

Autoreferat

1. IMIĘ I NAZWISKO

Michał Jakub Jakubowicz

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE LUB ARTYSTYCZNE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

- czerwiec 2015 stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk o Ziemi w zakresie geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Tytuł rozprawy: „Palaeoecology and sedimentary environment of the Middle Devonian carbonate buildups of the Hamar Laghdad area, southeastern Morocco”. Promotor: prof. dr hab. Zdzisław Bełka (UAM); promotor pomocniczy: dr Jolanta Dopieralska (Fundacja UAM); recenzenci: prof. dr hab. Marek Narkiewicz (Państwowy Instytut Geologiczny), prof. dr hab. Stanisław Skompski (Uniwersytet Warszawski). Rozprawa obroniona z wyróżnieniem
- czerwiec 2011 tytuł magistra kierunku geologia w specjalności geologia stratygraficzno-poszukiwawcza, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym i nagrodą Dziekana dla najlepszego absolwenta Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych. Tytuł pracy dyplomowej: „Sedimentary environment and fauna of Devonian methane seeps: case study from the Hollard Mound, eastern Morocco”; promotor: prof. dr hab. Zdzisław Bełka (UAM); recenzent: prof. dr hab. Błażej Berkowski (UAM)
- czerwiec 2009 tytuł licencjata kierunku geologia, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Studia ukończone z wynikiem bardzo dobrym. Tytuł pracy dyplomowej: „Ewolucyjne znaczenie *Archaeopteryx*”; promotor: dr Edward Chwieduk (UAM)

3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH

Zatrudnienie etatowe

- od 1.10.2015 adiunkt w Instytucie Geoekologii i Geoinformacji, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu

Długoterminowe stypendium

- 1.11.2013–31.01.2014 stypendysta Niemieckiej Centrali Wymiany Akademickiej (Deutscher Akademischer Austauschdienst: DAAD), Laboratorium Izotopów Stabilnych GeoZentrum Nordbayern, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Niemcy

Zatrudnienie na podstawie umowy w projektach badawczych

Kierownik:

- od 2017 projekt programu Sonata Narodowego Centrum Nauki nr 2016/23/D/ST10/00444: „Izotopy neodymu jako wskaźnik składu i pochodzenia fluidów w kopalnych wysiękach metanu”
- 2014–2016 projekt programu Iuventus Plus Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr IP2014 016373: „Paleoekologia, środowisko sedimentacji i geneza największej dewońskiej rafy północnej Gondwany (Aferdou el Mrakib, wschodni Anty-Atlas, Maroko)”
- 2013–2016 projekt programu Preludium NCN nr 2012/07/N/ST10/04044: „Powstanie najstarszego chemosyntetycznego ekosystemu (środkowodewoński kopiec Hollarda, południowe Maroko): efektem wpływów roztworów hydrotermalnych czy metanu?”

Wykonawca:

- od 2021 projekt programu Preludium NCN nr 2020/37/N/ST10/00773: „Paleoekologia środkowodewońskich zespołów koralowcowo-stromatoporowych Basenu Mader (Anty-Atlas, Maroko)”; kierownik projektu: mgr Aleksander Majchrzyk (Uniwersytet Warszawski)
- od 2020 projekt programu Opus NCN nr 2019/33/B/ST10/00059: „Ewolucja i paleoekologia głębokomorskich zespołów koralowcowych z dewonu Anty Atlasu w Maroku”; kierownik projektu: prof. dr hab. Błażej Berkowski (UAM)
- od 2019 projekt programu Opus NCN nr 2018/29/B/ST10/00954: „Mezofotyczne ekosystemy koralowców w środkowopaleozoicznym stadium rozkwitu raf”; kierownik projektu: prof. UW dr hab. Mikołaj Zapalski (Uniwersytet Warszawski)
- od 2019 projekt programu Opus NCN nr 2018/31/B/ST10/00292: „Paleoekologia i rozwój środkowodewońskich organizmów twardego podłoża na szelfie północnej Gondwany”; kierownik projektu: prof. dr hab. Michał Zatoń (Uniwersytet Śląski)
- od 2018 projekt programu Preludium NCN nr 2017/25/N/ST10/00445, „Rekonstrukcja paleośrodowiska górnodewońskiej platformy węglanowej Tafilalt na obszarze Jebel Bou Ifarherioun (AntyAtlas, Maroko)”; kierownik projektu: mgr Patrycja Dworzczak (UAM)
- 2014–2019 projekt programu Opus NCN nr 2013/11/B/ST10/00243, „Podmorskie kryptyczne biocenozy z dewonu Maroka”; kierownik projektu prof. dr hab. Błażej Berkowski (UAM)
- 2014–2019 projekt programu Opus NCN nr 2013/11/B/ST10/04751, „Karbońskie kopce mułowe: powracające węglanowe systemy depozycyjne na pograniczu geo- i biosfery”; kierownik projektu: prof. dr hab. Zdzisław Bełka (UAM)

4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘĆ, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2 USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŻN. ZM.)

4.1. Główne osiągnięcie – cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych

Izotopy neodymu jako wskaźnik składu i pochodzenia fluidów w kopalnych wyciekach metanu

Na główne osiągnięcie naukowe składają się cztery recenzowane artykuły naukowe, przygotowane i opublikowane po otrzymaniu przeze mnie stopnia doktora. Wszystkie artykuły zostały opublikowane w czasopismach indeksowanych przez Journal Citation Reports; we wszystkich przypadkach byłem pierwszym i korespondencyjnym autorem publikacji. Mój wkład w prace został podsumowany w podrozdziale 4.1.3 oraz, z podziałem na poszczególne artykuły, opisany szczegółowo w załączonym *Wykazie osiągnięć* i stosownych oświadczeniach.

[A1] JAKUBOWICZ M., DOPIERALSKA J., KAIM A., SKUPIEN P., KIEL S., BELKA Z. 2019. Nd isotope composition of seep carbonates: towards a new approach for constraining subseafloor fluid circulation at hydrocarbon seeps. *Chemical Geology*, 503, 40–51, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.10.015.

Punkty MEiN: 140; IF: 4,015

[A2] JAKUBOWICZ M., KIEL S., GOEDERT J., DOPIERALSKA J., BELKA Z. 2020. Fluid expulsion system and tectonic architecture of the incipient Cascadia convergent margin as revealed by Nd, Sr and stable isotopic composition of mid-Eocene methane seep carbonates. *Chemical Geology*, 558, 119872, doi: 10.1016/j.chemgeo.2020.119872.

Punkty MEiN: 140; IF: 4,015

[A3] JAKUBOWICZ M., AGIRREZABALA L., DOPIERALSKA J., KAIM A., SIEPAK M., BELKA Z. 2021. The role of magmatism in hydrocarbon generation in sedimented rifts: a Nd isotope perspective from mid-Cretaceous methane-seep deposits of the Basque-Cantabrian Basin, Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 303, 223–248, doi: 10.1016/j.gca.2021.03.025.

Punkty MEiN: 200; IF: 5,010

[A4] JAKUBOWICZ M., AGIRREZABALA L., BELKA Z., SIEPAK M., DOPIERALSKA J. 2022. Sr–Nd isotope decoupling at Cretaceous hydrocarbon seeps of the Basque-Cantabrian Basin (Spain): implications for tracing volcanic-influenced fluids in sedimented rifts. *Marine and Petroleum Geology*, 135, 105430, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105430.

Punkty MEiN: 140; IF: 4,348

Wskaźniki naukometryczne

W celu ujednoczenia poniższego zestawienia, współczynniki Impact Factor i punktacja ministerialna dla czasopism zostały podane według stanu z okresu tworzenia wniosku (maj 2022 r.). Dane bibliometryczne dla poszczególnych publikacji zostały podane w załączonym Wykazie osiągnięć.

Liczba publikacji indeksowanych przez JCR/Scopus: 27/28 (w tym pierwszoautorskich: 10/11)

Sumaryczny Impact Factor publikacji: **95,418**

w tym:

- sumaryczny Impact Factor dla cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia (A1–A4): 17,388
- sumaryczny Impact Factor publikacji pierwszoautorских: 43,135

Suma punktów MEiN: **3260**

w tym:

- suma punktów MEiN dla cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia (A1–A4): 620
- suma punktów MEiN dla publikacji pierwszoautorских: 1500

Suma cytowań publikacji (na dzień 30.05.2022):

- Scopus: **272** (bez autocytowań: **207**; cytowania publikacji pierwszoautorских: 153)
- Web of Science: **259**
- Google Scholar: **295**

Indeks Hirscha (na dzień 30.05.2022):

- Scopus: **11**
- Web of Science: **11**
- Google Scholar: **12**

4.1.1. Wstęp

Podmorskie wsięki metanu

Wsięki metanu (ang. *methane seeps*), zwane również „chłodnymi wsiękami” (*cold seeps*; propozycja polskich odpowiedników angielskich terminów została opracowana przez Jakubowicza, 2012) są miejscami na dnie morskim, w których dochodzi do naturalnego wypływu stosunkowo chłodnych (zwykle kilka °C) roztworów zdominowanych przez węglowodory (najczęściej metan; Paull i in., 1984; Joye i in., 2020). Miejsca te, znane przede wszystkim z rozwoju unikalnych, bogatych ekosystemów opartych na chemosyntezie (Tunnicliffe i in., 2003; Kiel i Tyler, 2010), reprezentują jednocześnie jedno z najbardziej szczególnych środowisk wytrącania się autigenicznych minerałów węglanowych. Wapienie wsiękowe powstają na znacznych głębokościach, często pomimo obecności podwyższonych stężeń siarkowodoru i nierzadko poniżej głębi kompensacyjnej zarówno aragonitu, jak i kalcytu (Greinert i in., 2002; Luff i in., 2004). To nietypowe środowisko sedymentacyjne znajduje odzwierciedlenie w swoistym zestawie cech petrologicznych i geochemicznych wapieni wsiękowych, sprawiając jednocześnie, że stanowią one cenne archiwum wiedzy o złożonych procesach geologicznych i biologicznych, które prowadzą do ich powstawania (Campbell i in., 2002; Peckmann i Thiel, 2004).

Wsięki metanu występują najczęściej wzdłuż krawędzi kontynentów, przede wszystkim w basenach osadowych z wysokim tempem akumulacji materii organicznej, aktywnej tektonice (również solnej), a często także podwyższonym gradiencie geotermicznym (Campbell, 2006; Suess, 2014). W trakcie mieszania się bogatych w metan fluidów z bogatą w jony siarczanowe wodą morską, metan jest wykorzystywany jako źródło energii w beztlenowych procesach redukcji i utleniania, przeprowadzanych przez chemosyntetyczne mikroorganizmy – zespoły metanotroficznych archeanów i bakterii redukujących siarczany (Knittel i Boetius, 2009):



Proces ten, znany jako beztlenowe utlenianie metanu, stanowi podstawę rozwoju ekosystemów rozwijających się wokół „zimnych wysięków”. Oprócz mikroorganizmów, najbardziej charakterystyczne dla tego typu środowisk są bardzo bogate, jednak gatunkowo mało zróżnicowane, w dużej mierze endemiczne zespoły bentonicznych bezkręgowców (przede wszystkim małży, wieloszczetów i ślimaków), które do odżywiania wykorzystują bliskie symbiozy z mikroorganizmami utleniającymi metan lub siarczki (Levin, 2005; Dubilier i in., 2008).

Z unikalnym charakterem i bogactwem ekosystemów wysięków metanu związane jest znaczne zainteresowanie problematyką ewolucji tego typu biocenoz. Pierwsze kopalne ekosystemy wysiękowe opisano pod koniec lat 80-tych XX wieku (Beauchamp i in., 1989), w zaledwie kilka lat po odkryciu pierwszych aktywnych wysięków metanu na dnie Zatoki Meksykańskiej (Paull i in., 1984). Prace paleontologiczne przyczyniły się jednocześnie do intensyfikacji badań nad charakterystyką petrologiczną i geochemiczną wapieni wysiękowych, mających na celu określenie kryteriów umożliwiających identyfikację dawnych środowisk tego typu (Campbell, 2006). Obecnie udokumentowany zapis kopalny ekosystemów wysiękowych sięga górnego syluru (Jakubowicz et al., 2017). Badania ostatniej dekady wykazały, że już najstarsze, środkowopaleozoiczne wysięki metanu przypominały swoje współczesne odpowiedniki zarówno pod względem charakterystyki geologicznej, jak i typu zamieszkujących je biocenoz (Hryniewicz i in., 2017; Jakubowicz i in., 2017).

Z geologicznego punktu widzenia, najistotniejszym następstwem utleniania metanu na drodze redukcji siarczanów jest znaczny wzrost alkaliczności środowiska, czemu towarzyszy wytrącanie węglanu wapnia. Z uwagi na ograniczenie tego procesu do środowisk beztlenowych, wapienie wysiękowe powstają przede wszystkim w przestrzeniach porowych osadu, w formie soczew, buł lub drobno rozproszonych nodulek ze znaczną domieszką minerałów ilastych (Greinert i in., 2001; Peckmann i Thiel, 2004; Naehr i in., 2007). Drogi migracji roztworów ulegają przy tym stopniowym zmianom; efekt ten jest potęgowany przez znaczną, czasową i przestrzenną zmiennością warunków utleniająco-redukcyjnych, związaną z wahaniami składu i tempa przepływu fluidów. W wyniku tego sekwencja paragenetyczna wapieni wysiękowych jest często bardzo złożona, obejmując znaczną różnorodność tekstur i mineralogii, występowanie struktur pochodzenia mikrobiального, kryształów pirytu, powierzchni korozji i/lub pustek z rozpuszczania (np. Beauchamp i Savard, 1992; Agirrezabala, 2009; Hryniewicz i in., 2021). Co bardzo charakterystyczne, wapienie wysiękowe cechują się również szczególnym składem izotopowym węgla. Metan cechuje się bowiem bardzo silnym względnym zubożeniem w cięższy izotop węgla, ^{13}C (Whiticar, 1999), w związku z czym węglany wytrącające się na skutek jego utleniania wykazują najczęściej bardzo lekki skład izotopowy węgla (wartości parametru $\delta^{13}\text{C}$ pomiędzy -70 a -15% V-PDB; Peckmann i Thiel, 2004; Campbell, 2006). Pozwala to na jednoznaczne odróżnienie wapieni wysięków metanu od węglanów wytrącających się wprost z wody morskiej ($\delta^{13}\text{C} \approx 0\%$ V-PDB).

Motywacja

Dzięki przybliżonym powyżej swoistym cechom petrologicznym i geochemicznym, a często także obecności charakterystycznych skamieniałości, rozpoznawanie wapieni wysięków metanu zazwyczaj nie nastręcza trudności. Problemy związane z obserwacjami i opróbowywaniem współczesnych wysięków metanu, wynikające z ich głębokomorskiego położenia, sprawiają jednak, że szczegółowe tło środowiskowe powstawania wapieni wysiękowych pozostaje niedostatecznie zrozumiane. Ponieważ wapienie te tworzą się przede wszystkim w obrębie osadu, dla współczesnych wysięków wgląd w pochodzenie, drogi migracji i ewolucję chemiczną roztworów jest niezwykle utrudniony. Problem ten może być częściowo rozwiązany dzięki badaniom kopalnych wysięków metanu, które dają możliwość bezpośredniego opróbowania nie tylko wychodni samych wapieni, ale nierzadko również głębokich części dawnych systemów zasilania danych wysięków (np. Nyman et al., 2010; Agirrezabala, 2015). W takich przypadkach skład przepływających

roztworów odtwarzany jest na podstawie analiz powstałych faz mineralnych, w tym przede wszystkim – autigenicznych węglanów. Ponieważ w przypadku większości systemów izotopowych wytrącaniu węglanów albo nie towarzyszy frakcjonowanie izotopowe, albo też efekt ten może być oszacowany, analizy tego typu pozwalają na bezpośrednie powiązanie składu geochemicznego skał z charakterystyką przepływających fluidów.

Oprócz dostępności odpowiednich „archiwów” mineralnych, fragmentaryczny stan wiedzy na temat pochodzenia i dróg migracji fluidów odzwierciedla również ogólne ograniczenia metod geochemicznych tradycyjnie wykorzystywanych w badaniach wysięków metanu. Stosunki izotopów węgla, wykorzystywane jako główny test w rozpoznawaniu wapieni wysiękowych, są również wykorzystywane do określenia, czy dany metan powstał na skutek bakteryjnej metanogenezy (niższe wartości $\delta^{13}\text{C}$), czy też termogenicznego rozpadu materii organicznej (zazwyczaj cięższy skład izotopowy; Peckmann i Thiel, 2004; Campbell, 2006). Interpretacja wyników tego typu analiz jest jednak utrudniona przez frakcjonowanie izotopowe związane z procesami życiowymi organizmów chemosyntetycznych, a także nieznaną proporcję węgla pochodzącego z otaczającej wody morskiej, remineralizacji materii organicznej, osadów dennych i skał podłoża (Formolo, 2004). Same analizy izotopowe węgla mają więc ograniczoną użyteczność w śledzeniu pochodzenia roztworów, a zwłaszcza w odtwarzaniu interakcji ze skałami podłoża, które nie były bezpośrednio związane z generacją metanu. Spośród innych metod geochemicznych stosowanych w badaniach wysięków metanu, stosunkowo często wykorzystywane są metody biomarkerowe, analizy koncentracji pierwiastków pobocznych i śladowych, a także analizy izotopowe tlenu i strontu. Wszystkie te metody mają jednak istotne ograniczenia. Biomarkery umożliwiają identyfikację pozostałości organizmów odpowiedzialnych za utlenianie metanu (Birgel i in., 2008), jednak, ponieważ proces ten jest ograniczony do płytkich wód porowych, metody te nie dają wglądu w genezę i drogi przepływu fluidów. Pierwiastki ziem rzadkich są często wykorzystywane do odtwarzania warunków redoks towarzyszących wytrącaniu się węglanów wysiękowych (Feng i in., 2009), jednak również w tym wypadku uzyskane informacje dotyczą przede wszystkim stosunkowo płytkich części dróg migracji roztworów. Inne z powszechnie wykorzystywanych analiz pierwiastkowych, takie jak pomiary koncentracji Mg, Sr, Mn, Fe, mają znaczenie przede wszystkim w odtwarzaniu pierwotnej mineralogii i wpływu przemian diagenetycznych (Savard i in., 1996; Buggisch i Krumm, 2005), nie dając bezpośrednich informacji o genezie roztworów i budowie geologicznej podłoża. W przypadku izotopów tlenu i strontu głównym problemem są natomiast wysokie koncentracje tych pierwiastków w wodzie morskiej i roztworach diagenetycznych, w związku z czym sygnatury głębokich interakcji ze skałami podłoża są podatne na nadpisywanie najpierw na skutek mieszania z wodą morską w trakcie wytrącania się węglanów, a następnie w trakcie późniejszej diagenety (Banner i Hanson, 1990; Jakubowicz i in., 2022).

Z uwagi na powyższe problemy, bardziej szczegółowe zrozumienie kwestii pochodzenia i ewolucji geochemicznej roztworów zasilających wysięki metanu wymaga poszukiwania nowych, alternatywnych metod badawczych, które umożliwiłyby wgląd w głębokie drogi krążenia fluidów w tego typu środowiskach. Wyzwanie to stało się główną motywacją do podjęcia tematyki ujętej w ramy przedłożonego osiągnięcia.

4.1.2. Koncepcja i cele pracy

Podstawowym celem cyklu publikacji tworzących przedstawione osiągnięcie naukowe (artykuły A1–A4) była ocena potencjału nowego narzędzia, składu izotopowego neodymu (Nd), do odtwarzania pochodzenia i dróg migracji roztworów w środowiskach podmorskich wysięków metanu. Wszystkie przedłożone prace zostały zrealizowane w ramach projektu programu Sonata Narodowego Centrum Nauki nr 2016/23/D/ST10/00444 („Izotopy neodymu jako wskaźnik składu i pochodzenia fluidów w kopalnych wysiękach metanu”; sierpień 2017 – lipiec 2022), którego jestem kierownikiem. Tożsamość tematyki projektu z tematyką osiągnięcia przedłożonego w niniejszym postępowaniu habilitacyjnym było zamierzona od

momentu przygotowywania projektu, dzięki czemu osiągnięcie ma charakter spójnego tematycznie zestawu uzupełniających się, wynikających z siebie publikacji.

