

Autoreferat

1. IMIĘ I NAZWISKO

Mateusz Zieliński

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

- 2011 stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk o Ziemi w zakresie geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza. Rozprawa pt. „Reconstruction of thermal history of the Ahnet and Mouydir basins (southern Algeria)”. Promotor: prof. dr hab. Zdzisław Bełka (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza); Recenzenci: prof. dr hab. Marek Narkiewicz (Państwowy Instytut Geologiczny), prof. dr hab. Stanisław Skompski (Uniwersytet Warszawski).
- 2007 tytuł magistra na kierunku geologia, specjalność geologia stratygraficzno-poszukiwawcza, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza. Praca pt. „Rekonstrukcja historii termicznej centralnego Iranu na podstawie stopnia przegrzania dewońskich konodontów”. Promotor: prof. dr hab. Zdzisław Bełka (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza); Recenzent: dr Adam Bodzioch (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza).
- 2005 tytuł licencjata na kierunku geologia, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza. Praca pt. „Wendozoa - przegląd koncepcji rozwoju fauny neoproterozoicznej”. Promotor: dr Edward Chwieduk (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza).

3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH LUB ARTYSTYCZNYCH

Zatrudnienie etatowe

- od 1.10.2012 adiunkt w Instytucie Geoekologii i Geoinformacji, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza.

Zatrudnienie na podstawie umowy w projektach badawczych

Wykonawca:

- 2013-2016 projekt Opus Narodowego Centrum Nauki nr 2012/07/B/ST10/03885, „Skład izotopowy strontu wód dorzecza Odry jako narzędzie badań biosfery i hydrosfery”; kierownik projektu: dr Jolanta Dopieralska (Fundacja UAM)
- 2018-2022 projekt Opus Narodowego Centrum Nauki nr 2017/27/B/ST10/00493, „Cyrkulacja wody morskiej i solanek w basenie przedkarpackim podczas miocenu - rekonstrukcja przy użyciu izotopów neodymu”; kierownik projektu: dr Jolanta Dopieralska (Fundacja 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 PÓŹN. ZM.)

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

Skład izotopowy strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) środowiska przyrodniczego w Polsce: skutki zanieczyszczenia antropogenicznego i konsekwencje dla badań proveniencji i mobilności

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. W czterech przypadkach jestem pierwszym autorem, a w trzech artykułach jestem także autorem korespondencyjnym. 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. Ze względu na zmianę systemu punktowania czasopism naukowych w okresie publikowania omawianego cyklu publikacji punkty MNiSW z roku publikacji są przeliczone na punkty wg aktualnej punktacji.

[A1] ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., BEŁKA Z., WALCZAK A., SIEPAK M., JAKUBOWICZ M., 2016. Sr isotope tracing of multiple water sources in a complex river system, Noteć River, central Poland, *Science of the Total Environment*, 548-549: 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.036>.

IF₂₀₁₆ = 4,09; punkty MNiSW wg aktualnej punktacji = 200/200;

[A2] ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., BEŁKA 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. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.03.014>.

IF₂₀₁₇ = 2,58; punkty MNiSW wg aktualnej punktacji = 100/200;

[A3] ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., BEŁKA 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. <https://doi.org/10.1002/hyp.13220>.

IF₂₀₁₈ = 3,18; punkty MNiSW wg aktualnej punktacji = 100/200;

[A4] ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., KRÓLIKOWSKA-CIĄGŁO S., WALCZAK A., BEŁKA Z., 2021. Mapping of spatial variations in Sr isotope signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Poland-implications of anthropogenic Sr contamination for archaeological provenance and migration research. *Science of the Total Environment*, 775: 145792. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145792>.

IF₂₀₂₁ = 6,55; punkty MNiSW wg aktualnej punktacji = 200/200;

Wskaźniki naukometryczne

Liczba publikacji indeksowanych przez Journal Citation Reports/Scopus: 8/9 (w tym pierwszoautorskich: 5/5)

Sumaryczny Impact Factor publikacji: 41,33

W tym:

- sumaryczny impact factor dla cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia (A1-A4): 16,4

- sumaryczny Impact Factor publikacji pierwszoautorskich: 18,92

Suma punktów MNiSW wg aktualnej punktacji: 1380

W tym:

- suma punktów MNiSW dla cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia (A1-A4): 600
- suma punktów MNiSW dla publikacji pierwszoautorskich: 700

Suma cytowań publikacji (na dzień 14.11.2024):

- Scopus: 126 (bez autocytowań: 95; cytowania publikacji pierwszoautorskich: 115)
- Web of Science: 114
- Google Scholar: 161

Indeks Hirscha (na dzień 14.11.2024)

- Scopus: 5
- Web of Science: 5
- Google Scholar: 5

4.1.1. Wstęp

Radiogeniczne izotopy strontu

Stront jest pierwiastkiem metali ziem alkalicznych. Jego promień jonowy (1,18 angstroma) jest podobny do promienia jonowego wapnia (1 angstrom), co powoduje, że stront podstawia wapń w minerałach takich jak plagioklasy, apatyt, siarczan (gips i anhydryt) i węglany (kalcyt, dolomit i zwłaszcza aragonit). Stront posiada cztery izotopy: ^{84}Sr (0,56%), ^{86}Sr (9,87%), ^{87}Sr (7,04%), ^{88}Sr (82,53%). Wszystkie one są stabilne, przy czym ^{87}Sr jest izotopem radiogenicznym powstającym w wyniku rozpadu izotopu rubidu ^{87}Rb (czas połowicznego rozpadu 48,8 miliarda lat). W efekcie, ilość izotopu ^{87}Sr zmienia się w czasie geologicznym. Jeżeli w trakcie formowania się minerału lub skały zostanie wbudowany do nich rubid i stront, i system pozostanie zamknięty względem tych pierwiastków, to zawartość izotopu ^{87}Sr będzie rosła, podczas gdy ilość pozostałych izotopów strontu pozostanie stała. Dlatego starsze skały, generalnie mają wyższe stosunki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ niż młodsze skały z tym samym początkowym stosunkiem Rb/Sr (Faure i Powell, 1972; Faure, 1986). Na przestrzeni czasu geologicznego skały danego wieku o wyższym stosunku Rb/Sr (np. granity w skorupie kontynentalnej) wykształcą wyższe stosunki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ niż skały o niższym stosunku Rb/Sr (np. bazalty skorupy oceanicznej). Stąd stosunki $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ są wskaźnikiem wieku i pochodzenia geochemicznego skał i ich pochodnych (osady, gleba). Ponieważ stront jest pierwiastkiem o stosunkowo dużej masie atomowej, frakcjonowanie podczas procesów geologicznych i biologicznych jest bardzo małe (Podio i in., 2013; Song i in., 2014; Flockhart i in., 2015; Ladegaard-Pedersen i in., 2020). Ponadto frakcjonowanie zależne od masy izotopów strontu, czy to naturalne czy wywołane instrumentalnie, jest korygowane podczas pomiaru za pomocą spektrometru masowego poprzez normalizację ilości izotopu ^{87}Sr do izotopu ^{86}Sr względem stałej wartości stosunku $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$. Dlatego zmierzona wartość $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ odzwierciedla tylko zmiany w ilości ^{87}Sr w próbce, która zależy od źródła tego izotopu. W efekcie skład izotopowy próby dostarcza informacji o pochodzeniu strontu w próbce i procesach mieszania strontu z różnych źródeł. W związku z tym, że proces rozpadu ^{87}Rb do ^{87}Sr jest wykorzystywany do datowania skał, wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla wielu naturalnych źródeł strontu zostały dobrze poznane (przeгляд w Faure i Powell, 1972; Aberg, 1995; Capo i in., 1998; Banner, 2004; Peucker-Ehrenbrink i Fiske, 2019).

Podczas wietrzenia stront jest uwalniany ze skał do gleby i wody, wchodzi do łańcucha pokarmowego i jest w jego obrębie przetwarzany przez rośliny i zwierzęta by ostatecznie trafić do oceanów głównie za pośrednictwem rzek (Fig. 1) (Capo i in., 1998).

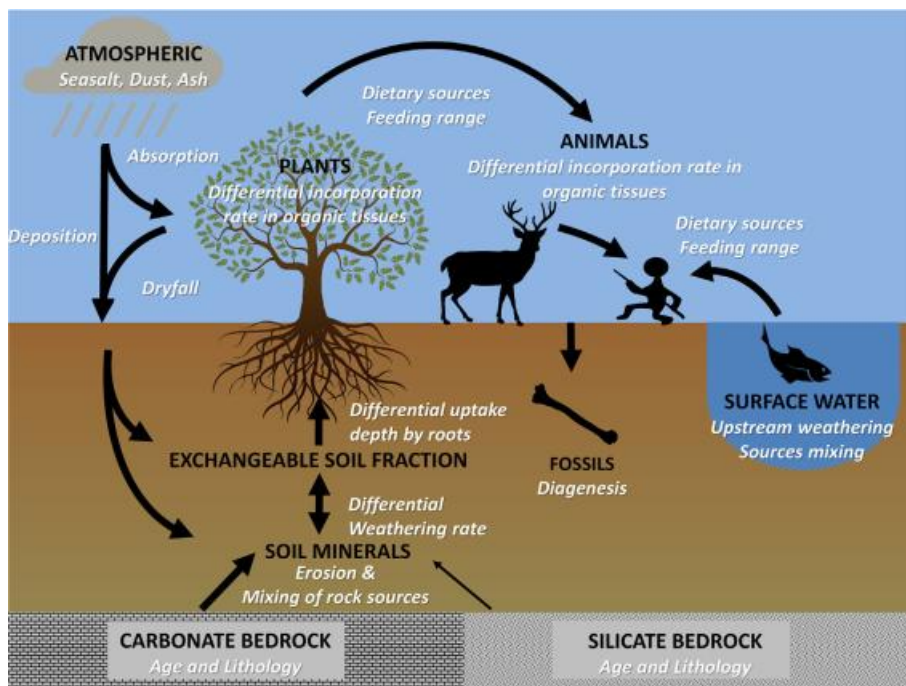


Figura 1. Uproszczony schemat przechodzenia strontu ze skał do ekosystemu (zaadaptowane z Bataille i in., 2020).

W oceanie światowym, który jest największym rezerwuarem rozpuszczonego strontu, przechodzi on do osadu głównie poprzez wbudowywanie do minerałów węglanowych. Niewielkie ilości strontu są także przenoszone bezpośrednio z oceanu do atmosfery i dalej nad kontynenty za pośrednictwem opadów. Naturalny sygnał izotopowy może być modyfikowany przez stront wprowadzany ze źródeł antropogenicznych takich jak emisje przemysłowe, zrzut ścieków przemysłowych i komunalnych czy stosowanie nawozów mineralnych (np. Maurer i in., 2012; Widory i in., 2018; Thomsen i Andreasen, 2019). Intensywność i zasięg tych zmian są zróżnicowane przestrzennie.

Duże zróżnicowanie i przewidywalność wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na powierzchni Ziemi umożliwiły geologom wykorzystanie tych cech do śledzenia proveniencji różnych materiałów geologicznych (przegląd w Capo, 1998; Banner, 2004; Peucker-Ehrenbrink i Fiske, 2019). Ponadto, dzięki niezmienności składu izotopowego strontu w ciągu skała - gleba/woda - roślina - zwierzęta/ludzie w ostatnich kilku dekadach badacze dostrzegli potencjał danych $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w rozwiązywaniu nowych problemów w takich dziedzinach jak hydrogeologia, ekologia, paleoekologia, archeologia, kryminalistyka i nauki o żywności (np. Aberg, 1995; Beard i Johnson, 2000; Poszwa i in., 2002; Bentley, 2006; Britton i in., 2011; Nakano, 2016).

