants will shrink in the future, but less so for already naturalized than for not yet naturalized species. *Divers. Distrib.* 27, 2063–2076. <https://doi.org/10.1111/ddi.13378>
- Primack, R.B., Gallinat, A.S., Ellwood, E.R., Crimmins, T.M., Schwartz, M.D., Staudinger, M.D., Miller-Rushing, A.J., 2023. Ten best practices for effective phenological research. *Int. J. Biometeorol.* 67, 1509–1522. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02502-7>
- Puchałka, R., Dyderski, M., Vítková, M., Sádlo, J., Klisz, M., Netsvetov, M., Prokopuk, Y., Matisons, R., Mionskowski, M., Wojda, T., Koprowski, M., Jagodziński, A.M., 2021. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) range contraction and expansion in Europe under changing climate. *Glob. Chang. Biol.* 27, 1587–1600. <https://doi.org/10.1111/gcb.15486>
- Puchałka, R., Paż-Dyderska, S., Dylewski, Ł., Czortek, P., Vitkova, M., Sadlo, J., Klisz, M., Koniakin, S., Carni, A., Rasomavicius, V., De Sanctis, M., Dyderski, M., 2023a. Forest herb species with similar European geographic ranges may respond differently to climate change. *Sci. Total Environ.* 905, 167303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167303>
- Puchałka, R., Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A., Sádlo, J., Vítková, M., Klisz, M., Koniakin,

- S., Prokopuk, Y., Netsvetov, M., Nicolescu, V., Zlatanov, T., Mionskowski, M., Dyderski, M., 2023b. Predicted range shifts of alien tree species in Europe. *Agric. For. Meteorol.* 341, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109650>
- Puchałka, R., Paż-Dyderska, S., Woziwoda, B., Dyderski, M., 2023c. Climate change will cause climatic niche contraction of *Vaccinium myrtillus* L. and *V. vitis-idaea* L. in Europe. *Sci. Total Environ.* 892, 164483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164483>
- R Core Team, 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing, Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L.A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J.C., Kainuma, M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A., Tavoni, M., 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Glob. Environ. Chang.* 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Ritchie, J.C., 1956. Biological flora of the British Isles. *Vaccinium myrtillus* L. *J. Ecol.* 44, 291–299.
- Ritchie, J.C., 1955. Biological flora of the British Isles. *Vaccinium vitis-idaea* L. *J. Ecol.* 43, 701–708.
- Rocchini, D., Garzon-Lopez, C.X., 2017. Cartograms tool to represent spatial uncertainty in species distribution. *Res. Ideas Outcomes* 3, e12029. <https://doi.org/10.3897/rio.3.e12029>
- Ruddiman, W.F., 2013. The Anthropocene. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 41, 45–68. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-123944>
- Rzanny, M., Mäder, P., Wittich, H.C., Boho, D., Wäldchen, J., 2024. Opportunistic plant observations reveal spatial and temporal gradients in phenology. *npj Biodivers.* 3, 5. <https://doi.org/10.1038/s44185-024-00037-7>
- Sangüesa-Barreda, G., Di Filippo, A., Piovesan, G., Rozas, V., Di Fiore, L., García-Hidalgo, M., García-Cervigón, A.I., Muñoz-Garachana, D., Baliva, M., Olano, J.M., 2021. Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests. *Sci. Total Environ.* 775, 145860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145860>

- Schwartz, M.D., Ahas, R., Aasa, A., 2006. Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Glob. Chang. Biol.* 12, 343–351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01097.x>
- Seebens, H., Blackburn, T.M., Dyer, E.E., Genovesi, P., Hulme, P.E., Jeschke, J.M., Pagad, S., Pyšek, P., Winter, M., Arianoutsou, M., Bacher, S., Blasius, B., Brundu, G., Capinha, C., Celesti-Grapow, L., Dawson, W., Dullinger, S., Fuentes, N., Jäger, H., Kartesz, J., Kenis, M., Kreft, H., Kühn, I., Lenzner, B., Liebhold, A., Mosena, A., Moser, D., Nishino, M., Pearman, D., Pergl, J., Rabitsch, W., Rojas-Sandoval, J., Roques, A., Rorke, S., Rossinelli, S., Roy, H.E., Scalera, R., Schindler, S., Štajerová, K., Tokarska-Guzik, B., Van Kleunen, M., Walker, K., Weigelt, P., Yamanaka, T., Essl, F., 2017. No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nat. Commun.* 8, 14435. <https://doi.org/10.1038/ncomms14435>
- Sevenello, M., Sargent, R.D., Forrest, J.R.K., 2020. Spring wildflower phenology and pollinator activity respond similarly to climatic variation in an eastern hardwood forest. *Oecologia* 193, 475–488. <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04670-4>
- Sitzia, T., Campagnaro, T., Dainese, M., Cierjacks, A., 2012. Plant species diversity in alien black locust stands: A paired comparison with native stands across a north-Mediterranean range expansion. *For. Ecol. Manage.* 285, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.016>
- Skov, F., Svenning, J.C., 2004. Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecography (Cop.)*. 27, 366–380. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2004.03823.x>
- Slabejová, D., Bacigál, T., Hegedüšová, K., Májeková, J., Medvecká, J., Mikulová, K., Šibíková, M., Škodová, I., Zaliberová, M., Jarolímek, I., 2019. Comparison of the understory vegetation of native forests and adjacent *Robinia pseudoacacia* plantations in the Carpathian-Pannonian region. *For. Ecol. Manage.* 439, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.039>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C., 2015. The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. *Anthr. Rev.* 2, 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Steinbauer, M.J., Grytnes, J.A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., Rixen, C., Winkler, M., Bardy-Durchhalter, M., Barni, E., Bjorkman, A.D., Breiner, F.T., Burg, S., Czortek, P., Dawes, M.A., Delimat, A., Dullinger, S., Erschbamer, B., Felde, V.A., Fernández-Arberas, O., Fossheim, K.F., Gómez-García, D., Georges, D., Grindrud, E.T.,