Stosunki izotopowe Nd należą do najszerzej wykorzystywanych narzędzi śledzenia cyrkulacji wód oceanicznych, zarówno w przypadku współczesnych, jak i dawnych oceanów (van de Fliertd i in., 2016; Tachikawa i in., 2017). Stosunki te są zazwyczaj wyrażane w formie znormalizowanej do stosunku obecnego w standardzie, jako parametr ϵ_{Nd} :

$$\epsilon_{Nd} = \frac{\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_{sample} - \left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_{CHUR}}{\left(\frac{^{143}Nd}{^{144}Nd}\right)_{CHUR}} \times 10^4$$

gdzie CHUR (ang. *Chondritic Uniform Reservoir*) odnosi się do wykorzystywanego standardu – ujednoczonego chondrytu, o składzie uważanym za odpowiadający uśrednionemu składowi izotopowemu Ziemi (Jacobsen i Wasserburg, 1980). Głównymi zaletami systemu izotopowego Nd, umożliwiającymi jego szerokie zastosowanie w badaniach systemów hydro(geo)logicznych, są stosunkowo krótki czas rezydencji Nd w wodzie morskiej (360–700 lat, przy średnim czasie mieszania wód oceanicznych równym 1500 lat; Tachikawa i in., 2017) oraz brak frakcjonowania izotopowego towarzyszącego procesom biologicznym i wytrącaniu się minerałów. Dzięki krótkiemu czasowi rezydencji Nd, skład izotopowy Nd wód oceanicznych wykazuje dużą zmienność przestrzenną i czasową, która kontrolowana jest głównie przez interakcje pomiędzy wodą i ziarnami mineralnymi dostarczanymi przez wietrzenie skorupy kontynentalnej (Lacan i in., 2012; Jeandel, 2016). Kluczową rolę odgrywa tutaj duże zróżnicowanie składu izotopowego Nd skał budujących skorupę ziemską. W związku z niekompatybilnym zachowaniem Nd w trakcie przemian fazowych na granicy płaszcz i skorupy ziemskiej, skorupa kontynentalna wykazuje silne względne wzbogacenie w izotop ^{144}Nd , skorupa oceaniczna natomiast – wzbogacenie w izotop ^{143}Nd , powstający na drodze rozpadu radioaktywnego izotopu samaru ^{147}Sm – mniej niekompatybilnego, niż Nd. Na skutek tego skały skorupy kontynentalnej, a także skały okrucowe powstające w wyniku ich wietrzenia cechują się niskimi stosunkami $^{143}Nd/^{144}Nd$ (silnie ujemne wartości ϵ_{Nd} , od -20 do -9), natomiast zasadowe skały magmowe – wysokimi wartościami $^{143}Nd/^{144}Nd$ (dodatnie wartości ϵ_{Nd} , od $+4$ do $+13$; Shaw i Wasserburg, 1985; Goldstein i Jacobsen, 1988). Interakcje pomiędzy fazami mineralnymi o różnym składzie izotopowym Nd i krążącymi fluidami znajdują następnie odzwierciedlenie w zmianach sygnatur izotopowych wód i wytrącających się z nich minerałów autigenicznych, umożliwiając odtwarzanie dróg migracji roztworów (Jones i in., 2008; Elmore i in., 2011; Wilson i in., 2013).

Pomimo szerokiego wykorzystania izotopów Nd do śledzenia cyrkulacji oceanicznej i krążenia fluidów w systemach hydrotermalnych (np. Piepgras i Wasserburg, 1985; Chavagnac i in., 2018), system ten był dotąd bardzo rzadko wykorzystywany w badaniach wysięków metanu. Do momentu rozpoczęcia prac nad przedłożonym cyklem artykułów, izotopy Nd zostały wykorzystane zaledwie w dwóch pracach dotyczących współczesnych wysięków (Bayon i in., 2011; Freslon i in., 2014). W obu tych publikacjach wartości ϵ_{Nd} , zmierzone bezpośrednio we fluidach i w autigenicznych węglanach (Bayon i in., 2011), lub w osadowej materii organicznej (Freslon i in., 2014), okazały się zbliżone do składu otaczającej wody morskiej. Tego rodzaju systematyki izotopowej Nd można oczekiwać w przypadku wielu wysięków metanu, ponieważ powłoki tlenków Fe–Mn na ziarnach mineralnych, stanowiące główne źródło ziem rzadkich dla płytkich wód porowych osadów głębokomorskich, zwykle wykazują wartości ϵ_{Nd} tożsame z otaczającą wodą morską. Badania mające na celu ocenę potencjału izotopów Nd w badaniach pochodzenia roztworów zasilających wysięki metanu powinny więc w pierwszej kolejności być skoncentrowane na wysiękach, w których podłożu występują skały o składzie izotopowym wyraźnie odmiennym od otaczającej wody morskiej. Ponieważ, z uwagi na dominację terygenicznymi źródłami Nd, woda morska w większości basenów przyjmuje niskie, nieradiogeniczne wartości ϵ_{Nd} (średnia globalna ≤ -8 ; Tachikawa et al., 2017), tego typu kontrastu można oczekiwać zwłaszcza w

przypadku wysięków o podłożu zawierającym skały o wysokich, radiogenicznych wartościach ϵ_{Nd} – a więc przede wszystkim zasadowe skały magmowe.

Znane wysięki o tego typu budowie podłoża są stosunkowo rzadkie. Wśród nich, w związku z trudnościami, jakie napotykają badania podłoża współczesnych wysięków, najlepiej udokumentowane są kopalne wysięki obecnie odsłonięte na lądzie (np. Kiel, 2010; Agirrezabala, 2015). Ważną zaletą badań prowadzonych na kopalnych wysiękach jest przy tym możliwość prowadzenia analiz nie tylko dla najpłytszych poziomów węglanów wysiękowych, ale i całego spektrum potencjalnych źródeł Nd obecnych w podłożu. Oprócz braku frakcjonowania izotopowego Nd w trakcie wytrącania się minerałów węglanowych, ich szczególna wartość jako archiwów sygnałów ϵ_{Nd} dawnych fluidów wiąże się z bardzo niską podatnością sygnatur izotopowych Nd na wtórne zmiany diagenetyczne (Banner i Hanson, 1990; Martin i Scher, 2004). W pierwszej pracy, w której wykorzystano izotopy Nd do badania kopalnych wysięków metanu, zespołowi pod moim kierunkiem (Jakubowicz i in., 2015a) udało się udokumentować względne wzbogacenie wapieni dewońskiego wysięku (tzw. kopca Hollarda, AntyAtlas, Maroko) w izotop ^{143}Nd , z wartościami ϵ_{Nd} węglanów wyraźnie wyższymi od sygnatur ówczesnej lokalnej wody morskiej. Fakt ten został w naszej pracy zinterpretowany jako efekt interakcji pomiędzy przepływającymi fluidami i zasadowymi skałami wulkanoklastycznymi, obecnymi w podłożu badanego wysięku. Praca wskazała wstępnie na potencjał izotopów Nd w badaniach wysięków metanu, stając się punktem wyjścia do sformułowania problemu badawczego podjętego w ramach przedłożonego osiągnięcia. Bardziej szczegółowa interpretacja dawnych interakcji pomiędzy przepływającymi roztworami i skałami podłoża była jednak dla kopca Hollarda utrudniona przez złożoną budowę geologiczną obszaru badań, a w szczególności – obecność mięszszego pakietu skał osadowych, położonego pomiędzy horyzontem wapieni wysiękowych i kompleksem skał wulkanoklastycznych. Neodym dostarczany do przepływających roztworów na skutek interakcji ze skałami osadowymi musiał więc częściowo zamaskować sygnatury pierwotnych interakcji pomiędzy fluidami i wulkanoklastykami, uniemożliwiając dokładne oszacowanie udziału Nd pochodzącego z różnych źródeł.

Aby zminimalizować rolę tego rodzaju niejasności interpretacyjnych, koncepcja przedłożonego cyklu publikacji została sformułowana w taki sposób, aby ocenę przydatności izotopów Nd w badaniach wysięków metanu rozpocząć od jedyne go znanego obecnie wysięku metanu, który rozwinął się bezpośrednio na podłożu zbudowanym z zasadowych skał wulkanicznych: kredowego wysięku odsłoniętego w miejscowości Baška w czeskich Karpatach Zewnętrznych. Badania na wysięku o tego typu, stosunkowo prostej budowie geologicznej miało umożliwić ogólne zrozumienie wpływu interakcji pomiędzy fluidami a skałami magmowymi na wartości ϵ_{Nd} wapieni wysiękowych, a także relacji pomiędzy składem izotopowym Nd a danymi z innych systemów izotopowych. Następnym krokiem miało być natomiast przetestowanie potencjału izotopów Nd w węglanach wysiękowych pod kątem rozwiązywania konkretnych problemów dotyczących budowy geologicznej aktywnych i pasywnych krawędzi kontynentalnych, w tym – dla systemów wysiękowych o znacznie bardziej złożonej budowie geologicznej.

Główne cele przedstawionego cyklu publikacji można podsumować następująco:

- 1) Rozpoznanie ogólnego zachowania się Nd w środowiskach wysięków metanu, w tym relacji pomiędzy składem izotopowym Nd wapieni wysiękowych, różnych skał obecnych w podłożu i wody morskiej, w celu oceny wrażliwości sygnatur ϵ_{Nd} fluidów na zmiany w trakcie interakcje ze skałami i mieszaniami z otaczającymi wodami porowymi;
- 2) Porównanie informacji dostarczanych przez izotopy Nd z danymi zapewnianymi przez inne systemy geochemiczne: izotopy Sr, C i O, a także analizy koncentracji pierwiastków pobocznych i śladowych;
- 3) Ocena, na wybranych przykładach, możliwości wykorzystania izotopów Nd w badaniach problematycznych aspektów geologii i ewolucji tektonicznej basenów sedymentacyjnych, w obrębie których dane wysięki się rozwinęły.

Szczegółowe cele badawcze, dotyczące kwestii zasygnalizowanych w punkcie 3, zostały przedstawione w podrozdziałach poświęconych poszczególnym publikacjom.

4.1.3. Opis osiągnięcia – wyniki badań

Założone cele przedłożonego cyklu artykułów zrealizowano na podstawie badań dziewięciu kopalnych wysięków metanu, położonych w obrębie trzech basenów sedymentacyjnych o różnym wieku i środowisku geotektonicznym. Obszary badań zostały dobrane w taki sposób, aby w podłożu wysięków występowały bądź potwierdzone, bądź domniemane zasadowe skały magmowe, stanowiące potencjalne źródło Nd wzbogaconego w radiogeniczny izotop ^{143}Nd . Wszystkie badane baseny sedymentacyjne reprezentują młode krawędzie kontynentalne poddane intensywnej działalności tektonicznej. Dwa z nich powstały w obrębie krawędzi pasywnych: wczesnych kontynentalnych ryftów, w których dochodziło do intruzji magmowych w miąższe, bogate w substancje organiczne pakiety osadowe (artykuły A1 i A3–A4). Trzeci obszar reprezentuje natomiast krawędź konwergentną na inicjalnym etapie swojego rozwoju (artykuł A2). W celu pełniejszego zrozumienia znaczenia obserwowanego składu izotopowego, w przedstawionych badaniach analizy izotopowe Nd uzupełniono o dane z innych systemów geochemicznych, razem dając szeroki wgląd w genezę metanu i interakcje fluidów ze skałami podłoża. Wyniki badań mają istotne implikacje zarówno dla zrozumienia ewolucji tektonicznej badanych basenów sedymentacyjnych, jak i w kontekście metodologicznym, ukazując, że izotopy Nd stanowią bardziej precyzyjne narzędzie odtwarzania interakcji pomiędzy fluidami i skałami magmowymi niż inne, dotychczas powszechniej wykorzystywane metody geochemiczne.

We wszystkich pracach tworzących przedłożony zestaw publikacji byłem autorem wiodącym i korespondencyjnym. Byłem odpowiedzialny za ogólną koncepcję artykułów, wybór obszarów badań, a także dobór metod badawczych. Jako kierownik projektu Sonata NCN nr 2016/23/D/ST10/00444 pozyskałem również środki na sfinansowanie większości prac terenowych i laboratoryjnych ujętych w ramach przedstawionych badań. Wraz ze współautorami prac przeprowadziłem prace terenowe. Byłem odpowiedzialny za obserwacje petrograficzne, selekcję prób do analiz geochemicznych, a następnie, wspólnie z pozostałymi autorami z Pracowni Izotopowej UAM, za prace analityczne obejmujące pomiary izotopowe Nd i Sr. Następnie przeprowadziłem interpretację pozyskanych wyników w kontekście potencjalnych źródeł fluidów i budowy geologicznej badanych obszarów. Byłem również odpowiedzialny za przygotowanie przeważającej części manuskryptów i rycin, a następnie za kontakt z redakcją, większość poprawek oraz odpowiedzi na komentarze recenzentów. W formie szczegółowej w odniesieniu do poszczególnych prac, wkład mój oraz współautorów został przedstawiony w *Wykazie Osiągnięć* i w załączonych oświadczeniach.

Metodyka

Prace terenowe w ramach prezentowanych badań zostały przeprowadzone w latach 2017–2019 (2017: artykuły A3–A4; 2018: artykuł A1; 2019: artykuł A2). Dodatkowo, do analiz wykorzystano również próbki zebrane w ramach prac prowadzonych we wcześniejszych latach przez współautorów artykułów (A1: prof. A. Kaim, dr P. Skupien; A2: dr S. Kiel, dr J. Goedert; A3–A4: dr L. Agirrezabala).

Większość analiz laboratoryjnych przeprowadzonych w ramach przedłożonego osiągnięcia wykonano na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza. W celu poznania cech teksturalnych i ewentualnych zmian diagenetycznych w badanych fazach węglanowych, przed analizami geochemicznymi wykonałem szczegółowe obserwacje petrograficzne na płytkach cienkich i zgładach. Badania te obejmowały standardową mikroskopię świetlną, zarówno w świetle przechodzącym, jak i odbitym, a także, dla wybranych próbek, mikroskopię katodoluminescencyjną (urządzenie Cambridge Luminoscope System CITL 8200 mk3, typ „zimnej katody”).

Wszystkie analizy izotopowe i pomiary zawartości pierwiastków śladowych wykonano na sproszkowanych próbkach skalnych pobranych z wykorzystaniem mikrowiertarki i mikroskopu stereoskopowego. Koncentracje izotopów Nd (artykuły A1–A3) i Sr (artykuły A1, A2, A4) zostały oznaczone przy pomocy termojonizacyjnego spektrometru masowego Finnigan MAT 261 w Pracowni Izotopowej (do końca 2020 roku: Laboratorium Izotopowym) UAM. Próbkki wapieni zostały rozpuszczone z wykorzystaniem 5%, ultraczystego kwasu octowego, według procedury zaproponowanej przez Rongemaille i in. (2011; szczegółowe uzasadnienie wyboru procedury zostało ujęte w artykule A4). Fosforanowe fragmenty ryb i skały wulkaniczne zostały rozpuszczone odpowiednio przy pomocy stężonego kwasu azotowego oraz mieszaniny kwasów fluorowodorowego i azotowego. Pomiary stosunków izotopowych przeprowadzono według procedur opisanych przez Pina i in. (1994), Fanton i in. (2002) i Dopieralską (2003). Względne zawartości izotopów Nd przedstawiono jako $\epsilon_{Nd}(t)$, przyjmując stosunki $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512638$ i $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1967$ dla standardu CHUR (Jacobsen i Wasserburg, 1980) i stosując korektę uwzględniającą wiek węglanów (wzbogacenie w ^{143}Nd na skutek radioaktywnego rozpadu ^{147}Sm). Szczegóły procedur pomiarowych i normalizacji wyników zostały opisane w artykułach A1–A4.

Koncentracje pierwiastków pobocznych i śladowych (artykuł A3: ziemie rzadkie i Ba; artykuł A4: Mg, Al, Mn, Fe, Th, Sr i Rb) oznaczono metodą spektrometrii mas ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej z potrójnym analizatorem kwadrupolowym (ICP-MS-QQQ). Preparatyka próbek została wykonana w Pracowni Izotopowej UAM w sposób analogiczny do postępowania w przypadku analiz izotopowych Nd i Sr. Część analityczna pomiarów została wykonana w Laboratorium Hydrogeochemicznym UAM przez dra Marcina Siepaka.

Pomiary koncentracji izotopów stabilnych zostały przeprowadzone na zlecenie w Laboratorium Izotopów Stabilnych w GeoZentrum Nordbayern (Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg). Analizy wykonano przy wykorzystaniu standardowych metod za pomocą zautomatyzowanego systemu próbkowania Gasbench II i spektrometru masowego ThermoFinnigan Five Plus. Wyniki podane są w standardowym zapisie δ , w promilach względem standardu V-PDB.

Artykuł A1

JAKUBOWICZ M., DOPIERALSKA J., KAIM A., SKUPIEN P. KIEL S., BELKA Z. 2019. Nd isotope composition of seep carbonates: towards a new approach for constraining subseafloor fluid circulation at hydrocarbon seeps. *Chemical Geology*, 503, 40–51.

Głównym celem pierwszej z prac wchodzących w skład przedłożonego osiągnięcia była wstępna ocena potencjału analiz izotopowych Nd do odtwarzania interakcji pomiędzy przepływającymi, bogatymi w metan fluidami a skałami wulkanicznymi obecnymi w podłożu wysięków metanu. Do tego celu wybrano dolnokredowy (barrem; ~125 Ma) wysięk metanu odsłonięty w okolicy miejscowości Baška w zachodnich Karpatach Zewnętrznych (Czechy). Wysięk Baška powstał w pobliżu centralnej części basenu śląskiego – stosunkowo wąskiego, głębokiego ryftu kontynentalnego położonego w mezozoiku w północnej części Oceanu Pienińsko-Magurskiego (północno-wschodni skraj Alpejskiej Tetydy; Golonka i in., 2006). Ryft śląski nie osiągnął nigdy stadium dojrzałego spreadingu oceanicznego, jednak wczesnokredowa ekstensja skorupy kontynentalnej zaznaczyła się na tym obszarze intensywną działalnością wulkaniczną (Dostal i Owen, 1998; Szopa i in., 2014). Z obecnością wulkanitów związana jest szczególna budowa geologiczna podłoża wysięku Baška: jest to jedyny znany obecnie przykład wapieni wysiękowych spoczywających niemal bezpośrednio na miększym pakiecie zasadowych skał wulkanicznych (tzw. cieszynitów; Włodyka, 2010). Badania na tego typu wysięku, o dobrze rozpoznanym podłożu, dają więc możliwość stosunkowo jednoznacznej oceny, czy przepływ bogatych w metan roztworów przez skały wulkaniczne znalazł odzwierciedlenie w formie radiogenicznych stosunków izotopowych Nd wapieni wysiękowych.

W celu pełniejszego zrozumienia pochodzenia fluidów i porównania zachowania się różnych systemów geochemicznych, oprócz pomiarów izotopowych Nd badane próbki węglanów wysiękowych zostały poddane analizom izotopowym Sr, C i O. Dodatkowo, pomiary izotopowe Nd i Sr objęły próbki cieszynitów pobranych z bezpośredniego otoczenia wysięków. Z uwagi na krótki czas rezydencji Nd i związaną z tym znaczną zmienność przestrzenną i czasową sygnatur ϵ_{Nd} wody morskiej, elementem niezbędnym w każdej pracy dotyczącej kopalnych wysięków metanu jest również ustalenie składu izotopowego Nd otaczających płytkich, nie-wysiękowych wód porowych. Dzięki wysokiej odporności biogenicznych fosforanów na zmiany diagenetyczne, dla skał mezozoicznych i kenozoicznych preferowanym archiwum są najczęściej fosforanowe elementy szkieletowe ryb (zęby, kości i łuski; Martin i Scher, 2004). Podobnie, w przedłożonej pracy jako archiwum sygnatury izotopowej „tła” wykorzystano łuski ryby pochodzącej z równowiekowych osadów odsłoniętych w pobliżu badanych wapieni wysiękowych.

Wszystkie analizowane próbki węglanów wysiękowych wykazują stosunkowo wysokie wartości ϵ_{Nd} (-5,7 do -0,1), wyraźnie wyższe do sygnału zrekonstruowanego dla otaczających wód porowych ($\epsilon_{Nd} = -7,6$) i przesunięte w kierunku sygnatur zmierzonych w cieszynitach ($\epsilon_{Nd} = +5,5$ do $+5,8$). Szczególnie radiogeniczne wartości ϵ_{Nd} zmierzono w silnie scementowanych częściach konkrecji. Pomiary izotopowe Sr, narzędzie również często wykorzystywane do odtwarzania interakcji pomiędzy roztworami a skałami wulkanicznymi (por. artykuł A4), dały obraz spójny z analizami neodymowymi: najniższe wartości, najbliższe sygnaturom zmierzonym w wulkanitach ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7035-0,7042$), zostały zmierzone w najsilniej zlyfikowanych węglanach wysiękowych ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7066-0,7069$). Mniej scementowane części konkrecji dały większą rozpiętość wartości $^{87}Sr/^{86}Sr$, z których część jest mniej, natomiast część bardziej radiogeniczna niż sygnał barremskiej wody morskiej ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7074-0,7075$; Jones i Jenkyns, 2001). W tym drugim przypadku skład izotopowy Sr wapieni wysiękowych może odzwierciedlać wpływ interakcji pomiędzy przepływającymi roztworami a drobnoziarnistymi skałami okrucowymi, w obrębie których powstały badane konkrecje wysiękowe. Biorąc jednak pod uwagę stosunkowo dużą podatność sygnatur izotopowych Sr w węglanach na wtórne zmiany diagenetyczne, obserwowane wysokie stosunki izotopowe mogą również częściowo odzwierciedlać przesunięcie pierwotnych wartości na skutek interakcji z późnymi, bogatymi w ^{87}Sr roztworami diagenetycznymi.