Motywacja

Wykorzystanie izotopów strontu przez archeologów zrewolucjonizowało badania paleomobilności dostarczając zupełnie nowe narzędzie do oceny modeli migracji i wymiany handlowej niezależne od danych archeologicznych. Od momentu ich pierwszego wykorzystania w połowie lat 80-tych XX wieku (Ericson, 1985) izotopy strontu są coraz powszechniej wykorzystywane w kontekście archeologicznym (np., Price i in., 2011; Drake i in., 2014; Schroeder i in., 2019). Aby izotopy strontu były użytecznym narzędziem w badaniach proveniencji i mobilności, niezbędne są dane o składzie izotopowym frakcji strontu, który może zostać przyswojony przez organizmy żywe z lokalnego środowiska (tzw. biodostępnego strontu). Służą one jako wartości tła względem którego porównuje się skład izotopowy badanego materiału i na tej podstawie dokonuje rozróżnienia lokalny - obcy. Ponieważ stront jest obecny w wodzie, glebie, faunie i florze szereg różnych rodzajów prób

może zostać wykorzystany do określenia wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ biodostępnego strontu, z których każdy ma swoje zalety i wady (Price i in., 2002; Maurer i in., 2012; Grimstead i in., 2010; Holt i in., 2021). Najczęściej w tym celu opróbowuje się wody powierzchniowe i podziemne (np. Evans i in., 2010; Voerkelius i in., 2010; Frei i Frei, 2011), glebę i roztwór glebowy (np. Frei i Frei, 2013; Willmes i in., 2018; Hoogewerff i in., 2019), rośliny (np. Evans i in., 2010; Hartman i Richards, 2014; Ryan i in., 2018) oraz kręgowce i bezkręgowce (np. Evans i in., 2010; Maurer i in., 2012; Hartman i Richards, 2014). Dodatkowe materiały, takie jak archeologiczne szczątki zwierząt i ludzi, czy też produkty żywnościowe są wykorzystywane w przypadku specyficznych badań w danej dziedzinie (np. Kelly i in., 2005; Kootker i in., 2016; Snoeck i in., 2016).

Impulsem do podjęcia badań było rosnące zapotrzebowanie ze strony środowiska archeologicznego na dane o wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ środowiska przyrodniczego w Polsce, które można wykorzystać w badaniach proveniencji i migracji. Prace prezentowane jako osiągnięcie habilitacyjne (artykuły A1-A4) stanowią efekt pierwszego systematycznego regionalnego kartowania geochemicznego środowiska przyrodniczego w Polsce pod kątem składu izotopowego radiogenicznego strontu. Wcześniej, ograniczone dane tego typu były pozyskiwane na potrzeby badań pojedynczych stanowisk archeologicznych i opracowań prezentujących dane izotopowe w skali kontynentów (Palmer i Edmond, 1989; Lofvendahl i in., 1990; Voerkelius i in., 2010; Price i in., 2011; Pokutta i Frei, 2012; Buko i in., 2013; Gregoricka i in., 2014; Pospieszny i in., 2015; Szczepanek i in., 2018; Schroeder i in., 2019).

4.1.2. Koncepcja i cele pracy

Podstawowym celem cyklu publikacji tworzących przedstawione osiągnięcie naukowe (artykuły A1-A4) było określenie przestrzennego zróżnicowania wartości sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ biodostępnego strontu w obrębie dorzecza Odry, aby dostarczyć bazowych danych geochemicznych do badań migracji i proveniencji w archeologii. Dane te są także cennym zasobem, który można wykorzystać jako niezależne narzędzie, w takich dziedzinach jak hydrogeologia do śledzenia oddziaływania woda-skała, procesów mieszania i wykrywania zanieczyszczeń antropogenicznych w zlewniach rzecznych. Wszystkie przedłożone prace zostały zrealizowane w ramach projektu Opus Narodowego Centrum Nauki nr 2012/07/B/ST10/03885 (Skład izotopowy strontu wód dorzecza Odry jako narzędzie badań biosfery i hydrosfery; lipiec 2013 - lipiec 2016; kierownik dr Jolanta Dopierańska, Fundacja UAM), w którym byłem głównym wykonawcą. Dzięki temu, że tematyka projektu jest w dużej mierze tożsama z tematyką przedłożonego osiągnięcia w postępowaniu habilitacyjnym, ma ono charakter spójnego tematycznie zestawu uzupełniających się publikacji.

Jako podstawowy rodzaj prób do określenia składu izotopowego biodostępnego strontu wykorzystano wody głównych rzek w dorzeczu Odry i rzek bezpośrednio uchodzących do Morza Bałtyckiego w zachodniej Polsce (Fig. 2). Generalnie, stront rozpuszczony w wodach rzecznych pochodzi ze skał i opadu atmosferycznego (Capo i in., 1998). Ponieważ skały zawierają znacznie więcej strontu (górną skorupa ziemską średnio 337 ppm; Capo i in., 1998) niż wody atmosferyczne (typowo poniżej 0,1 ppm; Capo i in., 1998) to stront uwalniany ze skał kontroluje skład izotopowy wody rzecznej (Palmer i Edmond, 1989). Może on jednak podlegać sezonowym zmianom związanym ze zróżnicowaniem przepływu w ciągu roku (np. Palmer i Edmond, 1989; Clow i in., 1997; Aubert i in., 2002).

Dodatkowo opróbowano także liście dębu i brzozy z obszarów parków krajobrazowych i narodowych (poza jednym wyjątkiem) oraz skały i osady w różnych częściach zlewni Odry. W poszczególnych pracach jako materiał uzupełniający analizowano także skład izotopowy nawozów mineralnych (A1), wód kopalnianych (A1 i A2), solanek technologicznych (A1) i oczyszczonych ścieków komunalnych (A3).

Jak już wspomniano wcześniej, naturalny sygnał izotopowy może być modyfikowany przez stront wprowadzany ze źródeł antropogenicznych. Jednakże, ze względu na zróżnicowany skład izotopowy i zróżnicowaną zawartość strontu w różnych źródłach strontu

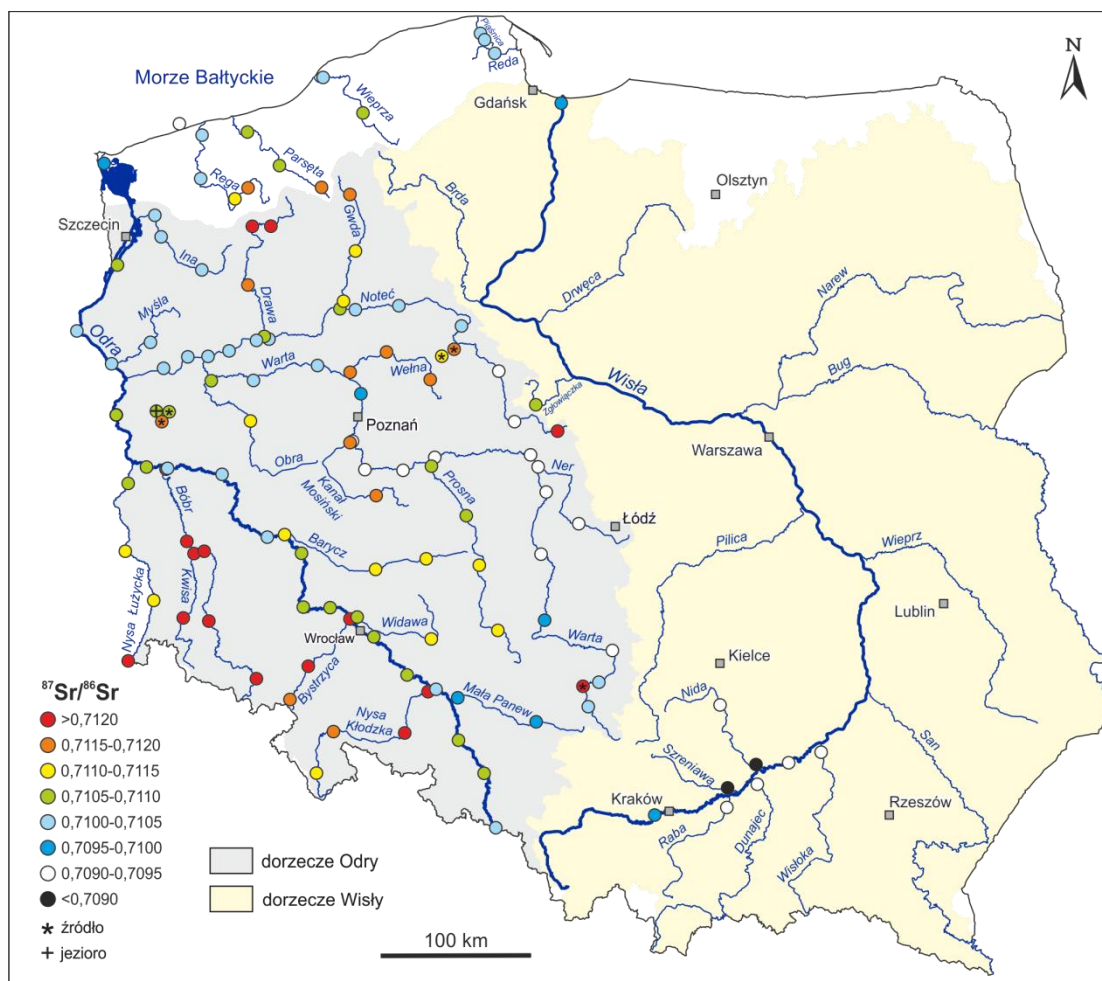


Figura 2. Zróżnicowanie przestrzenne sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód powierzchniowych w Polsce. Prezentowane wartości dla rzek i jezior są średnimi z danych sezonowych (wiosna i lato). W pozostałych przypadkach podane są dane sezonowe (zmodyfikowane za Zieliński i in., 2021).

możliwe jest określenie pochodzenia strontu w analizowanym materiale, a nawet proporcji mieszania się strontu z poszczególnymi rezerwuarów (Faure, 1986). W efekcie, można oszacować stopień zmiany sygnału izotopowego danego materiału i wskazać, że zmierzone wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nie są wyłącznie pochodzenia naturalnego.

