

# Autoreferat

## 1. Imię i nazwisko

Jacek Pawlak

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

Doktor nauk o Ziemi – stopień nadany przez Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk w roku 2011. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Numeryczna ocena wiarygodności rekonstrukcji paleoklimatycznych na podstawie analiz izotopowych holocenijskich osadów węglanowych z terenu Polski południowej*. Promotor: dr hab. Helena Hercman.

Magister geologii – stopień nadany przez Wydział Geologii Uniwersytetu Warszawskiego w roku 2003. Tytuł pracy magisterskiej: *Czwartorzędowe osady dolinne w rejonie Poronina*. Promotor: Prof. dr hab. Leszek Lindner.

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

06.2012 –	Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk – adiunkt.
05.2011 – 05.2012	Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk – asystent.
03.2009 – 04.2011	Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk – laborant.
03.2007 – 02.2009	Instytut Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk – doktorant.

## 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej

Tematyka prowadzonych przeze mnie badań naukowych po uzyskaniu stopnia doktora nauk o Ziemi skupiała się wokół dwóch ścieżek: kontynuacji rozpoczętej w doktoracie problematyki związanej z implementacją nieparametrycznych metod analizy danych w naukach o Ziemi oraz na rekonstrukcji warunków paleoklimatycznych w Europie Środkowej na podstawie badań nacieków jaskiniowych metodami geochemicznymi. Jestem współautorem szeregu prac dotyczących tej tematyki, zaczynając od Holocenu (Hercman et al., 2020) poprzez starszy okres MIS 7 (Błaszczuk et al., 2021) aż do trzeciorzędowych profili pól jaskiniowych z rejonu Słowenii (Zupan Hajna et al., 2021). Szczególnie zainteresowany byłem badaniami nacieków powstałych w okresie ostatniego interglacjalu (eem) oraz wistulianu w głównych rejonach krasowych Karpat. Wyniki tych badań uznaję za moje główne osiągnięcie naukowe i przedstawiłem je w tematycznie powiązanych ze sobą trzech artykułach naukowych (punkt I w wykazie osiągnięć naukowych) opublikowanych w czasopiśmie indeksowanym na liście Journal Citation Reports (JCR).

1. Pawlak J., Błaszczuk M., Hercman H., Matoušková Š., 2019, A continuous stable isotope record of last interglacial age from the Bulgarian Cave Orlova Chuka. *Geochronometria*, Vol. 46, pp. 87-101.

2. Pawlak J., Błaszczak M., Hercman H., Matoušková Š., 2021, Palaeoenvironmental conditions during MIS 6/MIS 5 transition recorded in speleothems from the Tatra Mountains. *Boreas*, Vol. 50, pp. 224-241.
3. Pawlak J., 2021, The speleothem oxygen record – a proxy for thermal or moisture changes? A case study of multiproxy records from MIS 5/MIS 6 speleothems from the Demänová Cave System. *Climate of the Past*, Vol. 17, pp. 1051-1064.

Badania, które doprowadziły do powstania opublikowanego osiągnięcia, realizowałem po uzyskaniu stopnia doktora nauk o Ziemi i stanowią istotny wkład w rozwój wiedzy o klimacie ostatniego interglacjału. Byłem autorem idei oraz planu badań, które prowadzono pod moim kierownictwem w ramach grantu NCN 2015/19/D/ST10/00571 w Laboratorium Uranowo-Torowym Instytutu Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk w Warszawie oraz w Instytucie Geologicznym Czeskiej Akademii Nauk, gdzie w ramach współpracy badawczej wykonywano analizy koncentracji pierwiastków śladowych oraz pomiary aktywności izotopów Uranu i Toru.

### **Tytuł głównego osiągnięcia naukowego**

Rekonstrukcja warunków klimatycznych w okresie ostatniego interglacjału w rejonie Karpat na podstawie zapisów izotopowych z nacieków jaskiniowych.

### **Wprowadzenie w problematykę badawczą głównego osiągnięcia naukowego**

Współczesne zmiany klimatyczne stanowią jeden z istotnych problemów ludzkości. Trwający obecnie holocen jest ciepłym okresem interglacjalnym. Badanie wcześniejszych okresów interglacjalnych, ich niezmiennego działaniem człowieka klimatu, jest istotne w celu lepszego zrozumienia rozmiaru aktualnie zachodzących antropogenicznych zmian klimatu. Ostatnim okresem ciepłym przed holocenem był interglacjał eemski. Ze względu na relatywnie młody wiek interglacjału eemskiego (129-116 ka), możliwości datowania i dostępność materiału badawczego, zmiany klimatu zachodzące w tym interglacjale mogą być analizowane z wysoką rozdzielczością. Stanowi to cenny materiał do porównań z trwającym obecnie holocenem. Pomimo faktu, że zgodnie z aktualną wiedzą interglacjał eemski nie może być traktowany jako bezpośrednia analogia dla holocenu, głównie ze względu na cykl zmian orbitalnych, który przekłada się na zmiany w insolacji (Davis & Brewer, 2008), jego szczegółowe badanie dostarcza istotnych informacji o dynamice i rozmiarach naturalnych zmian klimatycznych, niezaburzonych działaniem człowieka.

Powstawanie nacieków jaskiniowych ma bezpośredni związek z panującym w otoczeniu jaskini klimatem. Dodatkowo jaskinie stanowią „naturalne pułapki” i osady deponowane w jaskiniach, w tym także formy naciekowe, mają stosunkowo wysoki potencjał zachowania w okresach wzmożonej erozji na powierzchni. Węgiel wapnia, najczęściej budujący nacieki, może być precyzyjnie datowany metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ , co umożliwia estymacje precyzyjnej skali czasu krystalizacji nacieku. Warunki krystalizacji nacieków mają wpływ na wartość wielu wskaźników fizykochemicznych (tzw. proxy), takich jak: skład izotopowy węgla i tlenu, koncentracja pierwiastków śladowych, co czyni te wskaźniki wartościowym źródłem informacji o warunkach klimatycznych w przeszłości. Dodatkowe informacje na temat warunków krystalizacji daje również analiza wykształcenia kalcytu budującego nacieki. Do regionalnych i globalnych analiz porównawczych najczęściej wykorzystywany jest skład izotopowy tlenu  $\delta^{18}\text{O}$ . Dlatego zrozumienie, jakie czynniki środowiskowe mają wpływ na wartość  $\delta^{18}\text{O}$  nacieków jaskiniowych w skali lokalnej, regionalnej oraz globalnej, jest istotnym problemem badawczym.

Jeśli krystalizacja nacieku zachodzi w warunkach równowagi izotopowej, to wartość  $\delta^{18}\text{O}$  krystalizującego nacieku odzwierciedla temperaturę panującą w jaskini w trakcie krystalizacji oraz lokalny średni roczny skład izotopowy wody opadowej. Wpływ temperatury panującej w jaskini na  $\delta^{18}\text{O}$  krystalizującego w niej nacieku (gradient termiczny) jest stosunkowo dobrze poznany. Jego wartość jest szacowana na około  $-0,18\text{‰} \cdot \text{C}^{-1}$  (Tremaine et al., 2011). Kształtowanie się składu izotopowego wody opadowej jest problemem o wyższym stopniu złożoności. W skali globalnej skład izotopowy wody opadowej jest uzależniony od średniego składu izotopowego wód powierzchniowych oceanu światowego, który odzwierciedla globalną objętość lodu lodowcowego (Dansgaard, 1964). Współcześnie podstawowym źródłem

wód meteorycznych na kontynencie europejskim jest Ocean Atlantycki. Inne potencjalne źródła to Morze Śródziemne, Morze Czarne oraz Ocean Arktyczny. Wody powierzchniowe Morza Śródziemnego są wzbogacone w  $^{18}\text{O}$  w stosunku do wód powierzchniowych Oceanu Atlantyckiego. Okresowe zmiany głównego źródła wód opadowych w danym regionie mogą mieć istotny wpływ na wartość  $\delta^{18}\text{O}$ . Kolejnym czynnikiem kształtującym skład izotopowy wód opadowych w skali regionalnej jest tzw. efekt kontynentalny. Polega on na zubożeniu się w izotop  $^{18}\text{O}$  wód opadowych w trakcie ich transportu nad kontynentem (McDermott et al., 2011). Nad obszarem kondensacji i opadu znaczenie mają czynniki lokalne, takie jak: temperatura powietrza, wysokość nad poziomem morza, intensywność oraz ilość opadu. Dodatkowo skład izotopowy wód meteorycznych jest modyfikowany w trakcie ich transportu do jaskini. Najważniejszym czynnikiem jest tutaj parowanie, które może zachodzić zarówno w glebie, jak i w strefie epikrasu. Intensywność tego procesu jest uzależniona od wilgotności, temperatury oraz czynników lokalnych.

Kiedy podjąłem się badań nacieków eemskich z jaskiń Karpat na terenie Europy i Bliskiego Wschodu, znanych było kilkanaście zapisów  $\delta^{18}\text{O}$  o wysokiej rozdzielczości pochodzących z nacieków jaskiniowych (fig. 1). Z wyjątkiem zlokalizowanej na terenie Węgier jaskini Baradla (Demény et al., 2017; fig. 1) europejskie jaskinie, z których pobrano materiał do stworzenia tych zapisów, zlokalizowane były na terenie Europy Zachodniej, Europy Południowej oraz na obszarze Alp. Dominującym czynnikiem kształtującym wartość  $\delta^{18}\text{O}$  zapisów izotopowych o wieku eemskim z rejonu Europy Zachodniej oraz w przypadku zapisu z jaskini Baradla była temperatura. Czynniki typu wilgotność czy efekt sezonowości opadu znajdowały się na dalszym planie (Moseley et al., 2015; Demény et al., 2017; Kern et al., 2019; Comas-Bru et al., 2020; fig. 1). Wyjątek stanowi zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z jaskini Bourgeois-Delaunay, gdzie zaobserwowane cykle mogą być powiązane ze zmianami w zakresie wilgotności i ilości opadów (Couchoud et al., 2009). Z kolei eemskie zapisy  $\delta^{18}\text{O}$  z rejonu Bliskiego Wschodu i południowej Europy były kształtowane w znacznym stopniu przez zmiany w wilgotności, ilości opadów oraz zmiany  $\delta^{18}\text{O}$  powierzchniowych wód Morza Śródziemnego (*source effect*). Brak szerszych danych z rejonu Europy Środkowej oraz potencjalne znaczenie łańcucha Karpackiego dla kształtowania się klimatu w tym rejonie – współcześnie oraz we wcześniejszych interglacjalach – skłoniło mnie do zajęcia się tym problemem badawczym. W wyniku prowadzonych prac terenowych udało się pozyskać materiał naciekowy z pięciu jaskiń położonych na terenie Polski, Słowacji i Bułgarii. Przeprowadzone badania analityczne pozwoliły na stworzenie kompleksowych zapisów w funkcji wieku szeregu wskaźników paleośrodowiska dla tych regionów w okresie ostatniego interglacjalu (*multi-proxy*).

