

UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI
FACULTATEA DE BIOLOGIE ȘI GEOLOGIE

Variabilitatea climatică din Pleistocenul superior
înregistrată în stalagmite din România

Teză de doctorat

Rezumat

Conducător științific:

Prof. Univ. Dr. Bogdan P. Onac

Doctorand:

Virgil Drăgușin

Cluj-Napoca

2013

Cuprins

Mulțumiri

1. Introducere

1.1. Importanța și scopul studiului

1.2. Scurt istoric al folosirii speleotemelor în paleoclimatologie

1.3. Efectul factorilor de mediu asupra izotopilor stabili de oxigen și carbon

2. Metode și materiale

2.1. Metoda de datare U-Th

2.2. Analiza izotopilor stabili

2.3. Caracteristicile mediului în zonele studiate

2.3.1. Privire generală asupra climatului României

2.3.2. Peștera Ascunsă

2.3.3. Peștera Tăușoare

2.3.4. Peștera M3-R2

2.3.5. Peștera din Cariera Godeanu

2.4. Caracteristicile speleotemelor

2.4.1. POM2 (Peștera Ascunsă)

2.4.2. POM1 (Peștera Ascunsă)

2.4.3. 1152 (Peștera Tăușoare)

2.4.4. M3-R2/1 (Peștera M3-R2)

2.4.5. CG1 (Peștera din Cariera Godeanu)

3. Studiu de caz: Schimbări climatice din ultimii 8200 de ani reconstituite pe baza unei stalagmite din sudul României

4. Studiu de caz: Variabilitatea climatică în timpul stadiului izotopic marin 3 în nordul și sudul României

5. Studiu de caz: Variabilitate climatică la altitudini medii și mari în România în timpul MIS 5e

6. Concluzii

Bibliografie

1. Introducere

Deși răspândită în Europa și în lume, folosirea speleotemelor în paleoclimatologie este încă la începuturi în România. În ultimele două decenii doar câteva publicații și teze de doctorat au studiat informația climatică arhivată în speleoteme din România (Lauritzen & Onac, 1995; Onac, 1996; Onac & Lauritzen, 1996; Lauritzen & Onac 1999; Tămaș & Causse, 2001; Onac et al., 2002; Constantin, 2003; Tămaș, 2003; Tămaș et al., 2005; Constantin et al., 2007).

Acest studiu urmărește să dezvolte cunoașterea paleoclimatică în România prin cercetarea speleotemelor care s-au format în timpul Pleistocenului Superior și al Holocenului în trei zone: Munții Rodnei, Făgăraș și Mehedinți.

În studiul variabilității climei din Holocen, combinăm reconstrucții regionale de temperatură bazate pe polen (Davis et al., 2003) cu noi date de izotopi din Peștera Ascunsă (Munții Mehedinți, sud-vestul României) și cu date publicate din zona Mării Mediterane (sensu lato). Astfel, încercăm să cuantificăm magnitudinea relativă a schimbărilor hidrologice reflectate în rapoartele izotopice ale speleotemelor. Ne concentrăm asupra condițiilor climatice care delimitează o tranziție Holocenă observată la nivel global între 6 și 4 ka (Mayewski et al., 2004; Roberts et al., 2008, 2011).

Pentru studiul schimbărilor climatice în România în timpul stadiilor izotopice marine 4-2 (MIS 4-2), am folosit două stalagmite din peșterile Ascunsă și Izvorul Tăușoarelor (Munții Rodnei) pentru a face o comparație între aceste două regiuni cu climat diferit. Principala țintă a acestui studiu este MIS 3 (60-30 ka), o perioadă caracterizată de schimbări climatice bruște, ce a fost prima oară descrisă din calota glaciară groenlandeză. Referitor la studii pe speleoteme, nicio arhivă climatică europeană nu acoperă MIS 3 în întregime. Spötl și Mangini (2002) au publicat un profil izotopic de mare rezoluție pe stalagmite din Peștera Kleegruben (Alpi) care s-a format între 57 și 46 ka. Genty et al. (2003, 2010) și Wainer et al. (2009) au publicat profile izotopice din Peștera Villars (Franța), dar acestea fie prezintă hiatusuri fie nu au o rezoluție bună pe perioada MIS 3. Fleitmann et al. (2009) au publicat un profil izotopic din Peștera Sofular (Turcia) care acoperă parțial MIS 3, de la 50 ka până în prezent.

Importanța studierii schimbărilor climatice din MIS 3 este dată de necesitatea înțelegerii modificărilor din sistemul terestru care apar în timpul schimbărilor rapide de temperatură cu amplitudine mare.

Variabilitatea climatică din MIS 5e, o perioadă foarte importantă a Pleistocenului Superior, a fost foarte puțin studiată în România. Datele izotopice publicate provin numai de la speleoteme și duc lipsa unor modele de creștere bine puse la punct, dar și a rezoluției. În acest studiu prezentăm două profile izotopice din Munții Mehedinți și Făgăraș. În timp ce stalagmita CG1 (M-ții Mehedinți) s-a format în perioada 132-113 ka, stalagmita M3-R2/1 (M-ții Făgăraș) s-a format în perioada cea mai caldă a ultimului interglaciar, în regiunea alpină. Studiul schimbărilor climatice în mediile montane înalte este foarte importantă datorită condițiilor de mediu foarte sensibile ale acestora în comparație cu zonele înconjurătoare, ceea ce le conferă un caracter de insula climatică (Hedberg, 1964). Acest caracter face ca arhivele climatice din zonele montane înalte să fie mai sensibile la schimbări la scară mare și să nu fie mult influențate de factori regionali.

2. Metode și materiale

Din câteva tehnici de datare aflate în uz, numai câteva pot fi aplicate la speleoteme. Acestea sunt tehnici radiometrice (ex: U-Th, ^{14}C) care se bazează fie pe dezintegrarea anumitor nuclizi radioactivi, fie pe efectul cumulat al activității acestora (luminiscentă, rezonanță electronică de spin). Deoarece toate vârstele din această lucrare sunt obținute pe baza datărilor U-Th, numai această metodă este detaliată aici.

Lanțurile de dezagregare naturale sunt trei și încep cu ^{238}U , ^{235}U și ^{232}Th , fiecare terminându-se cu un izotop stabil de plumb. Între aceste două capete ale lanțului se găsesc o serie de nuclizi care sunt la rândul lor radioactivi și care dau importanța geocronologică a metodelor bazate pe dezechilibrele din seria uraniului (Ivanovich și Harmon, 1992).

Fracționarea diferiților nuclizi din aceste lanțuri este legată de fenomene naturale ce scot aceste lanțuri de dezagregare din echilibru, reechilibrarea lor fiind o funcție de timp. Fracționarea este definită ca partajarea izotopilor între două substanțe sau două faze ale aceleiași substanțe cu rapoarte izotopice diferite (Hoefs, 2009). O altă caracteristică importantă pentru cronologia Cuaternarului este că izotopul părinte de la începutul lanțului are o durată de înjumătățire și o abundență mai mare decât oricare din nuclizii din restul lanțului. Duratele lor de înjumătățire sunt egale sau mai mari decât vârsta Pământului ($^{238}\text{U} - 4.47 \times 10^9$ ani și $^{232}\text{Th} - 1.41 \times 10^{10}$ ani). În cazul ^{235}U , durata de înjumătățire este de 7.04×10^8 ani.

În cadrul acestei teze, am studiat stalagmite din peșteri din România, ale căror caracteristici mai importante sunt enumerate în continuare.

Peștera Ascunsă este localizată pe versantul estic la Munților Mehedinți (45° N, 22° 36' E, 1050 m alt.) în sud-vestul României. Are 400 m lungime și peste 200 adâncime. Este o peșteră de contact formată prin eroziune fluvială în wildflisch Turonian-Senonian, sub strate de calcar Jurassic Superior-Aptian (Codarcea et al., 1964).