Badania nad zróżnicowaniem składu izotopowego strontu w systemach rzecznych i ich przyczyn rozpoczęliśmy od Noteci, która charakteryzuje się niskim przepływem i poddana jest antropopresji w związku z aktywnym górnictwem węgla brunatnego w jej górnym biegu (Zieliński i in., 2016). W pracy tej udokumentowaliśmy kluczową rolę strontu wprowadzanego przez wody kopalniane w kształtowaniu budżetu izotopowego strontu wód górnej Noteci. Przez analogię pokazaliśmy także, że wody kopalniane pełnią istotną rolę w zasilaniu górnej Noteci. Ponadto odkryliśmy, że współcześnie wody rzeczne, gleba i fauna żywiąca się uprawami rolnymi zawierają oprócz strontu z naturalnych źródeł, także stront pochodzący z nawozów sztucznych stosowanych w rolnictwie. Odkrycie to pokazało, że współczesny i historyczny skład izotopowy strontu środowiska mogą się od siebie różnić, co niesie konsekwencje dla badań proveniencji i migracji w oparciu o izotopy strontu. W kolejnym kroku zakres badanych procesów rozszerzyliśmy o śledzenie interakcji woda - skała w zlewni o zróżnicowanej budowie geologicznej i wpływ sezonowych zmian przepływu na wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Zieliński i in., 2017). Jako obiekt badań wybraliśmy Wartę, która płynie po podłożu zbudowanym z mezozoicznych skał węglanowych i czwartorzędowych osadów glacialnych. Skład izotopowy wód Warty można wytłumaczyć mieszaniami się bardziej radiogenicznego (o wyższych wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) strontu ze skał krzemianowych i mniej radiogenicznego (o niższych wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) strontu ze skał węglanowych. Na

naturalny sygnał izotopowy nakłada się sygnał antropogeniczny związany ze zrzutami wód kopalnianych i stosowaniem nawozów mineralnych, jednak jego znaczenie wydaje się niewielkie. Sezonowy (wiosna i lato) pomiar składu izotopowego w dolnym biegu Warty na przestrzeni dwóch lat pozwolił na wykazanie zależności pomiędzy zmianami przepływu i wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. W konsekwencji wykrycia antropogenicznych zmian składu izotopowego wód rzecznych w Polsce zachodniej, w następnej pracy (Zieliński i in., 2018) podjęliśmy się ilościowego określenia tych zmian dla Odry, która jest odbiornikiem zróżnicowanych zanieczyszczeń przemysłowych i komunalnych. W tym celu przeprowadziliśmy modelowanie geochemiczne, które miało na celu wyodrębnienie naturalnej i antropogenicznej składowej rozpoznanych sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Finalnie zaprezentowaliśmy przestrzenne zróżnicowanie składu izotopowego strontu w hydrosferze (Fig. 2), geosferze i biosferze Polski ze wskazaniem częściowo antropogenicznej genezy współczesnych wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Zieliński i in., 2021a).

Główne cele przedstawionego cyklu publikacji można podsumować następująco:

- 1) Rozpoznanie zakresu zróżnicowania i czynników kształtujących współczesne wartości sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód rzecznych w Polsce;
- 2) Określenie stopnia antropogenicznych zmian sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód rzecznych;
- 3) Przedstawienie przestrzennej zmienności składu izotopowego strontu środowiska przyrodniczego w Polsce jako narzędzia w badaniach proveniencji i migracji;

4.1.3. Opis osiągnięcia - wyniki badań

Założone cele przedłożonego cyklu artykułów zrealizowano na podstawie badań 20 rzek w dorzeczu Odry i 3 uchodzących bezpośrednio do Morza Bałtyckiego w Polsce zachodniej. Obiektem badań był przede wszystkim system rzeczny Odry, obejmujący Odrę i jej główne dopływy oraz główne dopływy tychże. Ze względu na stosunkowo dużą rozległość badanego obszaru (ponad 100 tys km²) taki schemat opróbowania pozwolił na zachowanie równowagi pomiędzy szczegółowością danych, pokryciem terenu i nakładami pracy. W celu lepszego zrozumienia obserwowanego zróżnicowania składu izotopowego strontu wód rzecznych w danej zlewni, badano także wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ innych komponentów środowiska naturalnego i antropogenicznego. Wyniki badań mają istotne konsekwencje dla zastosowań izotopów strontu w badaniach proveniencji i migracji, wskazując na antropogeniczne pochodzenie współczesnych wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ środowiska na terenie Polski.

We wszystkich pracach tworzących przedłożony cykl publikacji byłem pierwszym autorem i autorem korespondencyjnym w większości prac. Byłem odpowiedzialny za ogólną koncepcję artykułów i schemat opróbowania. Wraz ze współautorami prac przeprowadziłem prace terenowe i uczestniczyłem w przygotowaniu prób do pomiarów izotopowych. Przeprowadziłem interpretację pozyskanych wyników w kontekście źródeł strontu i procesów mieszania. Byłem także odpowiedzialny za przygotowanie manuskryptów i rycin, a następnie za kontakt z redakcją, poprawki oraz odpowiedzi na komentarze recenzentów. Wkład mój oraz współautorów w odniesieniu do poszczególnych prac został przedstawiony szczegółowo w *Wykazie osiągnięć* i w załączonych oświadczeniach.

Metodyka

Prace terenowe w ramach prezentowanych badań zostały przeprowadzone w latach 2013-2016 (2013-2014: A1; 2014-2016: A2; 2015-2016: A3; 2013-2016: A4). Dodatkowe próby wody, skał i roślin zostały pobrane w latach 2018-2020.

Wszystkie analizy laboratoryjne przeprowadzone w ramach przedłożonego osiągnięcia wykonano na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza. W przypadku wody obejmowały one pomiar koncentracji i składu izotopowego strontu, podczas gdy w przypadku pozostałych materiałów (skały, osady, rośliny, nawozy mineralne), wykonano tylko pomiary składu izotopowego. Pomiar wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ skał, osadów i nawozów mineralnych

wykonano na próbach sproszkowanych z wykorzystaniem móździerza agatowego. Dodatkowo nawozy mineralne zostały rozpuszczone w wodzie dejonizowanej. Materiał roślinny przed pomiarami składu izotopowego został spopielony. Skład izotopowy strontu został oznaczony przy pomocy termojonizującego spektrometru masowego Finnigan MAT 261 w Pracowni Izotopowej na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza. Residuum po odparowaniu wody, roztworu nawozów mineralnych i popiół ze spalania roślin przed pomiarem jego składu izotopowego zostały rozpuszczone w kwasie azotowym według standardowej procedury (Dopieralska, 2003). Sproszkowane skały i osady przed pomiarem składu izotopowego strontu zostały rozpuszczone w zależności od litologii w kwasie octowym (skały węglanowe) lub w mieszaninie kwasu fluorowodorowego i azotowego (skały krzemianowe). Zmierzone wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ zostały znormalizowane względem wartości 0,710240 standardu NBS 987. Szczegóły procedur pomiarowych i normalizacji wyników zostały opisane w artykułach A1-A4.

Koncentrację strontu oznaczono metodą spektrometrii mas ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej z potrójnym analizatorem kwadrupolowym (ICP-MS-QQQ) w Laboratorium Hydrogeochemicznym na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza przez dr Marcina Siepaka.

Artykuł 1

ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., BEŁKA Z., WALCZAK A., SIEPAK M., JAKUBOWICZ M., 2016. Sr isotope tracing of multiple water sources in a complex river system, Noteć River, central Poland, *Science of the Total Environment*, 548-549: 307-316.

Artykuł prezentuje wykorzystanie składu izotopowego ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) i koncentracji strontu do wykrywania i śledzenia zanieczyszczeń antropogenicznych w wodach powierzchniowych. Do badań został wybrany system rzeczny Noteci, który charakteryzuje się niskim naturalnym przepływem i jest odbiorcą wód kopalnianych z odkrywkowej kopalni węgla brunatnego (odkrywka Tomisławice) (Wachowiak, 2011). Ponadto, w okolicach Inowrocławia w pobliżu Noteci zlokalizowane są zakłady sodowe (Janikosoda Ciech Soda Polska, Ciech Soda Polska) przetwarzające solanki powiązane z wysadem solnym występującym w podłożu. W efekcie jakość wód cieków i warunki hydrogeologiczne w zlewni zostały znacząco zmienione. Rzeka o takiej charakterystyce stanowi swoiste naturalne laboratorium do badania wpływu zanieczyszczeń antropogenicznych na wody powierzchniowe.

Woda została pobrana z 11 lokalizacji wzdłuż całego biegu Noteci (typowo przed i po połączeniu z dopływem) i ujść głównych dopływów latem (niski stan wody) i wiosną (wysoki stan wody) oraz z kanałów wprowadzających wody kopalniane. Dodatkowo, opróbowano gliny zwałowe, liście drzew (brzoza i dąb), nawozy mineralne i solanki przemysłowe celem określenia składu izotopowego potencjalnych naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu. Wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód Noteci zmieniają się w szerokim zakresie od 0,7089 do 0,7127 i nie wykazują one istotnych różnic pomiędzy sezonami. Największe zmiany sygnatur izotopowych obserwowane są w górnej części rzeki, gdzie wprowadzane są wody kopalniane, podczas gdy jej dolny odcinek charakteryzuje się stosunkowo stałymi wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7104 - 0,7105). Zróżnicowanie składu izotopowego powiązane jest ze znacznymi zmianami koncentracji strontu, która zmienia się w zakresie 0,14 - 1,32 mg/l i wykazuje istotne zmiany sezonowe (wyższa koncentracja latem i niższa wiosną). W źródłowym odcinku, wody Noteci mają stosunkowo radiogeniczny skład izotopowy (wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,7124 - 0,7127) i niską zawartość strontu (0,14 - 0,26 mg/l). Poniżej punktów wprowadzenia wód kopalnianych (o sygnaturach izotopowych 0,7086 - 0,7090 i koncentracji strontu powyżej 1 mg/l) wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ spadają latem do poziomu 0,7089 a zawartość strontu rośnie do 1,3 mg/l. Wiosną zmiany te są mniej gwałtowne, szczególnie w przypadku koncentracji strontu. Nieradiogeniczny stront (o niskich wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) z wód kopalnianych wyraźnie kontroluje ewolucję składu izotopowego wód Noteci w górnej części pomimo, iż jego udział w budżecie strontu jest zmienny w trakcie roku (od ponad 95%

udziału latem do 10% udziału wiosną). Skład izotopowy stopniowo staje się coraz bardziej radiogeniczny a zawartość strontu stopniowo spada w dół rzeki na odcinku Rybno (okolice Sompolna) - Piła (odcinek 185 km) w wyniku wprowadzania strontu o wyższych wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ przez wody dopływów (Kanał Ślesiński, Mała Noteć, Gwda) drenujących obszary zbudowane z glin zwałowych i osadów fluwioglacjalnych. Skład izotopowy stabilizuje się na poziomie 0,7104 - 0,7105, a koncentracja na poziomie 0,19 - 0,30 mg/l w dolnym odcinku Noteci.

Obserwowane duże zróżnicowanie składu izotopowego i koncentracji strontu można wytłumaczyć mieszaniami się strontu z dwóch rezerwuarów: (1) wody atmosferycznej pobierającej stront z wietrzejących i zmywanych czwartorzędowych osadów glacialnych i (2) wód kopalnianych. Pierwsze źródło charakteryzuje się stosunkowo wysokimi wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i niskimi koncentracjami strontu podczas gdy drugie źródło posiada odwrotną charakterystykę. Pomimo, iż w przeszłości wskazywano na zasolenie wód Noteci i gleby wokół zakładów sodowych w wyniku przenikania ścieków z uszkodzonych rurociągów i basenów poprodukcyjnych (Frąckowiak i Kuczyńska, 1996 i prace tam cytowane), w toku niniejszych badań nie stwierdzono wpływu strontu ze ścieków zakładów sodowych na skład izotopowy wód Noteci. Nie mniej jednak, nie można go wykluczyć, a jego wpływ może być maskowany przez bardziej radiogeniczny stront z wód Małej Noteci.

Porównanie składu izotopowego wód Noteci i wybranych elementów środowiska (liści drzew, gliny zwałowej i nawozów mineralnych) z tym dla współczesnej fauny (mysz, zając, lis) wokół stanowiska archeologicznego zlokalizowanego nieopodal jednego z naszych punktów pomiarowych (Gregoricka i in., 2014) wskazuje, że skład izotopowy analizowanej przez tych autorów fauny jest zmieniony przez nieradiogeniczny stront z nawozów mineralnych i odmienny od tego w czasach przedhistorycznych. Dostępne dane sugerują, że stront z nawozów znajduje się także w puli strontu rozpuszczonego w wodach rzecznych i, że skład izotopowy wód rzecznych w dorzeczu Noteci także jest odmienny od tego w przeszłości; Skala zmian jest jednak trudna do oszacowania. Odkrycie to ma bardzo ważne konsekwencje dla wykorzystania izotopów strontu w badaniach proveniencji i mobilności w archeologii na terenie Polski. Wskazuje ono, że współczesny skład izotopowy wód powierzchniowych i fauny nie powinien być stosowany bezkrytycznie do określania tła izotopowego dla tzw. biodostępnego strontu w przeszłości.