Skład izotopowy C cechuje się umiarkowanym stopniem wzbogacenia w lżejszy izotop węgla (^{12}C ; $\delta^{13}C \geq -28,4\%$), potwierdzając wysiękową genezę konkrecji węglanowych i sugerując termogeniczne pochodzenie metanu ($\delta^{13}C_{m.termogeniczny} = -20$ do -50% ; Schoell, 1988). Interpretacja ta jest zgodna ze środowiskiem tektonicznym obszaru badań, w którym intruzje magmowe, a także prawdopodobnie podwyższony gradient geotermiczny w obrębie młodego, kontynentalnego ryftu umożliwiły stosunkowo szybki rozpad termiczny materii organicznej w wypełniających ryft skałach osadowych. Dane te potwierdzają równocześnie głębokie pochodzenie metanu, który musiał migrować ku powierzchni przez kompleks cieszynitowy.

Zarówno izotopy Nd, jak i izotopy Sr w węglanach wysięku Baška dają jednoznaczne świadectwo interakcji pomiędzy przepływającymi roztworami a zasadowymi wulkanitami kompleksu cieszynitowego. W porównaniu z innymi wysiękami metanu, dla których przeprowadzono równoczesne analizy izotopowe Nd, Sr i C (artykuły A2–A4), relacje pomiędzy różnymi systemami izotopowymi są w tym przypadku wyjątkowo dobrze zachowane. Znaczna części obserwowanej zmienności może być wyjaśniona jako efekt prostego mieszania pomiędzy dwiema generacjami węglanowych cementów, wytrącanych z dwóch rodzajów roztworów: głębokich, bogatych w metan fluidów i otaczających wód porowych. Kluczową rolę odegrała tu najwyraźniej bardzo niewielką miąższość iłowców, które oddzielają wapienie wysiękowe od niżejleżących wulkanitów, dzięki czemu sygnatury interakcji z cieszynitami nie zostały w roztworach zmienione przez późniejsze interakcje ze skałami osadowymi. Dobrze zachowany związek pomiędzy wysokimi wartościami ϵ_{Nd} , niskimi wartościami $^{87}Sr/^{86}Sr$ i niskimi wartościami $\delta^{13}C$ wskazuje na rosnący udział wulkanogenicznego Nd i Sr wraz z rosnącym udziałem metanu, potwierdzając migrację metanu z utworów poniżej kompleksu cieszynitów a także, pośrednio, termogeniczną genezę węglowodorów.

Wyniki pracy A1 pozwoliły na lepsze zrozumienie roli, jaką interakcje ze skałami podłoża mogą odgrywać w kształtowaniu składu roztworów wypływających w wysiękach metanu. Wyniki te mają również ogólne implikacje dla zrozumienia czynników wpływających na ewolucję geochemiczną wód porowych osadów. W przypadku wysięków metanu, wyniki badań wysięku Baška potwierdziły potencjał izotopów Nd jako nowego, czułego narzędzia odtwarzania dróg migracji roztworów, szczególnie dla obszarów, gdzie w podłożu występują zasadowe skały magmowe lub osady wulkanoklastyczne. Przewaga izotopów Nd nad innymi metodami, które mogą służyć do śledzenia interakcji pomiędzy fluidami i skałami wulkanicznymi (izotopy Sr, analizy koncentracji ziem rzadkich) polega przy tym na ich zarówno wyjątkowo niewielkiej wrażliwości na wpływ diagenety, jak i na braku istotnych problemów analitycznych utrudniających interpretację otrzymanych wyników (por. Dulski, 1994; Shields i Stille, 2001; Jakubowicz i in., 2015a). Artykuł A1 stał się punktem wyjścia do dalszych prac, poświęconych zastosowaniu izotopów Nd w badaniach geologii i dawnych systemów hydrogeologicznych wybranych basenów osadowych (prace A2 i A3), a także bardziej szczegółowemu porównaniu potencjałów izotopów Nd i izotopów Sr (praca A4).

Artykuł A2

JAKUBOWICZ M., KIEL S., GOEDERT J., DOPIERALSKA J., BELKA Z. 2020. Fluid expulsion system and tectonic architecture of the incipient Cascadia convergent margin as revealed by Nd, Sr and stable isotopic composition of mid-Eocene methane seep carbonates. *Chemical Geology*, 558, 119872.

Pierwszy z artykułów, w których podjęto próbę wykorzystania analiz izotopowych Nd w wapieniach wysiękowych do zrozumienia ewolucji tektonicznej krawędzi kontynentalnych dotyczyła składu izotopowego wysięków metanu środkowoeoceńskiej (42,5–40,5 Ma) formacji Humptulips (Góry Olimpijskie, stan Waszyngton, Stany Zjednoczone). Są to najstarsze znane obecnie wysięki metanu kaskadyjskiej strefy subdukcji (ang. *Cascadia margin*), głównego systemu subdukcyjnego północno-wschodniego Pacyfiku, aktywnego wzdłuż wybrzeża Ameryki Północnej od eocenu do dzisiaj. Kaskadyjska strefa subdukcji wyróżnia się kilkoma swoistymi cechami budowy geologicznej i rodzaju samej subdukcji: wybitnie akrecyjnym charakterem (zdecydowana większość osadów płyty dolnej jest z niej zdzierana, tworząc rozległą pryzmę akrecyjną), bardzo niskim kątem subdukcji, młodym wiekiem subdukowanej skorupy oceanicznej i związanym z tym wysokim gradientem geotermiczny, a także obecnością szczególnie licznych wysięków metanu (Kulm i in., 1986; Trehu i in., 1994). Obszar ten wyróżnia się również bardzo złożoną historią geologiczną. Powstanie wysięków metanu formacji Humptulips przypada na kluczowy okres reorganizacji systemu subdukcyjnego północno-wschodniego Pacyfiku, która nastąpiła po amalgamacji do Ameryki Północnej nietypowego terranu wulkanicznego, tzw. Siletzii, we wczesnym eocenie (50–45 Ma; Wells i in., 2014; Phillips i in., 2017). Kaskadia reprezentuje tym samym jeden z rzadkich przykładów młodej, anomalnie miększej (10–30 km) skorupy oceanicznej, która nie uległa subdukcji i ostatecznie doprowadziła do zablokowania rowu oceanicznego. Wydarzenie to doprowadziło do „przeskoku” subdukcji o ponad 200 km na zachód, inicjując powstanie obecnej kaskadyjskiej krawędzi konwergentnej. Z uwagi na ograniczone odsłonięcia i bardzo złożoną budowę geologiczną eoceńskiego obszaru przedłukowego, wczesna historia tektoniczna Kaskadii pozostaje jednak niedostatecznie zrozumiana. Szczególnie niejasny jest dokładny moment ostatecznego przeskoku subdukcji, który musiał nastąpić pomiędzy akrecją Siletzii (50–45 Ma) a pierwszymi świadectwami aktywności łuku wulkanicznego Gór Kaskadowych (ok. 40 Ma; Chan i in., 2012). Badania wysięków metanu formacji Humptulips, powstałych w trakcie tego kluczowego interwału czasowego, mogą dać więc rzadką okazję do lepszego zrozumienia budowy i historii geologicznej młodej kaskadyjskiej strefy subdukcji. Badania te stanowiły jednocześnie pierwszą próbę oceny potencjału izotopów Nd w wapieniach wysiękowych jako archiwów ewolucji tektonicznej krawędzi konwergentnych.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono pomiary izotopowe Nd, Sr, C i O na wapieniach czterech wysięków metanu formacji Humptulips: wysięków Main, Rauí, East Fork Bridge i Satsop Weatherwax.

Ponieważ formacja Humptulips pozbawiona jest fosforanowych skamieniałości (por. praca A1), jako archiwa składu izotopowego Nd otaczających wód porowych wykorzystano w tym przypadku kalcytowe konkretacje wczesnodiagenetyczne. Wszystkie pomiary izotopowe przeprowadzone na węglanach wysiękowych dały stosunkowo wysokie, radiogeniczne wartości ϵ_{Nd} , w większości znacznie wyższe od sygnatur „tła” zmierzonych w nie-wysiękowych konkretacjach kalcytowych (-2,0 do -1,2) i przesunięte w stronę wartości obecnych w niżejległych wulkanitach terranu Siletzii ($\epsilon_{Nd} = +5,0$ do $+8,1$; Phillips i in., 2017). Wartości ϵ_{Nd} są szczególnie wysokie w przypadku wysięków Satrop Weatherwax i Main, dla których mieszczą się one w przedziale od ~ 0 do niemal $+2$, zbliżając się do najwyższych wartości kiedykolwiek zmierzonych dla wody morskiej ($+2,7$; Grasse i in., 2012). Najmniej radiogeniczny skład izotopowy Nd zaobserwowano w przypadku wysięku East Fork Bridge, dla którego wartości ϵ_{Nd} mieszczą się w przedziale zrekonstruowanym dla nie-wysiękowych wód porowych. Analizy izotopowe Sr wapieni wysiękowych dały obraz spójny z danymi izotopowymi Nd, ukazując nieradiogeniczne stosunki izotopowe $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0,7067–0,7075), wypadające pomiędzy sygnaturą ówczesnej wody morskiej ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7078$; McArthur i in., 2001) a składem wulkanitów Siletzii ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0,7030$ – $0,7038$; Phillips i in., 2017). Oba te systemy jednoznacznie wskazują na dawne interakcje pomiędzy bogatymi w metan roztworami a kompleksem skał wulkanicznych Siletzii, znajdującym się w podłożu wysięków formacji Humptulips.

Stosunki izotopowe węgla w większości badanych wapieni wysiękowych są umiarkowanie ujemne ($\delta^{13}C \geq -25\%$ dla wysięków Main, Rau i East Fork Bridge). Wyjątkiem jest wysięk Satsop Weatherwax, dla którego zaobserwowano znacznie niższe wartości ($\delta^{13}C_{min} = -44,3\%$). Obserwowaną zmienność wartości $\delta^{13}C$ zinterpretowano w pracy jako efekt różnego pochodzenia węglowodorów zasilających poszczególne wysięki formacji Humptulips. W przypadku trzech wysięków o umiarkowanie ujemnych wartościach $\delta^{13}C$, metan był najprawdopodobniej głębokiego, termogenicznego pochodzenia. Ponieważ historia subsydencji eoceńskiego obszaru przedłukowego wyklucza generację metanu termogenicznego w obrębie basenów przedłukowych młodej Kaskadii (por. Johnson i in., 1997; Brownfield, 2011), metan ten musiał pochodzić z głębokich części przyzmy akrecyjnej, a następnie migrować ku powierzchni poprzez skały wulkaniczne tworzące Siletzię. Taki model pochodzenia metanu jest potwierdzony przez skład izotopowy Nd–Sr wapieni wysiękowych, wskazujący na intensywne interakcje pomiędzy przepływającymi fluidami i wulkanitami, a także przez obserwowany związek pomiędzy wartościami ϵ_{Nd} i $\delta^{13}C$, wskazujący, że wzbogacenie w metan było pierwotną cechą roztworów zmienionych przez interakcje z Siletzią. Natomiast w przypadku wysięku Satsop Weatherwax metan był najprawdopodobniej przynajmniej częściowo płytszego, biogenicznego pochodzenia i musiał powstać bądź w przewarstwieniach osadowych obecnych w górnej części Siletzii, bądź w osadach młodych basenów przedłukowych. Interpretacja ta jest spójna z położeniem wysięku Satsop Weatherwax, który zlokalizowany był w eocenie najbliżej linii brzegowej, a więc i źródeł bogatego w substancje organiczne materiału terygenicznego. Również w tym przypadku obecność głębokich roztworów zmienionych przez interakcje z terranem Siletzii pozostaje jednak udokumentowana w formie wysokich wartości ϵ_{Nd} i niskich $^{87}Sr/^{86}Sr$ wapieni wysiękowych; mieszanie pomiędzy „głębokimi” i „płytkimi” składnikami roztworów następowało najprawdopodobniej w stosunkowo płytkiej części systemu zasilania wysięku.

Zgromadzone w ramach artykułu A2 dane Nd, Sr i C wskazują, że już w środkowym eocenie, stosunkowo niedługo (3–7 mln lat) po akrecji Siletzii, system hydrogeologiczny Kaskadii wykazywał cechy charakterystyczne dla krawędzi konwergentnych. Dane te podkreślają przy tym jednak również istotne różnice pomiędzy budową geologiczną eoceńskiej i współczesnej kaskadyjską strefą subdukcji. W eocenie, położenie terranu Siletzii w bezpośrednim sąsiedztwie rowu oceanicznego wymuszało migrację bogatych w termogeniczny metan roztworów bezpośrednio poprzez mięszczy pakiet skał wulkanicznych, czemu sprzyjał dodatkowo ekstensyjny reżim tektoniczny, typowy dla zaczątkowych krawędzi konwergentnych (por. Gurnis, 1992; Schmandt i Humphreys, 2011). Ten zespół czynników był odpowiedzialny za wyjątkowo spójne, „wulkanogeniczne” sygnatury izotopowe Nd i Sr zapisane w badanych wapieni wysiękowych. Natomiast w przypadku współczesnej Kaskadii, wysięki transportujące roztwory silnie zmienione przez interakcje z wulkanitami są znacznie rzadsze, co jest związane z dużą odległością dzielącą Siletzię od rowu oceanicznego,

wynikającą z rozwoju miększej pryzmy akrecyjnej (Kim i in., 2012; Joseph i in., 2012). Na skutek tego to pryzma jest miejscem występowania większości współcześnie aktywnych wsięków Kaskadii, a większość dzisiejszych wsięków wykazuje wysokie stosunki izotopowe Sr, odzwierciedlające interakcje przepływających roztworów z okrucowymi skałami osadowymi (Sample i Kopf, 1995; Sample i Reid, 1998).

Wyniki przedstawionych w pracy A2 badań mają również ważne implikacje dla zrozumienia wczesnej ewolucji tektonicznej kaskadyjskiej strefy subdukcji. W wielu pracach dotyczących historii geologicznej Kaskadii pojawiało się założenie, że moment aktywacji obecnej krawędzi konwergentnej był jednoznaczny z rozwojem dojrzałego łuku wulkanicznego w Górach Kaskadowych. Takie ujęcie wiąże się jednak z występowaniem luki czasowej pomiędzy akrecją Siletzii (50–45 Ma), a najstarszymi skałami magmowymi łuku wulkanicznego (40 Ma), pozostawiając pytanie o dokładny moment przeskoku rowu do jego obecnego położenia na zachód od Siletzii. Na wczesną aktywność kaskadyjskiej strefy subdukcji wskazują dane pośrednie: ekstensyjny, typowy dla początkowej subdukcji reżim tektoniczny pojawiający się na obszarze Kaskadii ok. 46 Ma (Heller i in., 1987; Gao i in., 2011), ustanie magmatyzmu poprzedniego łuku wulkanicznego w Kolumbii Brytyjskiej ok. 45 Ma (Dostal i in., 2019), a także nietypowy epizod magmowy, który miał miejsce na obszarze przedłukowym od 44 do 37 Ma, prawdopodobnie reprezentujący efekt subdukcji grzbietu śródoceanicznego (Breitsprecher i in., 2003; Eddy i in., 2016). W tym kontekście wyniki niniejszej pracy rzucają nowe światło na wczesną historię tektoniczną Kaskadii, wykazując, że roztwory wypływające w środkowooceńskich wsiękach formacji Humptulips cechowały się charakterystyką geochemiczną wskazującej na aktywną subdukcję. Biorąc pod uwagę czas potrzebny na wytworzenie metanu termogenicznego w głębokich częściach pryzmy akrecyjnej, dane te dają tym samym bezpośrednie świadectwo, że początek subdukcji na obszarze Kaskadii musiał nastąpić na kilka milionów lat przed pojawieniem się na tym obszarze typowego łuku wulkanicznego.

Artykuł A3

JAKUBOWICZ M., AGIRREZABALA L., DOPIERALSKA J., KAIM A., SIEPAK M., BELKA Z. 2021. The role of magmatism in hydrocarbon generation in sedimented rifts: a Nd isotope perspective from mid-Cretaceous methane-seep deposits of the Basque-Cantabrian Basin, Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 303, 223-248, doi: 10.1016/j.gca.2021.03.025.

oraz

Artykuł A4

JAKUBOWICZ M., AGIRREZABALA L., BELKA Z., SIEPAK M., DOPIERALSKA J. 2022. Sr–Nd isotope decoupling at Cretaceous hydrocarbon seeps of the Basque-Cantabrian Basin (Spain): implications for tracing volcanic-influenced fluids in sedimented rifts. *Marine and Petroleum Geology*, 135, 105430, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2021.105430.

Dwie ostatnie publikacje włączone w skład przedstawionego osiągnięcia podejmują temat genezy i dróg migracji roztworów zasilających dolnokredowe (alb; ~105 Ma) wsięki metanu Kraju Basków (Góry Kantabryjskie, północna Hiszpania). Prace te podejmują różne zagadnienia dotyczące źródeł roztworów, ich interakcji ze skałami podłoża oraz wpływu diagenety na skład izotopowy wapieni wsiękowych, dlatego też zostały opublikowane w formie dwóch niezależnych artykułów. Ponieważ jednak prace te dotyczą tych samych wsięków metanu i są ze sobą związane, w ramach niniejszego autoreferatu zostały one omówione łącznie.

Wsięki metanu Kraju Basków rozwinęły się w obrębie basenu baskijsko-kantabryjskiego, młodego, pery-kratonicznego ryftu, powstałego w mezozoiku na skutek otwierania się Zatoki Biskajskiej i północnego Atlantyku (DeFelipe i in., 2018; Teixell i in., 2018). Podobnie jak w przypadku basenu śląskiego (Artykuł A1), ryft baskijsko-kantabryjski nie osiągnął nigdy stadium dojrzałego spreadingu oceanicznego; intensywne

rozciąganie skorupy kontynentalnej doprowadziło tu jednak w połowie kredy do szeregu intruzji magmowych w miąższe, bogate w substancje organiczne, drobnoziarniste osady wypełniające ryft (Rossy i in., 1992; Ubide i in., 2014). Czas ten odznaczył się jednocześnie powstaniem w obrębie basenu baskijsko-kantabryjskiego czterech, niemal równowiekowych wysięków metanu, stanowiących przedmiot omawianych tu badań: wysięków Kardala, Alkolea, Ispaster i Gorliz. W bezpośrednim podłożu wszystkich omawianych wysięków występują intruzje subwulkaniczne – bądź odsłonięte na powierzchni (Gorliz), bądź widoczne w profilach sejsmicznych (Kardala-Alkolea, Ispaster). Związek ten stał się podstawą hipotezy zaprezentowanej we wcześniejszych pracach (Agirrezabala, 2009, 2015; Agirrezabala i in., 2013), że powstanie metanu zasilającego kredowe wysięki Kraju Basków związane było z termogenicznym rozpadem materii organicznej w obrębie aureoli kontaktowych intruzji.

W pracy A3 podjęto próbę weryfikacji tej hipotezy poprzez zastosowanie analiz izotopowych Nd, C i O, a także koncentracji wybranych pierwiastków (Ba, ziemie rzadkie) w wapieniach wysiękowych basenu baskijsko-kantabryjskiego. Oprócz weryfikacji genezy metanu, celem pracy była ogólna ocena potencjału izotopów Nd w badaniach pochodzenia węglowodorów w wypełnionych osadami ryftach – środowiska tektonicznego, dla którego metoda ta była dotąd bardzo rzadko stosowana. Odsłonięcia kopalnych wysięków Kraju Basków oferują przy tym rzadką możliwość badania charakterystyki geochemicznej nie tylko samych wapieni wysiękowych, ale i skał wulkanicznych i osadowych obecnych w ich podłożu. Celem artykułu A4 było natomiast porównanie danych izotopowych Nd z wynikami analiz izotopowych Sr, umożliwiając tym samym porównanie potencjału obu metod. W tym wypadku dane izotopowe zostały uzupełnione przez pomiary koncentracji pierwiastków pobocznych (Mg, Sr, Al, Mn, Fe) i śladowych (Th).

Oprócz autigenicznych węglanów, pomiarom izotopowym Nd–Sr poddano próbki intruzywnych bazaltów odsłoniętych w podłożu wysięku Gorliz, a także dwa typy archiwów składu izotopowego Nd lokalnych, nie-wysiękowych wód porowych. Pierwszym z nich jest fragment szczęki ryby, pochodzący z dolno/środkowoalbskich margli odsłoniętych pomiędzy wysiękami Gorliz i Ispaster. Ponieważ warstwy te nie są dokładnie równowiekowe z badanymi, górnoalbskimi wysiękami, analizom poddano dodatkowo wapienie mikrytowe z równowiekowej platformy węglanowej, położonej w południowej części basenu baskijsko-kantabryjskiego. Wyniki pomiarów na zarówno fosforanowych, jak i węglanowych archiwach dały wąski przedział wartości ϵ_{Nd} (–9,6 do –9,3), potwierdzając pierwotny charakter zrekonstruowanego, nieradiogenicznego składu izotopowego Nd wody morskiej w basenie.

