

Tysiącletnia chronologia "niebieskich pierścieni" w sosnie długowiecznej (*Pinus longaeva* D.K. Bailey) - opracowanie i interpretacja paleoklimatyczna

Streszczenie

Paleoklimatologia – nauka zajmująca się badaniem zmian klimatu w przeszłości Ziemi, odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu systemu klimatycznego obecnie oraz przewidywaniu przyszłych zmian klimatycznych. W tej dziedzinie dendroklimatologia – nauka wykorzystująca słoje drewna do wnioskowania o przeszłych warunkach klimatycznych – stanowi szczególnie cenne źródło. Słoje drzew dostarczają rocznych zapisów zmienności klimatu, a ich szerokość, gęstość i skład mogą odzwierciedlać przeszłe temperatury, opady i inne czynniki środowiskowe.

Sosna długowieczna (*Pinus longaeva*), znana ze swojej długowieczności i odporności w trudnych warunkach klimatycznych, rośnie na dużych wysokościach w Górach Białych w Kalifornii i innych wysokich pasmach górskich w Nevadzie i Utah, co czyni ją szczególnie wrażliwym wskaźnikiem zmian środowiskowych. Ta wrażliwość w połączeniu z niezwykle długim wiekiem jakie osiągają osobniki tego gatunku sprawia, że jest ona idealnym źródłem materiałów do badania przeszłej zmienności klimatu na przestrzeni tysiącleci. Sekwencje przyrostowe populacji z górnej granicy lasu korelują z temperaturą, podczas gdy drzewostany dolnej granicy lasu oferują źródło do rekonstrukcji opadów.

Odkrycie obecności „niebieskich pierścieni” w tym i innych gatunkach drzew otwiera możliwość dodanie nowej warstwy informacji do rekonstrukcji klimatu uzyskanych z tych drzew.

Formowanie się niebieskich pierścieni jest procesem zależnym od temperatury, w którym niższe temperatury w trakcie i po późnym sezonie wegetacyjnym przerywają proces lignifikacji, co skutkuje wytworzeniem nie w pełni zlignifikowanego drewna, które można rozpoznać po niebieskim zabarwieniu ścian komórkowych na preparatach cienkich drewna zabarwionych Safraniną i Astrablue. Aby sprostać potrzebie bardziej precyzyjnych narzędzi

do rekonstrukcji przeszłych warunków klimatycznych, w szczególności krótkotrwałych i subtelnych wahań temperatury, które nie są dobrze odzwierciedlane przez inne źródła, w niniejszej pracy opracowano zastosowanie niebieskich pierścieni jako czułego wskaźnika niższych temperatur w chronologii sosny długowiecznej, argumentując, że mogą one oferować dokładniejszy znacznik przeszłych epizodów ochłodzeń niż tradycyjne metody dendrochronologiczne.

Wcześniejsze badania wykazały silny związek między minimami wzrostu, oraz pierścieniami mrozowymi a ochłodzeniem i przymrozkami w trakcie sezonu wegetacyjnego. Ten związek okazał się szczególnie przydatny w rekonstrukcji historii erupcji wulkanicznych powodujących niektóre z epizodów ochłodzenia.

Jednak tradycyjne metody dendroklimatologiczne są obciążone ograniczeniami w zakresie zdolności do uchwycenia krótkoterminowych i subtelnych wahań temperatury. Podczas gdy słoje mrozowe dostarczają cennych informacji, są one mniej wrażliwe na łagodniejsze zjawiska ochłodzenia lub spadki temperatury na końcu i po sezonie wegetacyjnym. Z drugiej strony szerokości słoików drewna są mniej zdolne do uchwycenia wahań temperatury w skali rocznej i ponad rocznej ze względu na silną autokorelację wynikającą ze zjawiska pamięci biologicznej, jako że przyrosty roczne agregują sygnał warunków wzrostu w skali całego sezonu wegetacyjnego a czasem nawet poprzednich sezonów. Rekonstrukcje temperatury oparte na szerokościach przyrostów rocznych często wykazują opóźnioną i wygładzoną odpowiedź klimatu w postaci ochłodzeń będących skutkiem efektywnych klimatycznie erupcji wulkanicznych w porównaniu z innymi wskaźnikami. Niniejszy projekt odpowiada na potrzebę opracowania bardziej czułego wskaźnika, który mógłby uchwycić bardziej subtelne wahania temperatury o większej częstotliwości, zwiększając tym samym dokładność rekonstrukcji klimatycznych, uzupełniając tradycyjne wskaźniki dendroklimatyczne.