Artykuł 2

ZIELINSKI 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.

Przedmiotem artykułu jest śledzenie procesów wietrzenia w geologicznie zróżnicowanej zlewni i śledzenie antropogenicznego zanieczyszczenia w oparciu o skład izotopowy ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) i koncentrację strontu w wodach rzecznych. Dodatkowo, sprawdzano wpływ stanu wód na skład izotopowy strontu wody rzecznej ze względu na odmienne wyniki w różnych rejonach świata. Obiektem badań był system rzeczny Warty, w zlewni której powierzchniowe czwartorzędowe osady glacialne i fluwioglacjalne podścielone są mezozoicznymi skałami węglanowymi, które lokalnie znajdują się blisko powierzchni lub odsłaniają się na powierzchni. Do Warty wprowadzane są także wody kopalniane z odwadniania odkrywek Adamów (okolice Turku) i Bełchatów (okolice Radomska) eksploatujących złoża węgla brunatnego (Wachowiak i in., 2011).

Woda została pobrana z 16 lokalizacji wzdłuż całego biegu Warty (zazwyczaj przed i po połączeniu z dopływami) i ujściowych odcinków głównych dopływów oraz cieków wprowadzających wody kopalniane (Teleszyna, Kielbaska, Widawka) latem 2014 i wiosną 2015. Wody Warty mają stosunkowo wąski zakres wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, od 0,7090 do 0,7105, który kontrastuje z bardziej zróżnicowanymi sygnaturami izotopowymi wód jej dopływów ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w przedziale 0,7080 - 0,7121). Z wyjątkiem trzech dopływów, do których

wprowadzane są wody kopalniane, wody dopływów mają bardziej radiogeniczny skład izotopowy (wyższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) niż Warta. Zawartość strontu w wodach Warty zmienia się w zakresie 0,12 - 0,35 mg/l, podczas gdy w wodach dopływów zmienia się ona w szerszym zakresie (0,1 - 1,38 mg/l). W górnym odcinku Warty woda pokazuje wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ powyżej 0,71 i koncentracje strontu na poziomie 0,15 - 0,16 mg/l wskazujące na pobieranie strontu ze stosunkowo radiogenicznych skał. Następnie, na odcinku Radomsko - Pызdry sygnatury $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ obniżają się do wartości 0,7090 - 0,7093 a zawartość strontu rośnie do poziomu 0,35 mg/l w efekcie wprowadzania nieradiogenicznego strontu przez dopływy prowadzące wzbogacone w stront wody kopalniane. Poniżej Pызdr, aż do ujścia wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ rosną stopniowo do poziomu 0,7105, podczas gdy koncentracja strontu spada do poziomu 0,25 mg/l. Warta na tym odcinku jest wzbogacana w bardziej radiogeniczny stront przez dopływy niosące wody o stosunkowo wysokich wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Analiza składu izotopowego i koncentracji strontu mierzonych w próbach pobieranych latem (niski stan wody) i wiosną (wysoki stan wody) w dolnym biegu Warty na przestrzeni dwóch lat (2014-2016) wskazuje, że oba parametry są wrażliwe na zmiany stanu wód. Wiosną wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ są wyższe niż latem, natomiast koncentracja wykazuje odwrotne zachowanie.

Budżet izotopowy strontu zlewni Warty jest wypadkową względnego udziału strontu o niskich wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pochodzącego z rozpuszczanych skał węglanowych i strontu o wyższych wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pochodzącego z wietrzenia skał krzemianowych. Może być on wytłumaczony mieszaniami wód podziemnych kontaktujących się z łożyskami, wód podziemnych kontaktujących się ze skałami węglanowymi oraz wód atmosferycznych pobierających stront z wietrzejących powierzchniowych osadów glacialnych. Dodatkowo, na naturalne źródła strontu nakładają się źródła antropogeniczne, takie jak wody kopalniane i ścieki komunalne oraz przypuszczalnie także nawozy mineralne. Wpływ wód kopalnianych na skład izotopowy wód Warty wydaje się być umiarkowany, a ścieków komunalnych i nawozów niewielki. Stan ten jest jednak tymczasowy i ulegnie on zmianie po zakończeniu zrzutu wód kopalnianych.

Artykuł 3

ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., BEŁKA 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.

Praca ta rozwija prezentowane w poprzednich artykułach (Artykuł 1 i 2) zastosowanie izotopów strontu do śledzenia naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu w budżecie rzeki o ilościowe szacunki udziału poszczególnych składowych i modelowanie naturalnego składu izotopowego strontu wód rzeki. Jest to pierwsza tego typu analiza dla rzeki średniej wielkości. Obiektem tych dociekań jest Odra drenująca rozległą zlewnię o zróżnicowanej budowie geologicznej oraz z dużymi ośrodkami przemysłowymi i miejskimi wzdłuż jej biegu.

Woda została pobrana z 16 lokalizacji wzdłuż całego biegu Odry w granicach Polski (typowo przed i po połączeniu z dopływami), ujść głównych i wybranych mniejszych dopływów oraz kanałów latem 2015 i wiosną 2016 roku. Dodatkowe próby zostały pobrane wzdłuż biegu rzek drenujących Sudety, ze względu na duże zróżnicowanie geologiczne podłoża po którym one płyną na tym obszarze.

Za wyjątkiem granicy Polsko - Czeskiej, gdzie wody Odry mają stosunkowo niskie wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ok. 0,7100, skład izotopowy wód rzeki na całej jej długości jest stosunkowo jednorodny i zawiera się w przedziale 0,7103 - 0,7108. Kontrastuje to z dużą zmiennością koncentracji strontu od 0,25 do 1,27 mg/l. Najwyższa zawartość strontu obserwowana jest na Górnym Śląsku, w górnym biegu rzeki, gdzie są odprowadzane do niej wody kopalniane za pośrednictwem Rudej, Bierawki i Kłodnicy/Kanału Gliwickiego. Podwyższona koncentracja występuje także poniżej punktu zrzutu wód poprodukcyjnych z Legnicko - Głogowskiego

Okręgu Miedziowego. Podobnie jak w przypadku Warty (Artykuł 2) obserwowane są sezonowe różnice w składzie izotopowym i koncentracji strontu, z bardziej radiogenicznym (wyższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) składem i niższą koncentracją strontu wiosną.

Większość analizowanych dopływów niesie stront o wyższych wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i niższej koncentracji strontu niż Odra. Tylko kilka dopływów (Ruda, Myśla, Mała Panew) i sztucznych kanałów (Kanał Gliwicki, Kanał Odra-Sprewa, Kanał Odra-Hawela) pokazuje odwrotną charakterystykę. W efekcie, wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i koncentracja strontu dla całej zlewni Odry zmieniają się, odpowiednio, w przedziale 0,7080 - 0,7127 i 0,07 - 1,38 mg/l (Zieliński i in., 2016, 2017 i dane z tej pracy). Na tle innych dużych rzek wpadających do Bałtyku, które zawierają poniżej 0,1 mg/l strontu (Löfvendahl i in., 1990), zmienność jego koncentracji w wodach Odry jest stosunkowo duża. Pomimo, iż lewostronne dopływy Odry drenują Sudety, które są zbudowane z bardzo zróżnicowanych skał, pokazują one podobny trend zmian składu izotopowego strontu w dół rzeki i charakteryzują się niską koncentracją strontu (zazwyczaj poniżej 0,15 mg/l). Woda w ich górnych odcinkach zazwyczaj jest wzbogacona w radiogeniczny stront względem środkowych i dolnych partii. Budżety izotopowe rzek drenujących Sudety są wyraźnie powiązane z pobieraniem strontu ze skał podłoża wzdłuż drogi przepływu.

Wpływając na terytorium Polski Odra ma stosunkowo niskie wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (około 0,7100) i stosunkowo wysoką zawartość strontu (0,36 - 0,54 mg/l) wskazujące na udział strontu ze źródeł antropogenicznych. Najbardziej znacząca zmiana w charakterystyce geochemicznej rzeki następuje poniżej wylotu kolektora „Olza”, który odprowadza wody z kopalni węgla kamiennego. Efektem jest wzrost wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ do poziomu 0,7108 i koncentracji do poziomu 1,26 mg/l. Pomimo, iż dokładny skład izotopowy i koncentracja strontu tych wód kopalnianych nie są znane, powodowane przez nie efekty wskazują, że muszą mieć one wartość $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ nieco powyżej 0,7110 i zawierać kilka dziesiątek miligramów strontu. Wody kopalniane są wprowadzane do Odry także za pośrednictwem Rudej, Bierawki i Kłodnicy/Kanału Gliwickiego na co wskazuje wysoka zawartość strontu, pomiędzy 0,68 i 1,12 mg/l, ale także wysokie zasolenie (Rózkowski i in., 1993; Magdziej i Lach, 2002). W porównaniu do wód kolektora „Olza” woda prawobrzeżnych dopływów na Górnym Śląsku ma mniej radiogeniczny skład. Ponadto, każdy kolejny w dół rzeki z górnośląskich dopływów (Ruda, Kłodnica/Kanał Gliwicki, Mała Panew) pokazuje niższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, co skutkuje stopniowym obniżaniem sygnatur izotopowych wód Odry do wartości 0,7104, aż do połączenia z Nysą Kłodzką. Po połączeniu z Nysą Kłodzką i kolejnymi dopływami (Oława, Bystrzyca, Widawa, Średzka Woda, Kaczawa, Jezierzycza) sygnatury izotopowe stopniowo rosną do wartości 0,7107 wiosną, a koncentracja stopniowo maleje do wartości 0,34 mg/l na odcinku 200 km (do okolic Ścinawy) ponieważ dopływy te zasilają Odrę bardziej radiogenicznym, lecz rozcieńczonym strontem. W okolicach Głogowa do Odry wprowadzane są bogate w nieradiogeniczny stront wody poprodukcyjne z Legnicko - Głogowskiego Okręgu Miedziowego. W odpowiedzi, poniżej punktu zrzutu wyraźnie rośnie zawartość strontu w wodach Odry i jej skład izotopowy staje się mniej radiogeniczny. Ich wpływ na budżet strontu wód Odry jest widoczny na odcinku ponad 120 km. Pomimo, iż wody dopływów na tym odcinku (Obrzyca, Ołobok, Bóbr i Nysa Łużycka) mają wyższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i są uboższe w stront niż Odra, ich wpływ jest niewielki i stopniowo postępujący. W dolnym odcinku, skład izotopowy Odry jest kontrolowany przez nieradiogeniczny stront wprowadzany przez Wartę i Myślę.

Budżet izotopowy strontu w wodach Odry można wyjaśnić mieszaniem się strontu ze źródeł naturalnych i antropogenicznych. Scenariusz mieszania obejmuje 4 źródła strontu: (1) płytkie wody podziemne pobierające stront ze zwietrzałych przypowierzchniowych skał krzemianowych, głównie osadów glacialnych, lub lokalnie, głównie w Sudetach, kwaśnych skał magmowych; (2) wody kopalniane związane z górnictwem węgla kamiennego (3) wody kopalniane związane z górnictwem miedzi oraz (4) wody podziemne z płytkich mezozoicznych, paleogeńskich i neogeńskich poziomów wodonośnych.