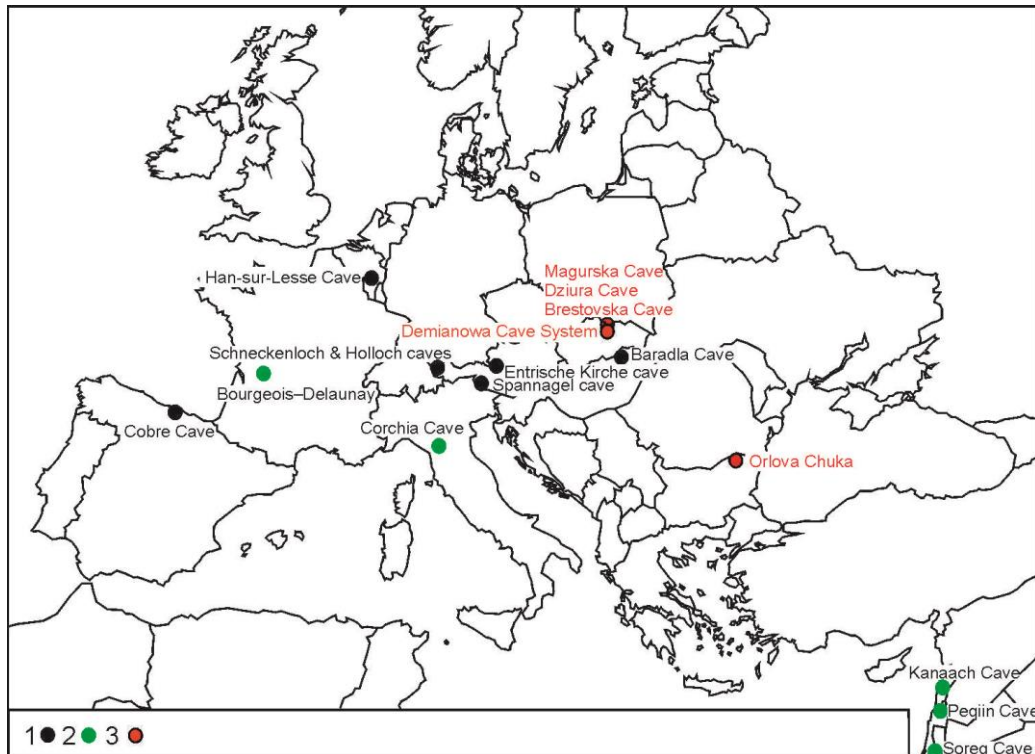


Figura 1. Lokalizacje europejskich i bliskowschodnich jaskiń, z których pochodzą ważne profile naciekowe o wieku ostatniego interglacjalu; 1 – lokalizacje jaskiń, gdzie autorzy uznali temperaturę otoczenia jaskini jako dominujący czynnik kształtujący skład  $\delta^{18}\text{O}$  nacieków; 2 – lokalizacje jaskiń, gdzie autorzy uznali inne czynniki jako dominujące skład  $\delta^{18}\text{O}$  nacieków; 3 – lokalizacje jaskiń, z których pochodzą badane przez mnie nacieki (Pawlak et al., 2021).

Lokalizacje jaskiń, z których pobrano nacieki do badań, w połączeniu z opublikowanymi zapisami pozwalały na porównanie zmienności warunków klimatycznych oraz dynamiki ich zmian w różnych rejonach Europy oraz wyciągnięcie wniosków w kwestii głównych czynników kształtujących klimat w Europie w okresie eemu.

### Streszczenie serii publikacji składających się na główne osiągnięcie naukowe

(1) Pawlak J., Błaszczak M., Hercman H., Matoušková Š., 2019, A continuous stable isotope record of last interglacial age from the Bulgarian Cave Orlova Chuka. *Geochronometria*, Vol. 46, pp. 87-101.

Prace obejmowały uzyskanie oraz analizę zapisów wysokiej rozdzielczości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  z 165 cm długości stalagmitu kolumnowego (Ocz-6; fig. 2). Stalagmit pobrano w jaskini Orlova Chuka położonej w północnej Bułgarii w rejonie Ruse (fig. 2). Archiwalne wyniki uzyskane z wykorzystaniem spektrometrii cząstek alfa wykazały, że stalagmit Ocz-6 krystalizował w okresie stadium tlenowego (MIS) 5 (fig. 2). Biorąc pod uwagę szybkie tempo narastania stalagmitów kolumnowych, stalagmit ten wydawał się idealnym materiałem do badań paleośrodowiska w okresie eemu prowadzonych w wysokiej rozdzielczości.

Uzyskane wyniki to pierwszy „naciekowy zapis izotopowy” wysokiej rozdzielczości o wieku eemskim, który pochodzi z regionu Europy południowo – wschodniej, czyli regionu Europy interesującego ze względu na możliwą zmienność w czasie wpływów Oceanu Atlantyckiego, morza Śródziemnego oraz morza Czarnego.

Naciek Ocz-6 został datowany metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Ostateczna skala czasu powstała w oparciu o 13 wyników datowań z wykorzystaniem opracowanego wcześniej w naszym laboratorium programu MOD-AGE (Hercman and Pawlak 2012). Na etapie datowania okazało się, że dokładne określenie wieku nacieku na odcinku pomiędzy 250 a 500 mm odległości od podstawy nie jest możliwe. Podejmowane próby dawały duży rozrzut otrzymywanych wyników. Analizy mikroskopowe szlifu z tego fragmentu nacieku wykazały, że jest to strefa o wysokiej porowatości, dodatkowo w strefie porów udało się zaobserwować generacje kryształów kalcytu, które z dużym prawdopodobieństwem mogły powstać już po uformowaniu się tego

fragmentu nacieku. Opracowany model wiek głębokość wskazuje na bardzo szybki wzrost nacieku w tym okresie, co mogło przyczynić się do powstania licznych przestrzeni porowych. Z tego powodu ten fragment nacieku został wyłączony z wszystkich analiz geochemicznych oraz późniejszej interpretacji paleośrodowiskowej.

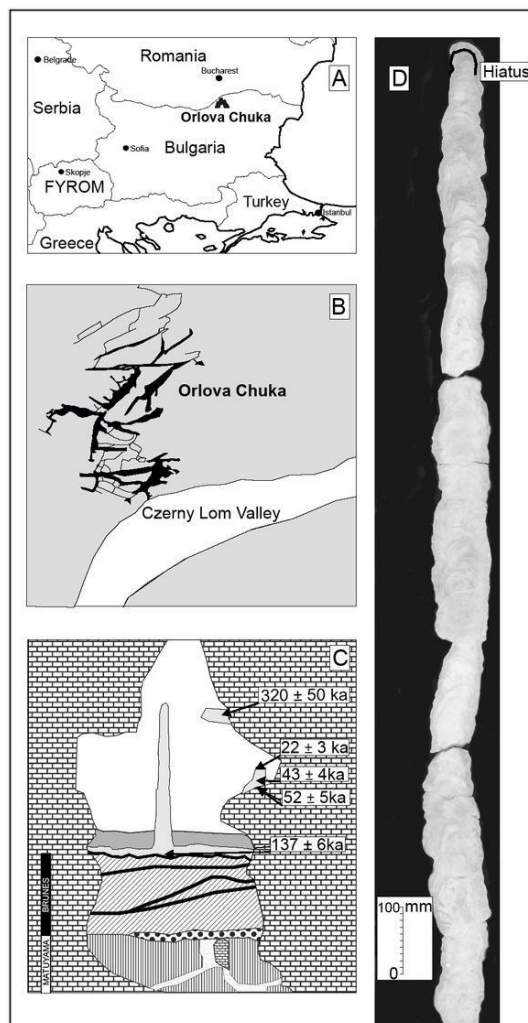


Figura 2. Lokalizacja stalagmitu Ocz-6: A – lokalizacja jaskini Orlova Chuka; B – szkic jaskini Orlova Chuka wykonany na podstawie materiałów dostępnych na stronie [www.dvemogili.bg](http://www.dvemogili.bg); C – przekrój przez osady jaskiniowe w miejscu pobrania stalagmitu Ocz-6. D – fotografia stalagmitu Ocz-6 (Pawlak et al., 2019).

Opierając się na 798. punktowych pomiarach wartości stosunków izotopowych  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  oraz na otrzymanej skali czasu, estymowano ciągłe zapisy izotopowe  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$ . Średnia rozdzielczość, jaką udało się uzyskać, to w przybliżeniu 0,02 ka. Dla wybranych fragmentów nacieku, charakteryzujących się zmianami w składzie izotopowym O i/lub C lub zmianami wykształcenia kalcytu, udało się dodatkowo pozyskać zapisy zmienności koncentracji pierwiastków.

Z zebranych danych wynika, że naciek Ocz-6 narastał w okresie ok. 129-112 ka. Główny trend zapisu  $\delta^{13}\text{C}$  najprawdopodobniej odzwierciedla rozwój pokrywy glebowej, a co za tym idzie – szaty roślinnej w otoczeniu jaskini (fig. 3 A). Główny trend  $\delta^{18}\text{O}$  nawiązuje do zmian średniej rocznej temperatury jaskini (fig. 3 A). W początkowym okresie interglacjału (129-126,5 ka) obserwowany negatywny trend dla zapisu  $\delta^{18}\text{O}$  (fig. 3 A) jest podobny do trendu obserwowanego w tym czasie w zapisach śródziemnomorskich. Trend negatywny jest częściej związany ze zmianami składu izotopowego wody morskiej niż z lokalnymi zmianami termicznymi. Na początku optimum ostatniego interglacjału widoczne jest znaczne przyspieszenie tempa krystalizacji nacieku oraz zmiany wykształcenia kalcytu (tzw. zmiany mikrofakalne). Dominującą wcześniej mikrofacją „columnar compact” zastępuje cechująca się wyższą porowatością mikrofacja „columnar open”. Takie przyspieszenie krystalizacji nacie-

ku i jednoczesna zmiana w mikrofacji może sugerować wilgotniejszy epizod. Obecna w obrębie porów młodsza generacja kryształów kalcytu uniemożliwia wnioskowanie na temat tego odcinka czasu na podstawie danych geochemicznych.

Pozostała część optimum interglacjału eemskiego cechuje się wysoką wartością  $\delta^{18}\text{O}$  oraz niską wartością  $\delta^{13}\text{C}$ , wskazując na ciepłe i wilgotne optimum klimatyczne z dobrymi warunkami do rozwoju szaty roślinnej. W trakcie trwania optimum klimatycznego zapis  $\delta^{18}\text{O}$  zaczyna bardziej nawiązywać do zapisów naciekowych z Europy Zachodniej oraz Środkowej. Można to interpretować jako zwiększenie się wpływu cyrkulacji atlantyckiej w rejonie Ruse. Zaznaczające się zwiększone wartości stosunków Fe/Ca i P/Ca na początku i pod koniec interglacjału mogą być powiązane ze zubożoną w tamtym czasie szatą roślinną oraz słabiej rozwiniętą pokrywą glebową. Zwiększająca się różnica pomiędzy zapisem  $\delta^{18}\text{O}$  z nacieku Ocz-6 i innymi europejskimi zapisami naciekowymi z tego okresu sugeruje, że warunki klimatyczne panujące w otoczeniu jaskini pod koniec ostatniego interglacjału zaczęły być bardziej zależne od czynników lokalnych. Wyraźny wzrost wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  po 113 ka wskazuje na osuszenie się klimatu, a następnie zatrzymanie wzrostu nacieku ok. 112 ka.

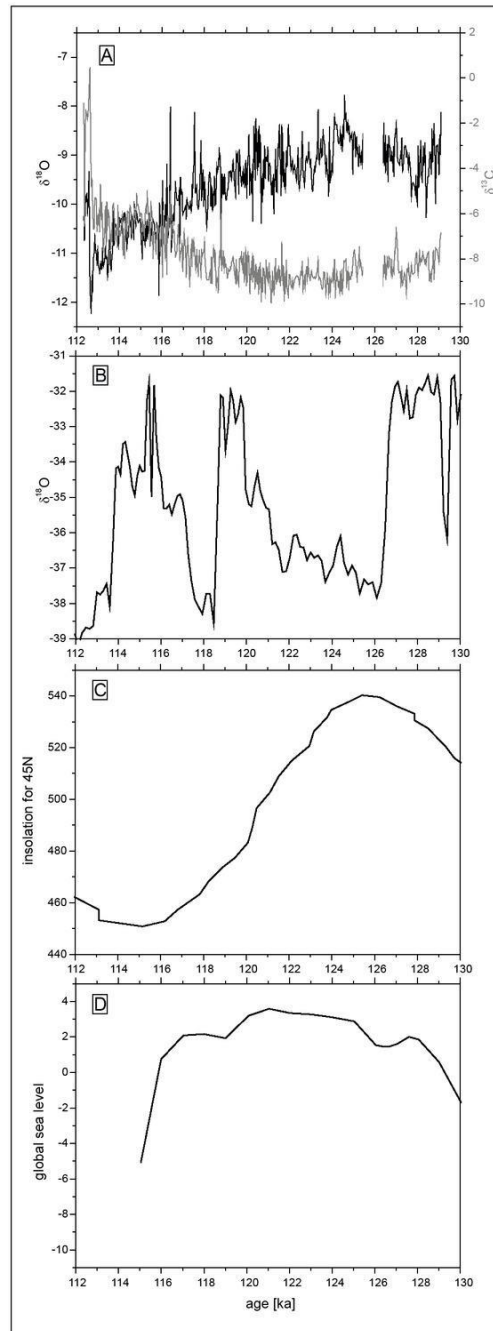


Figura 3. Zapis izotopowy z nacieku Ocz-6 na tle globalnych proxy: A – zapis  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  z nacieku Ocz-6; B – zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z rdzenia lodowego GRIP (Chappellaz et al., 1997); C – Zmienność letniej insolacji dla  $45^\circ\text{N}$  (Davis and Brewer, 2008); D – Globalny poziom morza (Dutton and Lambeck, 2012); (Pawlak et al., 2019).