Peștera de la Izvorul Tăușoarelor este situată în Munții Rodnei (47° 26' 46" N, 24° 31' 36" E) la o altitudine de 950 m. Are peste 18 km lungime și 450 m denivelare (-356, +105; Papiu, 2007). Peștera este formată în calcar Eocen superior, cu frecvente incluziuni bituminoase și de pirită (Viehmann and Șerban, 1963; Onac, 1987).

Peștera M3-R2 este situată la 2435 m a.s.l. în Munții Făgăraș (45° 34' 26" N, 24° 38' 57" E) la o adâncime relativ mică (mai puțin de 10-15 m sub suprafață). Lungimea galeriilor cumulează 86 m, iar adâncimea 20 m (Giurgiu, 2006). Peștera este dezvoltată într-o bandă de calcar cristalin intercalat între micașturi cu amfiboli și granați (Codarcea and Stancu, 1968).

Peștera din Cariera Godeanu (Peștera CG) este localizată la 45° 01' 27" N și 22° 39' 50" E, la 620 m asl, la câțiva metri sub suprafață. Este formată în calcar Jurassic Superior-Aptian (Codarcea et al., 1964). A fost deschisă în urma exploatării în carieră a calcarului și este de fapt o geoda carstică de mici dimensiuni (0.5 x 0.5 x 2 m) inaccesibilă omului.

Din peșterile enumerate mai sus, am analizat cinci stalagmite, care au fost datate cu metoda U-Th și din care s-au prelevat probe pentru analiza izotopilor stabili, în vederea reconstituirii variabilității climatice.

Stalagmita POM2 (Peștera Ascunsă) are 77.4 cm lungime și este formată din calcit alb compact. În total, cincisprezece probe de U-Th au fost prelevate pe toată lungimea stalagmitei și 151 de probe pentru izotopi stabili.

Stalagmita POM1 (Peștera Ascunsă) a fost prelevată de la aproximativ 80 m de la intrare și 40 m sub suprafață. Are 30 cm lungime și este compusă din alternanțe de calcit compact și închis la culoare și calcit mai puțin dens și mai deschis. Stalagmita prezintă ușoare schimbări în direcția de creștere, iar probele pentru datare au fost prelevate astfel încât să delimiteze aceste schimbări.

Stalagmita 1152 (Peștera Tăușoare) are 27 cm lungime și este formată din calcit dens de culoare maro închis. Axa de creștere este stabilă pentru primii 23 cm, după care se înclină câteva grade pentru ultimii 4 cm. Deoarece se observă numai câteva posibile discontinuități, prelevarea probelor pentru datare s-a făcut la 2 cm, numai schimbările vizibile fiind prelevate astfel încât să se identifice posibile hiatusuri.

Stalagmita M3-R2/1 (Peștera M3-R2) a fost colectată de la aproximativ 15 m față de intrare. Are 5 cm lungime și este formată din calcit dens de culoare albă, prezentând o crustă exterioară de meteorizare. Șapte probe pentru datare au fost prelevate la distanțe egale de-a lungul axei de creștere.

Stalagmita CG1 (Peștera din Cariera Godeanu) are 20 cm lungime și este compusă din calcit dens bine laminat, de diferite culori deschise. A fost prelevată din argila roșie rămasă în urma distrugerii parțiale a peșterii CG. Două probe pentru datare au fost prelevate de la bază și vârf.

3. Studiu de caz: Schimbări climatice în ultimii 8200 de ani reconstituite pe baza studiului unei stalagmite din sudul României

Modelul de creștere al stalagmitei POM2 este bazat pe șapte vârste U-Th, cu erori variind între 1 și 6% (2σ). Stalagmita fiind activă la momentul prelevării, se consideră că vârsta topului este de 0 ani și a fost folosită ca atare în calcularea modelului de creștere.

Cele două profile izotopice arată trei caracteristici: o aparentă lipsă a unui trend în Holocenul inferior (8.2-6 ka), un trend către valori mai ridicate de-a lungul Holocenului mediu (6-4 ka) și un ușor trend descendent în timpul Holocenului superior (4-0 ka) întrerupt de o perioadă scurtă cu valori scăzute, la 3.2-3.0 ka.

Pentru a plasa în context regional datele noastre, am comparat profilele $\delta^{18}\text{O}$ ale stalagmitelor POM2, PP10 (Constantin et al., 2007), PU-2 (Onac et al., 2002) și V11-22 (Tămaș et al., 2005) cu cele calculate de McDermott et al. (2011) pentru peșteri din Europa de la altitudini medii și la 22° longitudine estică.

Pentru Holocenul mediu, am dorit să vedem dacă trendul observat în datele noastre este produs numai de variațiile de temperatură sau au fost și alți factori implicați. Pentru a delimita efectul temperaturii asupra izotopilor de oxigen din stalagmite, trebuie mai întâi evaluată schimbarea produsă de temperatură în $\delta^{18}\text{O}$ al apei meteorice ($\Delta^{18}\text{O}_{mw}$). Astfel am calculat magnitudinea schimbării de temperatură anuale (TANN), de vară (MTWA) și de iarnă (MTCO) în timpul Holocenului mediu folosind reconstrucții regionale de temperatură pe baza polenului (Davis et al., 2003).

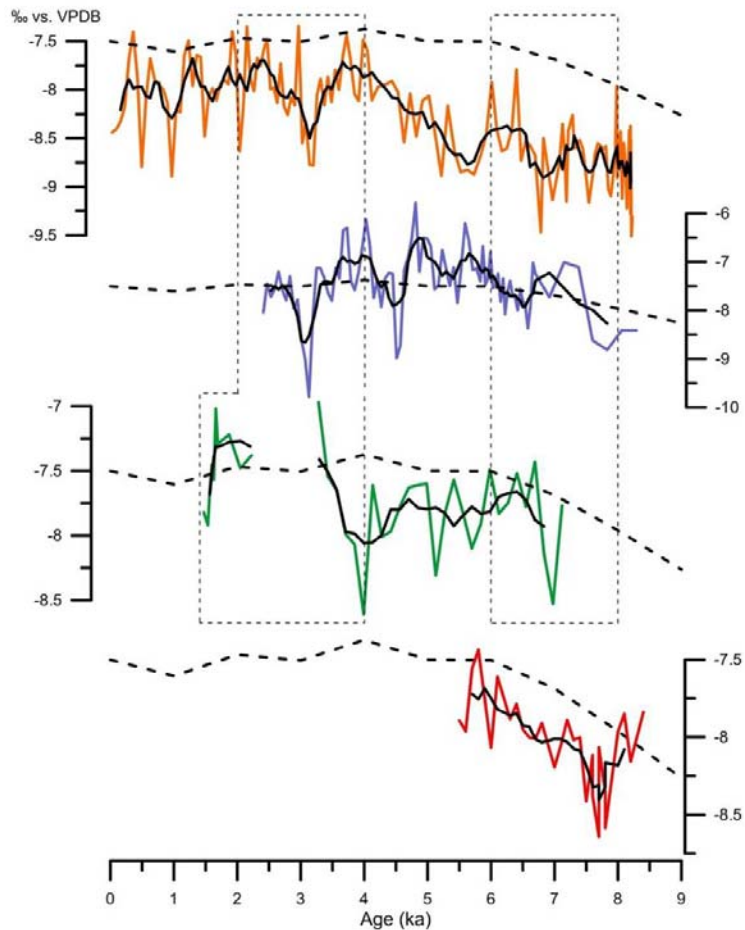


Fig. 1 – Comparație între $\delta^{18}\text{O}$ din stalagmitele POM2 (portocaliu), PP10 (albastru), PU-2 (verde) și V11-22 (roșu). Linile negre indică mediile glisante ale respectivelor șiruri de date, iar liniile întrerupte reprezintă valorile izotopice calculate de McDermott et al. (2011) pentru 22° E . Căsuțele cu linie punctată reprezintă ferestrele în cadrul cărora s-au calculat mediile 8-6 ka și 4-2 ka.