- Haider, S., Haugum, S. V., Henriksen, H., Herreros, M.J., Jaroszewicz, B., Jaroszynska, F., Kanka, R., Kapfer, J., Klanderud, K., Kühn, I., Lamprecht, A., Matteodo, M., Di Cella, U.M., Normand, S., Odland, A., Olsen, S.L., Palacio, S., Petey, M., Piscová, V., Sedlakova, B., Steinbauer, K., Stöckli, V., Svenning, J.C., Teppa, G., Theurillat, J.P., Vittoz, P., Woodin, S.J., Zimmermann, N.E., Wipf, S., 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming, *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6>
- Svenning, J.C., Skov, F., 2007. Could the tree diversity pattern in Europe be generated by postglacial dispersal limitation? *Ecol. Lett.* 10, 453–460. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01038.x>
- Svenning, J.C., Skov, F., 2006. Potential impact of climate change on the northern nemoral forest herb flora of Europe. *Biodivers. Conserv.* 15, 3341–3356. <https://doi.org/10.1007/s10531-005-1345-8>
- Svenning, J.C., Skov, F., 2004. Limited filling of the potential range in European tree species. *Ecol. Lett.* 7, 565–573. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00614.x>
- Thuiller, W., Guéguen, M., Renaud, J., Karger, D.N., Zimmermann, N.E., 2019. Uncertainty in ensembles of global biodiversity scenarios. *Nat. Commun.* 10, 1446. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09519-w>
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M.B., Sykes, M.T., Prentice, I.C., Araújo, M.B., 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 102, 8245–8250. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409902102>
- Thurm, E.A., Hernandez, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztoovits, E., Bielak, K., Zlatanov, T.M., Hladnik, D., Balic, B., Freudenschuss, A., Büchsenmeister, R., Falk, W., 2018. Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *For. Ecol. Manage.* 430, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>
- van Proosdij, A.S.J., Sosef, M.S.M., Wieringa, J.J., Raes, N., 2016. Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography (Cop.)*. 39, 542–552. <https://doi.org/10.1111/ecog.01509>
- Wake, D.B., Hadly, E.A., Ackerly, D.D., 2009. Biogeography, changing climates, and niche evolution: Biogeography, changing climates, and niche evolution. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 19631–19636. <https://doi.org/10.1073/pnas.0911097106>
- Wang, C., Cao, R., Chen, J., Rao, Y., Tang, Y., 2015. Temperature sensitivity of spring vegetation phenology correlates to within-spring warming speed over the Northern Hemisphere. *Ecol. Indic.* 50, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.11.004>