Modelowanie geochemiczne, którego celem było określenie udziału strontu ze źródeł naturalnych i antropogenicznych w budżecie izotopowym wód Odry wskazuje, że dominuje w nim stront ze źródeł antropogenicznych. Sumaryczny udział wód kopalnianych został

oszacowany na ok. 31,5%, udział strontu ze ścieków komunalnych i przemysłowych oraz źródeł rolniczych na ok. 48%. Stront pobierany przez wodę z podłoża skalnego stanowi tylko ok. 21%. Wyniki modelowania wskazują, że współczesny skład izotopowy strontu wód Odry jest inny od tego w czasach przedprzemysłowych i ulegnie on zmianie po zakończeniu zrzutu ścieków.

Artykuł 4

ZIELIŃSKI M., DOPIERALSKA J., KRÓLIKOWSKA-CIĄGŁO S., WALCZAK A., BEŁKA Z., 2021a. Mapping of spatial variations in Sr isotope signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Poland-implications of anthropogenic Sr contamination for archaeological provenance and migration research. *Science of the Total Environment*, 775: 145792.

Praca stanowi podsumowanie pierwszych systematycznych badań nad składem izotopowym strontu środowiska przyrodniczego w Polsce. Artykuł ten prezentuje przestrzenne zróżnicowanie sygnatur izotopowych (ang. isoscape) strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) na podstawie ok. 900 prób skał, osadów, wód powierzchniowych i roślinności. Ten zestaw danych jest uzupełniony o szacunki wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla różnowiekowych skał węglanowych na podstawie danych o składzie izotopowym strontu wody morskiej w przeszłości geologicznej (McArthur i in., 2001).

Plejstocenijskie osady glacialne, które pokrywają większość obszaru Nizy Polskiego zawierają materiał klastyczny zerodowany na terenie Skandynawii i przetransportowany przez lądolód na południe. Stanowią go fragmenty różnych prekambryjskich skał magmowych, metamorficznych i osadowych oraz paleozoiczne i mezozoiczne skały węglanowe. Pomimo regionalnego zróżnicowania petrograficznego i mineralnego osadów glacialnych w Polsce (np. Lisicki, 2003; Czubla i in., 2019), ich dominującym składnikiem są kwaśne skały krystaliczne. Dlatego też, wszystkie wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ zmierzone do tej pory dla plejstocenijskich osadów glacialnych są powyżej 0,72. Z kolei w Sudetach, zbudowanych z bardzo różnorodnych skał, bardzo duża zmienność litologiczna znajduje odzwierciedlenie w zróżnicowaniu składu izotopowego strontu. Dostępne dane $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dotyczą wyłącznie skał magmowych i metamorficznych, które dominują na tym obszarze i zmieniają się one w przedziale od 0,7023 do 1,1486. Najniższe wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pokazują górnopaleozoiczne ofiolity (Pin i in., 1988) a najwyższe kambryjskie granitoidy (Borkowska i in., 1980). W Sudetach obecne są także stosunkowo niewielkie wystąpienia górnodewońskich i dolnokarbońskich morskich węglanów (np. Freyer, 1968; Dopieralska, 2006). Zakładając, że ich skład izotopowy odpowiada składowi wody morskiej, w której powstały (McArthur i in., 2001) ich wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ powinny być w zakresie 0,7081 - 0,7083. Skład izotopowy strontu skał w obrębie Wyżyny Śląsko - Krakowskiej jest stosunkowo słabo poznany. Konieczna i in. (2015) podaje zakres 0,7106 - 0,7232 dla górnio triasowych skał klastycznych (od iłowców po piaskowce) na śląsku opolskim, podczas gdy skały węglanowe górnej jury pokazują skład izotopowy w wąskim zakresie 0,7070 - 0,7074 (Zieliński i in., 2016; Kowalik i in., 2020). Wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla pozostałych wystąpień mezozoicznych węglanów na tym obszarze zostały określone na podstawie krzywej izotopowej dla wody morskiej (McArthur i in., 2001). Znany jest także skład izotopowy wistuljańskich lessów i podścielających je mioceńskich iłów występujących we wschodniej części omawianego obszaru. Obie litologie mają stosunkowo jednolite wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, koncentrujące się wokół wartości 0,72 (Szczepanek et al., 2018; Schroeder et al., 2019). Dolnopaleozoiczne (od kambru do syluru) skały klastyczne w Górach Świętokrzyskich pokazują szeroki zakres wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, pomiędzy 0,7098 - 0,7978, jednak większość z nich jest powyżej 0,72 (Walczak i Bełka, 2017). Wśród skał występujących w Górach Świętokrzyskich znajdują się także dewońskie, triasowe i jurajskie skały węglanowe, których skład izotopowy został określony w oparciu o dane dla krzywej izotopowej dla wody morskiej (McArthur i in., 2001) na 0,7068 - 0,7082. W południowej części regionu występują gipsy, które mają stosunkowo jednorodny skład izotopowy w zakresie 0,7089 - 0,7091 (Peryt i Anczkiewicz, 2015). Pomimo, iż dla skał występujących na Wyżynie Lubelskiej nie ma bezpośrednich pomiarów, przewidywane

wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla górnokredowych węglanów budujących w przeważającej części płaskowyż są w przedziale od 0,7077 do 0,7079 (McArthur i in., 2001). Nieco wyższe wartości (0,7088 - 0,7089) są przewidywane dla miocenijskich wapieni rafowych rozciągających się wzdłuż południowej krawędzi wyżyny. Lessy w rejonie podkarpackim mają skład izotopowy identyczny do tego dla lessów na Wyżynie Śląsko - Krakowskiej (około 0,72) (Szczepanek et al., 2018).

Dane o wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód Noteci, Warty i Odry, i ich głównych dopływów, które były przedmiotem wcześniejszych prac (Artykuły 1, 2 i 3) zostały uzupełnione nowymi danymi dopełniając szczegółowe badania składu izotopowego strontu wód powierzchniowych w dorzeczu Odry (Fig. 2). W odróżnieniu od dorzecza Odry, dane dla rzek w dorzeczu Wisły są skąpe. Dostępne jest 8 wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla górnego odcinka i jedna z ujściowego odcinka Wisły. Duża gęstość danych dla dorzecza Odry i wielosezonowe opróbowanie ujawniło pewne prawidłowości. Pomimo, że Notec, Warta i Odra posiadają własne budżety izotopowe i osobne trendy zmian składu izotopowego w dół rzeki, pokazują one podobną sezonową zmienność wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, z wyższymi wartościami wiosną (wysoki stan wody) i niższymi latem (niski stan wody). Ponadto, większość dopływów niesie bardziej radiogeniczne wody niż główny strumień. Wcześniejsze prace pokazały także, że współczesny skład izotopowy wód rzecznych jest odmienny od tego w czasach przedprzemysłowych (Zieliński i in., 2016, 2017, 2018a). Dlatego też nie powinien być on wykorzystywany do określania tła geochemicznego w przeszłości. Pomimo tego, że dostępne jest tylko kilka wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla wód Wisły, wskazują one, że rzeka ta niesie nieradiogeniczny stront. Wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,7097 i 0,7095 pomierzone w górnym biegu Wisły są zgodne z tymi dla lokalnych dopływów. Także w ujściowym odcinku ma ona identyczny skład izotopowy (wartość $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0,7095) i zawartość strontu na poziomie 0,50 mg/l (Löfvendahl i in., 1990). Jest to zaskakujące, ponieważ wpływając na Niż Polki, Wisła drenuje obszary zbudowane z plejstocenijskich osadów glacialnych charakteryzujących się wartościami $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ powyżej 0,72. Taka charakterystyka geochemiczna wód Wisły wskazuje na znaczące zanieczyszczenie strontem ze źródeł antropogenicznych. Mniejsze rzeki na północy kraju wpływające bezpośrednio do Bałtyku (Wieprza, Parsęta, Rega) mają stosunkowo radiogeniczny skład izotopowy (wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ powyżej 0,7102) w wyższych wartościach sygnatur izotopowych w źródłowych odcinkach. Wynika to z występowania tam glin zwałowych o radiogenicznym składzie izotopowym, a wraz z biegiem rzeki zasilane są one strontem z wód opadowych o niskich wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0,7091 - 0,7092) i spływem powierzchniowym.

Do określenia składu izotopowego biosfery wykorzystano liście dębu i brzozy rosnących na glebach rozwiniętych na plejstocenijskich osadach glacialnych. Pokazują one stosunkowo wąski zakres wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pomiędzy 0,7113 i 0,7136. Podczas gdy w większości badanych lokalizacji (Drawieński Park Narodowy, Krzesiński Park Krajobrazowy i Załęczański Park Krajobrazowy) oba gatunki mają zbliżony skład izotopowy, w pozostałych miejscach (Bolkowo i Park Krajobrazowy Dolina Baryczy) jest on różny. Może to wynikać z lokalnych różnic w składzie litologicznym podłoża i/lub różnic w długości systemu korzeniowego dębu i brzozy. W każdej badanej lokalizacji wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ liści są wyższe od tych dla wody w tym samym miejscu, ale wyraźnie niższe niż sygnatury izotopowe dla podłoża skalnego. Jest to efektem tego, że stront jest pobierany przez drzewa z wód porowych, które są pochodzenia atmosferycznego (opad) i typowo charakteryzują się krótkim czasem rezydencji i oddziaływania ze skałą/osadem. Dlatego ich skład izotopowy jest bliższy temu dla deszczu niż bardziej radiogenicznego podłoża skalnego.

Porównanie danych izotopowych prezentowanych w niniejszej pracy z przewidywanym składem izotopowym gleby w Polsce (Hoogewerff i in., 2019) sugeruje, że gleby w kraju są zanieczyszczone strontem z nawozów sztucznych, co było wskazywane we wcześniejszych pracach (Artykuły 1, 2 i 3). Stront ten jest pobierany przez rośliny i dostaje się dalej do organizmu zwierząt, tak więc oddziałuje on na cały współczesny łańcuch pokarmowy. W efekcie, współczesny skład izotopowy wody, gleby i roślinności nie powinien być bezpośrednio wykorzystywany do określania tła geochemicznego dla środowiska w badaniach migracji i proveniencji. W niektórych przypadkach możliwe jest jednak odtworzenie pierwotnego składu izotopowego (Artykuł 3).

Zakresy sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i ich przestrzenna zmienność są różne dla wód powierzchniowych i podłoża skalnego. Różnice te są rezultatem zróżnicowanych procesów mieszania w geo- i hydrosferze, które kontrolują udział strontu z różnych źródeł naturalnych. Dodatkowo są one wywołane antropogenicznym zanieczyszczeniem wód powierzchniowych i przypuszczalnie także gleby. Jako, że współczesny skład izotopowy wód powierzchniowych, gleb i roślinności nie odzwierciedla naturalnego sygnału izotopowego, wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dla podłoża skalnego, które wydają się być mniej podatne na wpływy antropogeniczne, są sugerowane do określania tła geochemicznego w czasach historycznych.

4.1.4. Upowszechnianie wyników prac wchodzących w skład osiągnięcia

Oprócz recenzowanych publikacji, wyniki badań były prezentowane w formie posteru i wystąpienia na międzynarodowych konferencjach *EGU General Assembly* we Wiedniu (Zieliński i in., 2018b) (poster) i *Goldschmidt* w Lyonie (Zieliński i in., 2021b) (wystąpienie online) oraz na krajowej konferencji *Transformacja Zanieczyszczeń w Środowisku* w Krakowie (Zieliński i in., 2014) (poster).