(2) Pawlak J., Błaszczuk M., Hercman H., Matoušková Š., 2021, Palaeoenvironmental conditions during MIS 6/MIS 5 transition recorded in speleothems from the Tatra Mountains. *Boreas*, Vol. 50, pp. 224-241.

Jest to pierwsza praca z rejonu Europy Środkowej, w której analizowano zapisy paleośrodowiskowe odtworzone na podstawie materiału naciekowego, pobranego z trzech jaskiń znajdujących się w różnych warunkach morfologicznych na jednym niewielkim obszarze (Tatry Zachodnie; fig. 4). Pierwszą z badanych jaskiń jest Jaskinia Magurska, której główny otwór wejściowy znajduje się na wysokości 1460 m n.p.m. Jaskinia ta jest rozwinięta w obrębie jurajskich wapieni i triasowych dolomitów (Hercman, 1989). Z tej jaskini pobrano stalagmit MAG-1 (fig. 4 A) o długości 118 mm. Stalagmit ten narastał w korytarzu rozwiniętym w obrębie triasowych dolomitów w odległości ok 1000 m od wejścia do jaskini. Kolejną jaskinią jest Dziura Wyżnia, której otwór wejściowy znajduje się na wysokości 1000 m n.p.m.

Jaskinia jest rozwinięta w dolomitach środkowego triasu. Stalagmit Dz-1 (długość 95 mm; fig. 4 B) pobrano ok. 79 m od otworu wejściowego do tej jaskini. Jaskinia Brestovska (Słowacja) jest najniżej położona – jej otwór wejściowy jest na wysokości 880 m n.p.m. W jaskini wyróżniono dwa piętra korytarzy, które są rozwinięte w triasowych dolomitach oraz wapieniach eoceńskich. Polewę naciekową B-6.1 (fig. 4 C) pobrano z dolnego piętra, ok. 5 m powyżej współczesnego poziomu podziemnego przepływu (Hercman et al., 2008).

Istotnym aspektem prowadzonych badań jest możliwość oceny, jak warunki *stricte* lokalne wpływają na zapis izotopowy. Odtworzone na podstawie pozyskanego materiału zapisy paleośrodowiskowe obejmują okres ok. 180-80 ka, co pozwala nie tylko na odtworzenie warunków panujących w okresie ostatniego interglacjału, ale też cyklu zmian towarzyszących przejściu z warunków glacialnych do interglacialnych, a następnie do schyłku interglacjału i ponownemu przejściu do warunków glacialnych.

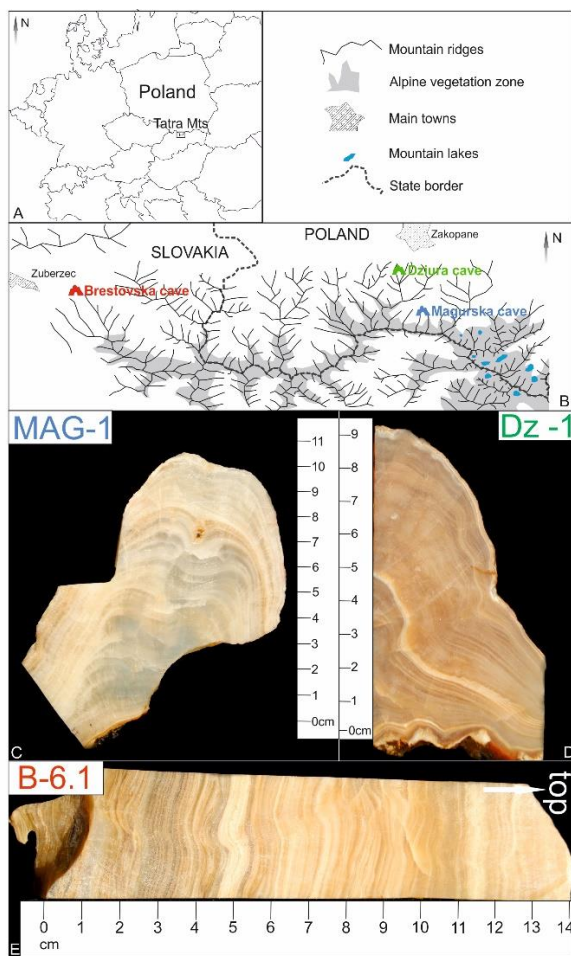


Figura 4. Lokalizacja jaskiń oraz fotografie próbek stalagmitów: A – mapa Europy Środkowej; B – szkic Tatr; C – fotografia próbki MAG-1 z Jaskini Magurskiej; D – fotografia próbki Dz-1 z jaskini Dziura Wyżnia; E – fotografia próbki B-6.1 z Jaskini Brestovskiej (Pawlak et al. 2021).

Dla wszystkich trzech analizowanych nacieków utworzono skale czasu opierające się na datowaniu metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Zapisy izotopowe wykonano w odniesieniu do punktowych pomiarów  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$ . Próbkę do pomiaru składu izotopowego wiercono z wykorzystaniem systemu Micro-Mill z krokiem od 0,3 do 1 mm w zależności od tempa krystalizacji nacieku na danym odcinku. Daje to rozdzielczość czasową dochodzącą do 0,1 ka w przypadku nacieku z Jaskini Magurskiej. Rozdzielczość zapisów z pozostałych dwóch nacieków dochodzi do 0,2 ka w okresach szybszej krystalizacji tych nacieków; w okresach wolniejszej krystalizacji jest ona niższa. Dodatkowo określono zmienność mikrofacjalną badanych form naciekowych oraz stosunki: Sr/Ca; Mg/Ca; Ba/Ca; P/Ca; Si/Ca.

Analiza mikrofacji badanych nacieków pozwala na rekonstrukcję warunków krystalizacji form naciekowych (Frisia, 2015). Naciek MAG-1 z położonej najwyższej Jaskini Magurskiej

wykształcony jest głównie w facji „columnar compact” i „columnar open”, co świadczy o ciągłym przesiąkaniu wody w trakcie krystalizacji. Polewa B-6.1 jest w znaczącym stopniu wykształcona w facjach „columnar microcrystalline” i „microcrystalline”, co świadczy o zmiennym tempie przesiąkania wody – łącznie z okresami, gdzie było ono znacznie zmniejszone. Dolna część nacieku Dz-1 składa się z podobnych facji. Zmiana następuje w jego górnej części, gdzie zaczyna dominować facja „columnar compact” i „columnar elongated”, co świadczy o zwiększonym zaopatrzeniu w wodę przesiąkającą. Obserwowaną tutaj zmienność można odnieść do różnic w wysokości poszczególnych jaskiń. Współcześnie średnia roczna ilość opadów w Tatrach jest ściśle powiązana z wysokością nad poziomem morza.

Średnia różnica wartości  $\delta^{18}\text{O}$  pomiędzy zapisami z Jaskini Magurskiej i Dziury Wyżniej wynosi 1,45‰. Średni efekt wysokościowy oszacowany dla Alp wynosi 0,2‰/100m (Ambach et al., 1968). W przypadku 460 m różnicy wysokości między Jaskinią Magurską a Dziurą Wyżnią można przyjąć w przybliżeniu wartość 0,9‰. Gradient temperaturowy dla wody opadowej w Europie Środkowej waha się od +0,33‰ do +0,75‰. Biorąc pod uwagę odwrotny efekt izotopowy związany z krystalizacją nacieku, można przyjąć wartość + 0,25‰/1°C jako sumaryczny efekt izotopowy. Współcześnie różnica w średniej rocznej temperaturze między strefami otworowymi obu jaskiń wynosi ok. 2,75°C. Zsumowanie efektu wysokościowego i temperaturowego daje w przybliżeniu wartość 1,6‰ dla współczesności. Może to być wytłumaczeniem obserwowanej średniej różnicy pomiędzy badanymi zapisami. Te stałe efekty nie tłumaczą jednak zmiennej wartości różnicy  $\delta^{18}\text{O}$  między badanymi zapisami. W trzech okresach (138-130 ka; 126-124 ka; 107-100 ka) różnica wartości  $\delta^{18}\text{O}$  dla badanych zapisów jest szczególnie wyraźna. W tych okresach zapisy  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Brestowskiej i Dziury Wyżniej mają podobny trend; różnica generowana jest przez inną amplitudę zmian. Potencjalnym mechanizmem tłumaczącym mniejszą amplitudę zmian zapisu  $\delta^{18}\text{O}$  z jaskini Dziura Wyżnia jest jej lokalizacja – wysokość nad poziomem morza, co wiąże się z dłuższym okresem zalegania śniegu i przemarzania gruntu. Dodatkowo większe nachylenie stoku powoduje, że znaczną część zimowego opadu odprowadza odpływ powierzchniowy (Róžański & Duliński 1988; Lauritzen & Lundberg 1999). Jaskinia Dziura Wyżnia jest najmniejszą z badanych jaskiń. W suchszych okresach wilgotność wewnątrz tej jaskini mogła spadać poniżej 100%, co dodatkowo stwarza możliwość modyfikowania zapisu izotopowego w tych okresach przez efekt kinetyczny związany z parowaniem. Zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Magurskiej wykazuje największe podobieństwo do innych zapisów z terenu Europy, co sugeruje, że jest on najmniej zmieniony przez warunki lokalne.

Zapis  $\delta^{13}\text{C}$  z Jaskini Magurskiej cechuje się największą amplitudą zmian (fig. 4 B). W warunkach górskich czynniki lokalne – takie jak: wysokość nad poziomem morza i nachylenie stoku – mają wpływ na rozwój roślinności oraz gleby. Roślinność na wyższych obszarach jest bardziej narażona na zmiany klimatyczne. Nawet nieznaczne ochłodzenie może spowodować przesunięcie się granicy lasu, co zarejestrowano przez zapis pochodzący z wyższej wysokości. Zapis  $\delta^{13}\text{C}$  z Jaskini Brestowskiej ma pewne cechy wspólne z zapisem z Jaskini Magurskiej, jeśli chodzi o zmiany drugiego rzędu. Jednak całościowo zapis z Jaskini Brestowskiej jest zdominowany przez stały rosnący trend. Ten trend jest obserwowany wyłącznie w tym nacieku, co oznacza, że stanowi to efekt lokalny. Biorąc pod uwagę okres oraz zebrane dane, stały trend w zapisie  $\delta^{13}\text{C}$  jest trudny do wytłumaczenia i jego weryfikacja czy interpretacja wymagają dalszych badań.