- Willems, F.M., Scheepens, J.F., Bossdorf, O., 2022. Forest wildflowers bloom earlier as Europe warms: lessons from herbaria and spatial modelling. *New Phytol.* 235, 52–65. <https://doi.org/10.1111/nph.18124>
- Wohlgemuth, T., Gossner, M.M., Campagnaro, T., Marchante, H., Loo, M. Van, Vacchiano, G., Castro-Díez, P., Dobrowolska, D., Gazda, A., Keren, S., Keserú, Z., Koprowski, M., La Porta, N., Marozas, V., Nygaard, P., Podrázský, V., Puchałka, R., Reisman-Berman, O., Straigytė, L., Ylioja, T., Pötzelsberger, E., Silva, J., 2022. Impact of non-native tree species in Europe on soil properties and biodiversity: a review. *NeoBiota* 69, 45–69. <https://doi.org/10.3897/neobiota.78.87022>
- Woziwoda, B., Dyderski, M., Jagodziński, A., 2019. Effects of land use change and *Quercus rubra* introduction on *Vaccinium myrtillus* performance in *Pinus sylvestris* forests. *For. Ecol. Manage.* 440, 1–11. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.010](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.010)
- Woziwoda, B., Dyderski, M., Parzych, A., Jonczak, J., Jagodziński, A.M., 2021. Loss in macronutrient pools in bilberry and lingonberry in mesic Scots pine forests after Northern red oak introduction. *Eur. J. For. Res.* 140, 1499–1514. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01414-8>
- Zohner, C.M., Mo, L., Renner, S.S., Svenning, J.C., Vitasse, Y., Benito, B.M., Ordonez, A., Baumgarten, F., Bastin, J.F., Sebald, V., Reich, P.B., Liang, J., Nabuurs, G.J., De-Miguel, S., Alberti, G., Antón-Fernández, C., Balazy, R., Brändli, U.B., Chen, H.Y.H., Chisholm, C., Cienciala, E., Dayanandan, S., Fayle, T.M., Frizzera, L., Gianelle, D., Jagodzinski, A.M., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Kepfer-Rojas, S., Khan, M.L., Kim, H.S., Korjus, H., Johannsen, V.K., Laarmann, D., Langn, M., Zawila-Niedzwiecki, T., Niklaus, P.A., Paquette, A., Pretzsch, H., Saikia, P., Schall, P., Seben, V., Svoboda, M., Tikhonova, E., Viana, H., Zhang, C., Zhao, X., Crowther, T.W., 2020. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, 12192–12200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1920816117>

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

Swoją działalność naukową realizowałem głównie w Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

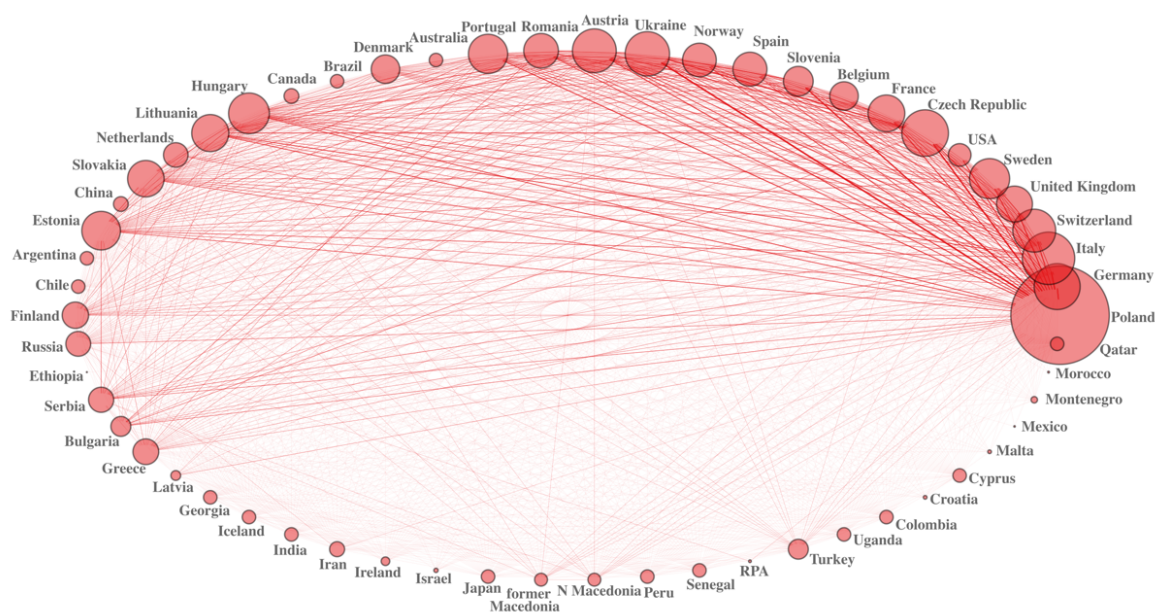
W dniach 14-27 maja 2012 r. w ramach zadań w granicie N N304 306740, kierowanym przez dr Marcina Piwczyńskiego odbyłem wyjazd służbowy do Londyńskich zielników w Kew Botanical Gardens (K) i Natural History Museum (BM). Celem wizyty w tych instytucjach było uzyskanie materiału roślinnego do badań molekularnych oraz anatomicznych nad gatunkami z plemienia Ferulinae (Apiaceae) oraz uzyskanie danych o ich rozmieszczeniu na potrzeby mojej pracy doktorskiej oraz planowanych wówczas publikacji naukowych. Dodatkowo wykonałem weryfikację poprawności identyfikacji okazów zielnikowych, która powinna być pomocna w przyszłych badaniach, które będą prowadzone w oparciu o zbiory tych zielników. Podobne prace wykonałem podczas innych wcześniejszych wyjazdów do Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin (7-11 kwietnia 2008), Zielnika Uniwersytetu Jagiellońskiego (22-23 kwietnia 2009) oraz Naturhistorisches Museum Wien (12-16 października 2009).