W szczególności, w niniejszej pracy zajęto się zbadaniem, czy niebieskie pierścienie w sosnie długowiecznej mogą służyć jako bardziej czuły wskaźnik epizodów ochłodzeń pod koniec sezonu wegetacyjnego poprzez opracowanie kompleksowego szeregu czasowego niebieskich pierścieni z 83 wywiertów drewna sosny długowiecznej, pokrywających prawie dwa tysiąclecia. Porównując występowanie niebieskich pierścieni z dostępnymi danymi klimatycznymi z lat 1895–2008, najpierw zbadano związek między temperaturą, topografią i powstawaniem niebieskich pierścieni. Ponadto, na przestrzeni ostatnich jedenastu stuleci, zbadano związek między niebieskimi pierścieniami a historycznymi erupcjami wulkanów i

przeanalizowano, w jakim zakresie informacje zawarte w niebieskich pierścieniach różnią się od i uzupełniają informacje na temat zmian klimatu w przeszłości pochodzące z pierścieni mrozowych, chronologii szerokości przyrostów rocznych drewna oraz chronologii maksymalnej gęstości drewna późnego.

W niniejszej pracy odkryto, że na formowanie się niebieskich pierścieni w sośnie długowiecznej istotny wpływ mają spadki temperatury pod koniec sezonu wegetacyjnego, szczególnie we wrześniu. Jednak poza wpływem temperatur września zaobserwowano również bardziej złożone współdziałanie czynników klimatycznych z kilku miesięcy, w tym niższe temperatury w kwietniu, czerwcu i sierpniu oraz wyższe temperatury w lutym i październiku. Występowanie i intensywność niebieskich pierścieni stopniowo maleje wraz ze spadkiem wysokości poniżej górnej linii granicy lasu, wskazując, że topografia terenu i wysokość nad poziomem morza również modulują ich powstawanie.

Znaleziono silny, i statystycznie istotny związek między powstawaniem niebieskich pierścieni a aktywnością wulkaniczną. Wyniki te wskazują na związek przyczynowo skutkowy między erupcjami wulkanów a powstawaniem niebieskich pierścieni poprzez ochłodzenie wywołane przez wulkanizm, przy czym erupcje tropikalne wykazują najsilniejszą korelację.

Nie wszystkie lata wykazujące niebieskie pierścienie są powiązane ze znaczącymi erupcjami wulkanicznymi, tak jak nie wszystkie minima szerokości przyrostów rocznych i/lub maksymalnej gęstości drewna późnego (MXD) odpowiadają znanym wydarzeniom wulkanicznym. Dzieje się tak, ponieważ nie każde zimne lato w danym miejscu można przypisać aktywności wulkanicznej, i podobnie nie wszystkie erupcje prowadzą do letnich ochłodzeń. Niebieskie pierścienie oferują wrażliwy zapis epizodów ochłodzenia, ale mogą stanowić zaszumione źródło informacji, z wieloma latami o niskim udziale niebieskich przyrostów odzwierciedlającymi lokalne przymrozki, a nie wielkoskalowe ochłodzenie.