W przypadku trzech z czterech badanych wysięków (Kardala, Alkolea i Ispaster), większość próbek węglanów dała wartości ϵ_{Nd} wyraźnie wyższe niż sygnał zrekonstruowany dla nie-wysiękowych wód porowych i przesunięte w kierunku sygnatur zmierzonych dla intruzji magmowej ($\epsilon_{Nd} = +2,4$ do $+3,0$). Szczególnie radiogeniczne wartości ϵ_{Nd} charakteryzują węglany wysięku Kardala (–7,6 do –6,9). W przypadku wysięków Alkolea i Ispaster, obserwowany przedział jest szerszy, jednak wciąż obejmuje próbki wyraźnie wzbogacone w ^{143}Nd (ϵ_{Nd} odpowiednio od –9,3 do –7,3 oraz od –9,2 do –7,4). Najniższe wartości ϵ_{Nd} (–9,7 do –9,0), niewiele wykraczające poza przedział zdefiniowany dla „tła”, zostały zmierzone dla wysięku Gorliz. Pierwotność sygnatur ϵ_{Nd} obserwowanych w wapieniach wysiękowych basenu baskijsko-kantabryjskiego została potwierdzona przez analizy koncentracji ziem rzadkich, które, znormalizowane do standardu – uśrednionego składu łupków (PAAS – *Post-Archean Australian Shale*; McLennan, 1989), wykazują względne wzbogacenie w środkowe ziemie rzadkie (Sm–Dy). Jest to cecha typowa dla mikrytowych węglanów wysiękowych i jest związana z ich wytrącanie z beztlenowych, wczesnodiagenetycznych wód porowych, dla których głównym źródłem ziem rzadkich jest redukcja tlenków Fe i Mn, charakteryzujące się wzbogaceniem w środkowe ziemie rzadkie (Himmler i in., 2010; Rongemaille i in., 2011; Jakubowicz i in., 2015a). Diagramy te różnią się natomiast wyraźnie od diagramów typowych dla roztworów późnodiagenetycznych (por. Kim i in., 2012).

Inaczej niż w przypadku kopalnych wysięków metanu Czech i Stanów Zjednoczonych (artykuły A1 i A2), w przypadku wysięków basenu baskijsko-kantabryjskiego dane izotopowe Sr dają obraz pozornie

niespójny z izotopami Nd, wskazując na dostawę Sr przede wszystkim z interakcji z wypełniającymi basen skałami okrucowymi, a nie ze skałami wulkanicznymi. Wszystkie wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obserwowane w baskijskich wapieniach wysiękowych są wyższe od sygnatury ówczesnej wody morskiej (0,7074–0,7075; Bralower i in., 1997), mieszcząc się w przedziale od 0,7084 do 0,7085 dla wysięku Kardala, 0,7078–0,7080 dla wysięku Ispaster, 0,7079–0,7083 dla wysięku Alkolea, oraz 0,7076–0,7080 dla wysięku Gorliz. Na głębokie, basenowe pochodzenie fluidów odpowiedzialnych za wytrącanie węglanów najbardziej wzbogaconych w ^{87}Sr wskazują ich podwyższone zawartości Fe oraz Mg. Cechy te wskazują na pierwotnie wysoko-Mg-kalcytową mineralogię i są typowe dla węglanów wytrącanych z wolno przepływających roztworów na pewnej głębokości poniżej dna morskiego, przy ograniczonym mieszaniu się z wodą morską (Bayon i in., 2007; Nöthen i Kasten, 2011). Pierwotny charakter stosunków $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ jest przy tym potwierdzony dla większości badanych wysięków przez obecność korelacji pomiędzy danymi izotopowymi Sr i innymi, mniej wrażliwymi na diagenezę systemami izotopowymi (por. Banner i Hanson, 1990), a także brak związków pomiędzy wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i koncentracjami pierwiastków litofilnych, wykluczający wpływ Sr uwalnianego w trakcie diagenezy z minerałów ilastych.

Większość analizowanych próbek wapieni wysiękowych cechuje się umiarkowanie ujemnymi wartościami $\delta^{13}\text{C}$ ($\geq -27\%$ dla wysięków Kardala, Alkolea i Ispaster). Najniższe wartości $\delta^{13}\text{C}$ ($-34,5$ do $-19,4\%$) zmierzone zostały dla wysięku Gorliz; również w tym przypadku obserwowany stopień względnego wzbogacenia w ^{13}C pozostaje jednak umiarkowany, co jest najbardziej typowe dla węglanów wytrącających się na skutek utleniania metanu termogenicznego (por. artykuły A1–A2). Jedyne w przypadku węglanów wysięku Alkolea węglowodorem termogenicznym towarzyszył najprawdopodobniej metan generowany biogeniczne, na co wskazuje szczególnie szeroki przedział obserwowanych wartości $\delta^{13}\text{C}$, a zwłaszcza – obecność cementów silnie wzbogaconych w ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = 8,5\%$), wskazujących na udział rezydualnego, ciężkiego izotopowo węgla powstałego w procesie bakteryjnej metanogenezy (por. Tissot i Welte, 1978; Whiticar, 1999).

Zgromadzone w artykule A3 dane ϵ_{Nd} , w połączeniu z analizami zawartości izotopów stabilnych, potwierdzają kluczową rolę intruzji magmowych w powstawanie metanu termogenicznego w kredzie basenu baskijsko-kantabryjskiego. Jednocześnie udokumentowany w pracy kontrast pomiędzy wartościami ϵ_{Nd} zmierzonymi dla wysięków Kardala, Alkolea i Ispaster, wskazującymi na wpływ interakcji ze skałami wulkanicznymi, oraz zasadniczo morskimi sygnaturami obserwowanymi dla wysięku Gorliz umożliwia lepsze zrozumienie relacji pomiędzy intruzjami magmowymi a charakterem generowanych przez nie systemów krążenia fluidów. W przypadku wysięków Kardala, Alkolea i Ispaster, kluczową rolę odgrywały najwyraźniej znaczna objętość i głębokość ($\sim 1,5$ – 2 km poniżej dna morskiego) intruzji magmowych. Dużym intruzjom towarzyszy zazwyczaj powstawanie stabilnych systemów cyrkulacji hydrotermalnej, a znaczne ciśnienie towarzyszące dużym głębokościom (> 1 km) ogranicza ilość dostępnych wód porowych i zwiększa temperaturę niezbędną do ich odparowania (Delaney, 1982; Barker i in., 1998). Na skutek tego ciepło jest rozprzodane głównie kondukcyjnie, a aureole kontaktowe są rozległe, umożliwiając długotrwałe krążenia roztworów i generację znacznych ilości metanu (Schutter, 2003; Aarnes i in., 2010; Sydnes i in., 2018). Na tej podstawie w pracy A3 zaproponowano, że towarzyszące głębokim intruzjom, bardziej rozległe interakcje pomiędzy fluidami i skałami wulkanicznymi znalazły odzwierciedlenie w wyraźnym wzbogaceniu węglanów wysiękowych Kardala, Alkolei i Ispaster w wulkanogeniczny Nd, skutkując podwyższonymi wartościami ϵ_{Nd} . Natomiast w przypadku wysięku Gorliz intruzja magmowa była wyraźnie mniejsza i osadzona znacznie płycej (ok. 500 m poniżej dna). W takich przypadkach powstające systemy krążenia roztworów są zazwyczaj niewielkie, przy czym, w związku ze stosunkowo niskim ciśnieniem, bardzo ważną rolę odgrywa w nich odparowywanie wód porowych, które ma przebieg bardzo gwałtowny i krótkotrwały (Raymond i Murchison, 1991; Barker i in., 1998; Schofield i in., 2010). Skutkiem tego dla takich intruzji typowe są niewielkie aureole kontaktowe i ograniczone interakcje pomiędzy fluidami i wulkanitami – najwyraźniej odpowiedzialne za stosunkowo nieradiogeniczny skład izotopowy Nd węglanów wysiękowych Gorliz.

W artykule A3 zademonstrowano, w jaki sposób izotopy Nd mogą być wykorzystywane jako czułe narzędzie rekonstruowania źródeł metanu w wypełnionych osadami basenach ryftowych. Jest to szczególnie istotne z uwagi na problemy, jakie stwarza interpretacja genezy węglowodorów w niezwykle złożonych systemach krążenia roztworów obecnych w osadowych ryftach (Lizarralde i in., 2011; Schofield i in., 2017; Geilert i in., 2018). Użyteczność izotopów Nd jest przy tym dodatkowo uwypuklona przez ich zestawienie z danymi izotopowymi Sr, co było głównym tematem pracy A4. Izotopy Sr stanowią jedno z najczęściej wykorzystywanych narzędzi odtwarzania interakcji pomiędzy fluidami i skałami wulkanicznymi w środowiskach wsięków metanu i wypływów hydrotermalnych (np. Von Damm i in., 1985; Sharma i in., 2007; Baumberger i in., 2016). Metoda ta ma jednak istotne ograniczenia, wynikające z podatność sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na zmiany diagenetyczne (Banner i Hanson, 1990), jak również z wysokich koncentracji Sr w wodzie morskiej i wodach porowych osadu, w wyniku czego przesunięcie pierwotnych sygnatur izotopowych wód wymaga bardzo wysokiego stopnia rozpuszczania skał wulkanicznych. W związku z tym, potencjał izotopów Sr w badaniach podmorskich źródeł związanych z basenami ryftowymi ograniczony jest do systemów, w których interakcje pomiędzy fluidami a intruzjami magmowymi są bardzo intensywne. Prosty model mieszania przedstawiony w artykule A4 ukazał natomiast, że w przypadku głębokich, basenowych roztworów porowych stosunkowo bogatych w Sr, skład izotopowy Nd fluidów jest w stanie zarejestrować wpływ interakcji z wulkanitami znacznie wcześniej, niż to ma miejsce w przypadku izotopów Sr. Model ten wyjaśnia tym samym występowanie w wsiękach basenu baskijsko-kantabryjskiego pozornej sprzeczności pomiędzy sygnaturami ϵ_{Nd} , wskazującymi na częściowo wulkaniczne pochodzenie Nd, i stosunkami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, wskazującymi na głównie osadowe źródło Sr. Wyniki pracy A4 mają przy tym ogólne implikacje dla badań nad pochodzeniem metanu w wypełnionych osadami ryftach, oferując wyjaśnienie obserwowanej dla niektórych obszarów pozornej sprzeczności pomiędzy danymi geologicznymi lub sejsmicznymi, sugerującymi wpływ magmatyzmu na powstawanie metanu, a wysokimi wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, nie dającymi dowodów na udział wulkanogenicznego Sr (np. Campbell i in., 1994; Canet i in., 2013; Geilert i in., 2018).

4.1.4. Upowszechnianie wyników prac wchodzących w skład osiągnięcia

Oprócz recenzowanych publikacji, wyniki badań były prezentowane w formie wystąpień na konferencjach międzynarodowych: *1st International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities* w Warszawie (Jakubowicz i in., 2016), *20th International Sedimentological Congress* w Québec City (Kanada; Jakubowicz i in., 2018), *2nd International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities* w Sapporo (Japonia; Jakubowicz i in., 2019b), *EGU General Assembly* (online; Jakubowicz i in., 2020b) oraz *35th IAS Meeting of Sedimentology* (online; Jakubowicz i in., 2021b), a także na *Polskiej Konferencji Sedymentologicznej POKOS* na Górze św. Anny (Jakubowicz, 2018). Wyniki prac zostały również omówione w ramach referatu zamawianego, wygłoszonego na *Ogólnopolskim Posiedzeniu Naukowym z okazji Obchodów 100-lecie Polskiego Towarzystwa Geologicznego* na zaproszenie Kapituły Obchodów (Jakubowicz, 2022).

4.1.5. Podsumowanie

Autigeniczne minerały węglanowe tworzące się wokół podmorskich wsięków metanu stanowią cenne archiwa wiedzy o źródłach i charakterystyce geochemicznej roztworów w tego typu środowiskach. Interpretacja zarchiwizowanych danych jest jednak utrudniona przez mieszanie się sygnatur wypływających fluidów i otaczającej wody morskiej, często ograniczoną wiedzę o podpowierzchniowych drogach migracji roztworów, a także możliwość wtórnych przemian diagenetycznych. Izotopy Nd należą do narzędzi geochemicznych najczęściej wykorzystywanych do odtwarzania cyrkulacji wód we współczesnych i dawnych oceanach, jednak dotąd metoda ta była bardzo rzadko stosowana w badaniach pochodzenia fluidów zasilających wsięki metanu. W zaprezentowanym cyklu artykułów podjęto próbę oceny potencjału izotopów

Nd w badaniach wysięków metanu, w tym możliwości jej zastosowania do rozwiązywania konkretnych problemów dotyczących budowy geologicznej basenów sedymentacyjnych, w których dane wysięki się rozwinęły. Z uwagi na charakterystyczne sygnatury izotopowe Nd zasadowych skał magmowych, szczególny nacisk położono na rekonstrukcje dawnych interakcji pomiędzy przepływającymi fluidami i skałami wulkanicznymi.

W ramach przedłożonego cyklu publikacji przebadano szereg kopalnych wysięków metanu, w których podłożu znajdują się zasadowe skały wulkaniczne: dolnokredowe wysięki Karpat Zewnętrznych (Czechy; artykuł A1) i basenu baskijsko-kantabryjskiego (Kraj Basków, Hiszpania; artykuły A3–A4), związane z wczesnymi, wypełnionymi osadami ryftami kontynentalnymi, oraz środkowoeoceńskie wysięki kaskadyjskiej strefy subdukcji (stan Waszyngton, Stany Zjednoczone; artykuł A2). By poszerzyć wgląd w środowisko sedymentacji wysięków i pochodzenie roztworów, izotopy Nd uzupełniono o inne metody badawcze: obserwacje sedymentologiczne, petrograficzne i strukturalne, analizy izotopowe Sr, C i O, a także pomiary koncentracji wybranych pierwiastków pobocznych i śladowych. Z wyjątkiem pojedynczego wysięku metanu basenu baskijsko-kantabryjskiego, we wszystkich badanych wysiękach stwierdzono wyraźne wzbogacenie w Nd pochodzenia wulkanicznego, zapisane w formie wysokich wartości ϵ_{Nd} (stosunków $^{143}Nd/^{144}Nd$ znormalizowanych do standardu) węglanów wysiękowych. Stopień obserwowanego wzbogacenia w izotop ^{143}Nd jest różny w zależności od budowy geologicznej podłoża danych wysięków, w tym przede wszystkim – od składu izotopowego i miąższości niżejleżących ciał wulkanicznych i pakietów skał osadowych, charakteru nieciągłości strukturalnych lub horyzontów służących jako drogi migracji fluidów, a także składu izotopowego otaczających, nie-wysiękowych wód porowych. Najwyższe wartości ϵ_{Nd} stwierdzono dla wysięków, w których podłożu miąższe ciała magmowe występują bardzo płytko: kredowego wysięku Karpat i eoceńskich wysięków Kaskadii. Bardziej umiarkowany stopień wzbogacenia w wulkanogeniczny Nd został natomiast stwierdzony dla kredowych wysięków Kraju Basków, w przypadku których intruzje magmowe występują na znacznej głębokości, a istotną rolę w kształtowaniu sygnałów ϵ_{Nd} przepływających roztworów musiały odgrywać ich interakcje z okrucowymi skałami osadowymi, wypełniającymi ryft baskijsko-kantabryjski.

Zgromadzone dane izotopowe Nd zostały wykorzystane do lepszego zrozumienia wybranych aspektów budowy geologicznej i historii tektonicznej zaczątkowych krawędzi kontynentalnych, w obrębie których dane wysięki metanu się rozwinęły. W przypadku wysięków karpaccich i baskijskich, rezultaty badań potwierdziły termogeniczne pochodzenie metanu w badanych młodych, dotkniętych działalnością wulkaniczną ryftach kontynentalnych, dla basenu baskijsko-kantabryjskiego dowodząc jednocześnie bezpośredniej generacji metanu w aureolach kontaktowych intruzji magmowych. Dla wysięków Kaskadii, izotopy Nd zostały natomiast wykorzystane do odtworzenia kontekstu tektonicznego powstawania bogatych w metan fluidów i ich interakcji z miąższym, wulkanicznym terranem Siletzii, którego akrecja do Ameryki Północnej doprowadziła we wczesnym eocenie do powstania kaskadyjskiej strefy subdukcji. Dane te posłużyły z kolei do lepszego zrozumienia najwcześniejszych etapów ewolucji tektonicznej kaskadyjskiej krawędzi konwergentnej, w tym – bardziej precyzyjnego określenia momentu przeskoaku rowu do jego obecnej pozycji na zachód od Siletzii.

Choć przeprowadzone badania dotyczyły źródeł fluidów i kontekstu geologicznego konkretnych, kopalnych wysięków metanu, implikacje ich wyników mają również uniwersalny charakter. Zgromadzone dane wykazały ogólną przydatność izotopów Nd do odtwarzania charakterystyki litologicznej podpowierzchniowych systemów zasilania wysięków metanu, w tym przede wszystkim – interakcji pomiędzy fluidami i skałami magmowymi. Przedłożone prace zilustrowały również, jak wyniki analiz Nd mogą być zastosowane do odtwarzania pochodzenia i dróg migracji metanu w strefach subdukcji i wypełnionych osadami ryftach, tj. w środowiskach tektonicznych, dla których, z uwagi na złożoną budowę geologiczną, tego rodzaju interpretacje są szczególnie trudne. Szczególnie szeroki wgląd w pochodzenie i ewolucję geochemiczną fluidów daje połączenie analiz izotopowych Nd z innymi systemami geochemicznymi; co istotne, przedstawione badania wykazały jednak, że informacje dostarczane przez izotopy Nd są unikalne i

często nieosiągalne z wykorzystaniem innych metod. Dotyczy to również izotopów Sr, tj. systemu dotąd najczęściej wykorzystywanego do śledzenia interakcji pomiędzy fluidami i skałami magmowymi w różnego rodzaju podmorskich źródłach.

4.2. Pozostałe osiągnięcia w dyscyplinie nauk o Ziemi i środowisku – dorobek naukowy

Pełna lista publikacji, wraz ze szczegółowym określeniem mojego w nich udziału, wykaz projektów badawczych i prezentacji konferencyjnych, a także dane naukometryczne oraz informacje o działalności dydaktycznej i organizacyjnej zostały przedstawione w załączonym *Wykazie osiągnięć*.

4.2.1. Działalność naukowa realizowana przed otrzymaniem stopnia doktora

W roku 2006, jako uczeń Liceum Ogólnokształcącego im. Bolesława Prusa w Żarach, uzyskałem tytuł finalisty XXXII Olimpiady Geograficznej. W tym samym roku rozpocząłem studia na kierunku geologia na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. W trakcie studiów byłem zaangażowany w działalności studenckich kół naukowych: jako sekretarz (w latach 2008–2010) Koła Naukowego Paleontologów oraz członek (w latach 2008–2011) Sekcji Paleogeografii i Sekcji Speleologii Studenckiego Koła Naukowego Geografów im. Stanisława Pawłowskiego. W trakcie studiów magisterskich, semestr zimowy roku akademickiego 2010–2011 spędziłem w Instytucie Nauk o Ziemi Uniwersytetu w Aarhus (Dania) jako stypendysta programu LPP Erasmus. W trakcie studiów byłem stypendystą Starosty Powiatu Żarskiego (lata 2006–2007) oraz, czterokrotnie, stypendystą Rektora UAM (lata 2007–2011). Studia pierwszego (2009 r.) i drugiego (2011 r.) stopnia ukończyłem z wynikiem bardzo dobrym oraz, w przypadku studiów magisterskich, nagrodą Dziekana dla najlepszego absolwenta WNGiG. W roku 2011 obroniłem pracę magisterską pt. „Sedimentary environment and fauna of Devonian methane seeps: case study from the Hollard Mound, eastern Morocco”, przygotowaną pod kierunkiem prof. dra hab. Zdzisława Bełki. Praca otrzymała II nagrodę w konkursie na najlepszą pracę magisterską obronioną na WNGiG w roku 2011.