W lipcu 2023 odbyłem oficjalny staż naukowy w Białowieskiej Stacji Geobotanicznej Uniwersytetu Warszawskiego, w ramach którego uczestniczyłem w badaniach nad ekologią inwazji klonu jesionolistnego w Puszczy Białowieskiej. Jest to rozszerzenie dotychczasowych badań nad niszą potencjalną tego gatunku (Puchałka et al., 2023b) o badania nad jego niszą realizowaną oraz jego wpływem na różnorodność grądów w różnych stadiach rozwojowych tych fitocenoz oraz różnych udziale tego gatunku. Wynikiem stażu są materiały na dwa artykuły naukowe będące obecnie w przygotowaniu.

Moja współpraca z naukowcami z innych ośrodków naukowych związana jest w dużej mierze z aktywnością w trzech akcjach COST: Non-Native Tree Species for European Forests - Experiences, Risks and Opportunities (NNEXT) FP1403 (2014-2018); An Integrated Approach to Conservation of Threatened Plants for the 21st Century (ConservePlants) CA18201 (2019-2024); Pan-European Network for Climate Adaptive Forest Restoration and Reforestation (Pen-CaForr) CA19128 (2020-2024). W 2024 r. dołączyłem do Akcji COST CA21138 - Joint effects of CLimate Extremes and Atmospheric depositioN on European FORESTs (CLEANFOREST), gdzie angażuję się w projekty związane z tematyką adaptacji lasów do zmian klimatycznych. Dotychczasowe efekty mojej aktywności w tych projektach

zostały wymienione w punkcie 7 niniejszego dokumentu. Nieformalnie współpracuję również z naukowcami w sieciach badawczych SoilTemp (<https://www.soiltempproject.com>), Fields4ever (<https://fields4ever.biomemakers.com>) i TraitDivNet (<https://macroecology.ut.ee/en/traitdivnet/>).

Według danych Web of Science (Dostępne 27 sierpnia 2024) z pięćdziesięciu ośmiu indeksowanych artykułów 63.8% było opublikowanych we współpracy międzynarodowej, przy łącznym udziale 725 współautorów z 57 krajów (Ryc. 9).



Ryc. 9. Sieć współpracy między współautorami opublikowanych 58 artykułów naukowych według Web of Science (Dostępne 27 sierpnia 2024). Wielkość okręgów przedstawia liczbę opublikowanych prac wspólnie z przedstawicielami poszczególnych krajów, od 1 (np. Meksyk) do 58 (Polska).

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

6.1. Działalność dydaktyczna

Zajęcia prowadzone dla studentów Wydziału Farmaceutycznego oraz Wydziału Nauk Biologicznych i Weterynaryjnych podczas studiów doktoranckich (2007-2011) oraz zatrudnienia na etacie naukowo-dydaktycznym w Katedrze Ekologii i Biogeografii (2016-obecnie):

- Applied statistics and spatial analysis in GIS [2600-ASS-GC-2-S2] - wykład i ćwiczenia: 2023/2024 (w języku angielskim),