4.1.5. Podsumowanie

Radiogeniczne izotopy strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) są szeroko stosowanym narzędziem w badaniach migracji i proveniencji w dziedzinach takich jak ekologia, paleoekologia, archeologia, hydrologia, kryminalistyka i nauki o żywności. Ich użyteczność wynika ze zróżnicowania sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na powierzchni Ziemi i ich niezmienności w trakcie procesów geologicznych i biologicznych. W rezultacie, skład izotopowy strontu analizowanego materiału dostarcza informacji o pochodzeniu strontu w próbce i procesach mieszania strontu z różnych źródeł. Kluczowym aspektem wykorzystania izotopów strontu w badaniach proveniencji i migracji jest informacja o wartościach $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ strontu, który może zostać przyswojony przez organizmy ze środowiska (tzw. biodostępnego strontu). Do określenia tych wartości wykorzystuje się szereg różnych materiałów takich jak wody powierzchniowe, gleba i roztwór glebowy, rośliny oraz szczątki zwierząt. Zaprezentowany cykl artykułów przedstawia wyniki pierwszego systematycznego kartowania składu izotopowego strontu środowiska przyrodniczego w Polsce. Ze względu na wielość potencjalnych naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu prace skupiają się na rozpoznaniu pochodzenia strontu w środowisku i procesach mieszania strontu z różnych źródeł.

W ramach przedłożonego cyklu publikacji przebadano wodę z ponad dwudziestu rzek w Polsce zachodniej. Jako uzupełnienie badano także wartości $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ roślinności, skał i osadów. W celu rozpoznania czynników kształtujących budżet izotopowy wód rzecznych w Polsce szczegółowym badaniom poddane zostały systemy rzeczne Noteci (artykuł A1), Warty (artykuł A2) i Odry (artykuł A3), które są zróżnicowane pod względem przepływu, wielkości zlewni, budowy geologicznej zlewni i intensywności antropopresji. Finalnie zaprezentowano przestrzenne zróżnicowanie sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ w środowisku przyrodniczym Polski skupiające się na zachodniej części kraju (artykuł A4). Wyniki badań pokazują, że skład izotopowy strontu wód rzecznych w Polsce jest efektem mieszania się strontu pochodzącego z podłoża skalnego i ze źródeł antropogenicznych. W przypadku Noteci i Odry to drugie źródło dominuje w budżecie izotopowym strontu rozpuszczonego w wodach tych rzek. Generalnie, współczesne wartości sygnatur $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ wód rzecznych i w pewnym zakresie także gleb użytkowanych rolniczo jest inny od tego, w czasach przedprzemysłowych. Odkrycie to ma kluczowe znaczenie dla badań proveniencji i migracji, ponieważ pokazuje, że współczesny skład izotopowy wód powierzchniowych nie powinien być bezkrytycznie wykorzystywany jako punkt odniesienia.

4.2. Pozostałe osiągnięcia w dyscyplinie Nauk o Ziemi i Środowisku

Pełna lista publikacji, wraz ze szczegółowym określeniem mojego udziału w nich, wykaz projektów badawczych i prezentacji konferencyjnych, a także danych naukowych zostały przedstawione w załączonym *Wykazie osiągnięć*.

4.2.1. Działalność naukowa realizowana przed otrzymaniem stopnia doktora

Studia doktoranckie odbywałem na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w latach 2008-2011. Moja rozprawa doktorska pt. „Reconstruction of thermal history of the Ahnet and Mouydir basins (southern Algeria)” powstała pod kierunkiem prof. dr hab. Zdzisława Bełki. Część badań została sfinansowana w ramach promotorskiego projektu badawczego Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N307 029337, w którym byłem wykonawcą. Przedmiotem rozprawy doktorskiej było opracowanie modelu historii termicznej dla osadów dewonu i karbonu występujących w basenach Ahnet i Mouydir. Oba baseny sedimentacyjne są rozległymi (łącznie powierzchnia ok. 10 000 km²) paleozoicznymi obniżeniami położonymi przy północnozachodniej krawędzi masywu Hoggar w południowej Algierii. Dojrzałość termiczna osadu została określona na podstawie konodontowego wskaźnika przeobrażeń termicznych (ang. conodont color alteration index - CAI). Jest to pierwsze zastosowanie metody CAI na tym obszarze. Niezwykle ciekawym aspektem pracy jest wykorzystanie rzadkiego zjawiska mineralizacji konodontów (obecności faz mineralnych na konodontach) do wyznaczenia dróg migracji fluidów odpowiedzialnych za jej powstanie. Głównym osiągnięciem rozprawy jest wskazanie, że skały dewonu i karbonu w obu basenach były wystawione na oddziaływanie temperatur w zakresie 40-150°C w efekcie regionalnego pograżenia, co odpowiada warunkom tworzenia się ropy naftowej. Analiza rozmieszczenia zmineralizowanych konodontów, z kolei, pokazała, że fluidy, z których wytrącały się fazy mineralne porastające konodonty migrowały najpewniej uskokami przecinającymi wypełnienie osadowe basenów. Wybrane wyniki zostały opublikowane w formie artykułu w czasopiśmie *Marine and Petroleum Geology*.

4.2.2. Działalność naukowa realizowana po otrzymaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu przeze mnie stopnia doktora w dziedzinie nauk o Ziemi i zatrudnieniu na stanowisku adiunkta (od 1 października 2012) moje zainteresowania naukowe skupiały się na 4 głównych tematach:

- Śledzenie naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu w wodach powierzchniowych
- Kartowanie składu izotopowego strontu (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) środowiska przyrodniczego w Polsce
- Rekonstrukcja cyrkulacji wód w dawnych basenach morskich
- Proweniencja pyłów atmosferycznych

Śledzenie naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu w wodach powierzchniowych oraz Kartowanie składu izotopowego strontu (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) środowiska przyrodniczego w Polsce

Główny zakres mojej działalności naukowej po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje prace nad śledzeniem naturalnych i antropogenicznych źródeł strontu w wodach powierzchniowych oraz kartowaniem sygnatur ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr środowiska przyrodniczego w Polsce. Prace w tym zakresie były prowadzone w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 2012/07/B/ST10/03885, w którym byłem głównym wykonawcą. 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.

Kolejna praca dotycząca śledzenia źródeł strontu w wodach powierzchniowych skupia się na zmianach jakości wody i określeniu źródeł zasilania meromiktycznego jeziora Lubińskiego na pojezierzu lubuskim (Zieliński i in., 2019). W pracy wykazaliśmy postępującą eutrofizację jeziora związaną ze wzruszeniem materii organicznej z dna w wyniku wymieszania jego wód podczas serii wichur. Rozstrzygnęliśmy także kwestię zasilania jeziora Lubińskiego. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że jezioro jest zasilane

głównie przez źródła występujące wzdłuż jego brzegów. Ponadto potwierdziliśmy antropogeniczne zanieczyszczenie wód jeziora w związku ze stosowaniem nawozów mineralnych. Moja rola polegała na rozpoznaniu dróg zasilania i zanieczyszczenia jeziora w oparciu o dane o składzie izotopowym strontu i zawartości strontu i chloru. Wspólnie z prof. Andrzejem Pukaczem z Collegium Polonicum w Ślubicach i prof. Anną Szczucińską brałem także udział w pracach terenowych.

Rekonstrukcja cyrkulacji wód w dawnych basenach morskich

Drugi z tematów badawczych, w który jestem zaangażowany po uzyskaniu stopnia doktora, obejmuje badania nad odtwarzaniem cyrkulacji wód w dawnych basenach morskich. Wykorzystujemy do tego celu skład izotopowy strontu i neodymu pierwotnego gipsu. Jest to pierwsze tego typu zastosowanie tej metody w skali basenu morskiego. Zagadnienie to było realizowane w ramach projektu Opus Narodowego Centrum Nauki (nr 2017/27/B/ST10/00493; kierownik dr Jolanta Dopieralska, Fundacja Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza), w którym byłem głównym wykonawcą.

Wstępne wyniki zostały zaprezentowane na konferencji EGU General Assembly (Dopieralska i in., 2022). W ramach realizacji tego projektu do tej pory powstała jedna publikacja. W artykule tym (Dopieralska i in., 2024) udokumentowaliśmy cykliczne zmiany składu izotopowego neodymu (ϵNd) i strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) warstwowych sekwencji gipsowych z terenu południowej Polski i zachodniej Ukrainy. Praca ta dała nowy wgląd w mechanizm tworzenia się pierwotnego gipsu w zapadlisku przedkarpaccim w miocenie. Moja rola w tych badaniach polegała na udziale w pracach terenowych razem z prof. Anną Wysocką, dr Marcinem Górką, dr Oksaną Stupką i dr Andrijem Pobiereckim (Andriy Poberezhskyi).

Proweniencja pyłów atmosferycznych

Ostatni z kierunków badań, w który jestem zaangażowany po obronie doktoratu dotyczy określenia pochodzenia pyłów atmosferycznych tworzących pokrywy lessowe w południowej Polsce w oparciu o skład izotopowy strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) i neodymu (ϵNd). Wstępny etap tych badań był realizowany w ramach projektu Miniatura Narodowego Centrum Nauki (nr 2020/04/X/ST10/00119), którego byłem kierownikiem. Pilotowe dane pokazują przestrzenne i czasowe zmiany składu izotopowego obu pierwiastków. Wskazują one na dominujący udział pyłu z lokalnych źródeł oraz ich zmienność w czasie i przestrzeni. Aktualnie staram się o pozyskanie finansowania kolejnego etapu tych badań, którego celem będzie ściślejsze powiązanie obszarów źródłowych pyłów z pokrywami lessowymi. Ponadto, brałem także udział w nowatorskich pracach nad wpływem lokalnych zmian środowiska na skład izotopowy neodymu w torfie (Marcisz i in., 2023). Kluczowym wynikiem tej pracy jest wykazanie związku między zmianami składu izotopowego neodymu i lokalnymi zaburzeniami środowiska przyrodniczego co niesie ważne implikacje dla badań proveniencji pyłów na torfowiskach. Moja rola w tych badaniach polegała na udziale w pracach terenowych wraz z Prof. Mariuszem Lamentowiczem i dr hab. Katarzyną Marcisz oraz edycji manuskryptu.

4.2.3. Wystąpienia konferencyjne i na zebraniach instytucji naukowych poza UAM

W ramach dotychczasowej działalności naukowej byłem autorem 3 wystąpień na konferencjach naukowych, w tym 2 na konferencjach międzynarodowych. W 1 przypadku moje uczestnictwo obejmowało wystąpienie ustne, a w 2 przypadkach wystąpienia posterowe. Oprócz tego, byłem współautorem 2 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 jednym finansowanym z zewnątrz projektem naukowym: program Miniatura Narodowego Centrum Nauki. Oprócz tego pełniłem funkcje głównego wykonawcy w dwóch projektach programu Opus Narodowego Centrum Nauki oraz funkcje wykonawcy w projekcie brytyjskiego Stowarzyszenia Archeologii Środowiskowej (Association for Environmental Archaeology, Great Britain). Byłem także wykonawcą w projekcie promotorskim Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

4.2.5. Recenzje publikacji naukowych

Od momentu uzyskania stopnia doktora wykonałem 6 recenzji artykułów naukowych dla czasopism z listy Journal Citation Reports: *Journal of Hydrology* (2), *Journal of Hydrology: Regional Studies* (1), *MDPI Water* (1), *Aquatic Geochemistry* (1), *Science of the Total Environment* (1).