Studia doktoranckie odbywałem na WNGiG w latach 2011–2015. Moja rozprawa doktorska pt. „Palaeoecology and sedimentary environment of the Middle Devonian carbonate buildups of the Hamar Laghdad area, southeastern Morocco” powstała pod kierunkiem prof. dra hab. Zdzisława Bełki oraz dr Jolanty Dopieralskiej (Park Naukowo-Technologiczny Fundacji UAM). Rozprawa, obroniona z wyróżnieniem, została zrealizowana w ramach projektu badawczego programu Preludium Narodowego Centrum Nauki nr 2012/07/N/ST10/04044, w którym pełniłem funkcję kierownika, i miała formę zestawu czterech artykułów naukowych opublikowanych w międzynarodowych czasopismach z bazy Journal Citation Reports. Badania te podejmowały kwestie składu gatunkowego, struktury troficznej i sukcesji kolonizacji, a także pochodzenia i dróg migracji fluidów w obrębie kopalnych, środkowodewońskich wsięków metanu i wpływów hydrotermalnych grzbietu Hamar Laghdad w południowym Maroku. Grzbiet ten jest jednym z najbardziej znanych miejsc występowania paleozoicznych wpływów fluidów, których działalność doprowadziła tu do powstania spektakularnych, dochodzących do 50 m wysokości, stożkowatych kopców mułowych. Dzięki zastosowaniu różnorodnych metod badawczych, obejmujących analizy paleoekologiczne, badania mikrofajalne z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, katodoluminescencyjnej i skaningowej, a także analizy geochemiczne (izotopy stabilne C i O, koncentracje ziem rzadkich, izotopy Nd), w ramach dysertacji udało się lepiej zrozumieć złożone relacje pomiędzy powstaniem niezwyklej budowli wapiennych i związanych z nimi ekosystemów a podmorską działalnością wsięków metanu i wpływów hydrotermalnych. Głównym efektem pierwszego z artykułów włączonych do pracy doktorskiej (Jakubowicz i in., 2013) było wykazanie związku pomiędzy występowaniem bardzo nietypowych, gęstych zespołów oportunistycznych dewońskich koralowców z rodzaju *Amplexus* i ich szczególnym wzrostem (tzw. „kielich w kielichu”) a

miejscami dawnej działalności podmorskich źródeł. Prowadzone prace pozwoliły także na określenie warunków i mechanizmów wzrostu enigmatycznych struktur mikrobialnych z rodzaju *Frutexites*, rozwiniętych na szkieletach koralowców *Amplexus*, przedstawiając przesłanki o powstawaniu tego rodzaju struktur w wyniku aktywności heterotroficznych bakterii redukujących siarczany i azotany (Jakubowicz i in., 2014a). W ramach trzeciego z artykułów tworzących pracę doktorską udokumentowano odkrycie unikalnych na skalę światową biocenoz zamieszkujących w dewonie podmorskie próżnie skalne obszaru Hamar Laghdad, tym samym umożliwiając bezprecedensowy wgląd w paleoekologię ekosystemów kryptycznych paleozoiku (Jakubowicz i in., 2014b). Praca ta została opublikowana w czasopiśmie *Geology*, od lat stanowiącym najwyższej oceniane czasopismo geologiczne według JCR; została również doceniona przez Oddział Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu, która przyznała mi tytuł laureata II edycji konkursu na najlepszą oryginalną pracę twórczą doktoranta opublikowaną w roku 2013 w obszarze nauk ścisłych i nauk o Ziemi. Pracy został także poświęcony artykuł wstępny popularnonaukowego internetowego czasopisma „LabTimes” (Karl Gruber, *A Rare Look into the Past*, labtimes.org/editorial/e_484.lasso), a jedna z jej ilustracji została wyróżniona jako zdjęcie okładkowe majowego numeru *Geology*. W ostatnim z artykułów powstałych w ramach przedłożonej dysertacji zaprezentowano natomiast pierwszą próbę zastosowania izotopów Nd, połączonych z analizami koncentracji ziem rzadkich i izotopów węgla i tlenu, do odtwarzania pochodzenia i dróg migracji roztworów w kopalnym wysięku metanu (środkowodewoński kopiec Hollarda; Jakubowicz i in., 2015a). Implikacje tej pracy zostały przedstawione w podrozdziale 4.1.2 i rozdziale 5 niniejszego autoreferatu.

Poza artykułami ujętymi w ramy pracy doktorskiej, tematyka badań głębokomorskich budowli węglanowych została przeze mnie podsumowana w postaci przeglądowej pracy w języku polskim (Jakubowicz, 2012). Moja działalność naukowa w trakcie studiów doktoranckich została doceniona poprzez dwukrotne przyznanie mi stypendium Rektora dla najlepszych doktorantów UAM (2011–2012; 2013–2014), stypendium Fundacji UAM (2014–2015), dwukrotnie stypendium programu START fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2015–2016: ze specjalnym wyróżnieniem; 2016–2017) oraz Nagrody Naukowej im. Ignacego Domeyki Wydziału III PAN (2016 r.).

4.2.2. Działalność naukowa realizowana po otrzymaniu stopnia doktora

Od momentu uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora w dziedzinie nauk o Ziemi i zatrudnienia na stanowisku adiunkta (od 1 października 2015 r.), moje zainteresowania naukowe skupiały się na czterech głównych kierunkach tematycznych:

- kontynuacja prac nad paleoekologią i środowiskiem sedymentacji kopalnych wysięków metanu;
- odtwarzanie paleoekologii paleozoicznych organizmów bentonicznych;
- rekonstrukcje składu izotopowego i cyrkulacji wód w dawnych basenach morskich;
- śledzenie naturalnych i antropogenicznych źródeł Sr w wodach rzecznych.

Badania prowadzone na tym etapie zostały docenione poprzez przyznanie mi stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2018–2021), zespołowej nagrody I stopnia Rektora UAM (2019), a także tytułu laureata konkursu projektu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza na wsparcie najbardziej produktywnej naukowo młodej kadry UAM (2020–2022).

Paleoekologia i środowisko sedymentacji kopalnych wysięków metanu

Główny zakres mojej działalności naukowej po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora obejmuje kontynuację prac nad paleoekologią, sedymentologią i geochemią kopalnych wysięków metanu. Dotychczasowe prace w tym zakresie były prowadzone przede wszystkim w obrębie kierowanych przeze mnie

projektów NCN nr 2012/07/N/ST10/04044 oraz 2016/23/D/ST10/00444. Cztery artykuły powstałe w ramach tej części mojej działalności badawczej tworzą zestaw publikacji przedłożony jako główne osiągnięcie habilitacyjne i zostały omówione w rozdziale 4.1.

Spośród pozostałych prac dotyczących wysięków metanu, trzy skupione były na kwestii paleoekologii dwóch najstarszych znanych obecnie ekosystemów wysięków metanu, zachowanych w środkowym paleozoiku Maroka (Hryniewicz i in., 2017; Jakubowicz i in., 2017; Jakubowicz i in., *zaakceptowany manuskrypt*). Badania te doprowadziły do radykalnej rewizji stanu wiedzy o wczesnej ewolucji biocenoz opartych na chemosyntezie, podważając panujący do tej pory pogląd, że paleozoiczne i mezozoiczne ekosystemy tego typu były zdominowane przez ramienionogi. W pierwszej z tych prac (Hryniewicz i in., 2017) dokonano rozpoznania taksonomicznego i interpretacji ekologicznej dwóch gatunków małży ze środkowodewońskiego kopca Hollarda (wschodni AntyAtlas; por. podrozdział 4.1.2 i rozdział 5 autoreferatu). Pierwszy z rozpoznanych gatunków, zidentyfikowany jako przedstawiciel wymarłej rodziny Modiomorphidae (nowy rodzaj i gatunek: *Ataviaconcha wendti*), tworzył masowe koncentracje i wyróżniał się znaczących rozmiarów, silnie wydłużoną i zakrzywioną muszlą. Niedługo po zaakceptowaniu do druku (2015 r.) pracy Hryniewicza i in. (2017) bardzo podobne, masowe wystąpienie małży z rodzaju *Ataviaconcha* zostało przeze mnie odkryte w obrębie górnosylurskiego wysięku El Borj (marokańska Meseta), który stanowi do dziś najstarszy znany wysięk metanu z bogatą fauną organizmów tkankowych (Jakubowicz i in., 2017). Również w tym przypadku *Ataviaconcha* charakteryzowała się bardzo dużą, wydłużoną, charakterystycznie zakrzywioną muszlą, uderzająco przypominającą morfologię charakterystyczną dla silnie wyspecjalizowanych małży z grup Bathymodiolinae i Vesicomidae, które tworzą analogiczne, masowe wystąpienia wokół wysięków metanu i wpływów hydrotermalnych od eocenu do dziś. W pracach wykazano, że cechy te rozwinęły się w różnych grupach małży niezależnie na skutek konwergencji ewolucyjnej, a paleozoiczne modiomorfidy nie były spokrewnione ze współczesnymi małżami wysiękowymi. Charakterystyczna morfologia rodzaju *Ataviaconcha*, dzielona z wieloma przedstawicielami Bathymodiolinae, Vesicomidae i Kalenteridae, została przy tym w naszych pracach zinterpretowana jako adaptacja do pół-inafaunального stylu życia w środowiskach wysięków metanu, umożliwiając małżowi jednoczesny dostęp do wód dennych zawierających tlen oraz wód porowych bogatych w siarkowodor. Morfologia tego typu, nieznaną u małży niewysiękowych, daje tym samym silny argument za współpracą badanych małży z mikroorganizmami chemosyntetycznymi (chemosymbiozą). Drugi z gatunków opisanych w pracy Hryniewicza i in. (2017) został natomiast zidentyfikowany jako przedstawiciel rodziny Solemyidae (nowy gatunek: *Dystactella eisenmanni*), tym samym stanowiąc najstarsze znane z wysięków wystąpienie tej grupy, charakterystycznej również dla współczesnych ekosystemów opartych na chemosyntezie. Moja rola w wymienionych artykułach polegała na rekonstrukcji paleoekologii i habitatu małży wysiękowych przy pomocy analiz sedimentologicznych, petrologicznych i geochemicznych; wspólnie z prof. Zdzisławem Bełką wykonałem również całość prac terenowych, w tym dostarczyłem materiał do analiz taksonomicznych, przeprowadzonych przez dra Krzysztofa Hryniewicza z Instytutu Paleobiologii PAN. W przypadku artykułu Jakubowicza i in. (2017) samodzielnie przeprowadziłem pierwszy etap prac terenowych, w tym – po raz pierwszy rozpoznałem obecność w wapieniach El Borj bogatych zespołów małży; następnie zinterpretowałem ich kontekst ewolucyjny oraz, na podstawie zgromadzonych danych petrograficznych, izotopowych i stratygraficznych, przedstawiłem pierwsze jednoznaczne dowody na genezę badanego paleoekosystemu jako kopalnego wysięku metanu.

Prowadzone przez nasz zespół badania nad paleozoicznymi wysiękami metanu Maroka zostały podsumowane, na zaproszenie redaktorów, w ramach rozdziału przeglądowego w monografii *Ancient Hydrocarbon Seeps* serii *Topics in Geobiology* (Jakubowicz i in., *zaakceptowany manuskrypt*). Oprócz przybliżenia zawartości prac poświęconych wysiękowi El Borj i kopcowi Hollarda, w pracy tej zaprezentowano także nowe wyniki przeprowadzonych przeze mnie analiz sedimentologicznych, petrologicznych i paleoekologicznych najmłodszych kopalnych wysięków metanu Maroka, znanych z górnego dewonu Mesety. Artykuł prezentuje również szeroką dyskusję implikacji, jakie badania najstarszych faun

wysiękowych niosą dla zrozumienia mechanizmów ewolucji ekosystemów opartych na chemosyntezie. Temat ten został przeze mnie poruszony także w ramach szerokiego podrozdziału poświęconemu trendom w ewolucji małży i ramienionogów związanych z kopalnymi wysiękami metanu, który został włączony w rozdział przeglądowy poświęcony zapisowi kopalnemu ramienionogów w tego typu środowiskach (Baliński i in., *zaakceptowany manuskrypt*).

Równoległe z badaniami nad paleozoicznymi wysiękami metanu Maroka, byłem zaangażowany w projekty dotyczące innych kopalnych wysięków metanu. Pierwszy z powstałych w ramach tej działalności artykułów poświęcony był ekologii i środowisku sedymentacji trzech miocenkich wysięków wysp Tsushima (Japonia; Hryniewicz i in., 2021). Publikacja ta opisuje najstarsze świadectwa aktywności wysiękowej w Morzu Japońskim, pozwalając na pełniejsze zrozumienie wczesnej historii tektonicznej tego basenu, a także dokumentując najstarsze wystąpienia niektórych znanych z niego organizmów chemosymbiotycznych. Moja rola w tych badaniach polegała przede wszystkim na udziale, jako sedymentologa skał węglanowych, w interpretacji paleośrodowiska (zgromadzenie i interpretacja danych rentgenograficznych, współinterpretacja danych mikroskopowych i katodoluminescencyjnych). Obecnie jestem natomiast zaangażowany w projekt poświęcony odtwarzaniu środowiska depozycji i źródeł roztworów zasilających kredowe wysięki metanu wyspy Hokkaido, kierowany przez dra Yusuke Miyajimę z Japońskiej Służby Geologicznej. Badania te opierają się przede wszystkim na danych izotopowych Sr i Nd z wapieni wysiękowych; pomiary izotopowe Nd zostały przeprowadzone w Laboratorium Izotopowym UAM w ramach pobytu dra Miyajimy w Poznaniu na moje zaproszenie. Wyniki pracy, podkreślające złożoność źródeł roztworów zasilających badane wysięki kredowego basenu przedłukowego, znajdują się na finalnym etapie opracowywania i zostały dotąd zaprezentowane w ramach wystąpień konferencyjnych (Miyajima i in., 2019a,b, 2020).

Moje zaangażowanie w badania nad systematyką geochemiczną węglanów wysiękowych zostało częściowo podsumowane w przeglądowym rozdziale monografii *Ancient Hydrocarbon Seeps*, dotyczącym geochemii kopalnych wysięków metanu (Cochran i in., *zaakceptowany manuskrypt*), na potrzeby którego napisałem dwa podrozdziały poświęcone analizom koncentracji pierwiastków pobocznych i śladowych.

Paleoekologia paleozoicznych organizmów bentonicznych

Druga z dziedzin działalności, w którą jestem zaangażowany od czasu studiów doktoranckich obejmuje badania nad ekologią paleozoicznych organizmów bentonicznych, w tym przede wszystkim wymarłych koralowców z rzędów Rugosa, Tabulata i Heterocorallia. Pierwsza z prac opublikowanych przeze mnie, jako pierwszego autora, po uzyskaniu stopnia doktora dotyczyła składu izotopowego węgla i tlenu w koralowcach Rugosa (Jakubowicz i in. 2015b). Wyniki tej pracy, realizowanej w dużej mierze w ramach stypendium DAAD na Uniwersytecie Friedricha-Alexandra w Erlangen, zostały przedstawione w rozdziale 5 przedłożonego autoreferatu. Obecnie kontynuuję badania nad frakcjonowaniem izotopowym w szkieletach paleozoicznych koralowców jako promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim mgr Patrycji Dworzak (UAM), a także wykonawca w kierowanym przez nią projekcie programu Preludium NCN nr 2017/25/N/ST10/00445. Jednym z elementów przygotowywanej dysertacji jest pierwsza próba odtworzenia składu izotopowego węgla i tlenu szkieletów koralowców z enigmatycznej, ewolucyjnie odrębnej grupy Heterocorallia. W powstałym w ramach tych badań artykule udokumentowano sygnatury izotopowe znacznie odmienne od tych znanych ze współczesnych koralowców Scleractinia, przypominające natomiast skład izotopowy szkieletów współczesnych Octocorallia, w zgodzie z pojawiającymi się sugestiami o ich bliskim pokrewieństwie z paleozoicznymi heterokoralami (Dworzak i in., 2022). Badania izotopowe były poprzedzone szerokimi analizami morfologii i paleoekologii unikalnie zachowanych heterokorali z górnego dewonu Maroka (Dworzak i in., 2020). Praca ta dały nowy wgląd w strukturę i mechanizmy budowy szkieletu heterokorali, a także udokumentowała pierwsze świadectwa interakcji *syn vivo* pomiędzy heterokoralami i organizmami inkrustującymi ich szkielety. W ramach tych badań uczestniczyłem w pracach terenowych, interpretacji i

dyskusji danych paleoekologicznych, mikrostrukturalnych i izotopowych, a także w rekonstrukcji habitatu badanych koralowców.

Równolegle z badaniami izotopowymi zajmowałem się realizacją kierowanego przeze mnie projektu badawczego programu Iuventus Plus MNiSW nr IP2014 016373, dotyczącego paleoekologii, środowiska sedymentacji i genezy największej dewońskiej rafy północnej Gondwany (Aferdou el Mrakib, wschodni AntyAtlas, Maroko). Wyniki szerokich badań paleontologicznych i sedymentologicznych rafy umożliwiły pierwszy szczegółowy opis jej struktury biotycznej i sukcesji kolonizacji (Jakubowicz i in., 2019c). Ponieważ dewońskie rafy północno-zachodniej Afryki reprezentują najdalej na południe wysunięte rafy koralowcowe paleozoiku, wyniki pracy pozwoliły także na określenie szczególnego zestawienia czynników ekologicznych i środowiskowych, które umożliwiło w środkowym dewonie wyjątkowo szerokie rozprzestrzenienie raf. Na podstawie analiz sedymentologicznych i izotopowych stosunkowo krótki, pojedynczy epizod rozwoju rafy został powiązany z okresem wzrostu temperatury wód oceanicznych, który połączony był ze zmianą charakteru cyrkulacji na szelfie północno-zachodniej Gondwany. Nietypowy skład taksonomiczny ekosystemu rafowego, wyróżniający się dominacją denkowców z rodzaju *Heliolites* i podrzędną rolą stromatoporoidów, zinterpretowano natomiast jako efekt ograniczonej przejrzystości wody w stosunkowo niewielkim, pół-zamkniętym basenie sedymentacyjnym, w którym rozwinęła się rafa. Moja rola w pracy polegała na zarysowaniu koncepcji pracy, kierowaniu pracami terenowymi, analizie struktur sedymentacyjnych, obserwacjach mikrofacjalnych, a także na całościowej interpretacji zebranych danych sedymentologicznych i paleontologicznych w kontekście paleoekologii rafy. Projekt Iuventus Plus zaowocował również odrębną publikacją poświęconą paleoekologii nietypowych, silnie zintegrowanych kolonii koralowców Tabulata z rodzaju *Heliolites*, stanowiących główne organizmów rafotwórczych dojrzałego stadium rozwoju rafy Aferdou el Mrakib (Król i in., 2018). Prace nad różnymi aspektami paleoekologii rafy są obecnie kontynuowane w ramach przygotowywania rozprawy doktorskiej mgra Aleksandra Majchrzyka (Uniwersytet Warszawski), której jestem promotorem pomocniczym; dysertacja jest realizowana w ramach prowadzonego przez mgra Majchrzyka projektu Preludium NCN nr 2020/37/N/ST10/00773, w którym pełnię funkcję wykonawcy. W recenzji znajduje się aktualnie pierwsza z przygotowanych w ramach rozprawy publikacji, poświęcona paleoekologii zespołów koralowcowo-stromatoporoidowych, które rozwinęły się u podstawy rafy Aferdou (Majchrzyk i in., w recenzji). Dane pilotażowe zebrane w ramach projektu Iuventus Plus stały się także punktem wyjścia dla realizowanego obecnie projektu programu Opus NCN nr 2018/31/B/ST10/00292 (kierownik: prof. dr hab. Michała Zatoń, Uniwersytet Śląski), dotyczącego składu taksonomicznego i ekologii organizmów inkrustujących z dewonu Maroka, w którym również jestem wykonawcą. W pierwszych dwóch artykułach powstałych w ramach tego projektu udokumentowano wyjątkowo bogaty zespół bezkręgowców inkrustujących muszle ramienionogów z otoczenia rafy Aferdou el Mrakib, dając cenny wgląd w ekologię dewońskich faun inkrustujących, a także w relacje pomiędzy tego typu faunami obecnymi w różnych częściach Oceanu Reik (Zatoń i in., 2022a,b). Mój udział w pracach kierowanych przez dra Króla, mgra Majchrzyka i prof. Zatonia obejmował przede wszystkim analizy sedymentologiczne służące interpretacji paleośrodowiskowej i paleoekologicznej badanych zespołów organizmów.

Po zatrudnieniu na stanowisku adiunkta w dalszym ciągu prowadziłem prace nad paleoekologią dewońskich organizmów obszaru Hamar Laghdad w Maroku, jako wykonawca w projektach programu Opus NCN nr 2013/11/B/ST10/00243 i 2019/33/B/ST10/00059 (kierownik projektów: prof. dr hab. Błażej Berkowski, UAM). Pierwszy z aspektów tych prac dotyczył rekonstrukcji czynników odpowiedzialnych za morfologię koralowców Tabulata z gatunku *Favosites bohemicus*, a przede wszystkim – relacji pomiędzy budową kolonii a charakterem lokalnego dna morskiego (Król i in., 2016). Drugi z kierunków omawianych badań dotyczył rekonstrukcji paleoekologicznej bogatych, wyjątkowo dobrze zachowanych zespołów organizmów kryptycznych, które zamieszkiwały pustki skalne obecne w kopcach mułowych grzbietu Hamar Laghdad we wczesnym i środkowym dewonie (Berkowski i in., 2019). Prace te znacznie poszerzyły obecną wiedzę o składzie biotycznym, sukcesji kolonizacji i czynnikach środowiskowych odpowiedzialnych za

charakter paleozoicznych ekosystemów kryptycznych. W omawianym okresie byłem także zaangażowany w badania składu gatunkowego i habitatu wczesnodewońskich zespołów małży, występujących w marglistych osadach przykrywających kopce Hamar Laghdad (Hryniewicz i in., 2018). We wszystkich wymienionych pracach moja rola polegała przede wszystkim na rekonstrukcji środowiska życia badanych organizmów na podstawie obserwacji sedymentologicznych, petrologicznych i/lub izotopowych.

Ostatni z kierunków mojej działalności poświęconej paleozoicznemu faunom bentonicznym, realizowany w ramach funkcji wykonawcy w projekcie programu Opus NCN nr 2018/29/B/ST10/00954 (kierownik: prof. UW dr hab. Mikołaj Zapalski, Uniwersytet Warszawski), dotyczy paleoekologii dewońskich zespołów koralowców Tabulata (Zapalski i in., 2017, 2021). Prace te mają na celu zrozumienie kontekstu środowiskowego bujnego rozwoju raf koralowcowo-stromatoporoidowych w środkowym dewonie, a także ich zniknięcie w późnym dewonie; szczególny nacisk położono na analizę związku pomiędzy środkowopaleozoicznym sukcesem koralowców Tabulata a ich potencjalną współpracą z fotosyntetycznymi symbiontami. Moja rola w tych badaniach polegała głównie na analizie danych izotopowych (Zapalski i in., 2017) i sedymentologicznych (Zapalski i in., 2021), pozwalających na oszacowanie temperatury i głębokości wód, w których rozwijały się dane zespoły koralowców, szczególnie w kontekście prawdopodobieństwa ich fotosymbiotycznego odżywiania.