Nasze wyniki pokazują, że niebieskie pierścienie mają tendencję do tworzenia się częściej w szerszych lub neutralnych pierścieniach przyrostów rocznych i często poprzedzają lata wskaźnikowe lata ujemne lub minima wzrostu. Sugeruje to, że mogą one dostarczać cennych spostrzeżeń na temat epizodów ochłodzenia pod koniec sezonu lub po sezonie wegetacyjnym, które nie miałyby już wpływu na szerokość przyrostu w danym roku. Dłuższe okresy ochłodzenia, takie jak te związane z klimatycznie efektywnymi erupcjami wulkanicznymi, mogą wpływać na warunki klimatyczne po zakończeniu wzrostu radialnego i

w kolejnych sezonach. W rezultacie, podczas gdy ochłodzenia te mogą powodować opóźnioną reakcję szerokości przyrostów, niebieskie pierścienie mogą sygnalizować początek takich zdarzeń wcześniej. Co więcej, niebieskie pierścienie stanowią lepszy indykator ochłodzeń niż szerokości przyrostów rocznych, ponieważ powstają, gdy nagły spadek temperatury zatrzymuje proces lignifikacji, pozostawiając trwałe ślady w postaci nie w pełni zlignifikowanych komórek drewna. Natomiast szerokości przyrostów w skutek zjawiska pamięci biologicznej oraz autokorelacji, mogą wskazywać na ochłodzenie z opóźnieniem oraz wygładzać jego wielkość.

Ostatecznie pokazano również, w jaki sposób podejście integrujące wiele źródeł — w tym pierścienie mrozowe, szerokości przyrostów, maksymalną gęstość drewna późnego, dane z rdzeni lodowych i niebieskie przyrosty — może zwiększyć naszą wiedzę na temat reakcji systemu klimatycznego na erupcje wulkaniczne.

Praca ta poszerza wiedzę na temat czynników wpływających na powstawanie niebieskich pierścieni. Podczas gdy wcześniejsze badania sugerowały związek między niebieskimi pierścieniami a temperaturą, niniejsza praca przedstawia bardziej szczegółową analizę konkretnych warunków klimatycznych, które prowadzą do ich powstawania. Dzięki wykorzystaniu dużej ilości wywiertów z drzew i zastosowaniu technik modelowania statystycznego, praca przedstawia kompleksową analizę czynników wpływających na powstawanie niebieskich pierścieni, w tym temperatury, wysokości i topografii. Chociaż wcześniejsze badania wskazały na wstępny związek między powstawaniem niebieskich pierścieni a aktywnością wulkaniczną, tutaj wzmocniono ten związek na większym zestawie danych i dłuższej osi czasu oraz zilustrowano konkretne przykłady nowych informacji, jakie niebieskie pierścienie mogą wnieść do naszej wiedzy na temat czasu i zasięgu przestrzennego skutków klimatycznych konkretnych erupcji.

Wykorzystanie niebieskich pierścieni jako wskaźnika przeszłych epizodów ochłodzenia może zwiększyć dokładność rekonstrukcji klimatu, poprawiając zrozumienie tego, jak klimat zmieniał się na przestrzeni tysiącleci, zapewniając dodatkową warstwę informacji o nagłych, krótkoterminowych zdarzeniach, które w przeciwnym razie mogłyby nie zostać uchwycone przez rekonstrukcje oparte na szerokościach przyrostu drzew. Mogą one również pomóc w rozwikłaniu złożonych interakcji między wulkanizmem, klimatem i działalnością człowieka w rozdzielczości ponad rocznej. Wynika to z faktu, że odporność lub podatność społeczeństw w dużym stopniu zależy od produktywności rolnictwa, na którą mogą wpływać krótkoterminowe ekstrema pogodowe, które zwykle nie są odzwierciedlone w

tradycyjnych chronologiach szerokości przyrostów rocznych oraz maksymalnej gęstości drewna późnego. Lepsze zrozumienie przeszłej zmienności klimatu może przyczynić się do trafniejszych prognoz przyszłych trendów klimatycznych, szczególnie w odniesieniu do aktywności wulkanicznej i innych czynników klimatycznych o dużym zasięgu, których nagłe skutki mogą mieć wpływ na społeczeństwo.