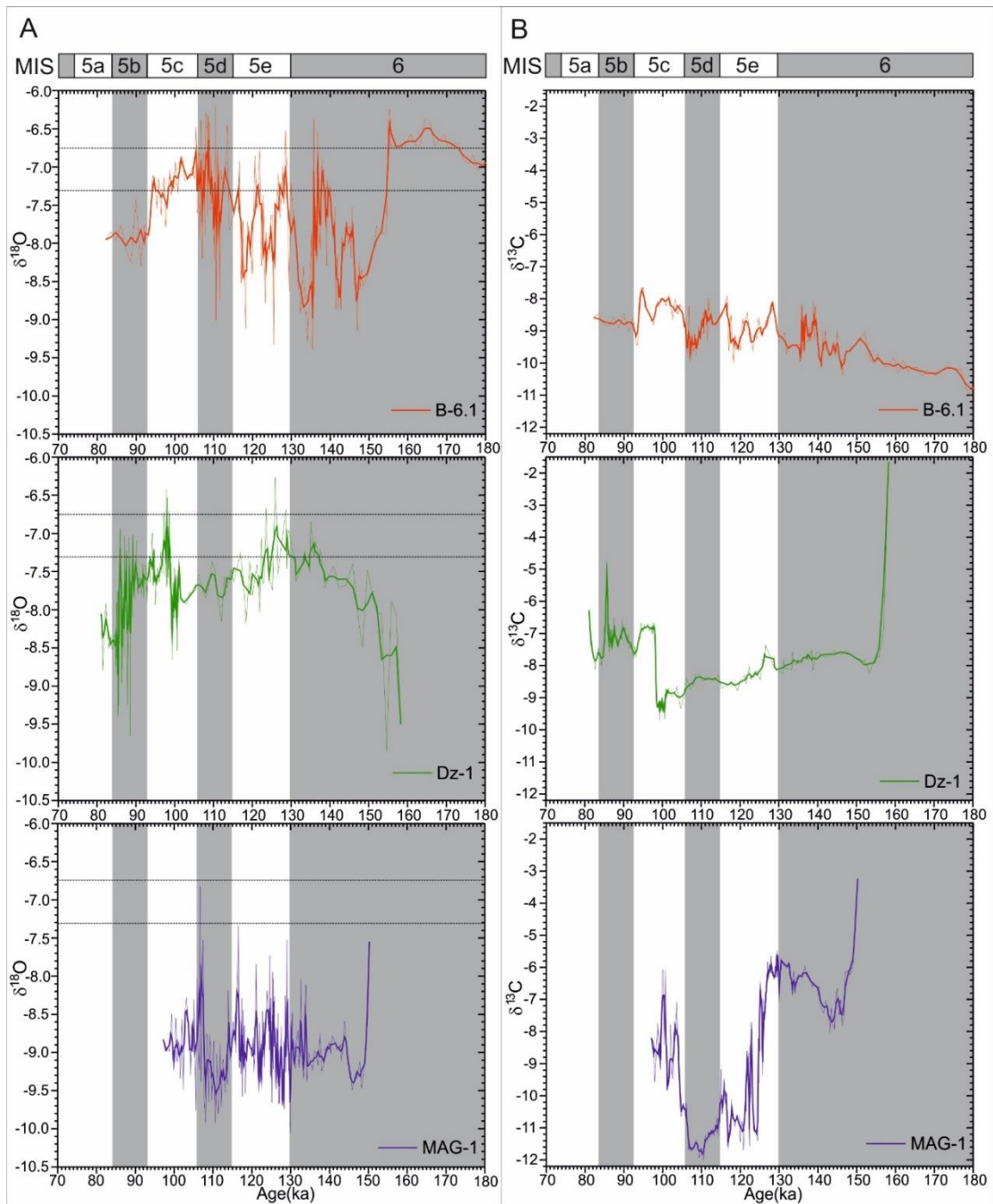


Figura 5. (Pawlak et al., 2021) Skład izotopowy analizowanych nacieków w skali czasu: A – zapisy  $\delta^{18}\text{O}$ ; B – zapisy  $\delta^{13}\text{C}$ ; pogrubione linie – wygładzony zapis izotopowy; cienkie linie – surowe dane  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$ ; przerywana linia pozioma – zakres wartości  $\delta^{18}\text{O}$  dla holoceńskiego stalagmitu z Jaskini Czarnej (Gradziński et al., 2009).

Zmiany w stosunkach Mg/Ca, Sr/Ca oraz Ba/Ca mogą być interpretowane jako zmiany warunków hydrologicznych (Tremaine & Froelich, 2013). W warunkach suchszego klimatu jest większe prawdopodobieństwo krystalizacji kalcytu z przesiąkającej wody w glebie lub szczelinach skał nadległych, zanim dotrze ona do jaskini, co prowadzi do wzrostu relatywnej koncentracji innych jonów w stosunku do  $\text{Ca}^{2+}$  w roztworze docierającym do jaskini. Wilgotniejsze warunki prowadzą do skrócenia czasu rezydencji wody w obrębie masywu, co prowadzi do spadku koncentracji Mg, Sr i Ba w stosunku do Ca. Spośród badanych stanowisk współcześnie średni opad roczny jest najwyższy w otoczeniu Jaskini Magurskiej. Można przyjąć, że w warunkach ostatniego interglacjału rozkład opadów w Tatrach był zbliżony do współczesnego. Należałoby oczekiwać, że stosunek Mg/Ca będzie najniższy w nacieku z Jaskini Magurskiej. Jednak z pozyskanych danych wynika, że wartości te są niższe dla zapisu z Jaskini Brestowskiej (fig. 6). Dodatkowo stały ujemny trend stosunku Mg/Ca w nacieku

z Jaskini Magurskiej potwierdza, że nie może być on traktowany w tym przypadku jako wskaźnik zmienności opadów.

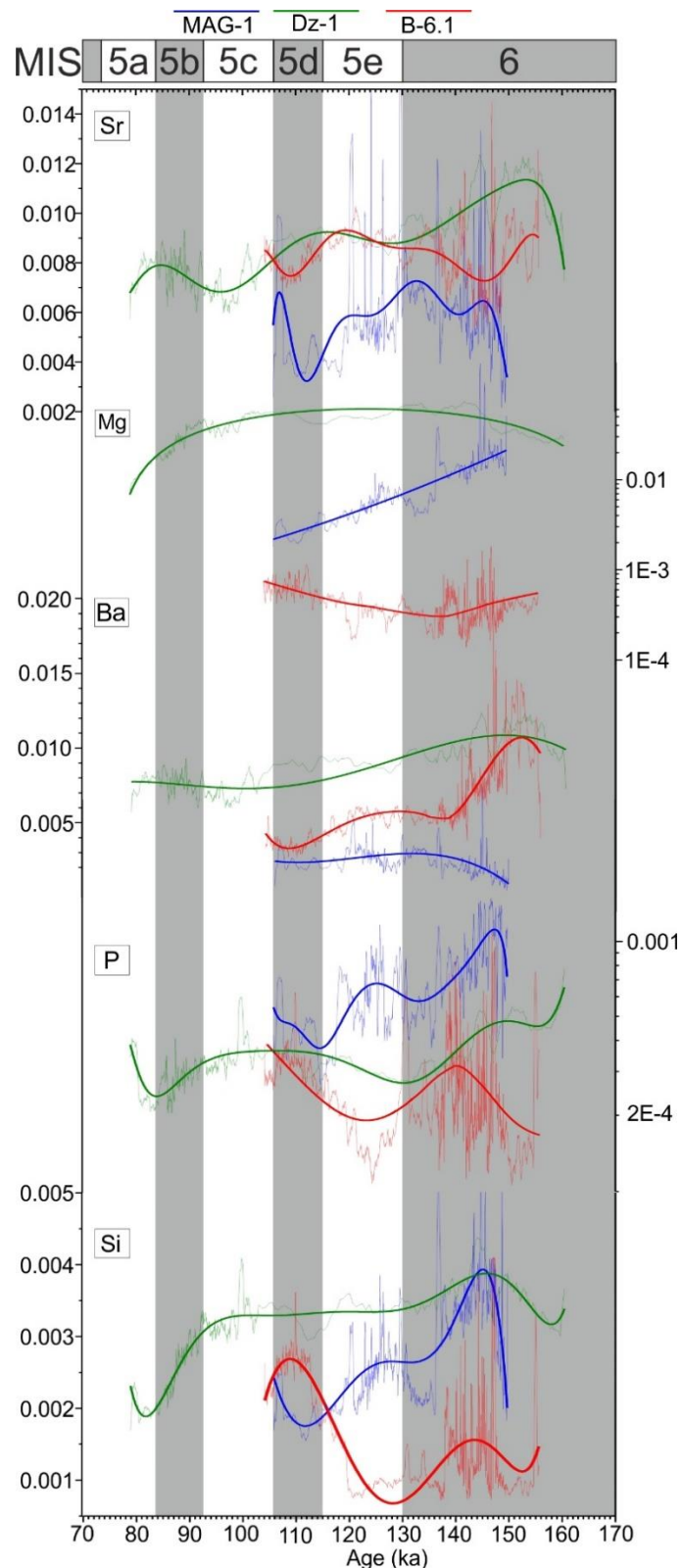


Figura 6. Relatywna koncentracja pierwiastków śladowych analizowanych nacieków w stosunku do Ca: cienkie linie – surowy sygnał; pogrubione linie – główny trend zapisów (Pawlak et al., 2021).

Średnia wartość stosunku Sr/Ca dla nacieku z Jaskini Magurskiej jest niższa niż dla nacieków z Jaskini Brestowskiej i Dziury Wyżniej, co może, w pewnym stopniu, być spowodowane różnicą w średniej rocznej ilości opadów (fig. 6). Zapisy stosunków P/Ca dla nacieków z Jaskini Brestowskiej i Dziury Wyżniej mają zbliżone wartości średnie oraz trendy. W przy-

padku zapisu P/Ca z Jaskini Magurskiej reakcja zapisu w czasie interglacjału jest odwrotna do pozostałych zapisów (fig. 6). Biorąc pod uwagę różnice w wysokości nad poziomem morza, co wiąże się z różnym poziomem rozwoju gleby, ilością opadów oraz różnym poziomem wietrzenia mrozowego, obserwowana różnica pomiędzy zapisem z Jaskini Magurskiej a pozostałymi zapisami może odzwierciedlać te procesy. Rozwinięte gleby zawierają kwasy organiczne, które mogą przyczyniać się do redukcji akumulacji pierwiastków takich jak P w strukturze kalcytu (Fairchild & Treble, 2009).

Najwcześniej (ok. 180 ka) zaczyna krystalizować polewa naciekowa z Jaskini Brestowskiej. Zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z tej jaskini osiąga swoją maksymalną wartość w przedziale czasowym 155-165 ka. W tym przypadku tak wysoka wartość  $\delta^{18}\text{O}$  ma związek z suchym klimatem, nieciągłą sezonową krystalizacją. Krystalizacja nacieków w jaskini Dziura Wyżna i Jaskini Magurskiej rozpoczyna się ok. 160 i 150 ka, co odzwierciedla systematyczny wzrost okresowej dostępności ciekłej wody na wyższych wysokościach. Dynamiczna zmiana wartości  $\delta^{13}\text{C}$  w początkowym okresie krystalizacji nacieku MAG-1 świadczy o zachodzących zmianach wykształcenia szaty roślinnej w otoczeniu Jaskini Magurskiej. Dodatkowo efekt ten może być również spowodowany zapoczątkowaniem wzrostu nacieków i wzrostem koncentracji  $\text{CO}_2$  w atmosferze jaskini. Bardzo szybki czas reakcji  $\delta^{13}\text{C}$  w okresie przed 150 ka powiązany z taką samą reakcją  $\delta^{18}\text{O}$  wskazuje bardziej na tę drugą możliwość lub efekt kinetyczny. W okresie ok 150-140 ka zapisy względnej koncentracji pierwiastków śladowych z wszystkich badanych nacieków wykazują dużą amplitudę zmian. Może to być interpretowane jako rezultat intensywniejszych procesów stokowych wywołanych takimi czynnikami jak intensywniejsze wietrzenie mrozowe (Kotarba, 1997). Przejście z glacialnego okresu MIS 6 do ostatniego interglacjału MIS 5e nie jest tak dobrze udokumentowane, jak przejście z ostatniego glaciału do holocenu. Rekonstrukcje bazujące na danych palinologicznych ukazują obraz szybkiego przejścia z suchych i chłodnych warunków do ciepłego interglacjału (Brewer et al., 2008). Zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z alpejskiej jaskini Schneckloch wskazuje na możliwość występowania krótkich okresów ociepleń i ochłodzeń klimatu w trakcie przejścia MIS 6/MIS 5e (Moseley et al., 2015). Podobne oscylacje stwierdzono w zapisie paleojeziornym pochodzącym z północnej Polski (Binka & Nitychoruk, 2011). Badane zapisy  $\delta^{18}\text{O}$  wykazują dużą zmienność w okresie 140-130 ka. Podwyższone wartości  $\delta^{18}\text{O}$  w okolicach 135 ka mogą wskazywać na powrót suchego i chłodniejszego klimatu. Podobne oscylacje odkryto również w zapisie z jaskini Okshola w Norwegii (Lauritzen, 1995). Zmienność tego typu może być analogią okresów młodszego i starszego dryasu.