Systematyka izotopowa i cyrkulacja wód dawnych basenów morskich

Tematyka odtwarzania składu izotopowego Nd fluidów na podstawie analiz archiwów mineralnych, stanowiąca przedmiot głównego osiągnięcia habilitacyjnego, jest przede mną realizowana również w ramach projektów poświęconych rekonstrukcjom cyrkulacji wód w obrębie dawnych basenów morskich. Pierwszy z poświęconych tej tematyce grantów, w który byłem zatrudniony jako wykonawca (projekt programu Opus NCN nr 2013/11/B/ST10/04751, kierownik: prof. dr hab. Zdzisław Bełka, UAM), podjął pionierską próbę wykorzystania wapieni karbońskiej platformy węglanowej południowego Kazachstanu do rekonstrukcji składu izotopowego Nd wód Oceanu Uralskiego – basenu oddzielającego w karbonie kontynenty Kazachstanii i Eurameryki. W opublikowanej w ramach tego projektu pracy Bełki i in. (2021) zademonstrowano potencjał tej metody, wykorzystując ją do wykazania, że subdukcja wzdłuż południowego wybrzeża Kazachstanii, prowadząca do zamykania się Oceanu Uralskiego, musiała rozpocząć się ponad 20 mln wcześniej, niż dotychczas sądzono. Pobocznym efektem tych badań było odkrycie pierwszego związanego z Kazachstanią wystąpienia głowonogów z szeroko rozprzestrzenionego, wczesnokarbońskiego rodzaju *Goniatites* (dwa nowe gatunki: *G. zhankurganensis* i *G. anaiensis*; Korn i in., 2020). Prace nad geologią karbońskiej platformy węglanowej południowego Kazachstanu są obecnie kontynuowane; w recenzji znajduje się artykuł dokumentujący występowanie wyraźnej cykliczności w składzie izotopowym Nd wapieni platformy, powiązanej z charakterystycznymi zmianami w składzie lokalnych faun bentonicznych, co zinterpretowaliśmy jako efekt okresowego upwellingu, powiązanego z cyklami glacio-eustatycznymi (Bełka i in., w recenzji). Moja rola w omawianym projekcie obejmowała przede wszystkim udział, w charakterze sedymentologa węglanów, w badaniach terenowych, analizach petrograficznych, a także w interpretacji znaczenia obserwowanych sygnatur izotopowych Nd.

Aktualnie jestem również zaangażowany w projekt dotyczący odtwarzania historii upwellingu i cyrkulacji oceanicznej w południowo-wschodnim Pacyfiku (system prądu Humboldta) w okresie od eocenu do plejstocenu, na podstawie składu izotopowego Nd zębów ryb z peruwiańskiego basenu Pisco (Kiel i in., w recenzji). W ramach tej pracy przeprowadziłem, wraz z pozostałymi współautorami z Pracowni Izotopowej UAM, pomiary izotopowe Nd, a także, wspólnie z drem Steffenem Kielem (Szwedzkie Muzeum Historii Naturalnej), zinterpretowałem wyniki w kontekście relacji pomiędzy źródłami Nd a głównymi epizodami zmian w cyrkulacji oceanicznej, związanymi z otwieraniem się Cieśniny Drake'a, wypiętrzaniem Andów i rosnącą czapą lodową Antarktydy.

Źródła Sr w wodach systemów rzecznych

Ostatni z kierunków badań, w które włączone byłem po obronie pracy doktorskiej dotyczył określenia składu izotopowego i koncentracji Sr w głównych rzekach dorzecza Odry. Projekt miał na celu zrozumienie naturalnych (dopływ wód gruntowych i deszczowych, interakcje ze skałami osadowymi) i antropogenicznych (rolnictwo, górnictwo, przemysł) źródeł Sr do Odry i jej dopływów. Wyniki wykazały zarówno istotną rolę interakcji woda-skała (Zieliński i in., 2017), jak i bardzo duży wpływ czynników antropogenicznych – w tym szczególnie stosowanych w rolnictwie nawozów sztucznych – oraz górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego (Zieliński i in., 2016, 2018). Oprócz implikacji środowiskowych, ważnym wynikiem prac było także wykazanie, że obecny skład izotopowy Sr jest zbyt zmieniony przez współczesne źródła antropogeniczne, by mógł być wykorzystywany w badaniach archeologicznych jako lokalny poziom referencyjny dla czasów przedindustrialnych. Moja rola w przedstawionych pracach polegała na udziale w pracach terenowych i interpretacji wyników pomiarów w kontekście interakcji pomiędzy wodami i skałami osadowymi obecnymi w dorzeczu badanego systemu rzecznego.

4.2.3. Wystąpienia konferencyjne i na zebraniach instytucji naukowych poza UAM

W ramach dotychczasowej działalności naukowej byłem autorem 19 wystąpień na konferencjach naukowych, w tym 13 – na konferencjach międzynarodowych. W 17 przypadkach moje uczestnictwo obejmowało wystąpienia ustne, natomiast w dwóch – wystąpienia posterowe. Dwukrotnie wyniki badań prezentowałem również w ramach zebrań zewnętrznych ośrodków naukowych. W trzech przypadkach moje wystąpienia miały charakter wykładów na zaproszenie organizatorów:

- JAKUBOWICZ M., 2014. Cryptic coral-crinoid 'hanging gardens' from the Middle Devonian of southern Morocco. *Seminarium Sekcji Paleontologii GeoZentrum Nordbayern*, 14 stycznia 2014, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg; na zaproszenie dyrektora Instytutu Paleontologii GeoZentrum Nordbayern, prof. W. Kiesslinga.
- JAKUBOWICZ M. 2016. Very similar, but very different: ecology of Palaeozoic hydrocarbon seep communities. *1st International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities*. 13–17 czerwca 2016, Warszawa (*keynote lecture*); na zaproszenie organizatorów konferencji.
- JAKUBOWICZ M. 2021. Lokalne archiwa regionalnych procesów: geochemia kopalnych wsięków metanu a historia tektoniczna krawędzi płyt kontynentalnych. *Ogólnopolskie Posiedzenie Naukowe z okazji Obchodów 100-lecie Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 29 kwietnia 2021, online; na zaproszenie Kapituły Obchodów 100-lecia PTG.

Oprócz tego, byłem współautorem 18 wystąpień konferencyjnych, które były prezentowane przez moich współpracowników. Pełna lista wystąpień, w które byłem zaangażowany znajduje się w załączonym *Wykazie osiągnięć*.

4.2.4. Aktywność w pozyskiwaniu i realizacji zewnętrznych projektów badawczych

W ramach dotychczasowej działalności naukowej kierowałem trzema finansowanymi z zewnątrz projektami naukowymi: dwoma Narodowego Centrum Nauki (programy Preludium i Sonata; program Sonata pozostaje w realizacji) oraz jednym Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (program Iuventus Plus). Oprócz tego, pełniłem funkcję wykonawcy w siedmiu projektach Narodowego Centrum Nauki (pięciu programu Opus i dwóch programu Preludium; pięć z nich – w realizacji). We wszystkich projektach, w których byłem wykonawcą pełniłem przede wszystkim funkcję specjalisty w zakresie sedymentologii i geochemii skał

węglanowych. Szczegółowy opis tematyki i wysokości finansowania projektów zostały zawarte w *Wykazie osiągnięć*.

4.2.5. Recenzje publikacji naukowych

Od momentu uzyskania stopnia doktora wykonałem 20 recenzji artykułów naukowych dla czasopism z listy JCR: *Chemical Geology* (3 recenzowane manuskrypty), *Geology* (3), *Palaios* (3), *Journal of Asian Earth Sciences* (2), *Marine and Petroleum Geology* (2), *Scientific Reports* (2), *Minerals* (2), *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie* (1), *PLoS One* (1) oraz *Progress in Earth and Planetary Science* (1). Wykonałem również jedną recenzję rozdziału w międzynarodowej monografii naukowej (Springer Series: *Topics in Geobiology*) oraz dwie recenzje rozdziałów w polskojęzycznych wydawnictwach pokonferencyjnych.

4.2.6. Nagrody i wyróżnienia

Stypendia z wyboru:

1.09.2006-30.06.2007	stypendium Starosty Powiatu Żarskiego
1.10.2007-30.06.2011	stypendium Rektora dla najlepszych studentów Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza
1.08.2010-31.01.2011	stypendium programu LPP Erasmus
1.10.2011-30.06.2012; 1.10.2013-30.06.2014	stypendium Rektora dla najlepszych doktorantów Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza
1.11.2013-31.01.2014	stypendium Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)
1.10.2014-31.07.2015	stypendium Fundacji Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
1.06.2015-1.06.2016	stypendium programu START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Stypendium przyznane ze specjalnym wyróżnieniem
1.06.2016-1.06.2017	stypendium programu START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej
1.11.2018-31.10.2021	stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców

Inne nagrody i wyróżnienia:

09.04.2006	tytuł finalisty zawodów III stopnia XXXII Olimpiady Geograficznej
14.05.2011	nagroda Dziekana za najwyższą średnią ocen wśród absolwentów Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych w roku 2011
22.11.2011	druga nagroda w konkursie na najlepszą pracę magisterską obronioną na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w roku 2011
18.03.2013	Nagroda dla Studentów Zagranicznych (Foreign Student Award) Institute de Physique du Globe w Paryżu
5.06.2014	laureat II edycji Konkursu Oddziału Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu na najlepszą oryginalną pracę twórczą doktoranta opublikowaną w roku 2013 w obszarze nauk ścisłych i nauk o Ziemi. Nagrodzona praca: Jakubowicz M., Berkowski B., Bełka Z., 2014. Cryptic

coral-crinoid "hanging gardens" from the Middle Devonian of southern Morocco. *Geology*, 42(2)

- 27.10.2016 Nagroda Naukowa im. Ignacego Domeyki Wydziału III Polskiej Akademii Nauk za cykl prac opisujących badanie unikalnych systemów wypływów hydrotermalnych i wysięków metanu na dnie dawnych mórz i oceanów
- 9.05.2019 Zespołowa Nagroda I Stopnia Rektora UAM, wspólnie ze współpracownikami: prof. dr hab. Zdzisławem Bełką, prof. UAM dr hab. Błażem Berkowskim i drem Janem Królem
- 7.06.2019 wyróżnienie czasopisma *Geological Journal* dla pracy: Jakubowicz M., Król J., Zapalski M., Wrzolek T., Wolniewicz P., Berkowski B. 2019. At the southern limits of the Devonian reef zone: Palaeoecology of the Aferdou el Mrakib reef (Givetian, eastern Anti-Atlas, Morocco). *Geol J*, 54(1), która znalazła się wśród najczęściej czytanych artykułów opublikowanych w tym czasopiśmie w latach 2018–2019
- 23.11.2020 laureat konkursu projektu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza na wsparcie najbardziej produktywnej naukowo młodej kadry UAM (na lata 2020–2022)

5. INFORMACJA O WYKAZYWANIU SIĘ ISTOTNĄ AKTYWNOŚCIĄ NAUKOWĄ ALBO ARTYSTYCZNĄ REALIZOWANĄ W WIĘCEJ NIŻ JEDNEJ UCZELNI, INSTYTUCJI NAUKOWEJ LUB INSTYTUCJI KULTURY, W SZCZEGÓLNOŚCI ZAGRANICZNEJ

W latach 2013–2014 odbyłem trzymiesięczny staż w Laboratorium Izotopów Stabilnych GeoZentrum Nordbayern (Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg) jako stypendysta Niemieckiej Centrali Wymiany Akademickiej (Deutscher Akademischer Austauschdienst; DAAD). Laboratorium Izotopów Stabilnych GeoZentrum Nordbayern jest jednym z wiodących ośrodków przeprowadzających analizy izotopowe węgla i tlenu na świecie; opiekunem stażu był prof. Michael Joachimski, jeden z najbardziej uznanych specjalistów w dziedzinie wykorzystania izotopów stabilnych w geologii. Celem stażu było zapoznanie się z podstawami metodologicznymi pomiarów względnych koncentracji izotopów stabilnych węgla i tlenu, a także zrealizowanie dwóch szczegółowych zadań badawczych. Realizacja obu zadań została zwieńczona publikacjami w renomowanych czasopismach z listy JCR.

Pierwsze z zadań obejmowało pomiary zawartości izotopów węgla i tlenu w próbkach węglanów śródkowodewońskiego wsięku metanu z południowego Maroka (tzw. kopca Hollarda; Jakubowicz i in., 2015a). Analizy te były elementem niezbędnym do szczegółowego rozpoznania środowiska sedymentacji kopca Hollarda, w tym – prawidłowej interpretacji danych izotopowych Nd i koncentracji ziem rzadkich, które stanowiły główny przedmiot pracy. Względne koncentracje izotopów węgla pozwoliły na rozróżnienie faz węglanowych powstałych w wyniku beztlenowego utleniania metanu oraz wapieni nie-wysiękowych, co było kluczowe z uwagi na rozwój wsięku kopca Hollarda w obrębie sukcesji zdominowanej przez węglany. Analizy te dały jednocześnie ważne przesłanki co do termogenicznej genezy metanu, potwierdzając model głębokiego pochodzenia węglowodorów, sformułowany dla kopca Hollarda na podstawie analiz izotopowych Nd i koncentracji ziem rzadkich. Praca stanowiła pierwszą próbę zastosowania izotopów Nd w badaniach kopalnych wsięków metanu, wykazując, że metoda ta pozwala na odtwarzanie dawnych interakcji pomiędzy fluidami i wulkanicznymi skałami podłoża; ten aspekt prowadzonych badań został omówiony szerzej w podrozdziale 4.1.2 przedłożonego referatu. Wyniki pracy ukazały się drukiem w prestiżowym czasopiśmie *Geochimica et Cosmochimica Acta*.

Drugi z projektów badawczych zrealizowanych przeze mnie w Laboratorium Izotopów Stabilnych GeoZentrum Nordbayern dotyczył odtwarzania charakteru i mechanizmów frakcjonowania izotopowego w szkieletach koralowców z paleozoicznego, wymarłego rzędu Rugosa (Jakubowicz i in., 2015b). Większość

prac analitycznych w ramach przedłożonego artykułu zostały przeprowadzona w GeoZentrum Nordbayern przy wykorzystaniu dostępnego tam specjalistycznego wyposażenia, we współpracy z pracownikami tej jednostki: mgrm Matthiasem Lópezem Corraę, dr Emilią Jarochofską i prof. Michałem Joachimskim. Oprócz samych pomiarów względnych koncentracji izotopów stabilnych, prace te obejmowały obserwacje mikroskopowe płytek cienkich i zgładów (mikroskopia świetlna i katodoluminescencyjna, skaningowa mikroskopia elektronowa), a także pobór próbek przy pomocy dostępnego w Instytucie Paleontologii GeoZentrum Nordbayern specjalistycznego urządzenia typu micromill (urządzenie umożliwiające zautomatyzowany pobór bardzo niewielkich próbek mineralnych z wybranych powierzchni szkieletu, niezbędne do odpowiednio precyzyjnej selekcji pierwotnego materiału szkieletowego). Szeroki zestaw zastosowanych w pracy metod mikroskopowych, a także zastosowanie analiz koncentracji wybranych pierwiastków pobocznych i śladowych umożliwił identyfikację najlepiej zachowanych i diagenetycznie zmienionych części szkieletów. Wyraźnie odmienne stosunki izotopowe zmierzone w diagenetycznie zmienionych i stosunkowo dobrze zachowanych częściach koralitów ukazały kluczowe znaczenie doboru odpowiedniego materiału do badań izotopowych nad kopalnymi grupami parzydełkowców. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na nowy wgląd w mechanizmy frakcjonowania izotopowego towarzyszącego szkieletogenezie paleozoicznych rugozów, wykazując, że skład izotopowy najmniej zmienionych części ich szkieletów był bliski węglanom wytrącanym w równowadze chemicznej z otaczającą wodą morską. Tym samym, pod względem mechanizmów frakcjonowania izotopowego koralowca *Rugosa* przypominały współczesne koralowce ośmiopromienne i hydrokorale, różniły się natomiast znacznie od większości koralowców współczesnych, zaliczanych do grupy *Scleractinia*. Wyniki te dały cenny nowy wgląd w relacje pomiędzy różnymi grupami kalcyfikujących parzydełkowców, potwierdzając najnowsze analizy genetycznymi i paleontologiczne, wskazujące, że współczesne koralowce są reprezentantami linii wyodrębnionej z bezszkieletowych parzydełkowców we wczesnym paleozoiku, a więc – że mechanizmy szkieletogenezy musiały wytworzyć się niezależnie u *Rugosa* i *Scleractinia*. Przeprowadzone analizy wykazały jednocześnie, że dzisiejsze koralowce *Scleractinia* nie mogą służyć jako analog w badaniach izotopowych wymarłych gałęzi parzydełkowców, w tym – w dociekaniach o możliwości występowania symbiozy pomiędzy koralowcami i glonami. Wyniki pracy zostały opublikowane w czasopiśmie *PLoS One*.

Oprócz stażu w GeoZentrum Nordbayern, moje pobyty naukowe poza Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza obejmowała półroczne stypendium w trakcie studiów magisterskich na Uniwersytecie w Aarhus (Dania), a także krótsze (do miesiąca) pobyty na zagranicznych uczelniach w celu poszerzenia warsztatu badawczego w ramach realizacji projektów naukowych, w które włączeni byli współpracownicy z zagranicy. Wyjazdy te obejmowały pobyty na Uniwersytecie Kraju Basków (wrzesień 2017 r.; osoba przyjmująca: dr Luis Agirrezabala), Uniwersytecie Stanowym Kalifornii w Chico (wrzesień 2019 r.; osoba przyjmująca: prof. Russell Shapiro), dwukrotnie na Uniwersytecie Technologicznym w Ałmaty (wrzesień 2014 i czerwiec 2017 r.; osoba przyjmująca: dr Sezim Mustapajewa) oraz, ponownie, w GeoZentrum Nordbayern (luty 2014 r.; osoba przyjmująca: dr Emilia Jarochofska). Wyniki tych badań zaowocowały powstaniem szeregu publikacji (Jakubowicz i in., 2015b, 2020a, 2021a, 2022; Korn i in., 2020; Bełka i in., 2021). Szczegółowy wykaz moich pobytów badawczych został przedstawiony w *Wykazie osiągnięć*.

6. INFORMACJA O OSIĄGNIĘCIACH DYDAKTYCZNYCH, ORGANIZACYJNYCH ORAZ POPULARYZUJĄCYCH NAUKĘ LUB SZTUKĘ

6.1. Aktywność dydaktyczna

W okresie studiów doktoranckich (lata 2011–2015) prowadziłem ćwiczenia z przedmiotu Geologia dla kierunków geografia, hydrologia, meteorologia i klimatologia oraz kształtowanie środowiska przestrzennego. Od momentu mojego zatrudnienia na stanowisku adiunkta (2015 r.) prowadziłem ćwiczenia z przedmiotów:

- Geologia (kierunki: geografia, geoinformacja, hydrologia, meteorologia i klimatologia),
- Terminologia specjalistyczna geografii – język angielski (kierunek: ekologia miasta),
- Język angielski specjalnościowy (kierunek: geoinformacja),
- Fotografia przyrodnicza (kierunek: geo-grafika),
- Technologie informacyjne (kierunki: geografia, ekologia miasta, zarządzanie środowiskiem),
- Biogeografia (kierunek: ekologia miasta);

ćwiczenia terenowe z przedmiotów:

- Geologia czwartorzędu (kierunek: ekologia miasta),
- Analiza środowiska (kierunek: zarządzanie środowiskiem),
- Fotografia przyrodnicza (kierunek: geo-grafika);

a także wykład z przedmiotu

- Zmiany środowiska w historii Ziemi (kierunek: hydrologia, meteorologia i klimatologia).

W ostatnich latach regularnie prowadziłem również wykłady z przedmiotów fakultatywnych, uruchamianych po wyborze przez studentów Wydziału Nauk Geograficznych:

- Isotopes in geosciences, archaeology and environmental protection (w języku angielskim)
- Życie na krawędzi: geoekologia środowisk ekstremalnych.

Dodatkowo, w omawianym okresie prowadziłem laboratoria i seminaria licencjackie dla studentów kierunków geografia, geo-grafika i geologia, a także byłem autorem sylabusów dla przedmiotów Życie na krawędzi – geoekologia środowisk ekstremalnych, Fotografia przyrodnicza, Terminologia specjalistyczna – język angielski i Technologie informacyjne. Dotychczas byłem promotorem dwóch prac licencjackich; obecnie jestem również promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich: mgr Patrycji Dworcak (UAM; promotor główny: prof. dr hab. Błażej Berkowski) oraz mgr Aleksandra Majchrzyka (Uniwersytet Warszawski; promotor główny: prof. UW dr hab. Mikołaj Zapalski).