- Dynamic biogeography [2600-DB-GC-1-S2] – konwersatorium: 2021/2022; 2022/2023; 2023/2024 (w języku angielskim),
- Ekologia i ochrona środowiska - Ekologia systemów lądowych [2100-ESLBIOL-1-S1] – laboratorium: 2016/2017,
- Ekologia ogólna [2100-EOOS-1-S1] – ćwiczenia: 2018/2019,
- Farmakognozja – ćwiczenia: 2006/2007,
- Informacja geoprzestrzenna w ekologii i ochronie przyrody [2100-IGOS-1-S1] – wykład i laboratorium: 2017/2018,
- Matematyka i statystyka [2600-MATSA-1-S1] – laboratorium: 2019/2020; 2021/2022,
- Matematyka i statystyka dla przyrodników [2100-MSOS-1-S1] – laboratorium: 2018/2019,
- Matematyka z informatyką - Podstawy informatyki [2600-PIBIOT-1-S1] – laboratorium: 2020/2021,
- Matematyka ze statystyką [2100-MATBIOL-2-S1] – laboratorium: 2016/2017,
- Matematyka ze statystyką [2600-MSBIOL-1-S1] – laboratorium: 2019/2020; 2020/2021; 2021/2022; 2022/2023; 2023/2024,
- Podstawy dendrobiologii [2600-BS-PDBIOL-3-S1] – laboratorium: 2022/2023; 2023/2024,
- Population ecology [2600-BS-PPBIOL-1-S2] – laboratorium: 2022/2023; 2023/2024 (w języku angielskim),
- Pozyskiwanie i rozliczanie funduszy na realizację projektów naukowych z zakresu ochrony środowiska [2100-PFOS-2-S2] – laboratorium: 2018/2019,
- Przetwarzanie danych w biologii [2600-PDBIOL-1-S1] – laboratorium: 2018/2019,
- Przetwarzanie danych w ochronie środowiska [2100-PDOS-1-S1] – laboratorium: 2018/2019,
- Technologia informacyjna [7100-TI-1-SJ] – laboratorium: 2018/2019,
- Technologia informatyczna [2600-TISA-1-S1] – laboratorium: 2018/2019,
- Thesis Lab [2600-TL2-GC-1-S2] – pracownia i seminarium: 2023-2024,
- Zajęcia terenowe - Florystyka [2100-ZTFL-1-S1] – 2007/2008,
- Zajęcia terenowe [0501-ZT-1-S1] – 2009/2010; 2010/2011,
- Zajęcia terenowe [0501-ZTRO-2-S1] – 2008/2009,
- Zajęcia terenowe [2100-ZTER-2-S1] – 2008/2009,
- Zastosowanie statystyki w biotechnologii [2600-ZSTBBIOT-2-S2] – laboratorium: 2019/2020; 2020/2021; 2021/2022; 2022/2023; 2023/2024.

Pełniłem rolę promotora pomocniczego rozprawy doktorskiej Mariusza Gławędy, napisanej pod kierunkiem dr hab. Marcina Koprowskiego, prof. UMK, pt. „Dendroekologiczna analiza przyrostów rocznych introdukowanych gatunków drzew leśnych [Dendroecological analysis of tree rings of non-native forest tree species], obronionej w 2019 r. na Wydziale Nauk Biologicznych i Weterynaryjnych Uniwersytetu Mikołaja w Toruniu. Byłem również zewnętrznym (zagranicznym) recenzentem autoreferatu rozprawy doktorskiej Yuliia Prokopuk, Institute for Evolutionary Ecology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv (2019) pt. *Кліматогенна варіація радіального приросту Quercus robur L. у біотопax заплави Дніпра в м. Києві (Climatogenic Quercus robur L. radial growth variation in the Dnieper River's floodplain biotopes in Kyiv)*. Recenzowałem trzy prace licencjackie i jedną pracę magisterską powstałe w Katedrze Ekologii i Biogeografii na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

W dniach 18 – 22 października 2021 r. odbyłem wyjazd szkoleniowy do Wydziału Leśnego Uniwersytetu w Sarajewie w ramach programu Erasmus+. Tematem szkolenia była fenotypowa i genetyczna zmienność bałkańskich drzew.

Od czerwca 2024 pełnię rolę promotora pracy magisterskiej pt. „Climatic-driven shifts in the ranges of breeding and wintering areas of the Northern Lapwing *Vanellus vanellus* (Charadriidae)”, realizowanej na kierunku studiów Global Change Biology.

6.2. Działalność organizacyjna

- Opiekun roku kierunku ochrona środowiska na Wydziale Nauk Biologicznych i Weterynaryjnych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, studia pierwszego stopnia w latach 2017-2020.
- 2018-2019 - Członek Zespołu programowego do Spraw Współpracy z Podmiotami Zewnętrznymi na Wydziale Nauk Biologicznych i Weterynaryjnych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- 21.09.2022 - Członek Komisji Rekrutacyjnej ISD-AC kandydatów do Szkoły Doktorskiej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- 2021-2022 - udział w ogólnoeuropejskiej akcji Looking for Cowslips (<https://cowslip.science>), której koordynatorem była dr Tsipe Aavik z Uniwersytetu w Tartu (Estonia). Akcja polegała na aktywacji wolontariuszy do zbierania łatwych w obserwacji kwiatów pierwiosnka lekarskiego (*Primula veris*), na cele badań nad biologią zapylania tego gatunku w kontekście wielkości populacji oraz warunków ekologicznych w

jakich one występują. Moja aktywność dotyczyła koordynacji działań wolontariuszy na terenie Polski, aktywizacji ich do uczestnictwa w projekcie oraz udzielania niezbędnych konsultacji i przekazywania wiedzy o znaczeniu poznawczym projektu. Brałem również udział w pracach nad przygotowaniem polskojęzycznej strony internetowej projektu.

- 09.07.2024 - Członek Komisji Rekrutacyjnej ISD-AC kandydatów do Szkoły Doktorskiej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.

6.3. Działalność popularyzatorska

W dniu 10 stycznia 2014 r. w trakcie Nocy Biologów na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu prezentowałem informacje o dawnym i obecnym znaczeniu kolekcji zielnikowych w badaniach naukowych.