Am folosit două ferestre temporale care să delimiteze intervalul studiat, adică 8-6 și 4-2 ka, în cadrul cărora am calculat valorile medii ale acestor parametri. Prin înmulțirea valorilor rezultate cu factorul de dependență al $\delta^{18}\text{O}$ față de temperatură (Rozansky et al., 1993), am obținut schimbarea izotopică teoretică a precipitațiilor de vară și iarnă pe parcursul Holocenului mediu.

Al doilea pas în delimitarea efectului temperaturii, este de a afla cum valorile izotopice ale calcitului ($\delta^{18}\text{O}_c$) sunt modificate de schimbarea temperaturii peșterii. Am folosit ecuația lui Tremaine et al. (2011) pentru a calcula valorile $\delta^{18}\text{O}_c$ pentru intervalele 8-6 și 4-2 ka:

$$1000 \ln \alpha = 16.1(10^3 T^{-1}) - 24.6$$

Mai departe, am determinat efectul izotopic combinat pe care temperatura l-a avut atât în timpul episoadelor pluviale/nivale cât și în timpul precipitării calcitului. Acest calcul a fost realizat și pentru alte peșteri din zona mediteraneeană, rezultatele acestor calcule fiind arătate sub formă grafică în Fig. 2.

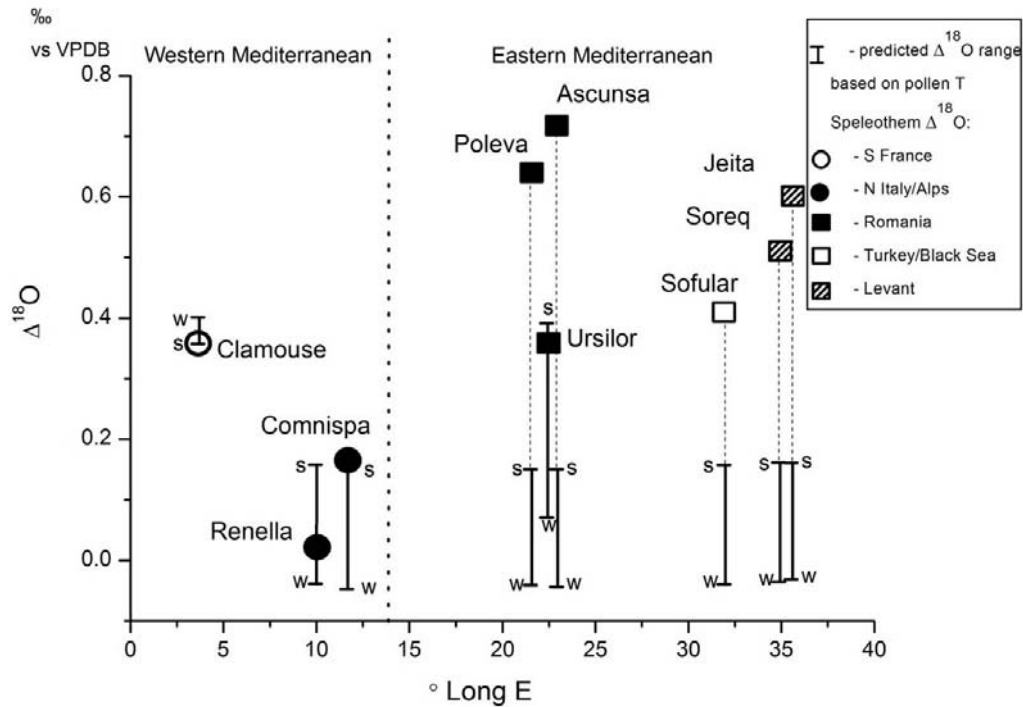


Fig. 2 – Comparație între schimbările izotopice înregistrate în perioada 6-4 ka în stalagmite de la diferite longitudini în Europa și schimbările precise pentru calcitul depus iarna și vara.

Din această figură se observă că la peșterile influențate de Mediterana de vest (Clamouse, Renella și COMNISPA) sau de Atlantic (Urșilor), variația izotopilor de oxigen a fost produsă numai de temperatură. În același timp, valori de la peșteri din Turcia (Sofular), Israel (Soreq), Liban (Jeita) și sudul României (Poleva și Ascunsa), care sunt afectate de Mediterana de est, arată rezultate peste valorile produse de temperatură. Se pare, astfel, că în timpul Holocenului mediu, Mediterana de est și împrejurimile sale au fost martorele, pe lângă temperaturi în creștere, și a unei alterări a ciclului hidrologic.

Această schimbare putea fi rezultatul efectelor locale, dar fără îndoială acestea au avut loc la scară regională. Un asemenea efect local ar putea fi evaporarea apei meteorice înainte sau imediat după infiltrarea în sol. Un efect regional care să aibă același efect asupra $\delta^{18}O_c$ ar putea fi îmbogățirea izotopică a unei surse de vapori, în acest caz Mediterana de est.

Tendința către valori mai mari ale $\delta^{13}\text{C}$ în Holocenul mediu în stalagmita POM2 este suprapus celui observat în $\delta^{18}\text{O}$ și reflectă probabil o scădere a activității organice ca urmare a scăderii resurselor de apă. Comparația cu stalagmita PP10 arată tendințe izotopice în ambele profile, aducând dovezi suplimentare care sprijină ipoteza unei scăderi regionale a resurselor de apă pe parcursul Holocenului mediu.

4. Studiu de caz: Variabilitatea climatică în timpul stadiului izotopic marin 3 în nordul și sudul României

Modelul de creștere al stalagmitei 1152 arată ca aceasta s-a depus între 67.7 ka și prezent, având un hiatus de la 20 la 15 ka. Stalagmita POM1 s-a format între ~47 și ~11 ka, dar studiul de față se bazează numai pe partea ce amai bine datată, între 47,2 și 30,8 ka.

La Peștera Tăușoare, valorile $\delta^{18}\text{O}$ din MIS 3 sunt aproape identice cu cele din Holocen. Interpretăm aceste valori ridicate ca reflectând cel mai probabil o reducere a alimentării acviferului și, deci și a ratei de picurare, în timpul sezonului rece, astfel stalagmita înregistrând numai informație climatică specifică sezonului cald.

Valori la fel de ridicate ca cele observate în $\delta^{13}\text{C}$ la Peștera Tăușoare au mai fost publicate din peșteri din Alpi (Holzkämper et al., 2005; Spötl et al., 2006; Spötl and Mangini, 2007; Luetscher et al., 2011), iar asemenea valori au fost interpretate ca reflectând CO_2 derivat în urma unui lanț de procese chimice care implică oxidarea sulfaților din pirita prezentă ca incluziuni în calcarul în care este formată peștera. Cadrul geologic de la Peștera Tăușoare permite existența unui asemenea mecanism chimic. Reacțiile chimice implică oxidarea piritei (FeS_2) prezentă în calcar, rezultând acid sulfuric (H_2SO_4). Apa de infiltrație fiind acidifiată de ionii de hidrogen, dizolvă roca, eliberând ioni bicarbonatici (HCO_3^-). Acest scenariu permite dizolvarea rocii carbonatice și precipitarea speleotemelor în absența dioxidului de carbon produs în sol. Aceasta presupune posibilitatea ca, în perioada formării stalagmitei, solul să nu fi fost dezvoltat deasupra peșterii. Deoarece valoarea $\delta^{13}\text{C}$ a calcarului Eocen este de 0.1‰ și se presupune că este stabilă, considerăm valorile izotopice pozitive sunt datorate proceselor de fracționare cinetică. Astfel, în lipsa CO_2 produs în sol, variabilitatea izotopică este indusă de intensitatea fracționării cinetice.

Un al doilea scenariu care include prezența solului necesită prezența mecanismului chimic detaliat mai sus și a fracționării cinetice. Într-un proces de disoluție bazat numai pe CO₂ produs în sol, raportul δ¹³C ar avea valori de maxim -3 - -4‰, astfel încât el ar trebui să fie îmbogățit în continuare pentru a putea ajunge la valorile măsurate de noi. În acest scenariu, variabilitatea izotopică ar putea fi impusă de procesele biologice din sol.