W okresie ostatniego interglacjału charakter zapisu  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Magurskiej jest zbliżony do zapisów z francuskiej jaskini Bourgeois-Delaunay (Couchoud et al., 2009), jaskini Baradla zlokalizowanej na granicy węgiersko-słowackiej (Demény et al., 2017) oraz położonej w bułgarskim rejonie Ruse jaskini Orlova Tchuka (Pawlak et al., 2019). Oscylacje wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  w zapisie z jaskini Bourgeois-Delaunay są interpretowane jako zmiany w wilgotności i ilości opadów (Couchoud et al., 2009). Współcześnie klimat Europy Środkowej kształtowany jest w znacznym stopniu przez wpływ oceanu Atlantyckiego. Podobieństwo zapisów  $\delta^{18}\text{O}$  wieku eemskiego zlokalizowanych w Europie Środkowej oraz Południowo-Wschodniej wskazuje na to, że zasięg wpływów cyrkulacji atlantyckiej w trakcie trwania ostatniego interglacjału obejmował również ten obszar. W okresie 120-110 ka w zapisie z Jaskini Magurskiej okresy wartości  $\delta^{18}\text{O}$  wskazującej na wzbogacenie w izotop  $^{18}\text{O}$  korelują z okresami wzbogacenia w izotop  $^{13}\text{C}$  widocznymi w zapisie  $\delta^{13}\text{C}$  (fig. 5). Taka korelacja może świadczyć o okresach suchszego klimatu. Jak wynika z danych palinologicznych, przejście z ostatniego interglacjału do warunków glacialnych było procesem dłuższym od przejścia z warunków glacialnych do interglacialnych (Brewer et al., 2008). W badanych zapisach tatrzańskich zmiana zaczyna się od zwiększenia się amplitudy w poziomach koncentracji pierwiastków śladowych z Jaskini Brestowskiej i Dziury Wyżniej w okresie 120-110 ka (fig. 6), co może świadczyć o zmianach w składzie chemicznym gleb. Znaczące zmiany wartości stosunków izotopowych  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  są widoczne po 110 ka. Pogorszenie warunków oraz prawdopodobnie zmiany w kondycji warstwy glebowej zaczynają być widoczne po 120 ka w zapisie P/Ca. Zmiana po 109 ka widoczna w zapisach  $\delta^{13}\text{C}$  wskazuje na ochładzanie i osuszanie się klimatu oraz dalsze pogarszanie się kondycji warunków glebowych, a także – co może być z tym związane – odgazowywaniem jaskiń z  $\text{CO}_2$ . Zatrzymanie się krystalizacji nacieku MAG-1 ok. 98 ka odzwierciedla pogorszenie się warunków na większej wyso-

kości. Zaprzestanie krystalizacji nacieków z Jaskini Brestowskiej i Dziury Wyżniej następuje ok 80 ka.

Podsumowując, obserwowane różnice pomiędzy badanymi zapisami są spowodowane lokalnymi różnicami środowiskowymi. Zapis z położonej najwyżej Jaskini Magurskiej rejestruje najbardziej ekstremalne zmiany klimatu. Otoczenie jaskini było pokryte lasem wysokogórskim w warunkach interglacjalnych, natomiast w warunkach glacialnych – roślinnością typu alpejskiego. Dodatkowo, zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Magurskiej jest najbardziej podobny do pozostałych europejskich zapisów  $\delta^{18}\text{O}$  wieku eemskiego. Badane zapisy wskazują na chłodny epizod w okresie przejścia z MIS 6 do MIS 5e. W porównaniu do innych zapisów  $\delta^{18}\text{O}$  rejestrujących okres ok. 160-90 ka zapis z Jaskini Magurskiej jest najbardziej zbliżony do zapisu z grenlandzkiego lodu lodowcowego GRIP. Wielkoskalowe zmiany widoczne przy przejściu w stadium izotopowe MIS 5e w zapisach z włoskiej jaskini Corchia (Drysdale et al., 2005), chińskiej jaskini Dongge (Kelly et al., 2006) oraz położonej w Izraelu jaskini Soreq (Bar-Matthews et al., 2003) nie są tutaj obserwowane. Świadczy to o dominującym wpływie cyrkulacji atlantyckiej i braku wyraźnych śladów wpływów śródziemnomorskich.

(3) Pawlak J., 2021, The speleothem oxygen record – a proxy for thermal or moisture changes? A case study of multiproxy records from MIS 5/MIS 6 speleothems from the Demänová Cave System. *Climate of the Past*, Vol. 17, pp. 1051-1064.

W ramach badań wykonano analizy geochemiczne nacieku JS9 pozyskanego z systemu Jaskiń Demianowskich (fig. 1). Według skali czasu opartej na datowaniach metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  badany naciek JS9 narastał w okresie 142-82 ka. Czas ten odpowiada przejściu z warunków glacialnych stadium izotopowego MIS 6 do interglacjalnego MIS 5e. Następnie obejmuje kolejne substadia MIS 5d/c/b/a. Podobnie jak dla badanych wcześniej nacieków tatrzańskich, z nacieku JS9 analizowano skład izotopowy tlenu i węgla oraz względne zmiany koncentracji wybranych pierwiastków. Interpretację paleoklimatyczną skoncentrowano na zagadnieniu, który czynnik klimatyczny (temperatura, ilość opadów, proporcja opadów zima – lato, cyrkulacja atmosferyczna) miał dominujący wpływ na zapis  $\delta^{18}\text{O}$ . W odróżnieniu od stanowisk jaskiniowych opisanych w poprzedniej pracy, położonych na północnych zboczach Tatr (2), badane stanowisko znajduje się po południowej stronie masywu tatrzańskiego. Daje to dodatkową możliwość porównania ze sobą zapisów po północnej i południowej stronie Tatr. Ponadto w systemie Jaskiń Demianowskich analizowano pod kontem składu izotopowego nacieki o wieku holocenijskim (Hercman et al., 2020). Stwarza to dodatkową możliwość porównania badanego zapisu izotopowego eemu z zapisami wieku holocenijskiego. System Jaskiń Demianowskich zlokalizowany jest na Słowacji w rejonie Niżnich Tatr. Składa się on z dziesięciu połączonych ze sobą jaskiń z łączną długością korytarzy 41,4 km i z deniwelacją do 196 m (Herich, 2017). Badany naciek JS9 pobrano w jaskini Slobody daleko od otworu wejściowego. Monitoring prowadzony w tej jaskini przez nasz zespół badawczy wskazuje, że współcześnie utrzymuje się tam stała temperatura oraz wilgotność powietrza na poziomie 100%. Zmniejsza to potencjalne zagrożenie występowania kinetycznego frakcjonowania izotopowego podczas krystalizacji nacieku.

Pobrany naciek jest stalagmitem o wysokości 155 mm (fig. 7 A). Makroskopowo stalagmit składa się z laminowanego kalcytu. Analiza mikroskopowa szlifów wskazuje, że naciek jest wykształcony w mikrofacji kolumnowej (*columnar radial*) rozdzielonej przez cieńsze warstwy mikrofacji mikrytowej (fig. 7 B, C). Skalę czasu dla badanego nacieku estymowano, opierając się na dziesięciu datowaniach metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ . Błąd analityczny uzyskanych dat waha się od 0,8 do 2,8%. Zapisy izotopowe  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  zbudowano, bazując na 290 niezależnych punktowych pomiarach składu izotopowego, wykonanych wzdłuż osi wzrostu nacieku. Próbkę pobrano z wykorzystaniem systemu Micro-Mill z rozdzielczością od 1 mm w odcinkach, gdzie tempo krystalizacji nacieku było szybsze, do 0,2 mm w odcinkach, gdzie następowało spowolnienie wzrostu. Rozdzielczość czasowa zapisu izotopowego mieści się w granicach od 0,1 do 0,4 ka. Dodatkowo określono zmienność mikro-facjalną badanego nacieku oraz stosunki: Sr/Ca; Mg/Ca; Ba/Ca; P/Ca; Fe/Ca; Mn/Ca; Si/Ca.

Zapisy  $\delta^{18}\text{O}$  estymowane z pięciu holocenijskich nacieków, pobranych z systemu Jaskiń Demianowskich, są do siebie podobne. Wartość średnia dla  $\delta^{18}\text{O}$  z tych nacieków wynosi 7,2‰ (Hercman et al., 2020). Zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z badanego w tej pracy nacieku JS9 oscyluje wokół tego przedziału wartości. Widocznych jest pięć okresów (143-135; 127-123; 116-113;

108-101; 94-92), w których wartość  $\delta^{18}\text{O}$  badanego nacieku jest znacząco różna od przedziału wartości charakterystycznego dla stalagmitów holocenijskich. Krótki epizod wyższych wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  w okresie 143-137 ka (fig. 8 A, B) może odzwierciedlać suche i chłodne warunki klimatyczne panujące w schyłkowym okresie MIS 6 (Gascoyne, 1992; Genty et al., 2006; Couchoud et al., 2009). Podwyższona względna koncentracja Mg i Ba oraz niższa wartość Sr dodatkowo potwierdzają taką interpretację (fig. 8 C, D, E). Dodatkowo w okresie 143-137 ka względne koncentracje Fe, Mn, Si są również podwyższone, co może być interpretowane jako efekt większego wietrzenia mrozowego oraz brak dobrze rozwiniętej warstwy glebowej.

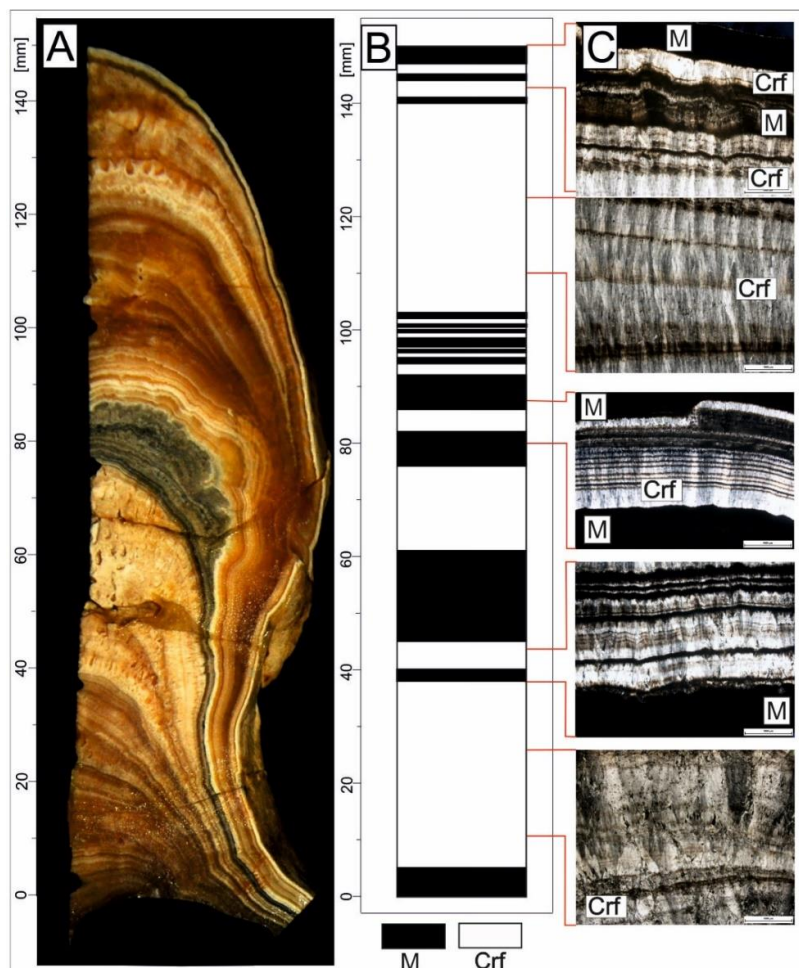


Figura 7. Naciek JS-9: A – fotografia nacieku; B – profil mikrofacjalny; C – przykładowe fotografie mikroskopowe mikrofacji nacieku JS9; M – mikrofacja mikrytowa; Crf – mikrofacja „columnar radiaxal” (Pawlak 2021).

Podobnie występowanie mikrofacji mikrytowej w tym czasie również sugeruje występowanie stosunkowo suchych warunków klimatycznych. W okresie 137-34 ka spadek wartości  $\delta^{13}\text{C}$  w zapisie z nacieku JS9 jest prawie dwukrotnie wyższy (5‰) od spadku wartości  $\delta^{13}\text{C}$  obserwowanego w zapisach z Jaskiń Demianowskich (2,5‰) na początku holocenu (Hercman et al., 2020). Może to świadczyć o bardziej znaczącej zmianie warunków glebowych oraz zmianach zachodzących w atmosferze jaskini w okresie 137-134 ka. Długookresowa tendencja wzrostowa w zapisie  $\delta^{18}\text{O}$  powiązana ze spadkową tendencją dla zapisu  $\delta^{13}\text{C}$  widoczna w okresie 145-130 ka jest związana z poprawą warunków termicznych pod koniec MIS 6 (Pawlak et al., 2021; Moseley et al., 2015; Meyer et al., 2008; Holzkomper et al., 2004).

