

GENOMIKA NA RATUNEK

Dzięki specjalnym modelom możemy przewidzieć reakcje gatunków na zmiany klimatyczne.



**dr Katarzyna
Sękiewicz**

Jest adiunktem w Zakładzie Biogeografii i Systematyki w Instytucie Dendrologii PAN. Zajmuje się filogeografią, genetyką populacyjną i konserwatorską gatunków drzewiastych, a obecnie koncentruje się na genomice adaptacyjnej i roli hybrydyzacji w kontekście zmian klimatycznych.

ksekiewicz@man.poznan.pl

Katarzyna Sękiewicz

Zakład Biogeografii i Systematyki
Instytut Dendrologii PAN w Kórniku

Na lasy przypada znacząca część bioróżnorodności. Są one jednym z najważniejszych typów ekosystemów lądowych i mają ogromny potencjał w łagodzeniu zmian klimatycznych. Biorąc pod uwagę znaczne tempo tych zmian, przyszłość lasów jest niepokojąca, dlatego niezwykle ważne jest opracowanie nowych strategii wspierających przetrwanie lasów w skali lokalnej, regionalnej i globalnej. Zmiany klimatyczne prowadzą do utraty bioróżnorodności, wpływając tym samym na funkcjonowanie i stabilność ekosystemów leśnych. Przewiduje się, że efekt ten będzie się nasilać w najbliższej przyszłości, a obecnie coraz częściej obserwujemy znaczny spadek liczebności populacji wielu gatunków drzew, chociażby w południowej Europie. Z tego względu

wiele uwagi poświęca się prognozowaniu wpływu zmian klimatycznych na rozmieszczenie i adaptację gatunków drzew leśnych. Przewidywanie reakcji na poziomie gatunku jest zatem jednym z najbardziej palących pytań w biologii ewolucyjnej, a jego rozwikłanie jest warunkiem wstępnym opracowania skutecznych rozwiązań, jeśli chodzi o ochronę i zarządzanie zasobami gatunków zorientowanymi na adaptację do zmian klimatu.

Obecnie jest to możliwe dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod i algorytmów obliczeniowych umożliwiających modelowanie zasięgu gatunku w oparciu o scenariusze przyszłych zmian klimatycznych. Jednakże tradycyjne metody prognozowania nie uwzględniają zmienności adaptacyjnej gatunków i ich populacji, a jest ona kluczowa dla ich potencjału ewolucyjnego, warunkując ich przystosowanie do zmieniających się warunków środowiskowych. Niedawny postęp w rozwijającej się od ponad dekady dziedzinie biologii – genomice krajobrazowej (*landscape genomics*), która zajmuje się badaniem genomowych podstaw lokalnej adaptacji populacji w skali przestrzennej i czasowej – otwiera nowe możliwości, dostarczając

nowatorskich rozwiązań dotyczących zrównoważonego i adaptacyjnego zarządzania i ochrony lasami w przyszłości.

Trzy strategie

Zdolność gatunków drzew do radzenia sobie ze zmianami klimatu bazuje na trzech wzajemnie uzupełniających się typach reakcji: migracji, odpowiedzi fenotypowej (plastyczności fenotypowej) oraz adaptacji dziedzicznej. Przesunięcie zasięgu występowania jest najczęściej braną pod uwagę reakcją gatunków drzew wobec tych zmian. W Europie dla większości drzew przewiduje się przesunięcie zasięgów w kierunku północnym, a w przypadku gatunków górskich – migracje wysokościowe.

Lasy, które znamy, mogą zatem zmienić się znacząco w zależności od tego, jak bardzo zmieni się klimat. Nawet w najbardziej optymistycznym scenariuszu zmian klimatycznych, który zakłada wzrost temperatury o $\sim 2,4^{\circ}\text{C}$, jest spodziewana znaczna utrata dogodnych siedlisk i przemieszczenie się optimum klimatycznego dla większości drzew leśnych poza obecne zasięgi, zwłaszcza w południowej Europie. Nie oznacza to jednak, że śródziemnomorskie lasy będą w przyszłości rosły w Europie Środkowej, ponieważ akurat tam znajdują się dogodne dla nich warunki klimatyczne. Jest to związane m.in. ze stosunkowo wolnym tempem migracji drzew. Przykładowo szacuje się, iż średnie tempo migracji gatunków drzewiastych późnej sukcesji, np. buka zwyczajnego, wynosi zaledwie 15–25 m na rok.

Biorąc pod uwagę to ograniczenie, obecne tempo zmian klimatu wydaje się zbyt szybkie, by niektóre gatunki i ich populacje mogły podążać za optymalnymi dla nich warunkami, co naraża je na ryzyko nieprzystosowania, a w konsekwencji nawet wyginiecie. Zdolność gatunków drzew do radzenia sobie ze zmianami środowiskowymi będzie polegać zatem głównie na plastyczności fenotypowej i lokalnej adaptacji. Jakie więc będą przyszłe zasięgi gatunków? Żeby odpowiedzieć na to pytanie, potrzebne są wiarygodne modele predykcyjne, a ich opracowanie nadal stanowi wyzwanie.