Od 2020 roku uczestniczę w międzynarodowych inicjatywach związanych z nauką obywatelską (*citizen science*) w ramach organizacji społeczności iNaturalist (<https://www.inaturalist.org/people/radoslawpuchalka>). Moje zaangażowanie związane jest z udostępnianiem informacji o rozmieszczeniu gatunków, głównie roślin naczyniowych z obserwacji terenowych oraz weryfikowaniu rekordów udostępnianych przez innych użytkowników. Weryfikacje które wykonuję dotyczą gatunków flory centralnej Europy oraz gatunków z rodzaju *Anemone* sensu lato (Ranunculaceae), występujących w Eurazji, północnej Afryce i Północnej Ameryce. Udzielam konsultacji zarówno nieprofesjonalnym użytkownikom jak i zawodowym botanikom w identyfikacji wielu taksonów z plemienia *Anemoneae*. Liczba wszystkich zweryfikowanych rekordów wynosi >130430, z czego >93000 stanowią rekordy gatunków z plemienia *Anemoneae* rozmieszczone głównie na półkuli północnej. Zweryfikowane dane zasilają globalne naukowe dane o różnorodności biologicznej, takie jak Global Biodiversity Information Facility (GBIF), szeroko wykorzystywane w wielkoskalowych badaniach biogeograficznych. Internetowe bazy danych, takie jak iNaturalist stanowią platformę pozwalającą nie tylko na zebranie danych użytecznych naukowo, ale również komunikację ze społeczeństwem oraz sposób popularyzacji wiedzy o różnorodności biologicznej. Opisane zostało to w artykule popularno-naukowym:

Paż-Dyderska, S., Dyderski, M.K., **Puchalka, R.**, Jagodziński, A.M., 2022. Jak wspomóc naukę i dobrze się bawić. *Głos Lasu* 36, 35–37.

Sprawny przepływ wiedzy między społeczeństwem i naukowcami jest szczególnie ważny w tak istotnych i aktualnych tematach jakimi są skutki zmian klimatycznych, pociągających za

sobą zmiany w czasowym (fenologia) i przestrzennym (roz rozmieszczenie) występowaniu gatunków. Aktywacja społeczeństwa może umożliwić lepsze zrozumienie zmian dzięki możliwości zebrania aktualnych danych o występowaniu gatunków, szczególnie tych, które ze względu na przyciąganie uwagi, jak estetyczne kwiaty zawilców, lub użytkowe jak owoce borówek są chętnie dokumentowane fotografiami przez miłośników przyrody. Te gatunki jak pokazały nasze badania mogą być silnie zagrożone zmianami klimatycznymi. Wyniki tych badań oparte w dużej mierze na danych zebranych przez miłośników przyrody przekazaliśmy również dla nich w formie popularnonaukowej w artykule:

Paż-Dyderska, S. **Puchałka, R.**, Woziwoda, B., Dyderski, M.K. 2023. Na jagody? Czernice i brusznice, a zmiany klimatu. *Dzikie Życie* 11(353): 22-24.

W latach 2021-2022 brałem udział w tłumaczeniu na język polski materiałów promocyjnych oraz strony internetowej projektu Looking for Cowslips. Oprócz artykułu o ekologii zapylania *Primula veris* (Aavik et al. w recenzji) przygotowywany jest również artykuł dotyczący aktywności, możliwości oraz ograniczeń udziału wolontariuszy w badaniach naukowych, podsumowujący doświadczenia płynące z tego projektu (Gibson et al. w przygotowaniu). Dotychczasowe krótkie doświadczenie z naukami społecznościowymi w mojej ocenie daje ogromne korzyści naukowcom, uzyskującym cenne dane badawcze oraz wolontariuszom, którzy dzięki możliwościom kontaktowania się z naukowcami przez platformy takie jak iNaturalist w krótkim czasie rozwijają imponującą wiedzę przyrodniczą. W dniu 28 września 2022 r. udzieliłem wywiadu w audycji radiowej Trójka przed południem na antenie Programu Trzeciego Polskiego Radia pt. *Wędrówka roślin. Jak zmiany klimatu wpływają na florę*. Wyniki naszych badań fenologicznych (Puchałka et al., 2022) prezentowane były na portalu Nauka w Polsce <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news,93774,milosnicy-przyrody-pomagaja-przewidziec-wplyw-zmian-klimatu-na-kwitnienie>. Na tymże również portalu znalazły się informacje o wynikach badań nad zmianami potencjalnych zasięgów inwazyjnych w Europie gatunków drzew (Puchałka et al., 2023) <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news,98117,inwazyjne-gatunki-drzew-iglastych-znikna-z-europy-srodkowej-do-2080-r.html>.