Aceste două scenarii arată că la Peștera Tăușoare controlul asupra valorilor δ¹³C este mai complicat decât în mod normal. Unul din factorii care controlează aceste valori este gradul de interacțiune dintre rocă și apa de infiltrație (care depinde de cantitatea anuală de precipitații), combinat cu timpul de rezidență al apei de percolație în carst. Mai departe, acestea controlează magnitudinea oxidării sulfatilor și cantitatea de HCO₃⁻ provenit din rocă.

În timp ce coeficientul de corelație (R²) calculat de-a lungul axei de creștere a stalagmitei 1152 este 0,12 și ar indica o fracționare cinetică redusă, o analiză mai detaliată realizată sub forma unui coeficient de corelație glisant pe 50 de valori arată că, în perioada 67-20 ka cei doi proxy sunt bine corelați. Aceasta indică prezența fracționării cinetice la locul de formare a stalagmitei.

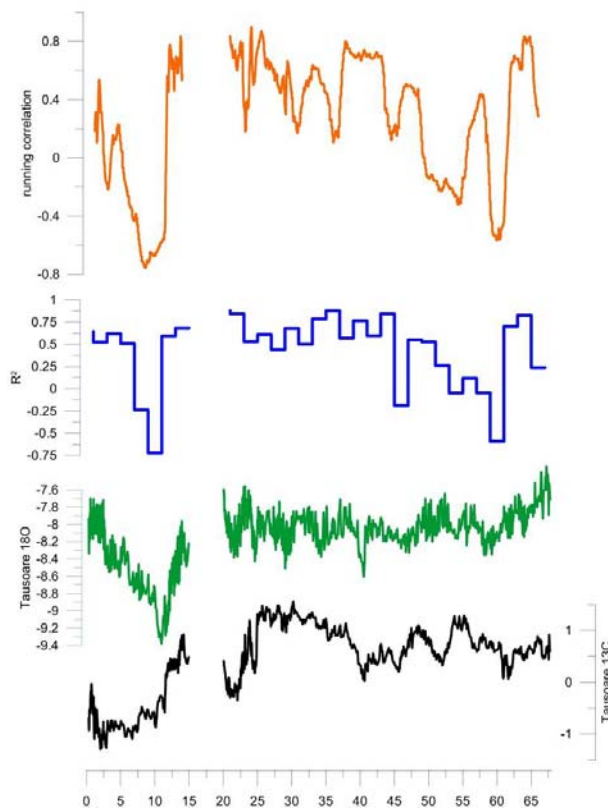


Fig. 3 – Profilele izotopice ale δ¹⁸O (verde) și δ¹³C (negru) în stalagmita 1152. Coeficientul de corelație (R²) pe segmente de 2000 de ani este reprezentat cu albastru iar coeficientul glisant de corelație pe o fereastră de 50 de valori este indicat cu linie portocalie.

Bazandu-ne pe faptul că fracționarea cinetică are un component hidrologic (rată de picurare redusă și umiditate relativă mică) și în cazul de față urmează după un mecanism chimic controlat tot de cantitatea de apă, considerăm că valorile ridicate ale coeficientului de corelație reflectă mai puține precipitații la Peștera Tăușoare. Drept urmare, acest proxy de ordinul doi poate fi folosit ca indicator relativ pentru cantitatea de precipitații, cu valorile mari fiind indicatoare de fracționare cinetică, deci de condiții mai secetoase.

Conform interpretării noastre, se pare că interstadiile erau în general mai umede decât stadialele, cu GIS 17 fiind cel mai umed din această perioadă. Interstadiile umede au fost și GIS 14, 12, 8, 4.1 și 2, dar acestea se situează pe o tendință de descreștere a cantității de precipitații.

Valorile izotopice ale oxigenului înregistrate la Peștera Ascunsă în MIS 3 sunt apropiate de cele Holocene și sunt invers corelate cu temperaturile globale. Urmând același argument ca și în cazul Peșterii Tăușoare, suntem de părere că precipitarea calcitului s-a realizat în principal în sezonul cald. De aceea, valorile $\delta^{18}\text{O}$ reflectă în general semnătura izotopică a sursei atlantice și variabilitatea scăzută a temperaturilor de vară calculată de Ampel et al. (2010) pentru vestul Europei. În timpul a două stadiale groenlandeze, valorile $\delta^{13}\text{C}$ ating limita superioară așteptată la carbonați depuși în echilibru cu CO_2 respirat de plante C_3 (McDermott, 2004), în acest caz -2.9‰. Stalagmita POM1 și-a întrerupt creșterea în timpul evenimentului Heinrich 3, când cele mai ridicate valori s-au înregistrat.

Faptul că $\delta^{18}\text{O}$ este invers corelat cu temperaturile anuale și prezintă valori ridicate în timpul perioadelor reci, arată că sezonalitatea infiltrației este principalul mecanism din spatele variației izotopice. Un scenariu posibil care ar putea produce aceasta variabilitate este reprezentat de variația lungimii sezonului rece. În timpul anilor mai calzi, sezonul rece poate fi mai scurt, făcând posibilă infiltrarea apelor primăvara devreme sau toamna târziu, acestea contribuind cu valori izotopice mai scăzute la valorile anuale ale calcitului. În mod contrar, în anii reci infiltrația ar fi limitată numai la valorile ridicate din vară. Urmând această argumentație, putem folosi valorile $\delta^{18}\text{O}$ de la Peștera Ascunsă drept proxy al sezonității.

Variabilitatea scăzută a semnalului împiedică observarea precisă a ciclurilor Dansgaard/Oeschger, cu excepția D/O 8 la Peștera Ascunsă, care este clar definit atât în $\delta^{18}\text{O}$ cât și în $\delta^{13}\text{C}$. Acest interstadial începe cu o creștere bruscă și de mare amplitudine în $\delta^{13}\text{C}$ (~5‰), în timp ce oxigenul crește cu doar 1,5‰. În timpul D/O 8, schimbările în valorile oxigenului le preced pe cele din carbon cu aproximativ 200 de ani. Această creștere în valorile ambelor rapoarte izotopice a fost întreruptă pentru scurt timp (50-100

de ani), o caracteristică identificată și în alte arhive climatice cum ar fi NGRIP sau Sofular (Andersen et al., 2005; Fleitmann et al., 2009). În timpul GIS 8, temperaturile sunt cele mai ridicate și mai constante din tot șirul de date, indicând condiții de mediu asemănătoare cu cele din Holocen.