Modelowanie na nowo

Tradycyjne modele predykcyjne, opierające się głównie na aspektach klimatycznych, zakładały całkowitą jednorodność odpowiedzi populacji w całym zasięgu gatunku, pomijając zmienność wewnątrzgatunkową wynikającą z lokalnej adaptacji. Nieuwzględnienie zmienności adaptacyjnej może skutkować przeszacowaniem prognoz, ostatecznie prowadząc do niewłaściwie ukierunkowanych wysiłków na rzecz ochrony i zarządzania zasobami gatunków. Rozwiązanie tego problemu znajdujemy w niedawno opracowanej

koncepcji przesunięcia genomowego (*genomic offset*), która okazała się obiecującym narzędziem łączącym dane genomowe i środowiskowe do oceny wpływu zmian klimatycznych na wzorce adaptacyjnej zmienności genetycznej populacji w ramach zasięgu gatunku.

Podjęcie to zostało opracowane przez amerykańskich badaczy Matthew C. Fitzpatricka i Stephena R. Kellera do oceny zmiany składu genetycznego populacji topoli balsamicznej (*Populus balsamifera*). To nowe spojrzenie na modelowanie przestrzenne będące efektem postępu w genomice krajobrazu jest znaczącym krokiem w kierunku wiarygodnych przewidywań reakcji gatunków na zmiany klimatu. Najprościej rzecz ujmując, przesunięcie genomowe jest miarą nieprzystosowania populacji do przyszłych warunków środowiskowych w ramach zasięgu przy uwzględnieniu zmienności adaptacyjnej populacji.

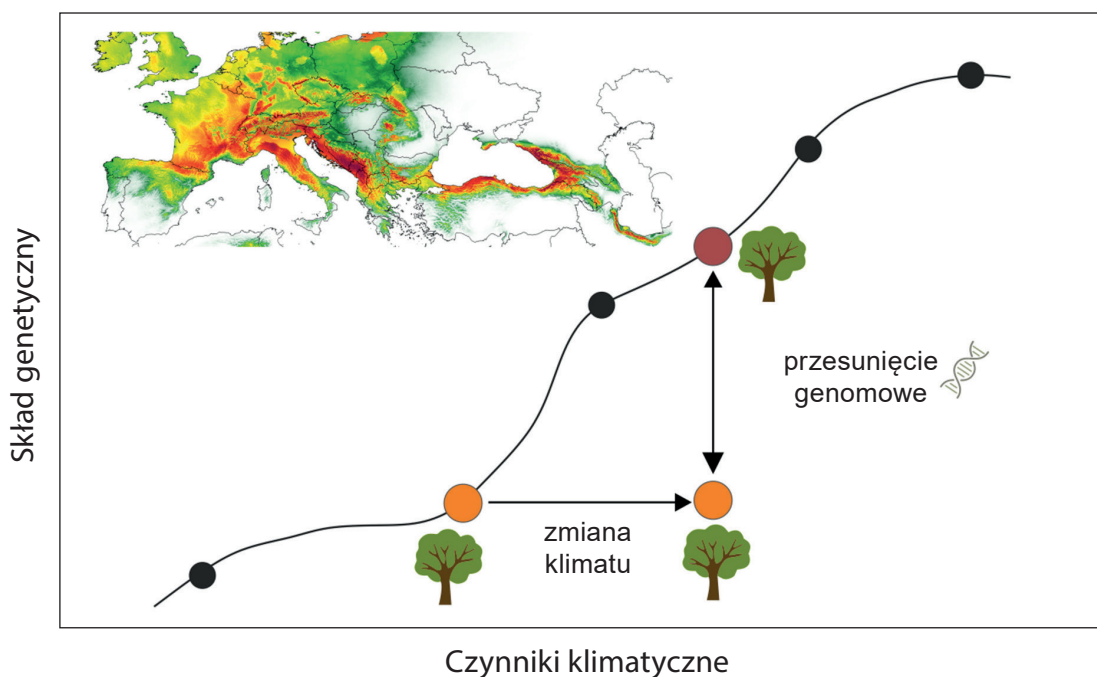
Wymaga to określenia genomowych podstaw lokalnej adaptacji w oparciu o dane sekwencyjne i środowiskowe oraz zastosowania zaawansowanych metod obliczeniowych i wielu symulacji. Zasadniczo podejście to jest predykcyjną miarą zmiany częstotliwości alleli (wersji genów) w całym genomie wzdłuż gradientów środowiskowych i ma służyć określeniu