W badanym zapisie przejście z MIS 6 do MIS 5e (*termination II*) jest podkreślone przez 1,2‰ spadek wartości  $\delta^{18}\text{O}$ . W przypadku zapisów  $\delta^{18}\text{O}$  z nacieków alpejskich oraz nacieków położonych po północnej stronie Tatr zmiana wartości  $\delta^{18}\text{O}$  w czasie *termination II* jest dodatnia. W naciekach alpejskich i tatrzańskich taka zmiana spowodowana jest dwoma przyczynami: poprawą warunków termicznych oraz zmianą w sezonowości opadów z dominacji w sezonie zimowym na dominację w sezonie letnim (Moseley et al., 2015; Meyer et

al., 2008; Holzkamper et al., 2004; fig. 9). W naciekach Tatrzańskich w przypadku zapisu  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Magurskiej dodatnia zmiana poprzedzona jest krótkim epizodem spadku wartości  $\delta^{18}\text{O}$ .

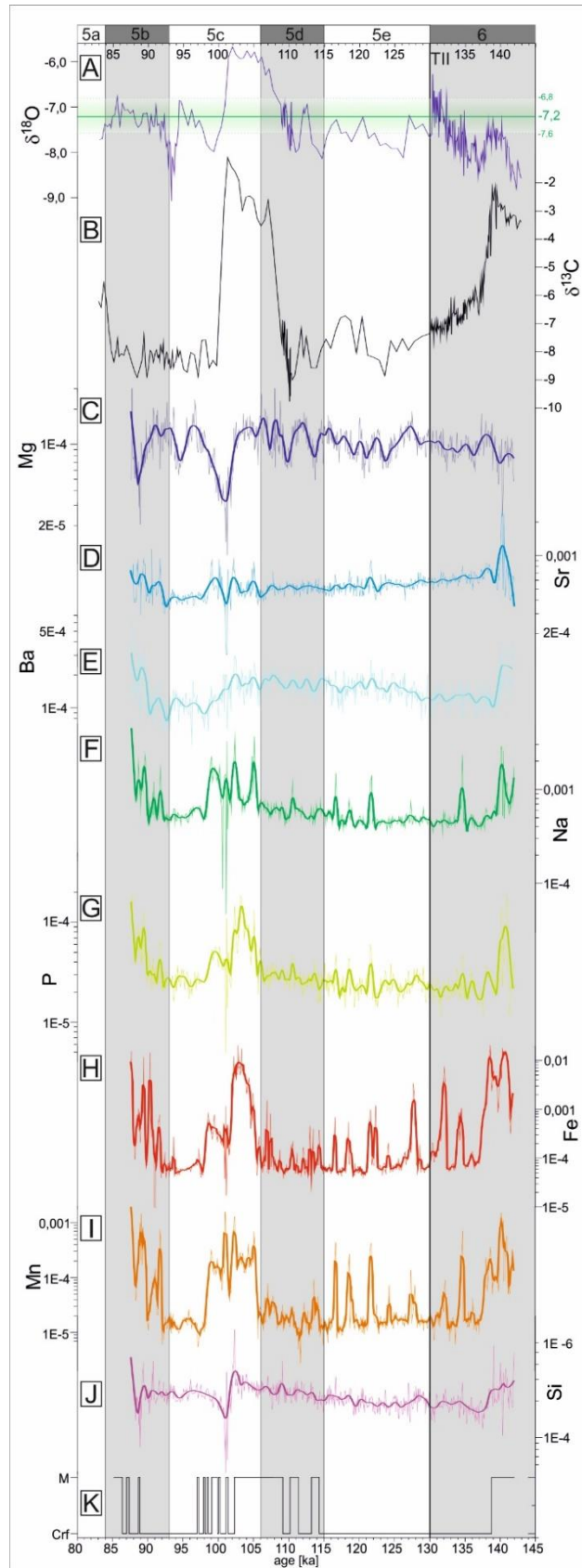


Figura 8. Zapis multiproxy z nacieku JS-9: A – zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z zaznaczonym przedziałem wartości dla holocenu (zielona linia); B – zapis  $\delta^{13}\text{C}$ ; C – zapis Mg/Ca; D – zapis Sr/Ca; E – zapis Na/Ca; F – zapis

Na/Ca; G – zapis P/Ca; H – zapis Fe/Ca; I – zapis Mn/Ca; J – zapis Si/Ca; K – log mikrofacjalny (Pawlak, 2021).

W przypadku nacieku JS9 dynamiczna zmiana (1,2‰) widoczna jest tylko w zapisie  $\delta^{18}\text{O}$  (fig. 8). Zatem czynniki powodujące obserwowaną w stalagmicie JS9 zmianę  $\delta^{18}\text{O}$  musiały wpływać jedynie na skład izotopowy tlenu. Ponadto w trakcie trwania MIS 5e wartość  $\delta^{18}\text{O}$  w tym nacieku pozostaje obniżona. Średnia wartość  $\delta^{18}\text{O}$  dla MIS 5e wynosi 7,6‰ i jest o 0,4‰ niższa od średniej wartości  $\delta^{18}\text{O}$  dla nacieków holocenów z systemu Jaskiń Demianowskich (Hercman et al., 2020). Jest mało prawdopodobne, że inne wartości średniej odzwierciedlają różnice w średniej rocznej temperaturze dla holocenu i ostatniego interglacjału. Obserwowane przesunięcie może być spowodowane przez wilgotniejsze warunki klimatyczne. Dodatkowo w Europie Środkowej początek ostatniego interglacjału zaznaczył się przejściem z klimatu bardziej kontynentalnego do wilgotniejszego klimatu przejściowego. Obserwowane przesunięcie może również odzwierciedlać większe znaczenie Atlantyku jako źródła dla wód meteorycznych. Woda powierzchniowa z Oceanu Atlantyckiego jestubożona w izotop  $^{18}\text{O}$  w stosunku do Morza Śródziemnego i Czarnego. Podobne przesunięcie wartości  $\delta^{18}\text{O}$  w czasie *termination II* jest widoczne w zapisach z regionu Morza Śródziemnego (Antro delCorchia, Soreq, Peqiin; fig. 9). W przypadku zapisów śródziemnomorskich przesunięcie wartości  $\delta^{18}\text{O}$  tłumaczone jest zmianą składu izotopowego wody powierzchniowej Morza Śródziemnego oraz zmianą w proporcji między źródłami dla lokalnych wód meteorycznych (Bar-Matthews et al., 2003; Nehme et al., 2015).

Zapis z ostatniego interglacjału z nacieku JS9 (MIS 5e) jest dwudzielny. Okres 127-123 ka cechuje się niższymi wartościami  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  oraz spadkiem wartości Mg/Ca. W skali globalnej okres 127-123 ka cechuje się wyższym poziomem oceanu światowego oraz wyższymi temperaturami (Goelzer et al., 2016). W skali lokalnej niższe wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , Mg/Ca w zapisie z nacieku JS9 mogą być interpretowane jako wilgotniejszy okres z rozwiniętą wegetacją. Kolejny okres 122-115 ka ma wyższe wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ . Globalnie ten przedział czasu jest związany z obniżaniem się poziomu oceanu światowego oraz pogarszaniem się warunków klimatycznych (Grant et al., 2012, Goelzer et al., 2016). W skali lokalnej podwyższone wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  są związane z osuszeniem klimatu oraz pogorszeniem się warunków dla wegetacji roślin. Epizod podwyższonych wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  w okresie 119-117 ka jest również obserwowany w zapisie izotopowym z jaskini Baradla oraz Jaskini Magurskiej i jest interpretowany jako epizod osuszenia się klimatu (Demény et al., 2017; Pawlak et al., 2021). Zapisy  $\delta^{18}\text{O}$  z Jaskini Magurskiej i Baradla są bardziej podobne do zapisu z nacieku JS9 w okresie 122-115 ka, co świadczy o zatartiu się lokalnych różnic w regionie pod koniec MIS 5e.

W okresie 108-101 ka proxy takie jak  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , Fe, Mn, P, Na (fig. 8 A, B, F, G, H, I) charakteryzują się podwyższonymi wartościami. Wyższe wskaźniki wymienionych zapisów są powiązane z warstwą facji mikrytowej (fig. 8 K). Podwyższone wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  w obrębie stref nacieku wykształconego w facji mikrytowej mogą być interpretowane jako rezultat kolonizacji powierzchni krystalizującego nacieku przez mikroorganizmy (Kaźmierczak et al., 1996; Frisia, 2015), co może być związane z mniejszą ilością opadów i suchszymi warunkami klimatycznymi w okresie 108-101 ka (ref.). Globalnie okres 108-101 ka wiąże się z ponownym wzrostem poziomu oceanu światowego (Grant et al., 2012). Zapis NGRIP w tym okresie również charakteryzuje się podwyższonymi wartościami  $\delta^{18}\text{O}$ , z krótkotrwałym epizodem obniżonych wartości ok. 105 ka. Podobna niestabilność zapisu  $\delta^{18}\text{O}$  jest widoczna w zapisie z Jaskini Magurskiej oraz w zapisach z jaskiń alpejskich (Boch et al., 2011). Ta różnica między badanym zapisem z nacieku JS9 a zapisami z jaskiń alpejskich może świadczyć o stabilnym suchym klimacie w tym okresie w regionie Niżnych Tatr.

Podsumowując, temperatura jest głównym czynnikiem kształtującym zapis izotopowy tlenu z nacieku JS9 w okresie 143-130 ka. Odwrotna niż w przypadku nacieków alpejskich reakcja  $\delta^{18}\text{O}$  w czasie trwania *termination II* najprawdopodobniej jest spowodowana zmianą w cyrkulacji atmosferycznej. W efekcie tej zmiany lżejsze izotopowo wody powierzchniowe Atlantyku stają się dominującym źródłem pary wodnej dla opadów lokalnych. Efekt ten był silniejszy od pozytywnego efektu temperaturowego. W okresie 127-123 ka klimat w otoczeniu Niżnych Tatr był cieplejszy i wilgotniejszy. Badany zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z nacieku JS9 jest bardziej zbliżony do zapisów z jaskini Baradla oraz Jaskini Magurskiej w okresie 122-115 ka, co sugeruje większą jednorodność klimatu w drugiej połowie MIS 5e w tym regionie Europy.

W przeciwieństwie do zapisów alpejskich oraz zapisu z Jaskini Magurskiej zapis  $\delta^{18}\text{O}$  z nacieku JS9 w okresie 108-101 ka wskazuje na stabilniejszy okres suchszego klimatu w tym rejonie.

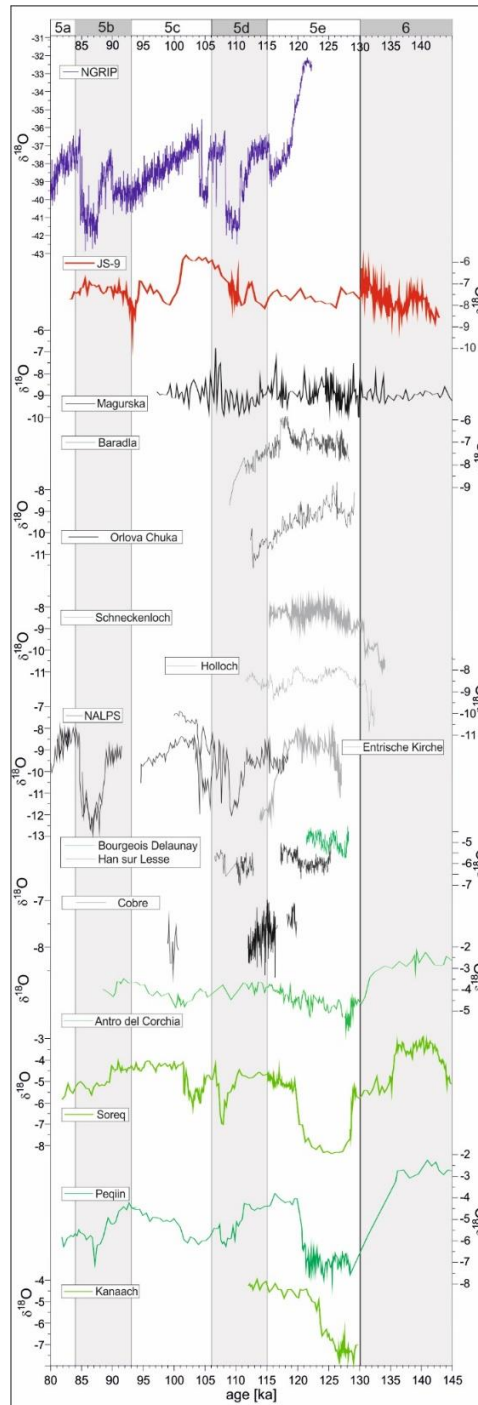


Figura 9. Porównanie zapisu z nacieku JS9 z innymi zapisami o wieku MIS 6/5 (Pawlak, 2021).