7. Inne informacje dotyczące przebiegu kariery naukowej

Po ukończeniu studiów magisterskich współpracowałem z firmami wykonującymi ekspertyzy i opracowania przyrodnicze na potrzeby planów ochrony rezerwatów, planów

urządzeniowo-leśnych i ocen oddziaływania inwestycji na środowisko przyrodnicze. W ramach tej aktywności wykonywałem opracowania flory i roślinności tych obszarów. W 2005 r. zostałem zatrudniony na stanowisku technika, następnie starszy technik w Katedrze i Zakładzie Farmakognozji Collegium Medicum Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Bydgoszczy. W jednostce tej zajmowałem się zbiorem i przygotowaniem materiału roślinnego do badań, pracami laboratoryjnymi oraz pomocą w przygotowywaniu zajęć dydaktycznych. W roku akademickim 2006/2007 prowadziłem również zajęcia dydaktyczne z ćwiczeń z przedmiotu Farmakognozja, obejmujące tematy związane z identyfikacją surowców roślinnych w mieszkankach ziołowych i sproszkowanych materiałach zielarskich. W tym czasie kontynuowałem współpracę z dr hab. Tomaszem Załuskim, prof. UMK w tematyce związanej z florystyką i ochroną przyrody. Jej rezultatem są publikacje w lokalnych czasopismach naukowych oraz materiały konferencyjne.

Możliwość rozpoczęcia studiów doktoranckich na Wydziale Biologii i Nauk o Ziemi na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika pojawiła się dopiero trzy lata po ukończeniu studiów magisterskich na tymże wydziale. Rozprawa zatytułowana „*Taksonomia i ewolucja owocu w rodzaju Ferula (Apiaceae)*”, była realizowana początkowo pod opieką dr hab. Wandy Gugnackiej-Fiedor, prof. UMK, a finalnie obroniona pod opieką promotorską dr hab. Krzysztofa Szpili, prof. UMK. Podjęcie się tego tematu badawczego wiązało się ze zmianą warsztatu metodycznego z badań terenowych na laboratoryjne, obejmujące głównie preparatykę anatomiczną i część prac molekularnych. Badania były realizowane przy współpracy z prof. dr hab. Krzysztofem Spalikiem z Uniwersytetu Warszawskiego, oraz dr Marcinem Piwczyńskim, którzy udzielili mi pomocy w pozyskaniu materiału badawczego z Obszaru Śródziemnomorskiego, Północnej Afryki oraz zachodniej i centralnej Azji, gdzie występuje największa różnorodność gatunkowa tego liczącego około 200 gatunków rodzaju. Pozwoliło mi to również na zrealizowanie wyjazdów do kilku większych europejskich kolekcji zielnikowych, m.in. Botanischer Garten und Botanisches Museum Berlin, Naturhistorisches Museum Wien, Natural History Museum, London i Royal Botanic Gardens, Kew. Efektem tej współpracy jest kilka opublikowanych artykułów naukowych dotyczących systematyki Apiaceae i biologii ewolucyjnej, które zostały opublikowane po ukończeniu moich studiów doktoranckich (Bartoszek et al., 2023a, 2023b, 2024; Panahi et al. 2015, 2018; Piwczyński et al. 2015, 2018; Puchałka et al. 2023) oraz materiały konferencyjne. Po ukończeniu studiów doktoranckich byłem zatrudniony na stanowisku technicznym w Katedrze Geobotaniki i Planowania Krajobrazu na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, gdzie do moich obowiązków należało opiekowanie się kolekcją Herbarium (TRN). W tym czasie podjąłem

próbę realizacji własnych badań dendroanatomicznych związanych z monitoringiem dynamiki sezonowego przyrostu drzew w odpowiedzi na warunki meteorologiczne. Brałem również udział w badaniach dendroekologicznych i dendrochronologicznych prowadzonych przez dr hab. Marcina Koprowskiego, prof. UMK oraz dr inż. Bernarda Okońskiego z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Później rozwinięta współpraca z dr. Marcinem Kliszem z Instytutu Badawczego Leśnictwa zaowocowała rozwinięciem obecnie szerokiej współpracy z naukowcami z wielu europejskich instytucji naukowych zajmujących się reakcjami przyrostowymi drzew w zmieniającym się środowisku klimatycznym i hydrologicznym. Z tematyką analizy przyrostów rocznych drzew związany był również mój projekt NCN Miniatura, w ramach którego badałem przebieg ksylogenezy u *Fagus sylvatica* i *Quercus petraea*. Późniejsze cztery próby starania się o finansowanie badań w konkursie Sonata, mimo tego, że wniosek w jednym z konkursów zakwalifikował się do drugiego etapu zakończyły się niepowodzeniem. Publikacje dotyczące wpływu warunków środowiskowych na formowanie się przyrostów drzew obejmują trzy artykuły w, których jestem pierwszym i korespondencyjnym autorem (Puchałka et al. 2016, 2017, 2024), trzy w których jestem jedynym lub jednym z dwóch korespondencyjnych autorów (Misi et al. 2019; Klisz et al. 2019, 2022) oraz prace współautorskie. Z tematyką dendrochronologiczną i dendroanatomiczną powiązane są również badania wykonane w realizacji z archeologami (Dąbrowski et al. 2017) oraz badania dotyczące rekonstrukcji klimatu centralnej Europy realizowane przy współpracy z klimatologami i historykami (Przybylak et al. 2020, 2023).