Koncepcja przesunięć genomowych w ostatnim czasie zyskała zainteresowanie w kontekście opracowania strategii zarządzania i zachowania zasobów drzew leśnych.

niedopasowania między obecnym składem genetycznym populacji a takim, który zapewniłby jej przetrwanie w zmieniających się warunkach środowiskowych. Innymi słowy, prognozy te mogą pomóc w ustaleniu, czy populacja może być samowystarczalna w obliczu przyszłych zmian środowiskowych, czy też może wymagać interwencji człowieka. Wiele prac naukowych skupiających się głównie na gatunkach drzew leśnych podkreśla znaczenie włączenia genomowych podstaw lokalnej adaptacji do prognozowania odpowiedzi populacji względem zmian klimatu.

Modelowanie przyszłego zasięgu z uwzględnieniem zmian warunków klimatycznych i potencjału adaptacyjnego wykonano ostatnio m.in. dla buka zwyczajnego z zachodniej części Alp, świerka czerwonego we wschodniej części Ameryki Północnej czy szkockich populacji brzozy karłowatej. Badania pozwoliły ocenić ryzyko nieprzystosowania populacji *in situ*, zmapować przyszłą przydatność siedlisk z uwzględnieniem lokalnych adaptacji oraz wskazać

Schemat koncepcji
przesunięcia genomowego



te populacje, które potencjalnie mogą stanowić źródło materiału nasiennego maksymalizującego zmienność genetyczną i minimalizującego nieprzystosowanie populacji w obliczu zmieniającego się klimatu.

Przyspieszone przesiedlenie

Adaptacja gatunków drzew wynika przede wszystkim z ich obecnej zmienności genetycznej. Z tego względu dużą uwagę przywiązuje się do zachowania jak najszerszego jej spektrum, a także monitorowania zagro-

żeń dotyczących populacji i składu genetycznego wynikających ze zmian klimatu. W praktyce jednak – zwłaszcza w przypadku drzew leśnych – bardzo niewiele strategii ochrony gatunków uwzględnia ich zasoby genetyczne decydujące o potencjale adaptacyjnym, który ma pierwszorzędne znaczenie dla trwałości gatunku. O ile informacje genetyczne są wykorzystywane w działaniach, to często stosowane wskaźniki (np. wskaźnik Shapleya) opierają się wyłącznie na oszacowaniu neutralnej zmienności genetycznej. Działania ochronne mające wyłącznie na celu promowanie lub zachowanie neutralnej zmienności mogą być nietrafione, dlatego ocena zmienności adaptacyjnej powinna być nieodłącznym elementem opracowania strategii zarządzania i ochrony drzew leśnych.

Zmiana klimatu prawdopodobnie zakłóci lokalną adaptację i przekroczy naturalną zdolność gatunków do reagowania przez przystosowanie się lub migrację, a niedopasowanie populacji stwarza ryzyko lokalnego wyginięcia. Żeby dotrzymać kroku zmianom klimatycznym, naukowcy i leśnicy poszukują narzędzi do podejmowania decyzji dotyczących zrównoważonego gospodarowania zasobami leśnymi w obliczu zmian klimatycznych.

Przykładem nowych koncepcji jest wyjście poza ochronę *in situ* i długoletni paradygmat „lokalne jest najlepsze”, czyli wykorzystanie lokalnych źródeł nasion, i zastosowanie wspomaganej migracji (*assisted migration*), która pozwala sprostać temu wyzwaniu. Termin ten obejmuje wiele różnych działań łączących zarówno wspomaganą przepływ genów (*assisted gene flow*) w obrębie obecnego zasięgu gatunku, jak i wspomaganą kolonizację (*assisted colonization*) poza nim.

Prognozuje się, że w wyniku zmian klimatycznych rozmieszczenie buka pospolitego w Europie zmieni się znacząco. Modele te nie uwzględniają potencjału adaptacyjnego, zatem nie wiemy, czy poszczególne populacje będą w stanie przystosować się do nowych warunków



KATARZYNA SĘKIEWICZ

Zasadniczo rozwiązanie to polega na wspomaganiu przez człowieka przeniesieniu na dany obszar osobników/populacji posiadających allele (wersje genów) lepiej przystosowane do prognozowanych warunków klimatycznych, ustalonych w oparciu o modele klimatyczne. Wspomagana migracja koncentruje się na koncepcji opóźnienia adaptacyjnego gatunków lub populacji, które nie dostosowują się wystarczająco szybko do zachodzących zmian klimatycznych lub mają ograniczone zdolności do rozprzestrzeniania się, by osiedlić się na obszarach odpowiednich klimatycznie. Choć to przyspieszone przesiedlenie jest uważane za skuteczną strategię zarządzania i ochrony lasów w celu przeciwdziałania obecnym zmianom klimatycznym i związanym z nimi zagrożeniom, stosowanie tego typu rozwiązań nadal budzi kontrowersje, ponieważ wiąże się z ryzykiem niepowodzenia. Po pierwsze, zmiany klimatyczne są przewidywane ze znaczną niepewnością. Po drugie, czynniki inne niż klimat mogą wspierać lokalną adaptację.