Zapisy użyte do porównania (fig. 9): NGRIP (Andersen et al., 2004); Magurska (Pawlak et al., 2021); Baradla (Demény et al., 2017); OrlovaTchuka (Pawlak et al., 2019); Schneckenloch (Mosley et al., 2015); Hölloch (Moseley et al., 2015), NALPS (Boch et al., 2011), Entrische Kirche (Meyer et al., 2008), Bourgeois-Delaunay (Couchoud et al., 2009); Cobre (Rossi et al., 2014); Han-sur-Lesse (Vansteenberghe et al., 2016); Antro del Corchia (Drysdale et al., 2005); Soreq (Bar-Matthews et al., 2003); Peqiin (Bar-Matthews et al., 2003) and Kanaan (Nehme et al., 2015).

W zobrazowanym powyżej porównaniu zapisu z nacieku JS9 z innymi zapisami o wieku MIS 6/5 czarnymi i szarymi liniami zaznaczono zapisy z nacieków, gdzie dominującym czynnikiem wpływającym na wartość  $\delta^{18}\text{O}$  jest temperatura. Liniami w odcieniach zieleni zaznaczono zapisy z nacieków, gdzie istotniejszy jest wpływ takich czynników, jak ilość opadów, zmienność składu izotopowego wody opadowej.

## **Podsumowanie**

Wszystkie zaprezentowane prace dotyczą problematyki interpretacji zapisów izotopowych o wieku między 160 a 80 ka. Ten przedział wiekowy obejmuje ważne zmiany klimatyczne na granicy MIS 6/MIS 5e, okres ostatniego interglacjału oraz przejście do chłodniejszych warunków i początek ostatniego zlodowacenia. Badane zapisy pochodzą z pięciu różnych jaskiń zlokalizowanych w trzech rejonach: Tatrach Zachodnich (S Polska; N Słowacja), Niżnych Tatrach (N Słowacja) oraz w regionie Ruse (N Bułgaria). Badane zapisy są pierwszymi zapisami izotopowymi o wysokiej rozdzielczości z tych regionów. Taki rozkład geograficzny stanowisk jaskiniowych pozwolił na porównanie zapisów z północnej oraz południowej części Karpat. Porównanie zapisów z północnej i południowej części Tatr oraz z północnych Alp pozwoliło na oszacowanie regionalnych różnic w klimacie tego rejonu Europy.

W przypadku Tatr Zachodnich badane nacieki pobrano z jaskiń położonych w różnych warunkach morfologicznych i klimatycznych. Jest to pierwsza tego typu praca porównawcza wykonana w rejonie Europy Środkowej. Wykonana interpretacja pozwoliła na oszacowanie, jak duży wpływ na zapis izotopowy mają czynniki lokalne, takie jak efekt wysokościowy, efekt temperaturowy, efekt ilości opadów oraz różne warunki glebowe.

Analiza interpretacyjna zapisów izotopowych  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  wraz z zapisami pierwiastków śladowych i analizą mikroskopową mikrofacji pozwoliła na szerszą interpretację oraz ocenę, który czynnik klimatyczny (temperatura, ilość opadów, proporcja opadów zima – lato, cyrkulacja atmosferyczna) miał dominujący wpływ na zapis  $\delta^{18}\text{O}$ . Przeprowadzone badania wpisały się w aktualnie wiodący nurt badań nacieków metodami izotopowymi i geochemicznymi zmierzający do lepszego zrozumienia wpływu czynników środowiskowych na otrzymywane zapisy. Jest to warunek konieczny kompleksowej i wiarygodnej rekonstrukcji paleośrodowiska na podstawie badań nacieków.

## **Inne istotne osiągnięcia naukowe**

### **1) Implementacja nieparametrycznych metod do interpretacji danych izotopowych w naukach o Ziemi**

(4) H. Hercman, J. Pawlak, 2012, MOD-AGE: An age-depth model construction algorithm, Quaternary Geochronology, pp. 1-10.

Praca dotyczy testowania i implementacji algorytmu, który wykorzystuje metodę Monte-Carlo oraz regresję LOESS do estymacji modelu wiek~głębokość. Opracowany algorytm był wykorzystywany we wszystkich prowadzonych przeze mnie badaniach dotyczących rekonstrukcji środowiskowych bazujących na badaniach nacieków. Dodatkowo algorytm prezentowany w tej pracy wykorzystano do estymacji krzywych strontowych publikowanych w pracach (Wierzbowski et al., 2017 (13); 2012 (14)).

(8) J. Pawlak, H. Hercman, 2016, Numerical correlation of speleothem stable isotope records using a genetic algorithm, Quaternary Geochronology, 33, pp. 1-12.

W tej pracy przetestowano możliwość zastosowania algorytmów genetycznych jako potencjalnego narzędzia do korelacji danych geologicznych. Materiałem testowym były zapisy izotopowe z nacieków jaskiniowych. Przetestowano możliwości korelacji bez znanej skali czasu oraz optymalnego dopasowania dwóch zapisów w granicach niepewności ich skal czasu. Opracowany pakiet oprogramowania GenCorr jest wykorzystywany do korelacji krzywych czasowych (głównie danych paleośrodowiskowych) w prowadzonych badaniach paleoklimatycznych.

(9) H. Hercman, J. Pawlak, 2016. StronTer: Tools for Probabilistic Methods in Strontium Isotope Stratigraphy, „The Journal of Geology”, 124:2, pp. 267-275.

Podjęto próbę zastosowania teorii Bayesa w stratygrafii strontowej. W tej pracy przedstawiono algorytm, który umożliwia oszacowanie wieku próbki, opierając się na stosunkach izotopów strontu  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  oraz wzorcowej krzywej strontowej. Przetestowany w pracy algorytm wykorzystuje dane o niepewności wartości  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  oraz niepewności krzywej strontowej. Algorytm zwraca jako wynik możliwy wiek próbki w formie rozkładu prawdopodobieństwa. Opierając się na prawdopodobieństwie warunkowym, możliwa jest również estymacja sekwencji kilku dat z jednego profilu oraz fazy kilku dat z jednej warstwy.

## 2) Aplikacja korelacji numerycznej do stratygrafii tlenowej (OIS)

W tym cyklu prac mój wkład polegał na dalszym rozwoju oraz testowaniu algorytmu GenCor (Pawlak & Hercman, 2016). Wprowadzenie możliwości uwzględniania przy korelacji reperów wiekowych oraz innych informacji wiekowych (np. ograniczenie wieku) umożliwiło aplikację algorytmów genetycznych nie tylko do szacowania wieku profili, ale także do weryfikacji i uściślenia skali czasu lub określania czasu trwania przerw w depozycji.

(12) Błaszczak M., Hercman H., Pawlak J., Gąsiorowski M., Matoušková Š., Aninowska M., Kicińska D., Tyc A., 2018, Low to middle Pleistocene paleoclimatic record from the Kraków-Częstochowa Upland (Poland) based on isotopic and calcite fabrics analyses. *Geochronometria*, vol. 45, pp. 185-197.

Dla potrzeb tej pracy algorytm GenCor zmodyfikowano i zaimplementowano możliwość korelacji zapisów, które posiadają punktowe informacje o wieku (repery wiekowe) do krzywej wzorcowej z dobrze zdefiniowaną skalą czasu. Dzięki tej modyfikacji algorytm GenCor wykorzystano w tym przypadku do zbudowania skali czasu na bazie stratygrafii tlenowej (OIS), co stanowiło mój bezpośredni wkład w tę pracę.

(14) Pawlak J., Hercman H., Sierpień P., Pruner P., Gąsiorowski M., Mihevc A., Zupan Hajna N., Bosák P., Błaszczak M., Wach B., 2020, Estimation of the durations of breaks in deposition – Speleothem case study. *Geochronometria*, vol. 47, pp. 154-170.

Praca metodyczna, w której algorytmy GenCor i Mod-Age wykorzystano do szacowania wieku przerw w krystalizacji nacieków z systemu Jaskiń Demianowskich położonego na Słowacji oraz profilu polewy jaskiniowej z Jaskini Śnieżnej w Słowenii. W pracy tej pokazano również zastosowanie stratygrafii tlenowej do estymacji ciągłej skali czasu, bazując na punktowych reperach paleomagnetycznych jako dodatkowej informacji chronologicznej. Zastosowana w niej metoda stratygrafii tlenowej była w stanie wykonać „detekcję” potencjalnych *hiatusów*, niezależnie od informacji zawartych w profilu, oraz oszacować czas ich trwania.

(16) Sierpień P., Pawlak J., Hercman H., Pruner P., Zupan Hajna N., Mihevc A., Bosák P., 2021, Flowstones from the Račiška Pečina Cave (SW Slovenia) Record 3.2-Ma-Long History. *Geochronometria*, vol. 48, pp. 31-45.

W tej pracy algorytm GenCor wykorzystano do estymacji skali czasu dla profilu z położonej na Słowenii jaskini Raciska Pecina. Zastosowano w tym celu zapis  $\delta^{18}\text{O}$  oraz profil paleomagnetyczny. Otrzymana skala czasu wskazała, że profil badanych osadów sięga 3,2 Ma lat wstecz. Podobnie jak w przypadku profilu z Jaskini Śnieżnej, zastosowana metoda pozwala na niezależną „detekcję” *hiatusów* oraz oszacowanie czasu ich trwania.

Prace te pokazują możliwości, jakie stwarza zastosowanie OIS jako alternatywnej metody chronologii w przypadku zapisów z pól jaskiniowych starszych niż zasięg metody  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  lub takich, gdzie nie jest możliwe zastosowanie metod chronologii radioizotopowej  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  bądź U – Pb ze względu na duże zanieczyszczenie materiału czy niską koncentrację uranu.

## Literatura cytowana

Ambach W., Dansgaard W., Eisner H., Møller J., 1968, The altitude effect on the isotopic composition of precipitation and glacier ice in the Alps, *Tellus* 20:4, 595-600.

Andersen K., Azuma N., Barnola J.M., Bigler M., Biscaye P., Caillon N., Chappellaz J., Clausen H.B., Dahl-Jensen D., Fisher H., Flückiger J., Fritzsche D., Fujii Y., Goto-