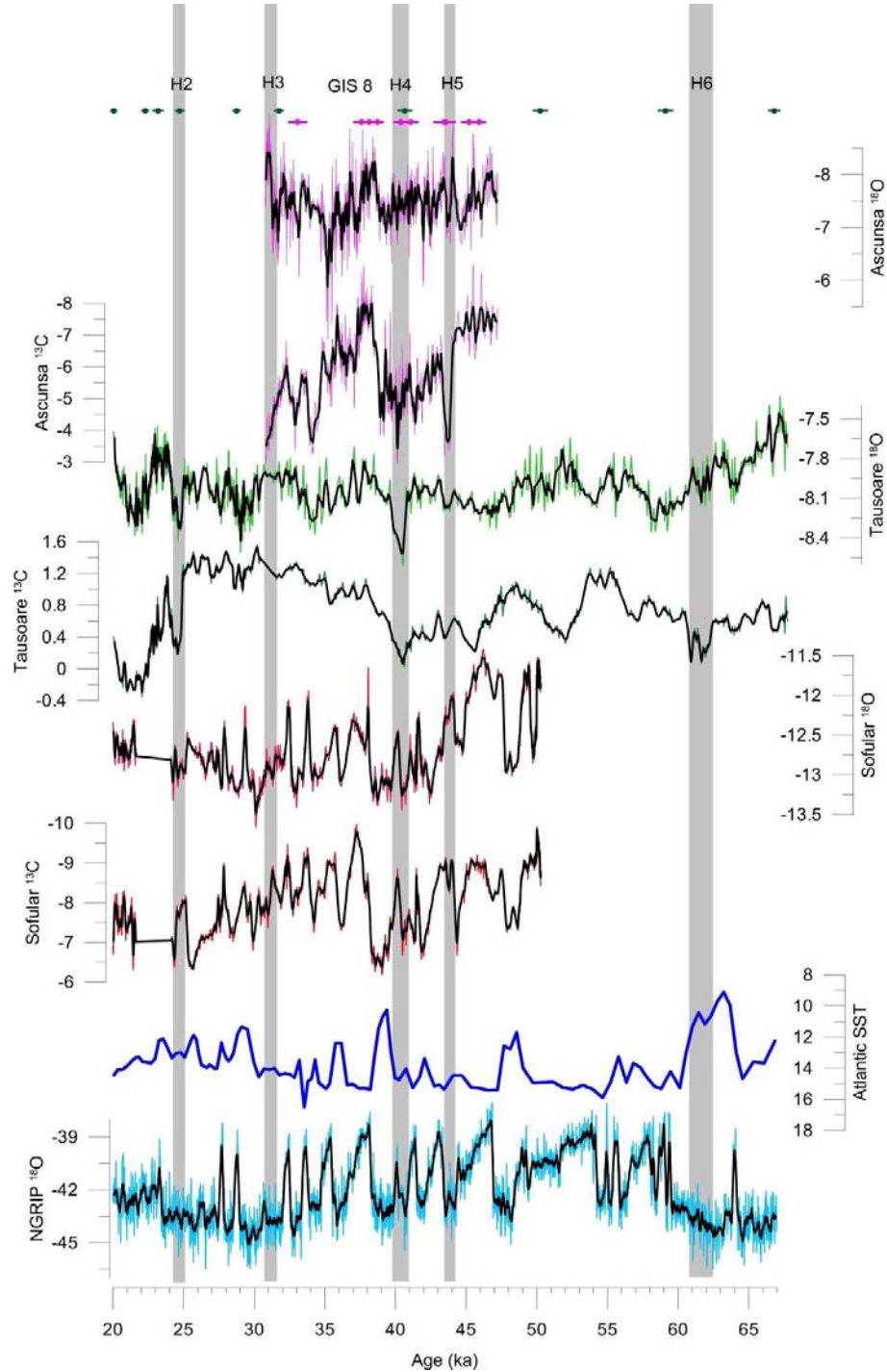


Fig. 4 – Comparație între profilele izotopice de la peșterile Tăușoare și Ascunsă și alte arhive climatice.

Evenimentele Heinrich sunt mai bine exprimate în seriile noastre de timp, indicând un impact diferit al acestor schimbări rapide de climă. HE 6, probabil cel mai puțin studiat (Hemming, 2004), pare a fi durat de la ~62,5 la ~60,5 ka, dar o estimare exactă este dificil de realizat datorită lipsei de amplitudine a valorilor izotopice.

În ambele stalagmite, începutul evenimentului Heinrich 5 apare la 44 ka, similar cu un eveniment bine definit atât în $\delta^{18}\text{O}$ cât și în $\delta^{13}\text{C}$ la Peștera Sofular. La Peștera Ascunsă, HE 5 produce cel mai puternic semnal în $\delta^{13}\text{C}$ și apare ca o creștere rapidă de 3.5 ‰ a valorilor. La Tăușoare, semnalul izotopic asociat cu acest eveniment este mai puțin vizibil, dar îndajuns încât să se observe că are loc simultan cu cel de la Peștera Ascunsă.

Scăderea bruscă a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ la P. Tăușoare la 40 ka poate să fi fost cauzată de scăderea valorilor apelor de suprafață ale Atlanticului de Nord. Acest episod a avut loc cel mai probabil în HE 4 datorită inputului rapid de apă dulce cu valori mici ale $\delta^{18}\text{O}$ provenită din dezintegrarea calotei glaciare din America de Nord. Aceste ape dulci au fost responsabile pentru răcirea apelor de suprafață ale oceanului, reducând și mai mult valorile izotopice ale vaporilor de apă proveniți din această sursă.

Evenimentul Heinrich 3 (~31 ka, Hemming, 2004) este dificil de recunoscut la P. Tăușoare dar este bine definit la P. Ascunsă, ca un eveniment rece care a dus la oprirea formării stalagmitei, asemănător cu stalagmitele din P. Villars, Franța (Genty et al., 2003, 2010).

Evenimentul Heinrich 2 este ușor de identificat la P. Tăușoare în ambele serii de timp, punctul său central fiind situat la 24,5 ka.

Seriile de timp de la P. Tăușoare au fost analizate folosind metodele Morlet wavelets și Multi Taper, pentru a scoate în evidență posibile periodicități în variabilitatea lor. Cea mai bine reprezentată periodicitate este cea de 2300 de ani care apare în decursul MIS 2, de la 31 la 20 ka, atât în $\delta^{18}\text{O}$ cât și în $\delta^{13}\text{C}$. Ciclul de 2300 de ani a fost bine documentat în Groenlanda (Mayewski et al., 1997; Rohling et al., 2002) și în Marea Egee (Rohling et al., 2002). Perioada 31-20 ka coincide cu un vârf în valorile insolației din timpul verii la 45°N (Laskar et al., 2004) și cu o creștere de trei ori a ratei de depunere a calcitului, indicând o posibilă modulare a climatului de vară în timpul maximelor de insolație.

5. Studiu de caz: Variabilitatea climatică la altitudini medii și mari în România în timpul MIS 5e

Așa cum am precizat mai sus, pentru acest studiu am folosit stalagmitele CG1 (M-ții Mehedinți) și M3-R2/1 (M-ții Făgăraș). Stalagmita GC1 s-a format pe toată durata MIS 5e, de la 131,9 la 113,7 ka. Valorile izotopilor de oxigen urmează o tendință crescătoare pe tot parcursul perioadei de creștere, întreruptă de câteva evenimente cu extensie milenară, caracterizate de valori mai grele ale $\delta^{18}\text{O}$. Valorile carbonului urmează o tendință generală de descreștere, întreruptă de perioad cu valori mai ridicate. Este de notat că valorile $\delta^{18}\text{O}$ și ale $\delta^{13}\text{C}$ sunt aproximativ egale cu cele din Holocen de la P. Ascunsă, care este situată în apropiere. Aceasta poate indica o asemănare între condițiile de mediu din Holocen și MIS 5e din această zonă.

Valorile $\delta^{18}\text{O}$ din stalagmita M3-R2/1 variază foarte puțin în primii 400 de ani, dar încep apoi să fluctueze cu o amplitudine relativ mai mare. Pe toată durata formării stalagmitei, valorile nu urmează nicio tendință și au o medie de -8,4 ‰. La ~124 ka se observă o creștere a valorilor, care se aseamănă cu o creștere asemănătoare identificată în stalagmite din Franța (Couchoud et al., 2009) și Italia (Drysdale et al., 2009). Valorile $\delta^{13}\text{C}$ arată o ușoară tendință către valori mai mari, fiind punctată de câteva evenimente scurte cu amplitudine de aproximativ 2,2‰.

Deși cele două profile izotopice ale stalagmitei CG1 au tendințe diferite, ele par să se coreleze în timpul evenimentelor izotopice mai importante. Pentru a gradul în care se corelează, am calculat un coeficient de corelare glisant, pe o fereastră de nouă valori de-a lungul întregii serii de timp. Ținând cont de faptul că procesele de fracționare cinetică din peșteră duc la valori izotopice ridicate dar în stalagmita CG1 corelarea cea mai mare este realizată în timpul evenimentelor izotopice cu valori scăzute, putem afirma că aici fracționarea cinetică nu a jucat un rol important în variabilitatea izotopică. Astfel, putem afirma că $\delta^{18}\text{O}$ și $\delta^{13}\text{C}$ din stalagmita CG1 reflectă variații regionale ale factorilor de mediu și sunt mai puțin influențate de factori locali. În figura 5 se poate observa că insolația pe timpul verii la 45°N (Laskar, 2004) este principalul factor care modifică pe termen lung valorile $\delta^{13}\text{C}$ în MIS 5e. Deși se observă că o activitate organică mai mare reflectă creșterea în insolație, este dificil de concluzionat dacă insolația de vară controlează activitatea organică direct prin temperatură sau prin creșterea cantității de precipitații.