6.2. Aktywność organizacyjna

W ramach swojej działalności organizacyjnej na UAM dwukrotnie sprawowałem funkcję opiekuna roku studiów licencjackich (2016–2019, kierunek: geoinformacja; 2021–obecnie, kierunek: geo-grafika). Od roku 2021 pełnię również rolę Koordynatora ds. kontaktu z Poradnią Rozwoju i Wsparcia Psychicznego UAM na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych.

W roku 2016 byłem członkiem komisji rekrutacyjnej dla kierunku geoinformacja, a w roku 2021 – członkiem jury Wydziałowego Konkursu Prac Licencjackich. Moja aktywność organizacyjno-administracyjna obejmowała także obowiązki wynikające z zaangażowania w realizację dziesięciu projektów badawczych Narodowego Centrum Nauki (załączony *Wykaz osiągnięć*), w tym przede wszystkim z kierowania przeze mnie trzema projektami: nr 2012/07/N/ST10/04044 (2013–2016 r.; program Preludium NCN), nr IP2014 016373 (2014–2017 r.; program Iuventus Plus MNiSW) oraz 2016/23/D/ST10/00444 (od 2017 r.; program Sonata NCN). Poza pracami w ramach grantów badawczych, pozostaję zaangażowany w bieżącą działalność operacyjną i organizacyjną Laboratorium Izotopowego UAM, a także sprawuję opiekę nad wydziałowym urządzeniem katodoluminescencyjnym.

Jestem aktywnym członkiem International Association of Sedimentologists (od 2018 r.), European Geosciences Union (od 2020 r.), oraz Polskiego Towarzystwa Geologicznego (od 2021 r.). W roku 2016

brałem udział w organizacji XIII Konferencji Naukowej Sekcji Paleontologicznej Polskiego Towarzystwa Geologicznego w Poznaniu.

6.3. Aktywność popularyzacyjna

W trakcie pracy na UAM byłem zaangażowany w działalność popularyzującą naukę. Moje badania dotyczące dewońskich kopców mułowych Maroka zostały rozpowszechnione w ramach artykułu w serwisie Nauka w Polsce Polskiej Agencji Prasowej pt. „Wiszące ogrody i oazy życia sprzed 380 mln lat w pustynnych kopcach” autorstwa dziennikarki PAP p. Ludwika Tomali (naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C405197%2Cwiszace-ogrody-i-oazy-zycia-sprzed-380-mln-lat-w-pustynnych-kopcach.html), której udzieliłem wywiadu przy okazji wręczenia stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w 2015 r. Tematyka publikacji poświęconej koralowcowo-liliowcowym „wiszącym ogrodom” z dewońskich pustek skalnych Maroka (Jakubowicz i in., 2014b) została również omówiona w artykule wstępnym popularnonaukowego czasopisma internetowego *Lab Times* autorstwa Karla Grubera pt. „A Rare Look into the Past” (labtimes.org/editorial/e_484.lasso). Praca dotycząca dewońskiej rafy mezofotycznej z Australii, którego byłem współautorem (Zapalski i in., 2021), została natomiast spopularyzowana w czasopiśmie *National Geographic* w ramach artykułu pt. „Na rafach cienia” autorstwa p. Sławomira Borkowskiego (Borkowski, 2021). Oprócz tego, od lat regularnie prowadzę działalność popularyzacyjną, organizując warsztaty z paleontologii i wykłady dotyczące geologii Maroka i Kazachstanu w ramach Poznańskiego Festiwalu Nauki i Sztuki oraz, na zaproszenie, w poznańskich i podpoznańskich placówkach oświatowych (38. Dwujęzyczne LO w Poznaniu; Piątkowska Szkoła Społeczna im. Dr Wandy Bleńskiej w Poznaniu; III LO im. św. Jana Kantego w Poznaniu; Zespół Szkół Zakonu Pijarów w Poznaniu; Gimnazjum im. Jana Pawła II w Czerwonaku; niepubliczne przedszkole „Leśne Gzubki” w Poznaniu).

7. OPRÓCZ KWESTII WYMIENIONYCH W PKT. 1-6, WNIOSKODAWCA MOŻE Podać INNE INFORMACJE, WAŻNE Z JEGO PUNKTU WIDZENIA, DOTYCZĄCE JEGO KARIERY ZAWODOWEJ

–

Cytowana literatura

- Aarnes, I., Svensen, H., Connolly, J.A.D., Podladchikov, Y.Y., 2010. How contact metamorphism can trigger global climate changes: Modeling gas generation around igneous sills in sedimentary basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, 7179-7195.
- Agirrezabala, L.M., 2009. Mid-Cretaceous hydrothermal vents and authigenic carbonates in a transform margin, Basque-Cantabrian Basin (western Pyrenees): a multidisciplinary study. *Sedimentology* 56, 969-996.
- Agirrezabala, L.M., 2015. Syndepositional forced folding and related fluid plumbing above a magmatic laccolith: Insights from outcrop (Lower Cretaceous, Basque-Cantabrian Basin, western Pyrenees). *Geological Society of America Bulletin* 127, 982-1000.
- Agirrezabala, L.M., Kiel, S., Blumenberg, M., Schäfer, N., Reitner, J., 2013. Outcrop analogues of pockmarks and associated methane-seep carbonates: A case study from the Lower Cretaceous (Albian) of the Basque-Cantabrian Basin, western Pyrenees. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 390, 94-115.
- Baliński A., Bittner A., Jakubowicz M. *Zaakceptowany manuskrypt*. Brachiopods. W: *Ancient Hydrocarbon Seeps* (Red. Kaim A., Landman N., Cochran K.), Topics in Geobiology, Springer Verlag (*książka zakontraktowana do druku przez wyd. Springer Verlag we wrześniu 2022 r.*).
- Banner, J.L., Hanson, G.N., 1990. Calculation of simultaneous isotopic and trace-element variations during water-rock interactions with applications to carbonate diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 3123-3137.
- Barker, C.E., Bone, Y., Lewan, M.D., 1998. Fluid inclusion and vitrinite-reflectance geothermometry compared to heat-flow models of maximum paleotemperature next to dikes, western onshore Gippsland Basin, Australia. *International Journal of Coal Geology* 37, 73-111.
- Baumberger, T., Früh-Green, G.L., Dini, A., Boschi, C., van Zuilen, K., Thorseth, I.H., Pedersen, R.B., 2016. Constraints on the sedimentary input into the Loki's Castle hydrothermal system (AMOR) from B isotope data. *Chemical Geology* 443, 111-120.

- Bayon, G., Pierre, C., Etoubleau, J., Voisset, M., Cauquil, E., Marsset, T., Sultan, N., Le Drezen, E., Fouquet, Y., 2007. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments: Implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments. *Marine Geology* 241, 93-109.
- Bayon, G., Birot, D., Ruffine, L., Caprais, J.C., Ponzevera, E., Bollinger, C., Donval, J.P., Charlou, J.L., Voisset, M., Grimaud, S., 2011. Evidence for intense REE scavenging at cold seeps from the Niger Delta margin. *Earth and Planetary Science Letters* 312, 443-452.
- Beauchamp, B., Krouse, H.R., Harrison, J.C., Nassichuk, W.W., Eliuk, L.S., 1989. Cretaceous cold-seep communities and methane-derived carbonates in the Canadian Arctic. *Science* 244, 53-56.
- Beauchamp, B., Savard, M., 1992. Cretaceous chemosynthetic carbonate mounds in the Canadian Arctic. *Palaios* 7, 434-450.
- Belka, Z., Dopieralska, J., Jakubowicz, M., Skompski, S., Walczak, A., Korn, D., Siepak, M., 2021. Nd isotope record of ocean closure archived in limestones of the Devonian–Carboniferous carbonate platform, Greater Karatau, southern Kazakhstan. *Journal of the Geological Society* 178(1), jgs2020-2077.
- Belka Z., Skompski S., Jakubowicz M., Dopieralska J., Walczak A., Mustapayeva S. *W recenzji*. Testing icehouse cyclicality and seawater dynamics on an ancient carbonate platform with Nd isotopes (Carboniferous, southern Kazakhstan). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (ms nr PALAEO-D-21-00707).
- Berkowski, B., Jakubowicz, M., Belka, Z., Król, J.J., Zapalski, M.K., 2019. Recurring cryptic ecosystems in Lower to Middle Devonian carbonate mounds of Hamar Laghdad (Anti-Atlas, Morocco). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 523, 1-17.
- Birgel, D., Himmler, T., Freiwald, A., Peckmann, J., 2008. A new constraint on the antiquity of anaerobic oxidation of methane: Late Pennsylvanian seep limestones from southern Namibia. *Geology* 36, 543-546.
- Borkowski S., 2021. Na rafach cienia. *National Geographic Polska*, 5, 80-82.
- Bralower, T.J., Fullagar, P.D., Paull, C.K., Dwyer, G.S., Leckie, R.M., 1997. Mid-Cretaceous strontium-isotope stratigraphy of deep-sea sections. *Geological Society of America Bulletin* 109, 1421-1442.
- Breitsprecher, K., Thorkelson, D.J., Groome, W.G., Dostal, J., 2003. Geochemical confirmation of the Kula-Farallon slab window beneath the Pacific Northwest in Eocene time. *Geology* 31, 351-354.
- Brownfield, M.E., 2011. Total petroleum systems and geologic assessment of undiscovered hydrocarbon resources of the western Oregon and Washington Province. W: *Geologic Assessment of Undiscovered Hydrocarbon Resources of the Western Oregon and Washington Province* (Red. U.S., Geological Survey Western Oregon Team, Washington Province Assessment, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia).
- Buggisch, W., Krumm, S., 2005. Palaeozoic cold seep carbonates from Europe and North Africa—an integrated isotopic and geochemical approach. *Facies* 51, 566-583.
- Campbell, A.C., German, C.R., Palmer, M.R., Gamo, T., Edmond, J.M., 1994. Chemistry of hydrothermal fluids from Escanaba Trough, Gorda Ridge. *U.S. Geological Survey Bulletin* 2022, 201-222.
- Campbell, K.A., Farmer, J.D., Des Marais, D., 2002. Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments. *Geofluids* 2, 63-94.
- Campbell, K., 2006. Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 232, 362-407.
- Canet, C., Anadón, P., Alfonso, P., Prol-Ledesma, R.M., Villanueva-Estrada, R.E., García-Vallès, M., 2013. Gas-seep related carbonate and barite authigenic mineralization in the northern Gulf of California. *Marine and Petroleum Geology* 43, 147-165.
- Chan, C.F., Tepper, J.H., Nelson, B.K., 2012. Petrology of the Grays River volcanics, southwest Washington: Plume-influenced slab window magmatism in the Cascadia forearc. *Geological Society of America Bulletin* 124, 1324-1338.
- Chavagnac, V., Saleban Ali, H., Jeandel, C., Leleu, T., Destigneville, C., Castillo, A., Cotte, L., Waeles, M., Cathalot, C., Laes-Huon, A., Pelleter, E., Nonnotte, P., Sarradin, P.-M., Cannat, M., 2018. Sulfate minerals control dissolved rare earth element flux and Nd isotope signature of buoyant hydrothermal plume (EMSO-Azores, 37°N Mid-Atlantic Ridge). *Chemical Geology* 499, 111-125.
- Cochran J. K., Landman N. H., Jakubowicz M., Brezina J., Naujokaityte J., Danilova A., Garb M., Larson N. *Zaakceptowany manuskrypt*. Geochemistry of cold hydrocarbon seeps: an overview. W: *Ancient Hydrocarbon Seeps* (Red. Kaim A., Landman N., Cochran K.), Topics in Geobiology, Springer Verlag (*książka zakontraktowana do druku przez wyd. Springer Verlag we wrześniu 2022 r.*).
- DeFelipe, I., Pulgar, J.A., Pedreira, D., 2018. Crustal structure of the eastern Basque-Cantabrian Zone - western Pyrenees: from the Cretaceous hyperextension to the Cenozoic inversion. *Revisita de la Sociedad Geológica de España* 31, 69-82.
- Delaney, P.T., 1982. Rapid intrusion of magma into wet rock: Groundwater flow due to pore pressure increases. *Journal of Geophysical Research* 87, 7739.
- Dopieralska, J., 2003. Neodymium isotopic composition of conodonts as a palaeoceanographic proxy in the Variscan oceanic system. Praca doktorska, Justus-Liebig-University, Giessen.
- Dostal, J., Keppie, J.D., Church, B.N., Somerville, I.D., 2019. Generation of Eocene volcanic rocks from the Cordilleran arc of south-central British Columbia (Canada) during subduction of the Farallon and Resurrection plates and Yellowstone oceanic plateau. *Geological Journal* 54, 590-604.
- Dostal, J., Owen, J.V., 1998. Cretaceous alkaline lamprophyres from northeastern Czech Republic: geochemistry and petrogenesis. *Geologische Rundschau* 87, 67-77.

- Dubilier, N., Bergin, C., Lott, C., 2008. Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nature Reviews Microbiology* 6, 725-740.
- Dulski, P., 1994. Interferences of oxide, hydroxide and chloride analyte species in the determination of rare earth elements in geological samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry* 350, 194-203.
- Dworczak P., Berkowski, B., Jakubowicz, M., 2020. Epizoans immured in the heterocoral *Oligophylloides maroccanus* Weyer, 2017: a unique record from the Famennian (Upper Devonian) of Morocco. *Lethaia* 53, 452-461.
- Dworczak P., López Correa M., Jakubowicz M., Munnecke A., Joachimski M., Berkowski B. 2022. Carbon and oxygen isotope fractionation in the Late Devonian heterocoral *Oligophylloides*: implications for the skeletogenesis and evolution of the Heterocorallia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 598, 111017.
- Eddy, M.P., Bowring, S.A., Umhoefer, P.J., Miller, R.B., McLean, N.M., Donaghy, E.E., 2016. High-resolution temporal and stratigraphic record of Siletzia's accretion and triple junction migration from nonmarine sedimentary basins in central and western Washington. *Geological Society of America Bulletin* 128, 425-441.
- Elmore, A.C., Piotrowski, A.M., Wright, J.D., Scrivner, A.E., 2011. Testing the extraction of past seawater Nd isotopic composition from North Atlantic deep sea sediments and foraminifera. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 12, Q09008.
- Fanton, K.C., Holmden, C., Nowlan, G.S., Haidl, F.M., 2002. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd stratigraphy of Upper Ordovician epeiric sea carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 241-255.
- Feng, D., Chen, D., Peckmann, J., 2009. Rare earth elements in seep carbonates as tracers of variable redox conditions at ancient hydrocarbon seeps. *Terra Nova* 21, 49-56.
- Formolo, M.J., Lyons, T.W., Zhang, C., Kelley, C., Sassen, R., Horita, J., Cole, D.R., 2004. Quantifying carbon sources in the formation of authigenic carbonates at gas hydrate sites in the Gulf of Mexico. *Chemical Geology* 205, 253-264.
- Freslon, N., Bayon, G., Toucanne, S., Bermell, S., Bollinger, C., Chéron, S., Etoubleau, J., Germain, Y., Khripounoff, A., Ponzevera, E., Rouget, M.-L., 2014. Rare earth elements and neodymium isotopes in sedimentary organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 140, 177-198.
- Friedman, I., O'Neil, J.R., 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. *U.S. Geological Survey, Professional Paper* 440-K, 1-12.
- Gao, H., Humphreys, E.D., Yao, H., van der Hilst, R.D., 2011. Crust and lithosphere structure of the northwestern U.S. with ambient noise tomography: Terrane accretion and Cascade arc development. *Earth and Planetary Science Letters* 304, 202-211.
- Geilert, S., Hensen, C., Schmidt, M., Liebetrau, V., Scholz, F., Doll, M., Deng, L., Fiskal, A., Lever, M.A., Su, C.-C., Schloemer, S., Sarkar, S., Thiel, V., Berndt, C., 2018. On the formation of hydrothermal vents and cold seeps in the Guaymas Basin, Gulf of California. *Biogeosciences* 15, 5715-5731.
- Goldstein, S.J., Jacobsen, S.B., 1988. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 87, 249-265.
- Golonka, J., Gahagan, L., Krobicki, M., Marko, F., Oszczytko, N., Ślącza, A., 2006. Plate-tectonic Evolution and Paleogeography of the Circum-Carpathian Region. W: *The Carpathians and their foreland: Geology and hydrocarbon resources* (Red. Golonka, J., Picha, F.J.). *AAPG Memoir*, s. 11-46.
- Grasse, P., Stichel, T., Stumpf, R., Stramma, L., Frank, M., 2012. The distribution of neodymium isotopes and concentrations in the Eastern Equatorial Pacific: Water mass advection versus particle exchange. *Earth and Planetary Science Letters* 353-354, 198-207.
- Greiner, J., Bohrmann, G., Suess, E., 2001. Gas Hydrate-Associated Carbonates and Methane-Venting at Hydrate Ridge: Classification, Distribution, and Origin of Authigenic Lithologies. W: *Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution, and Detection* (Red. Paull, C.K., Dillon, P.W.), s. 99-113.
- Greiner, J., Bohrmann, G., Elvert, M., 2002. Stromatolitic fabric of authigenic carbonate crusts: result of anaerobic methane oxidation at cold seeps in 4,850 m water depth. *International Journal of Earth Sciences* 91, 698-711.
- Gurnis, M., 1992. Rapid Continental Subsidence Following the Initiation and Evolution of Subduction. *Science* 255, 1556-1558.
- Heller, P.L., Tabor, R.W., Suczek, C., 1987. Paleogeographic evolution of the United States Pacific Northwest during Paleogene time. *Canadian Journal of Earth Sciences* 24, 1652-1667.
- Himmler, T., Bach, W., Bohrmann, G., Peckmann, J., 2010. Rare earth elements in authigenic methane-seep carbonates as tracers for fluid composition during early diagenesis. *Chemical Geology* 277, 126-136.
- Hryniewicz, K., Jakubowicz, M., Bełka, Z., Dopieralska, J., Kaim, A., 2017. New bivalves from a Middle Devonian methane seep in Morocco: the oldest record of repetitive shell morphologies among some seep bivalve molluscs. *Journal of Systematic Palaeontology* 15, 19-41.
- Hryniewicz, K., Jakubowicz, M., Klug, C., 2018. Early Devonian bivalves from Hamar Laghdad, Morocco. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie - Abhandlungen* 290, 191-202.
- Hryniewicz, K., Miyajima, Y., Amano, K., Georgieva, M.N., Jakubowicz, M., Jenkins, R.G., Kaim, A., 2021. Formation, diagenesis and fauna of cold seep carbonates from the Miocene Taishu Group of Tsushima (Japan). *Geological Magazine* 158, 964-984.
- Jacobsen, S.B., Wasserburg, G.J., 1980. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites. *Earth and Planetary Science Letters* 50, 139-155.
- Jakubowicz, M., 2012. Współczesne głębokomorskie budowle węglanowe - nieznaną świat podmorskich oaz. *Przegląd Geologiczny* 60, 325-332.