- Azuma K., Grønvold K., Gundestrup N.S., Hansson M., Huber C., Hvidberg C.S., Johnsen S.J., Jonsell U. Y., Jouzel J., Kipfstuhl S., Landais A., Leuenberger M., Lorrain R., Masson-Delmotte V., Miller H., Motoyama H., Narita H., Popp T., Rasmussen S.O., Raynaud D., Röthlisberger R., Ruth U., Samyn D., Schwander J., Shoji H., Siggaard-Andersen M.J., Steffensen J.P., Stocker T., Sveinbjörnsdóttir A.E., Svensson A.M., Takata M., Tison J.L., Thorsteinsson Th., Watanabe O., Wilhelms F., White J.W.C., 2004, High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature*, 431, 147-151.
- Bar-Matthews M., Ayalon A., Gilmour M., Matthews A., Hawkesworth C.J., 2003, Sea-land oxygen isotopic relationships from planktonic foraminifera and speleothems in the Eastern Mediterranean region and their implication for paleorainfall during interglacial intervals, *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 67, 3181-3199.
- Binka K., Nitychoruk J., 2011, Cyclicity in the Eemian climate? A case study of the Eemian site at Czaple, Eastern Poland. *Review of Palaeobotany and Palynology* 164, 39-44.
- Boch R., Cheng H., Spötl C., Edwards R.L., Wang X., Häuselmann Ph., 2011, NALPS: a precisely dated European climate record 120-60 ka, *Clim. Past*, 7, 1247-1259.
- Brewer S., Joel G., Sanchez G.M., Klotz S., 2008, The climate in Europe during the Eemian: a multi-method approach using pollen data. *Quaternary Science Reviews* 27, 2303-2315.
- Comas-Bru L., Rehfeld K., Roesch C., Amirnezhad-Mozhdehi S., Harrison S.P., Atsawawanunt K., Ahmad S.M., Brahim Y.A., Baker A., Bosomworth M., Breitenbach S.F.M., Burstyn Y., Columbu A., Deininger M., Demény A., Dixon B., Fohlmeister J., Hatvani I.G., Hu J., Kaushal N., Kern Z., Labuhn I., Lechleitner F.A., Lorrey A., Martrat B., Novello V.F., Oster J., Pérez-Mejías C., Scholz D., Scroxton N., Sinha N., Ward B.M., Warken S., Zhang H. and SISAL Working Group members, 2020, SISALv2: a comprehensive speleothem isotope database with multiple age-depth models, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 2579-2606, <https://doi.org/10.5194/essd-12-2579-2020>.
- Couchoud I., Genty D., Hoffmann D., Drysdale R., Blamart D., 2009, Millennial-scale climate variability during the Last Interglacial recorded in a speleothem from southwestern France, *Quaternary Sci. Rev.*, 28, 3263-3274.
- Chappellaz J., Brook E., Blunier T., Malaize B., 1997, CH<sub>4</sub> and δ<sup>18</sup>O of O<sub>2</sub> records from Antarctic and Greenland ice: A clue for strati-graphic disturbance in the bottom part of the Greenland Ice Core Project and the Greenland Ice Sheet Project 2 ice cores. *Journal of Geophysical Research* 102.
- Dansgaard W., 1964, Stable isotopes in precipitation, *Tellus*, 16, 436-468.
- Davis B.A.S., Brewer S., 2008, Orbital forcing and role of the latitudinal insolation/temperature gradient. *Climate Dynamics* 32, 143-165.
- Demény A., Kern Z., Czuppon G., Németh A., Leél-Ossy S., Siklósy Z., Lin K., Hu H.M., Shen C.C., Vennemann T.W., Haszpra L., 2017, Stable isotope compositions of speleothems from the last interglacial – Spatial patterns of climate fluctuations in Europe, *Quaternary Sci. Rev.*, 161, 68-80.
- Drysdale R.N., Zanchetta G., Hellstrom J.C., Fallick A.E., Zhao J., 2005, Stalagmite evidence for the onset of the Last Interglacial in southern Europe at 129\_1 ka, *Geophys. Res. Lett.*, 32.
- Dutton A., Lambeck K., 2012, Ice volume and sea level during the last interglacial. *Science* 337: 216-219.
- Fairchild I., Treble P., 2009, Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews* 28, 449-468.
- Frisia S., 2015, Microstratigraphic logging of calcite fabrics in speleothems as tool for palaeoclimate studies, *Int. J. Speleol.*, 44, 1-16.

- Gascoyne M., 1992, Paleoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Review* 11, 609-632.
- Genty D., Blamart D., Ghaleb B., Plagnes V., Causse C., Bakalowicz M., Zouari K., Chkir N., Hellstrom J., Wainer K., Bourges F., 2006, Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African  $\delta^{13}\text{C}$  stalagmite profiles-comparison with Chinese and South Hemisphere stalagmites. *Quaternary Science Reviews* 25, 2118-2142.
- Goelzer H., Huybrechts P., Loutre M.F., Fichet T., 2016, Last Interglacial climate and sea-level evolution from a coupled ice sheet-climate model, *Clim. Past*, 12, 2195-2213.
- Gradziński M., Hercman H., Kicińska D., Barczyk G., Bella P., Holoubek P., 2009, Karst in the Tatra Mountains developments of knowledge in the last thirty years. *Przeegląd Geologiczny* 57, 674-684.
- Grant K.M., Rohling E.J., Bar-Matthews M., Ayalon A., Medina-Elizalde M., Ramsey C.B., Satow C., Roberts A.P., 2012, Rapid coupling between ice volume and polar temperature over the past 150 000 years, *Nature*, 491, 744-747.
- Hercman H., 1989, On the geology of the Magurska Cave (the High Tatra Mts., Southern Poland). *Kras i Speleologia* 6, 79-83.
- Hercman H., Gradziński M., Bella P., 2008, Evolution of Brestovska Cave based on U-series dating of speleothems. *Geochronometria* 32, 1-12.
- Hercman H., Pawlak J., 2012, MOD-AGE: An age-depth model construction algorithm, *Quat. Geochronol.*, 12, 1-10.
- Hercman H., Gašiorowski M., Pawlak J., Błaszczuk M., Gradziński M., Matoušková Š., Zawidzki P., Bella P., 2020, Atmospheric circulation and the differentiation of precipitation sources during the Holocene inferred from five stalagmite records from Demänová Cave System (Central Europe), *Holocene*, 30, 834-846.
- Herich P., 2017, Demänová caves. The most extensive under-ground karst phenomenon in Slovakia. *Bulletin of the Slovak Speleological Society* 2017, 27-38.
- Holzhammer S., Mangini A., Spötl C., Mudelsee M., 2004, Timing and progression of the Last Interglacial derived from a high alpine stalagmite, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07201.
- Kaźmierczak J., Coleman M.L., Gruszczynski M., Kempe S., 1996, Cyanobacterial key to the genesis of micritic and peloidal limestones in ancient seas, *Acta Palaeontol. Pol.*, 41, 319-338.
- Kern Z., Demény A., Persoiu A., Hatvani I.G., 2019, Speleothem Records from the Eastern Part of Europe and Turkey – Discussion on Stable Oxygen and Carbon Isotopes, *Quaternary*, 2, 3-31.
- Kotarba A., 1997, Formation of High-Mountain Talus Slopes Related to Debris-Flow Activity in the High Tatra Mountains. *Permafrost and Periglacial Processes* 8, 191-204.
- Lauritzen S., 1995, High-Resolution Paleotemperature Proxy Record for the Last Interglaciation Based on Norwegian Speleothems. *Quaternary Research* 43, 133-146.
- McDermott F., Atkinson T.C., Fairchild I.J., Baldini L.M., Matthey D.P., 2011, A first evaluation of the spatial gradients in  $\delta^{18}\text{O}$  recorded by European Holocene speleothems, *Global Planet. Change*, 79, 275-287.
- Meyer M.C., Spötl C., Mangini A., 2008, The demise of the Last Interglacial recorded in isotopically dated speleothems from the Alps, *Quaternary Sci. Rev.*, 27, 476-496.
- Moseley G.E., Spötl C., Cheng H., Boch R., Min A., Edwards L.R., 2015, Termination-II interstadial/stadial climate change recorded in two stalagmites from the north European Alps, *Quaternary Sci. Rev.*, 127, 229-239.

- Nehme C., Verheyden S., Noble S.R., Farrant A.R., Sahy D., Hellstrom J., Delannoy J.J., Claeys P., 2015, Reconstruction of MIS 5 climate in the central Levant using a stalagmite from Kanaan Cave, Lebanon, *Clim. Past*, 11, 1785-1799.
- Pawlak J., Błaszczak M., Hercman H., Matoušková Š., 2021, Palaeoenvironmental conditions during MIS 6/MIS 5 transition recorded in speleothems from the Tatra Mountains, *Boreas*, 50, 224-241.
- Pawlak J., Błaszczak M., Hercman H., Matoušková Š., 2019, A continuous stable isotope record of last interglacial age from the Bulgarian Cave Orlova Chuka, *Geochronometria*, 46, 87-101.
- Rossi C., Mertz-Kraus R., Osete M.L., 2014, Paleoclimate variability during the Blake geomagnetic excursion (MIS 5d) deduced from a speleothem record, *Quaternary Sci. Rev.*, 102, 166-180.
- Różański K., Duliński M., 1988, A reconnaissance study of water in the karst of the Western Tatras Mountains. *Catena* 15, 289-301.
- Tremaine D.M., Froelich P.N., 2013, Speleothem trace element signatures: A hydrologic geochemical study of modern cave drip waters and farmed calcite, *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 121, 522-545.
- Vansteenberghe S., Verheyden S., Cheng H., Edwards R.L., Keppens E., Claeys P., 2016, Paleoclimate in continental northwestern Europe during the Eemian and early Weichselian (125-97 ka) insights from a Belgian speleothem, *Clim. Past*, 12, 1445-1458.

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

**10.2013 – 05.2014 oraz 07.2014 – 09.2014 SUBATECH, Nantes, Francja – staż badawczy w ramach projektu ATLAB**

Staż dotyczył problematyki modelowania molekularnego. W trakcie stażu poznałem podstawy technik modelowania molekularnego oraz w znacznym stopniu rozwijałem swoje umiejętności programowania, co również przyczyniło się do powstania szeregu prac naukowych, których tematem było zastosowanie metod nieparametrycznych w naukach o Ziemi. Tematem badawczym realizowanym w trakcie tego stażu była – istotna z punktu widzenia metodyki datowania  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  – problematyka adsorpcji uranu i toru w minerałach ilastych. Minerały te są pospolitą domieszką datowanych metodą  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  osadów jaskiniowych, takich jak nacieki, trawertyny i martwice węglanowe. Stale rozwijam tę problematykę w ramach mojej pracy w Laboratorium Uranowo-Torowym, w efekcie czego między innymi w czerwcu 2021 roku złożyłem do konkursu NCN OPUS projekt badawczy pt. *Experimentalna weryfikacja metod korekcji dat uranowo-torowych stosowanych dla wtórnych węglanów zanieczyszczonych detrytusem*.

**Prowadzenie z dr Šarką Matouškovą pomiarów koncentracji pierwiastków śladowych oraz stosunków aktywności izotopów uranu i toru w Instytucie Geologicznym Czeskiej Akademii Nauk (Geologický ústav AV ČR, v. v. i.), w ramach współpracy bilateralnej**

Uzyskane dane pomiarowe umożliwiły powstanie wszystkich prac stanowiących moje główne osiągnięcie naukowe.

**Współpromotorstwo dwóch prac magisterskich na Uniwersytecie Poznańskim – promotor pomocniczy doktoratu na Uniwersytecie Jagiellońskim**

We wszystkich wymienionych przypadkach moją rolą jako współpromotora i promotora pomocniczego było wspomaganie magistrantek i doktorantki w podstawowych technikach analizy danych – niezbędnych w rekonstrukcji warunków paleośrodowiskowych. Szczegółowe dane dotyczące tych prac zamieszczono w punkcie 6.

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

Otwarte webinarium na zaproszenie Sekcji Speleologicznej Polskiego Towarzystwa Przyrodników Imienia Kopernika pt. „Klimat zapisany w naciekach jaskiniowych”. Dostępne online: [https://www.youtube.com/watch?v=a\\_QygRUa00E](https://www.youtube.com/watch?v=a_QygRUa00E).

Współpromotorstwo prac magisterskich wraz z dr Dittą Kicińską. Prace były realizowane na Uniwersytecie Poznańskim:

Joanna Drzewiecka: *Rekonstrukcja warunków paleośrodowiskowych Środkowego plejstocenu na podstawie badań izotopowych wybranych nacieków z Jaskini na Ścianie, Sudety*. Data złożenia pracy: 29.06.2018.

Joanna Samulska: *Budowa skały czasu dla zapisów paleośrodowiskowych na podstawie datowań metodą uranowo-torową nacieków jaskiniowych*. Data złożenia pracy 29.09.2015.

Promotor pomocniczy doktoratu dr Doroty Podgórskiej: *Rekonstrukcja warunków paleośrodowiskowych Vistulianu na podstawie analizy nacieków jaskiniowych z Demänovskiego Systemu Jaskiniowego*. Data obrony pracy: 17.09.2019. Praca realizowana na Uniwersytecie Jagiellońskim. Promotor główny: prof. dr hab. Michał Gradziński.

## **7. Inne istotne informacje**

2020 – Medal Marii Markowicz-Łohinowicz stopnia drugiego za publikację:

(12) Błaszczak M., Hercman H., Pawlak J., Gąsiorowski M., Matoušková Š., Aninowska M., Kicińska D., Tyc A., 2018, Low to middle Pleistocene paleoclimatic record from the Kraków-Częstochowa Upland (Poland) based on isotopic and calcite fabrics analyses, *Geochronometria*, 45(1), 185-197.

2014 – Medal Marii Markowicz-Łohinowicz stopnia pierwszego za publikację:

(4) Hercman H., Pawlak J., 2012, MOD-AGE: An age-depth model construction algorithm. *Quaternary Geochronology*, Vol. 12: 1-10.