Valorile izotopilor de oxigen din stalagmita M3-R2/1 (~2400 m asl, ~ -8.4‰) sunt mai mici decât media valorilor din stalagmita LFG-2 din Carpații Occidentali (Lauritzen and

Onac, 1999, ~550 m asl, ~ -7‰) și egale cu cele din stalagmita CG1 (~620 m asl, - 8.4‰). Diferența dintre LFG-2 și M3-R2/1 poate fi doar parțial explicată prin efectul altitudinii (Clark and Fritz 1997; Lachniet 2009), deoarece acest efect ar fi impus diferențe de până la 5 ‰.

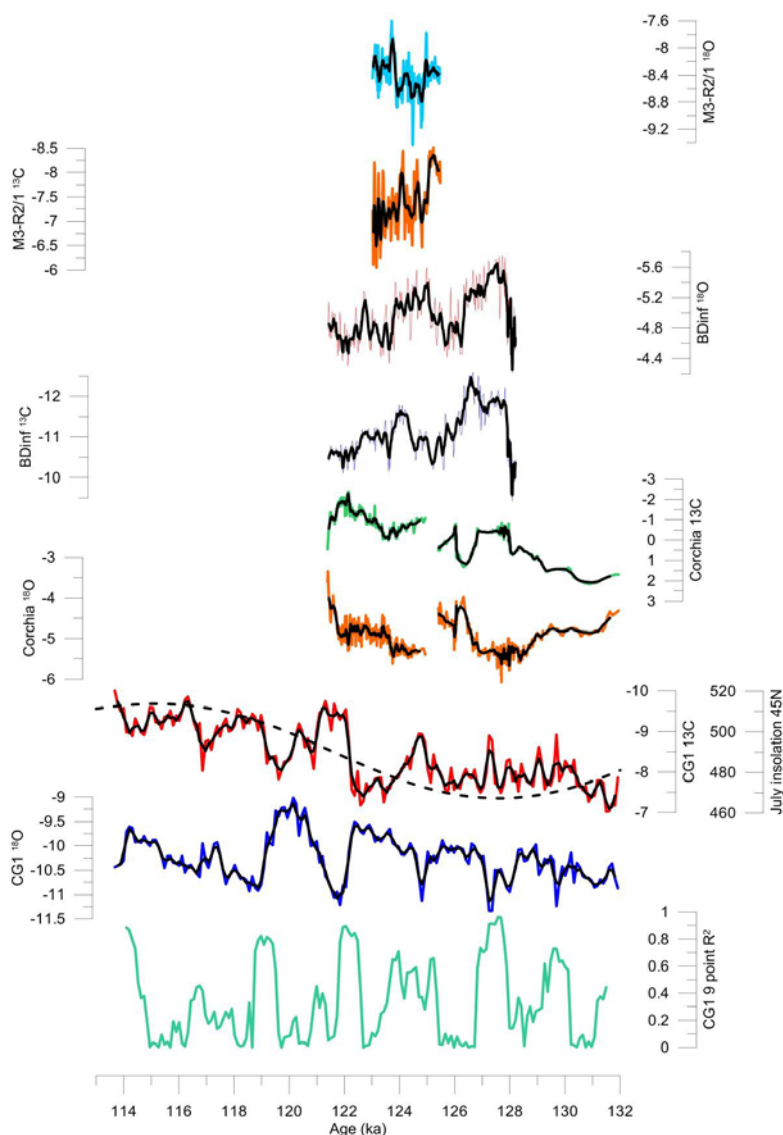


Fig. 5 – Comparație între profilele izotopice de la peșterile CG, Corchia, Burgeois-Delunay și M3-R2. Sunt arătate deasemenea și graficul coeficientului glisant de corelație pe o fereastră de nouă valori pentru stalagmita CG1, dar și insolația lunii iulie la 45° N.

Chiar dacă efectul altitudinii a avut o influență în aceste valori, aceasta a fost probabil ascunsă de un alt efect și anume sezonalitatea infiltrației apelor meteorice. Aceasta este determinată de scăderea sau lipsa infiltrației în timpul iernii, ceea ce face ca marea parte a infiltrației să se realizeze în timpul sezonului cald. Astfel, valorile izotopice

ridicate reflectă o extensie mai mare a sezonului rece decât la altitudini medii și joase. Faptul că semnalul izotopic al oxigenului are o amplitudine mică, poate indica faptul că durata sezonului rece nu a fluctuat pe durata formării stalgmitelor.

În profilul izotopic al carbonului, valorile mari comparativ cu cele din stalgmita CG1 sugerează o activitate organică mai scăzută, iar tendința crescătoare indică o continuă degradare a acestei activități.

Perioada de mai mare variabilitate izotopică ce începe la ~125 ka la Peștera M3-R2 coincide cu o perioadă cu valori mari ale oxigenului la P. CG și cu intervalul #4 al variației nivelului mării definit de Hearty et al. (2007) ca o stagnare la ~ +3 - +4 m după o scădere ce avusese loc la ~125 ka.

În Marea Roșie, Rohling et al. (2008) au identificat o perioadă de creștere continuă a nivelului mării între 124,7 și 123.3 ka, cu o rată de 1,7 m pe secol, aceasta putând fi produsă de temperaturi globale care erau cu 2°C mai mari decât în prezent. În același timp, rate mari de depunere a calcitului au fost identificate în Franța (125.3-123.8 ka, Couchoud et al., 2009), Italia (125.0-123.7 ka, Drysdale et al., 2009) și Israel (127-124 ka, Bar-Matthews et al., 2003).

Metoda Multi Taper (Percival and Walden, 1993) scoate în evidență, într-un interval de încredere de 99%, periodicități de 80 și 167 de ani, vizibile în izotopii de carbon. În același timp, izotopii de oxigen conțin periodicități de 62 și 107 ani.

Periodicitatea de 80 de ani din $\delta^{13}\text{C}$ este apropiată de ciclul solar Gleissberg recunoscut și în alți proxy (Sonett et al., 1990), sugerând un control al variabilității solare asupra semnalului $\delta^{13}\text{C}$. O legătură plauzibilă între variabilitatea solară și clima României poate fi regăsită în Oscilația Nord Atlantică ce influențează climatul de iarnă din România (Bojariu and Giorgi, 2005) și care a fost demonstrat că răspunde la variațiile solare.

În datele de oxigen, ciclul de 62 de ani poate fi legat de Oscilația Atlantică Multidecennială, un mod care se consideră că reflectă relația dintre Atlanticul de Nord și atmosferă pe o perioadă de 55-70 de ani (Knudsen et al., 2011) sau 64 de ani (Ioniță et al., 2013). Cealaltă periodicitate puternică este cea de 107 ani, similară cu ciclul de 105.75 de ani care, la fel ca ciclul Gleissberg, este o modulație a ciclului petelor solare de 11 ani (Damon and Jirikowic, 1992).

6. Concluzii

În această teză am studiat variabilitatea climatică din timpul Pleistocenului superior și Holocen, bazându-ne pe analiza izotopilor stabili din stalagmite prelevate din peșteri din Munții Rodnei, Făgăraș și Mehedinți.

Izotopii stabili din stalagmita POM2 ne-au permis identificare schimbărilor climatice din Holocen la scară seculară și milenară. Între 6 și 4 ka, raportul $\delta^{18}\text{O}$ s-a modificat gradual către valori mai mari și, utilizând o abordare nouă, am scos în evidență că această schimbare a reflectat nu numai creșterea temperaturii, ci că au fost implicați și alți factori în variabilitatea izotopică.