- Jakubowicz M. 2018. Środowisko sedymentacji wapieni wysięków metanu: dane mikrofacjalne a nowe metody geochemiczne. *Polska Konferencja Sedymentologiczna POKOS 7*, 4-7 czerwca 2018, Góra Św. Anny. Abstrakty, s. 76.
- Jakubowicz M. 2021. Lokalne archiwa regionalnych procesów: geochemia kopalnych wysięków metanu a historia tektoniczna krawędzi płyt kontynentalnych. *100-lecie Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 29 kwietnia 2021, online.
- Jakubowicz M., Berkowski, B., Bełka, Z., 2013. Devonian rugose coral 'Amplexus' and its relation to submarine fluid seepage. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 386, 180-193.
- Jakubowicz M., Bełka, Z., Berkowski, B., 2014a. *Frutexitex* encrustations on rugose corals (Middle Devonian, southern Morocco): complex growth of microbial microstromatolites. *Facies* 60, 631-650.
- Jakubowicz M., Berkowski, B., Bełka, Z., 2014b. Cryptic coral-crinoid "hanging gardens" from the Middle Devonian of southern Morocco. *Geology* 42, 119-122.
- Jakubowicz M., Dopieralska, J., Bełka, Z., 2015a. Tracing the composition and origin of fluids at an ancient hydrocarbon seep (Hollard Mound, Middle Devonian, Morocco): A Nd, REE and stable isotope study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 156, 50-74.
- Jakubowicz M., Berkowski, B., Lopez Correa, M., Jarochovska, E., Joachimski, M., Bełka, Z., 2015b. Stable Isotope Signatures of Middle Palaeozoic Ahermatypic Rugose Corals - Deciphering Secondary Alteration, Vital Fractionation Effects, and Palaeoecological Implications. *PLoS One* 10, e0136289.
- Jakubowicz M., Dopieralska J., Bełka Z. 2016. On the use of Nd isotopes in studies of seep and vent carbonates: prospects, limitations, and challenges. *1st International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities*. 13-17 czerwca 2016, Warszawa. Abstrakty, s. 18.
- Jakubowicz M., Hryniewicz, K., Bełka, Z., 2017. Mass occurrence of seep-specific bivalves in the oldest-known cold seep metazoan community. *Scientific Reports* 7, 14292.
- Jakubowicz M., Dopieralska J. Kaim A., Skupien P. Bełka Z. 2018. Nd isotope composition of seep carbonates: a new approach to identifying fluid sources at ancient cold seeps. *20th International Sedimentological Congress*, 13-17 sierpnia 2018, Québec City. Abstrakty, s. 113.
- Jakubowicz M., Dopieralska, J., Kaim, A., Skupien, P., Kiel, S., Bełka, Z., 2019a. Nd isotope composition of seep carbonates: Towards a new approach for constraining subsurface fluid circulation at hydrocarbon seeps. *Chemical Geology* 503, 40-51.
- Jakubowicz M., Kiel S., Goedert J., Dopieralska J., Bełka Z. 2019b. Reconstructing a fluid expulsion system during early evolution of the Cascadia margin: a message from isotopic composition of mid-Eocene methane seep carbonates (Humptulips Formation, Washington, USA). *2nd International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities*, 10-14 czerwca 2019, Sapporo. Abstrakty, s. 9.
- Jakubowicz M., Król, J., Zapalski, M.K., Wrzolek, T., Wolniewicz, P., Berkowski, B., 2019c. At the southern limits of the Devonian reef zone: Palaeoecology of the Aferdou el Mrakib reef (Givetian, eastern Anti-Atlas, Morocco). *Geological Journal* 54, 10-38.
- Jakubowicz M., Kiel, S., Goedert, J.L., Dopieralska, J., Bełka, Z., 2020a. Fluid expulsion system and tectonic architecture of the incipient Cascadia convergent margin as revealed by Nd, Sr and stable isotope composition of mid-Eocene methane seep carbonates. *Chemical Geology* 558, 119872.
- Jakubowicz M., Kiel S., Goedert J., Dopieralska J., Bełka Z. 2020b. Nd, Sr and stable isotope signatures of ancient methane-seep carbonates (Eocene, Washington, USA) as a record of incipient subduction at the Cascadia convergent margin. *EGU General Assembly*, 4-8 maja 2020, online. Abstrakt nr EGU2020-2412, doi: 10.5194/egusphere-egu2020-2412, 2020.
- Jakubowicz M., Agirrezabala, L.M., Dopieralska, J., Siepak, M., Kaim, A., Bełka, Z., 2021a. The role of magmatism in hydrocarbon generation in sedimented rifts: A Nd isotope perspective from mid-Cretaceous methane-seep deposits of the Basque-Cantabrian Basin, Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 303, 223-248.
- Jakubowicz M., Kiel S., Agirrezabala L., Goedert J., Dopieralska J., Kaim A., Bełka Z. 2021b. Reconstructing tectonic history of active plate margins with Nd isotope composition of hydrocarbon-seep carbonates. *35th IAS Meeting of Sedimentology*, 21-25 czerwca 2021, Praga, online. Abstrakty, s. 220.
- Jakubowicz M., Agirrezabala, L.M., Bełka, Z., Siepak, M., Dopieralska, J., 2022. Sr–Nd isotope decoupling at Cretaceous hydrocarbon seeps of the Basque-Cantabrian Basin (Spain): Implications for tracing volcanic-influenced fluids in sedimented rifts. *Marine and Petroleum Geology* 135, 105430.
- Jakubowicz M., Berkowski B., Hryniewicz K., Bełka Z. *Zaakceptowany manuskrypt*. Middle Palaeozoic of Morocco: the earliest-known methane seep metazoan ecosystems. W: *Ancient Hydrocarbon Seeps* (Red. Kaim A., Landman N., Cochran K.), Topics in Geobiology, Springer Verlag (*książka zakontraktowana do druku przez wyd. Springer Verlag we wrześniu 2022 r.*).
- Jeandel, C., 2016. Overview of the mechanisms that could explain the 'Boundary Exchange' at the land-ocean contact. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374, 20150287.
- Johnson, S.Y., Tennyson, M.E., Lingley Jr., W.S., Law, B.E., 1997. Petroleum Geology of the State of Washington. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1582. United States Government Printing Office, Washington.
- Jones, C.E., Jenkyns, H.C., 2001. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous. *American Journal of Science* 301, 112-149.
- Jones, K.M., Khatiwala, S.P., Goldstein, S.L., Hemming, S.R., van de Flierdt, T., 2008. Modeling the distribution of Nd isotopes in the oceans using an ocean general circulation model. *Earth and Planetary Science Letters* 272, 610-619.
- Joseph, C., Torres, M.E., Martin, R.A., Haley, B.A., Pohlman, J.W., Riedel, M., Rose, K., 2012. Using the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr of modern and paleoseep carbonates from northern Cascadia to link modern fluid flow to the past. *Chemical Geology* 334, 122-130.

- Joye, S., 2020. The Geology and Biogeochemistry of Hydrocarbon Seeps. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 48, 205-231.
- Kiel, S., 2010. An Eldorado for Paleontologists: The Cenozoic Seeps of Western Washington State, USA. W: *The Vent and Seep Biota* (Red. Kiel, S.). Springer, s. 433-448.
- Kiel, S., Tyler, P.A., 2010. Chemosynthetically-Driven Ecosystems in the Deep Sea, in: Kiel, S. (Ed.), *The Vent and Seep Biota: Aspects from Microbes to Ecosystems*. Springer, pp. 1-14.
- Kiel S., Jakubowicz M., Altamirano A., Bełka Z., Dopieralska J., Salas-Gismondi R. *W recenzji*. Cenozoic upwelling history of the southern Pacific Ocean. *Geology* (ms nr G50150).
- Kim, J.-H., Torres, M.E., Haley, B.A., Kastner, M., Pohlman, J.W., Riedel, M., Lee, Y.-J., 2012. The effect of diagenesis and fluid migration on rare earth element distribution in pore fluids of the northern Cascadia accretionary margin. *Chemical Geology* 291, 152-165.
- Knittel, K., Boetius, A., 2009. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. *Annual Review of Microbiology* 63, 311-334.
- Korn, D., Belka, Z., Skompski, S., Jakubowicz, M., Mustapaeva, S., Baibatsha, A., 2020. First record of the Early Carboniferous ammonoid genus *Goniatites* from the Greater Karatau (Kazakhstan palaeocontinent). *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments* 100, 985-992.
- Król, J.J., Zapalski, M.K., Jakubowicz, M., Berkowski, B., 2016. Growth strategies of the tabulate coral *Favosites bohemicus* on unstable, soft substrates: An example from the Hamar Laghdad (Lower Devonian, Anti-Atlas, Morocco). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 449, 531-540.
- Król, J.J., Jakubowicz, M., Zapalski, M.K., Berkowski, B., 2018. Massive tabulates in competition for space: A case study from Aferdou el Mrakib (Middle Devonian, Anti-Atlas, Morocco). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 497, 105-116.
- Kulm, L.D., Suess, E., Moore, J.C., Carson, B., Lewis, B.T., Ritger, S., Kadko, D.C., M., T.T., Embley, R.W., Rugh, W.D., Massoth, G.J., Langseth, M.G., Cochrane, G.R., Scamman, R.L., 1986. Oregon Subduction Zone: Venting, Fauna, and Carbonates. *Science* 231, 561-566.
- Lacan, F., Tachikawa, K., Jeandel, C., 2012. Neodymium isotopic composition of the oceans: A compilation of seawater data. *Chemical Geology* 300-301, 177-184.
- Lawrence, J.R., Drever, J.I., Anderson, T.F., Brueckner, H.K., 1979. Importance of alteration of volcanic material in the sediments of Deep Sea Drilling Site 323: chemistry, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 573-588.
- Levin, L.A., 2005. Ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. *Oceanography and Marine Biology - an Annual Review*, 43, 1-46.
- Lizarralde, D., Soule, S.A., Seewald, J., Proskurowski, G., 2011. Carbon release by off-axis magmatism in a young sedimented spreading centre. *Nature Geoscience* 4, 50-54.
- Luff, R., Wallmann, K., Aloisi, G., 2004. Numerical modeling of carbonate crust formation at cold vent sites: significance for fluid and methane budgets and chemosynthetic biological communities. *Earth and Planetary Science Letters* 221, 337-353.
- Majchrzyk A., Jakubowicz M., Berkowski B., Bongaerts P., Zapalski M. *W recenzji*. In the shadow of a giant reef: palaeoecology of mesophotic coral communities from the Givetian of Anti-Atlas (Morocco). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (ms nr PALAEO-D022-00137).
- Martin, E.E., Scher, H.D., 2004. Preservation of seawater Sr and Nd isotopes in fossil fish teeth: bad news and good news. *Earth and Planetary Science Letters* 220, 25-39.
- McArthur, J.M., Howarth, R.J., Bailey, T.R., 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS Version 3. Best-fit line to the marine Sr-isotope curve for 0 to 509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *Journal of Geology* 109, 155-169.
- McLennan, S.M., 1989. Rare-earth elements in sedimentary rocks - influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy* 21, 169-200.
- Miyajima Y., Jakubowicz M., Hirata T. 2019a. In situ Sr isotope analysis and U-Pb dating of methane-seep carbonates: insight into origin of seeping fluids at Cretaceous seeps in Hokkaido, Japan. *2nd International Workshop on Ancient Hydrocarbon Seep and Cognate Communities*, 10-14 czerwca 2019, Sapporo. Abstrakty, s. 10.
- Miyajima Y., Jakubowicz M., Hirata T. 2019b. In situ Sr isotope analysis of methane-seep carbonates: insight into ancient subseafloor fluid circulation. *Japan Geoscience Union Meeting*, 26-30 maja 2019, Makuhari Messe, Chiba (Japonia).
- Miyajima Y., Jakubowicz M., Dopieralska J., Jenkins R., Bełka Z., Hirata T. 2020. The fluid origin and migration process at methane seeps at the Cretaceous subduction zone of Hokkaido, northern Japan: constraints from Sr and Nd isotopes and U-Pb age of seep carbonates. *Japan Geoscience Union – American Geophysical Union Joint Meeting*, 12-15 lipca 2020, online. Abstrakt nr MIS29-04.
- Naehr, T.H., Eichhubl, P., Orphan, V.J., Hovland, M., Paull, C.K., Ussler, W., Lorenson, T.D., Greene, H.G., 2007. Authigenic carbonate formation at hydrocarbon seeps in continental margin sediments: A comparative study. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 54, 1268-1291.
- Nöthen, K., Kasten, S., 2011. Reconstructing changes in seep activity by means of pore water and solid phase Sr/Ca and Mg/Ca ratios in pockmark sediments of the Northern Congo Fan. *Marine Geology* 287, 1-13.
- Nyman, S.L., Nelson, C.S., Campbell, K.A., 2010. Miocene tubular concretions in East Coast Basin, New Zealand: Analogue for the subsurface plumbing of cold seeps. *Marine Geology* 272, 319-336.

- Paull, C.K., Hecker, B., Commeau, R., Freemanlynde, R.P., Neumann, C., Corso, W.P., Golubic, S., Hook, J.E., Sikes, E., Curray, J., 1984. Biological communities at the Florida escarpment resemble hydrothermal vent taxa. *Science* 226, 965-967.
- Peckmann, J., Thiel, V., 2004. Carbon cycling at ancient methane-seeps. *Chemical Geology* 205, 443-467.
- Phillips, B.A., Kerr, A.C., Mullen, E.K., Weis, D., 2017. Oceanic mafic magmatism in the Siletz terrane, NW North America: Fragments of an Eocene oceanic plateau? *Lithos* 274-275, 291-303.
- Piegras, D.J., Wasserburg, G.J., 1985. Strontium and neodymium isotopes in hot springs on the East Pacific Rise and Guaymas Basin. *Earth and Planetary Science Letters* 72, 341-356.
- Pin, C., Briot, D., Bassin, C., Poitrasson, F., 1994. Concomitant separation of strontium and samarium-neodymium for isotopic analysis in silicate samples, based on specific extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta* 298, 209-217.
- Raymond, A.C., Murchison, D.G., 1991. The relationship between organic maturation, the widths of thermal aureoles and the thicknesses of sills in the Midland Valley of Scotland and Northern England. *Journal of the Geological Society* 148, 215-218.
- Rongemaille, E., Bayon, G., Pierre, C., Bollinger, C., Chu, N.C., Fouquet, Y., Riboulot, V., Voisset, M., 2011. Rare earth elements in cold seep carbonates from the Niger delta. *Chemical Geology* 286, 196-206.
- Rosy, M., Azambre, B., Albarede, F., 1992. REE and Sr-Nd isotope geochemistry of the alkaline magmatism from the Cretaceous North Pyrenean Rift Zone (France-Spain). *Chemical Geology* 97, 33-46.
- Sample, J., Kopf, A.J., 1995. Isotope geochemistry of syntectonic carbonate cements and veins from the Oregon margin: implications for the hydrogeologic evolution of the accretionary wedge. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results* 146, 137-148.
- Sample, J.C., Reid, M.R., 1998. Contrasting hydrogeologic regimes along strike-slip and thrust faults in the Oregon convergent margin: Evidence from the chemistry of syntectonic carbonate cements and veins. *Geological Society of America Bulletin* 110, 48-59.
- Savard, M.M., Beauchamp, B., Veizer, J., 1996. Significance of aragonite cements around Cretaceous methane seeps. *Journal of Sedimentary Research* 66, 430-438.
- Schmandt, B., Humphreys, E., 2011. Seismically imaged relict slab from the 55 Ma Siletzia accretion to the northwest United States. *Geology* 39, 175-178.
- Schoell, M., 1988. Multiple Origins of Methane in the Earth. *Chemical Geology* 71, 1-10.
- Schofield, N., Holford, S., Millett, J., Brown, D., Jolley, D., Passey, S.R., Muirhead, D., Grove, C., Magee, C., Murray, J., Hole, M., Jackson, C.A.L., Stevenson, C., 2017. Regional magma plumbing and emplacement mechanisms of the Faroe-Shetland Sill Complex: implications for magma transport and petroleum systems within sedimentary basins. *Basin Research* 29, 41-63.
- Schofield, N., Stevenson, C., Reston, T., 2010. Magma fingers and host rock fluidization in the emplacement of sills. *Geology* 38, 63-66.
- Schutter, S.R., 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. W: *Hydrocarbons in Crystalline Rocks* (Ed. Petford, N., McCaffrey, K.J.W.). Geological Society, London, Special Publications, s. 7-33.
- Sharma, M., Rosenberg, E.J., Butterfield, D.A., 2007. Search for the proverbial mantle osmium sources to the oceans: Hydrothermal alteration of mid-ocean ridge basalt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71, 4655-4667.
- Shaw, H.F., Wasserburg, G.J., 1985. Sm-Nd in marine carbonates and phosphates - implications for Nd isotopes in seawater and crustal ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 503-518.
- Shields, G., Stille, P., 2001. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites. *Chemical Geology* 175, 29-48.
- Suess, E., 2014. Marine cold seeps and their manifestations: geological control, biogeochemical criteria and environmental conditions. *International Journal of Earth Sciences* 103, 1889-1916.
- Sydnes, M., Fjeldskaar, W., Løtveit, I.F., Grunnaleite, I., Cardozo, N., 2018. The importance of sill thickness and timing of sill emplacement on hydrocarbon maturation. *Marine and Petroleum Geology* 89, 500-514.
- Szopa, K., Włodyka, R., Chew, D., 2014. LA-ICP-MS U-Pb apatite dating of Lower Cretaceous rocks from teschenite-picrite association in the Silesian Unit (southern Poland). *Geologica Carpathica* 65, 273-284.
- Tachikawa, K., Arsouze, T., Bayon, G., Bory, A., Colin, C., Dutay, J.-C., Frank, N., Giraud, X., Gurlan, A.T., Jeandel, C., Lacan, F., Meynadier, L., Montagna, P., Piotrowski, A.M., Plancherel, Y., Pucéat, E., Roy-Barman, M., Waelbroeck, C., 2017. The large-scale evolution of neodymium isotopic composition in the global modern and Holocene ocean revealed from seawater and archive data. *Chemical Geology* 457, 131-148.
- Teichert, B.M.A., Bohrmann, G., Suess, E., 2005. Chemoherts on Hydrate Ridge — Unique microbially-mediated carbonate build-ups growing into the water column. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 227, 67-85.
- Teixell, A., Labaume, P., Ayarza, P., Espurt, N., de Saint Blanquat, M., Lagabrielle, Y., 2018. Crustal structure and evolution of the Pyrenean-Cantabrian belt: A review and new interpretations from recent concepts and data. *Tectonophysics* 724-725, 146-170.
- Tissot, B.P., Welte, D.H., 1978. Petroleum Formation and Occurrence. A New Approach to Oil and Gas Exploration. Springer-Verlag.
- Trehu, A.M., Asudeh, I., Brocher, T.M., Luethert, J.H., Mooney, W.D., Nabelek, J.L., Nakamura, Y., 1994. Crustal Architecture of the Cascadia Forearc. *Science* 266, 237-243.
- Tunnicliffe, V., Juniper, S.K., Sibuet, M., 2003. Reducing environments of the deep sea floor. W: *Ecosystems of the World: The Deep Sea* (Ed. Tyler, P.A.). Elsevier Press, Amsterdam, s. 81-110.
- Ubide, T., Wijbrans, J.R., Galé, C., Arranz, E., Lago, M., Larrea, P., 2014. Age of the Cretaceous alkaline magmatism in northeast Iberia: Implications for the Alpine cycle in the Pyrenees. *Tectonics* 33, 1444-1460.

Autoreferat – dr Michał Jakubowicz

- van de Fliedert, T., Griffiths, A.M., Lambelet, M., Little, S.H., Stichel, T., Willson, D.J., 2016. Neodymium in the oceans: a global database, a regional comparison and implications for palaeoceanographic research. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374, 20150293.
- Von Damm, K.L., Edmond, J.M., Measures, C.I., Grant, B., 1985. Chemistry of submarine hydrothermal solutions at Guaymas Basin, Gulf of California. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 49, 2221-2237.
- Wells, R., Bukry, D., Friedman, R., Pyle, D., Duncan, R., Haeussler, P., Wooden, J., 2014. Geologic history of Siletzia, a large igneous province in the Oregon and Washington Coast Range: Correlation to the geomagnetic polarity time scale and implications for a long-lived Yellowstone hotspot. *Geosphere* 10, 692-719.
- Whiticar, M.J., 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology* 161, 291-314.
- Wilson, D.J., Piotrowski, A.M., Galy, A., Clegg, J.A., 2013. Reactivity of neodymium carriers in deep sea sediments: Implications for boundary exchange and paleoceanography. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 109, 197-221.
- Włodyka, R., 2010. The evolution of mineral composition of the Cieszyn magma province rocks. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice.
- Zapalski, M.K., Baird, A.H., Bridge, T., Jakubowicz, M., Daniell, J., 2021. Unusual shallow water Devonian coral community from Queensland and its recent analogues from the inshore Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 40, 417-431.
- Zapalski, M.K., Nowicki, J., Jakubowicz, M., Berkowski, B., 2017. Tabulate corals across the Frasnian/Famennian boundary: architectural turnover and its possible relation to ancient photosymbiosis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 487, 416-429.
- Zatoń M., Nawrot R., Jakubowicz M., Ernst A., Rakociński M., Berkowski B., Belka Z. 2022a. Middle Devonian brachiopod-hosted sclerobiont assemblages from the northern shelf of Gondwana: diversity, colonization patterns and relation to coeval palaeocommunities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 594, 110947.
- Zatoń M., Słowiński J., Vinn O., Jakubowicz M. 2022b (w druku). Middle Devonian microconchids and anticalyptraeids (Tentaculita) from the northern shelf of Gondwana (Morocco): palaeoecological and palaeobiogeographical implications. *Historical Biology*, doi: 10.1080/08912963.2022.2077648.
- Zieliński, M., Dopieralska, J., Belka, Z., Walczak, A., Siepak, M., Jakubowicz, M., 2016. Sr isotope tracing of multiple water sources in a complex river system, Notec River, central Poland. *The Science of the Total Environment* 548-549, 307-316.
- Zieliński, M., Dopieralska, J., Belka, Z., Walczak, A., Siepak, M., Jakubowicz, M., 2017. The strontium isotope budget of the Warta River (Poland): Between silicate and carbonate weathering, and anthropogenic pressure. *Applied Geochemistry* 81, 1-11.
- Zieliński, M., Dopieralska, J., Belka, Z., Walczak, A., Siepak, M., Jakubowicz, M., 2018. Strontium isotope identification of water mixing and recharge sources in a river system (Oder River, central Europe): A quantitative approach. *Hydrological Processes* 32, 2597-2611.

Źródła internetowe

- Tomala, L., 2015, „Wiszące ogrody i oazy życia sprzed 380 milionów lat”, serwis Nauka w Polsce – Polska Agencja Prasowa. naukawpolsce.pl/aktualnosci/news%2C405197%2Cwizszace-ogrody-i-oazy-zycia-sprzed-380-mln-lat-w-pustynnych-kopcach
- Karl Gruber, 2014, „A Rare Look into the Past”, serwis Lab Times labtimes.org/ediitorial/e_484.lasso (obecnie serwis Lab Times zmienił profil na tematykę wyłącznie medyczną, a publikacje sprzed 2020 roku nie są archiwizowane)

.....
Michał Jakubowicz

(podpis wnioskodawcy)