4.2.6. Nagrody i wyróżnienia

2018 Wynagrodzenie motywacyjne UAM

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

Moje pobyty naukowe poza Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza obejmowały krótkie (do dwóch tygodni) pobyty na krajowych uczelniach i w zagranicznych jednostkach naukowych w celu poszerzenia warsztatu badawczego w ramach realizacji projektów naukowych, w które włączeni byli współpracownicy z kraju i zagranicy. Wyjazdy te obejmowały dwukrotny pobyt na Uniwersytecie Warszawskim (maj i czerwiec, 2020; osoba przyjmująca Dr Maciej Górka) i pobyt w Instytucie Geologii i Geochemii Palnych Minerałów Ukrainiejskiej Akademii Nauk we Lwowie (październik 2021; osoba przyjmująca dr Andriy Pobierecki (Andriy Poberezhskyi)). W trakcie pobytów na Uniwersytecie Warszawskim zapoznawałem się z wybranymi grupami miocenich organizmów morskich oraz dokonywałem selekcji materiału do analiz izotopowych. Podczas pobytu we Lwowie, z kolei, byłem wprowadzany w zagadnienie wykształcenia serii gipsowej w ukraińskiej części zapadliska przedkarpackiego oraz metodologię badań skał siarczanowych. W ramach tego pobytu odbył się także pobór prób do analiz izotopowych. Wyniki tych badań zaowocowały powstaniem jednej publikacji (Dopieralska i in., 2024). 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 2008-2011) prowadziłem ćwiczenia z przedmiotu metodyka stratygrafii oraz paleontologia i stratygrafia dla kierunku Geologia. Od momentu mojego zatrudnienia na stanowisku adiunkta (2012 rok) prowadziłem następujące zajęcia:

- Ćwiczenia i wykład z geologii dla kierunku Geografia i Geografia specjalności Zarządzanie Środowiskiem, Hydrologia Meteorologia i Klimatologia, Ekologia Miasta, Geoanaliza Społeczno-Ekonomiczna

- Ćwiczenia i wykład z podstaw geologii i gleboznawstwa dla kierunku Geografia specjalność Geo-grafika
- Wykład i konwersatorium z podstaw geologii, geomorfologii i hydrologii dla kierunku Ochrona Środowiska
- Wykład z gospodarki odpadami dla kierunku Geografia specjalność Ekologia Miasta
- Ćwiczenia i ćwiczenia terenowe z przyrodniczych uwarunkowań gospodarki przestrzennej dla kierunku Gospodarka Przestrzenna
- Wykład z wybranych aspektów geologii obszarów miejskich dla kierunku Geografia specjalność Ekologia Miasta
- Wykład z biogeochemii i badań izotopowych środowiska miejskiego dla kierunku Geografia specjalność Ekologia Miasta
- Ćwiczenia i ćwiczenia terenowe z fotografii przyrodniczej dla kierunku Geografia specjalność Geo-grafika
- Ćwiczenia z technologii informacyjnych dla kierunku Geografia specjalność Geo-grafika
- Ćwiczenia z grafiki komputerowej dla kierunku Geografia specjalność Geo-grafika
- Ćwiczenia z geomorfologii dla kierunku Geografia specjalność Geo-grafika
- Ćwiczenia terenowe z geologii czwartorzędu dla kierunku Geografia specjalność Ekologia Miasta
- Ćwiczenia terenowe z kartowania środowiska przyrodniczego dla kierunku Geoinformacja

W roku akademickim 2022/2023 byłem także opiekunem praktyki zawodowej dla kierunku Geografia specjalności Ekologia Miasta i Geo-grafika. Dodatkowo prowadziłem seminarium magisterskie. Ponadto byłem autorem sylabusów do przedmiotów „Wybrane aspekty geologii obszarów miejskich” oraz „Biogeochemia i badania izotopowe środowiska miejskiego”. Dotychczas byłem promotorem jednej pracy magisterskiej.

6.2. Aktywność organizacyjna

W ramach swojej aktywności organizacyjnej na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza trzykrotnie sprawowałem funkcję opiekuna roku studiów licencjackich (2012-2015, kierunek Geoinformacja; 2017-2020, 2023 - aktualnie, kierunek Geografia) i magisterskich (2015-2017, kierunek Geoinformacja; 2020-2022, kierunek Geografia). Moja aktywność organizacyjno-administracyjna obejmowała także obowiązki wynikające z udziału w realizacji 3 projektów badawczych Narodowego Centrum Nauki (patrz załączony *Wykaz osiągnięć*), w tym przede wszystkim z kierowania przeze mnie projektem nr 2020/04/X/ST10/00119 (program Miniatura Narodowego Centrum Nauki). Poza pracami w ramach grantów badawczych, jestem zaangażowany w bieżącą działalność operacyjną i organizacyjną Laboratorium Izotopowego na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza.

6.3. Aktywność popularyzacyjna

W ramach aktywności popularyzatorskiej organizowałem warsztaty z paleontologii i wykłady o dinozaurach podczas Poznańskiego Festiwalu Nauki i Sztuki. Wygłaszałem także prelekcje popularnonaukowe w placówkach oświatowych (Zespół Szkół Zakonu Pijarów im. św. Józefa Kalasancjusza w Poznaniu, I Liceum Ogólnokształcące im. Stanisława Staszica w Pleszewie).

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

-

Cytowana literatura:

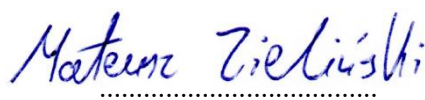
- Aberg G., 1995. The use of natural strontium isotopes as tracers in environmental studies. *Water, Air and Soil Pollution*, 79: 309-322.
- Aubert D., Probst A., Stille P., Viville D., 2002. Evidence of hydrological control of Sr behavior in stream water (Strengbach catchment, Vosges mountains, France). *Applied Geochemistry*, 17: 285-300.
- Banner J.L., 2004. Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 65: 141-194.
- Bataille C.P., Crowley B.E., Wooller M.J., Bowen G.J., 2020. Advances in global bioavailable strontium isoscapes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 555: 109849.
- Beard B.L., Johnson C.M., 2000. Strontium isotope composition of skeletal material can determine the birth place and geographic mobility of humans and animals. *Journal of Forensic Sciences*, 45: 1049-1061.
- Bentley R.A., 2006. Strontium isotopes from the earth to the archaeological skeleton: A review. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 13: 135-187.
- Borkowska M., Hamerut J., Vidal P., 1980. Origin and age of Izera gneisses and Rumburk granites in the Western Sudetes. *Acta Geologica Polonica*, 30: 121-146.
- Britton K., Grimes V., Niven L., Steele T.E., McPherron S., Soressi M., Kelly T.E., Jaubert J., Hublin J.J. Richards M.P., 2011. Strontium isotope evidence for migration in late Pleistocene *Rangifer*: Implications for Neanderthal hunting strategies at the Middle Palaeolithic site of Jonzac, France. *Journal of Human Evolution*, 61: 176-185.
- Buko A., Kara M., Price T.D., Duczko W., Frei K.M., Sobkowiak-Tabaka I., 2013. A unique medieval cemetery from the 10th/11th century with chamber-like graves from Bodzia (Central Poland). Preliminary results of the multidisciplinary research. *Sonderdruck aus Archäologisches Korrespondenzblatt*, 43: 423-442.
- Capo R.C., Stewart B.W., Chadwick O., 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 82: 197-225.
- Clow D.W., Mast M.A., Bullen T.D., Turk J.T., 1997. Strontium 87/strontium 86 as a tracer of mineral weathering reactions and calcium sources in an alpine/subalpine watershed, Loch Vale, Colorado. *Water Resources Research*, 33: 1335-1351.
- Czubla P., Terpiłowski S., Orłowska A., Zieliński P., Zieliński T., Pidek I.A., 2019. Petrographic features of tills as a tool in solving stratigraphical and palaeogeographical problems-a case study from Central-Eastern Poland. *Quaternary International*, 501: 45-58.
- Drake B.L., Wills W.H., Hamilton M.I., Dorshow W., 2014. Strontium isotopes and the reconstruction of the Chaco regional system: evaluating uncertainty with Bayesian mixing models. *PLoS One*, 9: e95580.
- Dopieralska J., 2003. Neodymium isotopic composition of conodonts as a palaeoceanographic proxy in the Variscan oceanic system (rozprawa doktorska) Justus-Liebig-University, Giessen. <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2003/1168/>.
- Dopieralska J., Bełka Z., Haack U., 2006. Geochemical decoupling of water masses in the Variscan oceanic system during Late Devonian times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240: 108-119.
- Dopieralska J., Zieliński M., Bełka Z., Walczak A., Górka M., Wysocka A., Poberezhskyy A., 2022. The origin of parent brine of the Badenian (Middle Miocene) primary gypsum deposits in the western part of the Carpathian Foredeep Basin: insights from strontium isotopes. EGU General Assembly 2022, Wiedeń. EGU22-6557.
- Dopieralska J., Bełka Z., Zieliński M., Górka M., Poberezhskyy A., Stupka O., Walczak A., Wysocka A., 2024. Neodymium and strontium isotopes track the origin of parent brines of primary gypsum deposits (Miocene, Carpathian Foredeep Basin). *Chemical Geology*, 648: 121963.
- Ericson J.E., 1985. Strontium isotope characterization in the study of prehistoric human ecology. *Journal of Human Evolution*, 14: 503-514.

- Evans J.A., Montgomery J., Wildman G., Boulton N., 2010. Spatial variations in biosphere $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Britain. *Journal of the Geological Society, London*, 167: 1-4.
- Faure G., Powell, J.L., 1972. Strontium isotope geology. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- Faure G., 1986. Principles of isotope geology, 2nd edition. Wiley.
- Flockhart D.T.T., Kyser T.K., Chipley D., Miller N.G., Norris D.R., 2015. Experimental evidence show no fractionation of strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) among soil, plants, and herbivores: implications for tracking wildlife and forensic science. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 51: 372-381.
- Frąckowiak H., Kuczyńska I., 1996. Wpływ nawodnień zasolonymi wodami górnej Noteci na niektóre właściwości fizykochemiczne organicznych gleb łąkowych. *Roczniki Gleboznawcze*, 47: 75-82.
- Frei K.M., Frei R., 2011. The geographic distribution of strontium isotopes in Danish surface waters - A base for provenance studies in archaeology, hydrology and agriculture. *Applied Geochemistry*, 26: 326-340.
- Frei R., Frei K.M., 2013. The geographic distribution of Sr isotopes from surface waters and soil extracts over the island of Bornholm (Denmark) - A base for provenance studies in archaeology and agriculture. *Applied Geochemistry*, 38: 147-160.
- Freyer G., 1968. Conodontenfundes aus dem Oberdevon und Unterkarbon von Dzikowiec Kłodzki (Ebersdorf) und Góglowy (Hollenau) in Dolny Śląsk (Niederschlesien). *Geologie*, 17: 60-67.
- Gregoricka L.A., Betsinger T.K., Scott A.B., Polcyn M., 2014. Apotropaic practices and the undead: a biogeochemical assessment of deviant burials in post-medieval Poland. *PLoS ONE*, 9: e113564.
- Grimstead D.N., Nugent S., Whipple J., 2017. Why a standardization of strontium isotope baseline environmental data is needed and recommendations for methodology. *Advances in Archaeological Practice*, 5: 184-195.
- Hartman G., Richards M., 2014. Mapping and defining sources of variability in bioavailable strontium isotope ratios in the Eastern Mediterranean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 126: 250-264.
- Holt E., Evans J.A., Madgwick R., 2021. Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) mapping: a critical review of methods and approaches. *Earth-Science Reviews*, 216: 103593.
- Hoogewerff J.A., Reimann C., Ueckermann H., Frei R., Frei K.M., van Aswegen T., Stirling C., Reid M., Clayton A., Ladenberger A., The GEMAS Project Team., 2019. Bioavailable $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in European soils: a baseline for provenancing studies. *Science of the Total Environment*, 672: 1033-1044.
- Kelly S., Heaton K., Hoogewerff J., 2005. Tracing the geographical origin of food: The application of multi-element and multi-isotope analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 16: 555-567.
- Kootker L.M., van Lanen R.J., Kars H., Davies G.R., 2016. Strontium isoscapes in The Netherlands. Spatial variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ as a proxy for palaeomobility. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 6: 1-13.
- Konieczna N., Bełka Z., Dopieralska J., 2015. Nd and Sr isotopic evidence for provenance of clastic material of the Upper Triassic rocks of Silesia, Poland. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 85: 675-684.
- Kowalik N., Anczkiewicz R., Wilczyński J., Wojtal P., Muller W., Bondioli L., Nava A., Gasparik M., 2020. Tracing human mobility in central Europe during the Upper Paleolithic using sub-seasonally resolved Sr isotope records in ornaments. *Scientific Reports*, 10: 10386.
- Ladegaard-Pedersen P., Achilleos M., Dorflinger G., Frei R., Kristiansen K., Frei K.M., 2020. A strontium isotope baseline of Cyprus. Assessing the use of soil leachates, plants, groundwater and surface water as proxies for the local range of bioavailable strontium isotope composition. *Science of the Total Environment*, 708: 134714.
- Lisicki S., 2003. Litotypy i litostratygrafia glin lodowcowych plejstocenu dorzecza Wisły. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego*, 177: 1-105.