Abordarea noastră se bazează pe folosirea reconstrucțiilor de temperatură bazate pe date palinologice și delimitarea rolului avut de schimbarea acesteia în variația izotopică a calcitului. Calculele noastre au scos în evidență faptul că pe parcursul Holocenului mediu o creștere izotopică de 0,56‰ a fost produsă de alți factori decât temperatura în creștere. Pentru o mai bună imagine la nivel regional, am extins aceste calcule și la alte speleoteme din bazinul Mării Mediterane. Astfel am arătat că valorile izotopilor de oxigen de la peșterile din Marea Mediterană de vest și cele aflate sub influența majoră a Atlanticului au urmat numai creșterea temperaturilor, pe când la peșterile din bazinul Mediteranei de est valorile izotopice au fost afectate în plus și de alte procese. Aceste procese pot fi reprezentate de condiții evaporative locale în creștere sau de o creștere graduală a valorilor $\delta^{18}\text{O}$ ale apelor de suprafață din estul Mării Mediterane. Dovezi care sprijină existența unei creșteri importante a evaporației sunt aduse de comparația dintre profilele $\delta^{13}\text{C}$ de la peșterile Ascunsă și Poleva, ambele arătând o descreștere regională a resurselor de apă pentru plante.

Folosind această nouă abordare, am calculat influența temperaturii pentru două episoade climatice importante, la 8,2 și 3,2 ka. În POM2, evenimentul climatic de la 8,2 ka este caracterizat de o rată de creștere a stalagmitei foarte mare, dar valorile $\delta^{18}\text{O}$ și ale $\delta^{13}\text{C}$ au o variabilitate scăzută. Pe de altă parte, evenimentul de la 3,2 ka este caracterizat de o scădere de 1,5‰ a valorilor $\delta^{18}\text{O}$. Delimitând variabilitatea izotopică impusă de temperatură, am arătat că în timpul evenimentului 8,2 ka peșterile Ascunsă și V11 au fost influențate doar de condițiile climatice de vară. În timpul evenimentului de la 3,2 ka, la P. Ascunsă variabilitatea izotopică reflectă schimbări în temperaturile de iarnă și o posibilă reducere în aprotul mediteranean de precipitații.

Pentru studiul variabilității climatice din MIS 3, am utilizat două stalagmite din Peștera Ascunsă și Peștera Tăușoare și am făcut o comparație între aceste două regiuni cu climate diferite. Acest studiu scoate în evidență fluctuații climatice semnificative în perioada 67-20 ka. La ambele peșteri, alimentarea acviferului a fost limitată numai la sezonul cald, variația izotopică reflectând astfel variații ale sezonality.

În cazul datelor izotopice de la P. Tăușoare, am folosit coeficientul glisat de corelație între carbon și oxigen ca proxy de precipitații. Interpretarea noastră arată că interstadiile au fost mai umede decât stadiile, GIS 17 fiind cel mai umed înregistrat de noi. Celelalte interstadiile umede, GIS 14, 12, 8, 4.1 și 2 descriu o tendință de scădere a cantității de precipitații pe tot parcursul perioadei de formare a stalagmitei.

În ceea ce privește schimbările climatice înregistrate în timpul MIS 4-2 de către stalagmitele noastre, variabilitatea asociată cu ciclurile D/O pare a fi atenuată, pe când evenimentele Heinrich au o expresie mai puternică. Doar HE 2, 4 și 5 sunt clar vizibile, pe când HE 3 și 6 au un impact mai scăzut.

Deasemenea am scos în evidență existența unui ciclu de 2300 de ani atât în seria de timp a oxigenului, cât și în cea a carbonului, de la 31 la 20 ka. Această perioadă coincide cu un vârf în insolația de vară la 45°N și cu o creștere a ratei de depunere a calcitului de trei ori, indicând o posibilă modulare a climatului de vară de către activitatea solară.

În cadrul stadiului izotopic marin 5e, am arătat că în Peștera CG (Munții Mehedinți) condițiile de depunere a calcitului s-au păstrat între 132 și 113 ka. Deoarece valorile absolute ale izotopilor sunt asemănătoare cu cele din Holocen din această zonă, considerăm că în MIS 5e condițiile de mediu erau asemănătoare cu cele din Holocen.

Perioada de creștere a stalagmitei M3-R2/1 (Munții Făgăraș) coincide cu un vîr de temperaturi bine documentat la nivel global. Datele de oxigen și carbon relevă variabilitatea la scară decenială și seculară la altitudini mari între 125 și 123 ka. Mai mult, rezoluția mare a profilelor izotopice a permis scoaterea în evidență a unor periodicități în variația izotopică, reflectând influența activității solare asupra climei.

Bibliografie

Ampel, L., Bigler, C., Wohlfarth, B., Risberg, J., Lotter, A., F. & Veres, D., 2010. Modest summer temperature variability during DO cycles in western Europe. *Quaternary Science Reviews* 29 (11–12): 1322-1327.

Andersen, K., K., Svensson, A., Johnsen, S., J., Rasmussen, S., O., Bigler, M., Röthlisberger, R., Ruth, U., Siggaard-Andersen, M.-L., Steffensen, J., P., Dahl-Jensen, D., Vinther, B., M. & Clausen, H., B., 2005. The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15–42 ka. Part 1: constructing the time scale. *Quaternary Science Reviews*, 25 (23–24): 3246-3257

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. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 17: 3181-3199

Bojariu, R. & F. Giorgi, 2005. The North Atlantic Oscillation signal in a regional climate simulation for the European region. *Tellus*, 57A: 641-653

Clark, I. & Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, 328 pp.

Codarcea, A., Răileanu, G., Năstăseanu, S., Bercia, I., Bercia, E. & Bițoiu, C., 1964. Geological map of Romania, scale 1:200.000, L-34-XXIX, Baia de Aramă sheet (32). Institutul Geologic, București

Codarcea, M., D. & Stancu, I., 1968. Geological map of Romania, scale 1:200.000, L-35-XIX, Sibiu sheet (27). Institutul Geologic, București

Constantin, S., Bojar, A.-V., Lauritzen, S.-E. & Lundberg J., 2007. Holocene and Late Pleistocene climate in the sub-Mediterranean continental environment: A speleothem record from Poleva Cave Southern Carpathians, Romania. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 243: 322-338.

Couchoud, I., Genty, D., Hoffmann, D., Drysdale & R., Blamart, D., (2009) Millennial-scale climate variability during the Last Interglacial recorded in a speleothem from South-western France. *Quaternary Science Reviews*, 28 3263–3274

Damon, P., E. & Jirikovic, J., L., 1992. THE SUN AS A LOW-FREQUENCY HARMONIC OSCILLATOR RADIOCARBON. 34 (2): 199-205

Dansgaard., W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.

Davis, B., A., S., Brewer, S., Stevenson, A., C., & Guiot, J., 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews* 22: 1701-1716.

Day, C. C. & Henderson, G. M., 2011. Oxygen isotopes in calcite grown under cave-analogue conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 3956-3972.

Drysdale, R. N., Hellstrom, J. C., Zanchetta, G., Fallick, A. E., Sánchez Goñi, M. F., Couchoud, I., McDonald, J., Maas, R., Lohmann, G. & Isola, I., 2009. Evidence for obliquity forcing of glacial Termination II. *Science*, 325: 1527–1531

Dreybrodt, W. & Scholz, D., 2011. Climatic dependence of stable carbon and oxygen isotope signals recorded in speleothems: From soil water to speleothem calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 734-752.

Fairchild, I. J., Smith, C. L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey D., McDermott F. & E.I.M.F., 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews* 75: 105-153.

Fleitmann, D., Cheng, H., Badertscher, S., Edwards, R. L., Mudelsee, M., Göktürk, O. M., Frankhauser, A., Pickering, R., Raible, C. C., Matter, A., Kramers, J. & Tüysüz, O., 2009. Timing and climatic impact of Greenland interstadials recorded in stalagmites from northern Turkey. *Geophysical Research Letters*, 36 (19): L19707

Frisia, S., Fairchild, I. J., Fohlmeister, J., Miorandi, R., Spötl, C. & Borsato, A., 2011. Carbon mass-balance modelling and carbon isotope exchange processes in dynamic caves. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 380-400.

Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel, J. & Van-Exter, S., 2003. Precise dating of Dansgaard–Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature* 421: 833-837

Genty, D., Combourieu-Nebout, N., Peyron, O., Blamart, D., Wainer, K., Mansuri, F., Ghaleb, B., Isabello, L., Dormoy, I., von Grafenstein, U., Bonelli, S., Landais, A., Brauer A., 2010. Isotopic characterization of rapid climatic events during OIS3 and OIS4 in Villars Cave stalagmites (SW-France) and correlation with Atlantic and Mediterranean pollen records. *Quaternary Science Reviews*, 29 (19–20): 2799-2820

Hedberg, O., 1964. Features of afroalpine plant ecology. *Acta phytogeographica Suecica*, 49, pp. 149

Hemming, S., R., 2004. Heinrich events: Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Reviews of Geophysics*, 42 (1): 1944-9208

Hendy, C., H., 1971. The isotopic geochemistry of speleothems I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 35: 801-824.

Hoefs, J., 2009. *Stable Isotope Geochemistry*. Sixth edition, Springer-Verlag, 285 p.

Holzkämper, S., Spötl, C. & Mangini A., 2005. High-precision constraints on timing of Alpine warm periods during the middle to late Pleistocene using speleothem growth periods. *Earth and Planetary Science Letters* 236 (3–4): 751-764.

Ionita, M., Rimbu, N., Chelcea, S. & Patrut, S. 2013. Multidecadal variability of summer temperature over Romania and its relation with Atlantic Multidecadal Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, 113 (1-2): 305-315

Ivanovich, M. & Harmon, R., S., 1992. Uranium-series disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences, Clarendon Press, Oxford, pp. 912

Knudsen M., F., Seidenkrantz, M.-S., Jacobsen B., H. & Kuijpers, A., 2011. Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years. *Nature Communication*, 2,178: 1-8

Lachniet, M., S., 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews* 28: 412-432.

Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M., Levrard, B., 2004. A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428: 261-285

Lauritzen S.-E. & Onac, B.P., 1995. Uranium-series dating of speleothems from Romanian caves. *Theoretical and Applied Karstology* 8: 25-36

Lauritzen, S.-E. & Onac, B.P., 1999. Isotopic stratigraphy of a Last Interglacial stalagmite from north-western Romania: correlation with deep-sea record and northern-latitude speleothem. *Journal of Caves and Karst Studies*. 61 (1): 22-30

Luetscher, M., Hoffmann, D. L., Frisia, S. & Spötl, C., 2011. Holocene glacier history from alpine speleothems, Milchbach cave, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, 302 (1–2): 95-106

Mayewski, P. A., Meeker, L. D., Twickler, M. S., Whitlow, S. I., Yang, Q. & Prentice, M., 1997. Major features and forcing of high latitude northern hemisphere atmospheric circulation over the last 110,000 years. *Journal of Geophysical Research*. 102 (26): 345-26,362

Mayewski, P. A., Rohling, E., Stager, J. C., Karlén, W., Maasch, K. A., Meeker, L. D., Meyerson, E. A., Gasse, F., van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R. R. & Steig, E. J., 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62 (3): 243-255

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 and Planetary Change* 79: 275-287.

Mühlinghaus, C., Scholz, D. & Mangini, A., 2009. Modelling fractionation of stable isotopes in stalagmites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 73: 7275-7289.

Onac, B. P., 1996. Speleothems from caves in Padurea Craiului Mountains: a mineralogic, crystallographic, and paleoclimatic study, PhD thesis, Babeş-Bolyai University, Cluj-Napoca

Onac, B. P. & Lauritzen, S.-E., 1996. The climate of the last 150,000 years recorded in speleothems: preliminary results from north-western Romania. *Theoretical and Applied Karstology* 9: 9-21.

Onac, B. P., Constantin, S., Lundberg, J. & Lauritzen, S.-E. 2002. Isotopic climate record in a Holocene stalagmite from Urşilor Cave Romania. *Journal of Quaternary Science* 17: 319-327.

Percival, D. B. & Walden, A. T., 1993. *Spectral Analysis for Physical Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 612 pp.

Polag, D., Scholz, D., Mühlinghaus, C., Spötl, C., Schröder-Ritzrau, A., Segl, M. & Mangini A., 2010. Stable isotope fractionation in speleothems: Laboratory experiments. *Chemical Geology* 279: 31-39.

Reynard, L. M., Day, C. C. & Henderson, G. M., 2011. Large fractionation of calcium isotopes during cave-analogue calcium carbonate growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75: 3726-3740.

Roberts, N., Jones, M. D., Benkaddour, A., Eastwood, W. J., Filippi, M. L., Frogley, M. R., Lamb, H. F., Leng, M. J., Reed, J. M., Stein, M., Stevens, L., Valero-Garcés, B. & Zanchetta, G. 2008. Stable isotope records of Late Quaternary climate and hydrology from Mediterranean lakes: the ISOMED synthesis. *Quaternary Science Reviews* 27 (25-26): 2426-2441

Roberts, N., Eastwood, W. J., Kuzucuoğlu, C., Fiorentino G. & Caracuta V., 2011. Climatic, vegetation and cultural change in the eastern Mediterranean during the mid-Holocene environmental transition. *The Holocene* 21: 147-162.

Rohling, E. J., Mayewski, P. A., Abu-Zied, R. H., Casford, J. S. L. & Hayes, A. 2002. Holocene atmosphere-ocean interactions: records from Greenland and the Aegean Sea. *Climate Dynamics*, 18, (7): 587-593

Rozansky, K, Araguás-Araguás L. & Gonfiantini R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation. *Geophysical Monograph Series*, 78: 1-36.

Sonett, C. P., Finney, S. A., & Berger, A., 1990. The Spectrum of Radiocarbon, *Philosophical Transactions of the Royal Society, A*, 330: 413-426

Spötl C. & Mangini A., 2002. Stalagmite from the Austrian Alps reveals Dansgaard-Oeschger events during isotope stage 3: Implications for the absolute chronology of Greenland ice cores. *Earth and Planetary Science Letters*, 203 (1): 507-518

Spötl, C., Mangini, A. & Richards, D. A., 2006. Chronology and paleoenvironment of Marine Isotope Stage 3 from two high-elevation speleothems, Austrian Alps. *Quaternary Science Reviews* 25 (9–10): 1127-1136.

Spötl, C. & Mangini A., 2007. Speleothems and paleoglaciérs. *Earth and Planetary Science Letters* 254 (3–4): 323-331.

Tămaş, T. & Causse C., 2001. U-Th TIMS chronology of two stalagmites from V11 Cave (Bihor Mountains, Romania). *Theoretical and Applied Karstology*, 13-14: 25-32.

Tămaş, T., 2003. Mineralogia și geochimia speleotemelor din unele peșteri ale Munților Bihor, PhD Thesis, Babeş-Bolyai University, Cluj-Napoca

Tămaş, T., Onac, B. P. & Bojar A.-V., 2005. Lateglacial-Middle Holocene stable isotope records in two coeval stalagmites from the Bihor Mountains, NW Romania. *Geological Quarterly*, 49 (2): 185–194.

Tremaine, D. M, Froelich, P. N., Wang, Y., 2011. Speleothem calcite formed in situ: Modern calibration of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ paleoclimate proxies in a continuously-monitored natural cave system. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 75 (17): 4929-4950

Wackerbarth, A., Scholz, D., Fohlmeister, J. & Mangini A., 2010. Modelling the $\delta^{18}\text{O}$ value of cave drip water and speleothem calcite. *Earth and Planetary Science Letters* 299: 387-397.

Wainer, K., Genty, D., Blamart, D., Hoffmann, D. & Couchoud, I., 2009. A new stage 3 millennial climatic variability record from a SW France speleothem. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 271 (1–2): 130-139.