Mankamentem w stosowaniu tej strategii są również potencjalnie szkodliwe konsekwencje genetyczne, takie jak tzw. depresja outbredowa, prowadząca do zakłócenia lokalnych adaptacji. Dlatego by uniknąć niepowodzeń podejmowanych działań w tej kwestii, konieczne jest uwzględnienie danych genomowych o lokalnej adaptacji w modelach klimatycznych. Tego typu modele w coraz większym stopniu uzupełniają doświadczenia proveniencyjne, by identyfikować populacje zawierające pożądane genotypy, które po przeniesieniu do docelowych lokalizacji zminimalizowałyby zakłócenia lokalnej adaptacji do klimatu, maksymalizując w ten sposób przystosowanie do zmieniających się warunków środowiska. Choć nie jest to narzędzie doskonałe, daje pogląd na to, czego można się spodziewać w przyszłości, uwzględniając potencjał ewolucyjny populacji.

Zachowanie zasobów

Jak wspomniano, koncepcja przesunięć genomowych w ostatnim czasie zyskała na popularności w związku z opracowywaniem strategii zarządzania i zachowania zasobów leśnych ukierunkowanych na adaptację do zmian klimatycznych, takich jak np. wspomagany przepływ genów czy migracja wspomagana. Przykładowo, szwedzcy badacze, Pär K. Ingvarsson i Carolina Bernhardsson, stosując podejście integrujące analizy powiązań genotyp – środowisko, by wykryć lokalną adaptację i modelować allele adaptacyjne w kontekście zmian klimatycznych, oszacowali przesunięcia genetyczne dla populacji topoli osiki (*Populus tremula*). Spośród przebadanych szwedzkich populacji wskazano takie, które mogą dobrze zareagować na zmiany klimatyczne i stanowić źródło wprowadzania alleli adaptacyjnych do populacji północnych, które doświadczą znacznego nieprzystosowania w stosun-



R. ROZKOWSKI

kowo krótkim okresie (~50 lat). Autorzy podkreślili użyteczność tych wyników do opracowania strategii wspomaganey migracji.

Modelowanie przestrzenne zagrożeń środowiskowych staje się coraz bardziej powszechne, ponieważ praktycy poszukują informacji o prawdopodobnym wpływie zmian środowiskowych na ekosystemy. Wiedza ta może mieć zastosowanie w ochronie i zarządzaniu lasami, tak by sprostać wyzwaniom najbliższych lat. Prognozy oparte na przesunięciu genomowym integrują wewnątrzgatunkowe różnicowanie genomowe, wypełniając lukę w wiedzy na temat adaptacji do lokalnych warunków środowiskowych. Stanowią one naukowe podstawy do opracowania strategii wspomaganego przepływu genów czy migracji wspomaganey, które są obecnie podstawą programów ochrony ukierunkowanych na adaptację do zmian klimatu. Jednak by takie prognozy były w pełni wykorzystane, musimy lepiej zrozumieć, w jaki sposób niepewność związana z tymi podejściami może wpływać na planowanie ochrony. Jest to możliwe dzięki doświadczeniom proveniencyjnym, które obecnie stanowią nieodłączny element badań nad adaptacją klimatyczną drzew. Takie eksperymenty są często czasochłonne i kosztowne, ale dostarczają ważnych danych porównawczych, stanowiących realną weryfikację modeli komputerowych.

Obecnie integracja tradycyjnych modeli predykcyjnych opartych na scenariuszach przyszłych zmian klimatycznych z genetyczną zmiennością populacji jest najnowszym zagadnieniem podejmowanych badań w Instytucie Dendrologii PAN w ramach projektu „Hybrydyzacja jako proces ewolucyjny wzmacniający potencjał adaptacyjny gatunków drzewiastych w obliczu zmian klimatycznych” (2020/39/D/NZ8/01522). ■

Uprawa testująca potomstwo drzewostanów nasiennych sosny, Nadleśnictwo Człuchów

Chcesz wiedzieć więcej?

Isabel N., Holliday J.A., Aitken S.N., *Forest genomics: advancing climate adaptation, forest health, productivity, and conservation*, „Evolutionary Applications” 2020.

Lewandowski A., Chmura D.J., Wójkiewicz B., Żukowska W.B., *Hodowla lasu w zmieniającym się klimacie*, „Academia” 2019.

Szmyt J., *Hodowla lasu wobec zmian klimatycznych – wyzwania, ograniczenia, perspektywa*, „Sylwan” 2020.