Znaczny wpływ na moją karierę naukową wywarło uczestnictwo w trzech Akcjach COST, w których biorę udział od 2014 r., w ramach których realizowane były ogólnoeuropejskie inicjatywy dotyczące aspektów naukowych i praktycznych związanych z introdukcją obcych gatunków drzew, adaptacją lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych oraz ochroną gatunków zagrożonych wyginięciem w Europie. Aktywność w tych projektach pozwoliła mi na poszerzenie współpracy z naukowcami z innych krajów europejskich oraz udoskonalenie warsztatu metodycznego związanego z moimi zainteresowaniami naukowymi w kontekście ekologii i ochrony przyrody. Dotychczasowym efektem współpracy związanej z akcjami COST jest kilka publikacji naukowych (Patzelsberger et al. 2021, Wohlgemuth et al. 2022, Aronne et al. 2023, Dimitrova et al. 2022, Puchałka et al., 2021, 2023; Klisz et al. 2021, 2023).

Przedstawiony jako *osiągnięcie naukowe* zbiór prac zainspirowany był badaniami dendroklimatologicznymi nad *R. pseudoacacia* w centralno-wschodniej Europie (Klisz et al. 2021), w ramach których pierwotnie jako tło do badań nad zależnościami przyrost drewna – klimat chcieliśmy ustalić na ile marginalne klimatycznie są próbkowane przez nas drzewostany

tego gatunku. Robocze próby modelowania potencjalnego zasięgu na zestawie danych uzupełnionym o stanowiska gatunku z Europy wschodniej i północno-wschodniej sugerowały, że gatunek ten w obecnych warunkach klimatycznych ma znacznie szerszy potencjalny zasięg niż sugerowały to wcześniejsze badania (Dyderski et al. 2018). Nawiązana współpraca z dr hab. Marcinem K. Dyderskim z Instytutu Dendrologii Polskiej Akademii Nauk oraz z innymi ekspertami w temacie aklimatyzacji drzew, dendroklimatologii oraz ekologii inwazji zaowocowała kilkoma publikacjami, których wyniki mogą być potencjalnie wysoce użyteczne w zrozumieniu czynników kształtujących zasięgi roślin oraz ochronie przyrody i gospodarce leśnej. Wyniki prowadzonych obecnie badań na szerszych grupach gatunków, wstępnie wydają się potwierdzać przypuszczalne zależności między cechami roślin, określonymi zmiennymi klimatycznymi oraz tendencjami do kurczenia lub rozszerzania się zasięgów. Podjęta współpraca z dr Patrykiem Czortkiem z Uniwersytetu Warszawskiego stanowi rozszerzenie badań nad potencjalnymi niszami, o nisze realizowane badanych gatunków. Wyniki tych badań pozwolą lepiej zrozumieć cechy ekosystemów przyjmujących obce gatunki, oraz ich wpływ na różnorodność biologiczną, strukturę filogenetyczną, warunki glebowe i obieg pierwiastków. Tym samym powinny wnieść znaczący wkład w wiedzę o ekologii biologicznych inwazji i utraty naturalnej różnorodności biologicznej w zmieniającym się klimacie i co za tym idzie środowisku przyrodniczym.

7.1. Wyróżnienia i nagrody po uzyskaniu stopnia doktora:

- 2019 r. - indywidualne wyróżnienie Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za osiągnięcia w dziedzinie naukowej w 2018 r.
- 2020 r. - zespołowe wyróżnienie Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za osiągnięcia w dziedzinie naukowej w 2019 r.
- 2021 r. - indywidualne wyróżnienie Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za osiągnięcia w dziedzinie naukowej w 2020 r.
- 2022 r. - indywidualne wyróżnienie Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za osiągnięcia w dziedzinie naukowej w 2021 r.
- Jednorazowe stypendia Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu za wysokopunktowane publikacje naukowe (21): 2019 r. (2); 2020 r. (1); 2021 r. (5); 2022 r. (3); 2023 r. (8); 2024 r. (3).

Rodolfin
Pudrota

(podpis wnioskodawcy)