- Lofvendahl R., Aberg G., Hamilton P.J., 1990. Strontium in rivers of the Baltic Basin. *Aquatic Sciences*, 52: 315-329.
- Magdziorz A., Lach R., 2002. Analiza możliwości ograniczenia zasolenia Bierawki i Odry przez wody kopalniane. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko*, 2: 69-88.
- Marcisz K., Belka Z., Dopieralska J., Jakubowicz M., Karpińska-Kołaczek M., Kołaczek P., Mauquoy D., Słowiński M., Zieliński M., Lamentowicz M., 2023. Neodymium isotopes in peat reveal past local environmental disturbances. *Science of the Total Environment*, 871: 161859.
- Maurer A.F., Galer S.J.G., Knipper C., Beierlein L., Nunn E.V., Peters D., Tutken T., Alt K.W., Schone B.R., 2012. Bioavailable $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in different environmental samples - effects of anthropogenic contamination and implications for isoscapes in past migration studies. *Science of the Total Environment*, 433: 216-229.
- McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R., 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve from 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *The Journal of Geology*, 109: 155-170.
- McNutt R.H., 2000. Strontium isotopes. W: Cook P.G., Herczeg A.L., (red.), *Environmental tracers in subsurface hydrology*. Kluwer Academic Publishers. pp. 234-260.
- Nakano T. 2016. Potential uses of stable isotope ratios of Sr, Nd, and Pb in geological materials for environmental studies. *Proceedings of the Japan Academy, Series B, Physical and Biological Sciences*, 92: 167-184.
- Palmer M.R., Edmond J.M., 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 92: 11-26.
- Palmer M.R., Edmond J.M., 1992. Controls over the strontium isotope composition of river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 2099-2111.
- Peryt T.M., Anczkiewicz R., 2015. Strontium isotope composition of Middle Miocene primary gypsum (Badenian of the Polish Carpathian Foredeep Basin): evidence for continual non-marine inflow of radiogenic strontium into evaporite basin. *Terra Nova*, 27: 54-61.
- Peucker-Ehrenbrink B., Fiske G.J., 2019. A continental perspective of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record: A review. *Chemical Geology*, 510: 140-165.
- Pin C., Majerowicz A., Wojciechowska I., 1988. Upper paleozoic oceanic crust in the Polish Sudetes: Nd-Sr isotope and trace element evidence. *Lithos*, 21: 195-209.
- Pokutta D.A., Frei K.M., 2011. Isotopic study of Szczepankowice Early Bronze Age barrow burial ground (southwestern Poland). *Silesia Antiqua*, 47: 1-19.
- Podio N., S., Baroni M.V., Badini R.G., Inga M., Osters H., Cagnoni M., Gautier E.A., Garcia P.P., Hoogewerff J., Wunderlin D.A., 2013. Elemental and isotopic fingerprint of Argentinian wheat. Matching soil, water, and crop composition to differentiate provenance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61: 3763-3773.
- Pospieszny Ł., Sobkowiak-Tabaka I., Price T.D., Frei K.M., Hildebrandt-Radke I., Kowalewska-Marszałek H., Krenz-Niedbała M., Osypińska M., Stróżyk M., Winiarska-Kabacińska M., 2015. Remains of a late Neolithic barrow at Kruszyn. A glimpse of ritual and everyday life in early Corded Ware societies of the Polish Lowland. *Præhistorische Zeitschrift*, 90: 185-213.
- Poszwa A., Dambrine E., Ferry B., Pollier B., Loubet M., 2002. Do deep tree roots provide nutrients to the tropical rainforest?. *Biogeochemistry*, 60: 97-118.
- Price T.D., Burton J.H., Bentley R.A., 2002. The characterization of biologically available strontium isotope ratios for the study of prehistoric migration. *Archaeometry*, 44: 117-135.
- Price T.D., Frei K.M., Dobat A.S., Lynnerup N., Bennike P., 2011. Who was in Harold Bluetooth's army? Strontium isotope investigation of the cemetery at the Viking Age fortress at Trelleborg, Denmark. *Antiquity*, 85: 476-489.
- Rózkowski A., Chmura A., Gajowiec B., Wagner J., 1993. Impact of mining on the groundwater chemistry in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). *Mine Water and the Environment*, 12: 95-105.

- Ryan S.E., Snoeck C., Crowley Q.G., Babechuk M.G., 2018. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and trace element mapping of geosphere-hydrosphere-biosphere interactions: a case study in Ireland. *Applied Geochemistry*, 92: 209-224.
- Schroeder H., Margaryan A., Szmyt M., Theulot B., Włodarczak P., Rasmussen S., Gopalakrishnan S., Szczepanek A., Konopka T., Jensen T.Z.T., Witkowska B., Wilk S., Przybyła M.M., Pospieszny Ł., Sjögren K.-G., Belka Z., Olsen J., Kristiansen K., Willerslev E., Frei K.M., Sikora M., Johannsen N.N., Allentoft M.E., 2019. Unraveling ancestry, kinship, and violence in a Late Neolithic mass grave. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116: 10705- 10710.
- Shand P., Darbyshire D.P.F., Love A.J., Edmunds W.M., 2009. Sr isotopes in natural waters: applications to source characterisation and water-rock interaction in contrasting landscapes. *Applied Geochemistry*, 24: 574-586.
- Snoeck C., Pouncett J., Ramsey G., Meighan I.G., Mattielli N., Goderis S., Lee-Thorp J.A., Schulting R.J., 2016. Mobility during the Neolithic and Bronze Age in Northern Ireland explored using strontium isotope analysis of cremated human bone. *American Journal of Physical Anthropology*, 160: 397-413.
- Song B.-Y., Ryu J.-S., Shin H.S., Lee K.-S., 2014. Determination of the source of bioavailable Sr using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tracers: a case study of hot pepper and rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62: 9232-9238.
- Szczepanek A., Belka Z., Jarosz P., Pospieszny Ł., Dopieralska J., Frei K.M., Rauba-Bukowska A., Werens K., Gorski J., Hozer M., Mazurek M., Włodarczak P., 2018. Understanding Final Neolithic communities in south-eastern Poland: new insights on diet and mobility from isotopic data. *PLoS One*, 13: e0207748.
- Thomsen E., Andreasen R., 2019. Agricultural lime disturbs natural strontium isotope variations: Implications for provenance and migration studies. *Science Advances*, 5: eaav8083.
- Voerkelius S., Lorenz G.D., Rummel S., Quélet C.R., Heiss G., Baxter M., Brach-Papa C., Deters-Itzelsberger P., Hoelzl S., Hoogewerff J., Ponzevera E., Van Bockstaele M., Ueckermann H., 2010. Strontium isotopic signatures of natural mineral waters, the reference to a simple geological map and its potential for authentication of food. *Food Chemistry*, 118: 933-940.
- Wachowiak G., 2011. Wpływ zrzutów wód kopalnianych na wielkość przepływów wody w rzekach w początkowym okresie odwadniania odkrywki „Tomisławice” KWB „Konin”. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35: 153-166.
- Wachowiak G., Galiniak G., Jończyk W., Martyniak R., 2011. Ocena zmian odpływu w zlewni rzeki Widawki w roku hydrologicznym 2010 pod wpływem oddziaływania inwestycji górniczo-energetycznej w rejonie Belchatowa. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 35: 381-395.
- Walczak A., Belka Z., 2017. Fingerprinting Gondwana versus Baltica provenance: Nd and Sr isotopes in Lower Paleozoic clastic rocks of the Małopolska and Łysogóry terranes, southern Poland. *Gondwana Research*, 45: 138-151.
- Widory D., Vautour G., Poirier A., 2018. Atmospheric dispersion of trace metals between two smelters: An approach coupling lead, strontium and osmium isotopes from bioindicators. *Ecological Indicators*, 84: 497-506.
- Willmes M., Bataille C.P., James H.F., Moffat I., McMorrow L., Kinsley L., Armstrong R.A., Eggins S., Grun R., 2018. Mapping of bioavailable strontium isotope ratios in France for archaeological provenance studies. *Applied Geochemistry*, 90: 75-86.
- Zieliński M., Dopieralska J., Walczak-Parus A., Siepak M., Jakubowicz M., Belka Z., 2014. Śledzenie źródeł antropopresji przy pomocy izotopów strontu ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$): skąd pochodzą wody Noteci. *Transformacja Zanieczyszczeń w Środowisku*, 11-12.12. 2014, Kraków. Materiały konferencyjne, str. 94.
- 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, Noteć River, central Poland, *Science of the Total Environment*, 548-549: 307-316.

- Zieliński M., Dopieralska J., Bełka 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., Bełka Z., Walczak A., Siepak M., Jakubowicz M., 2018a. 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.
- Zieliński M., Dopieralska J., Bełka Z., Walczak A., Siepak M., Jakubowicz M., 2018b. A high anthropogenic Sr flux into the Baltic Sea from the Oder River basin and its isotopic record. *EGU General Assembly*, 8-13.4.2018, Wiedeń. Geophysical Research Abstracts vol. 20, EGU2018-2222.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-2222.pdf>
- Zieliński M., Szczucińska A., Drożdżyński M., Frankowski M., Pukacz A., 2019. Water quality assessment of a meromictic lake based on physiochemical parameters and strontium isotopes ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) analysis: a case study of Lubińskie Lake (western Poland). *MDPI Water*, 11: 2231.
- Zieliński M., Dopieralska J., Królikowska-Ciągło S., Walczak A., Bełka Z., 2021a. Mapping of spatial variations in Sr isotope signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Poland-implications of anthropogenic Sr contamination for archaeological provenance and migration research. *Science of the Total Environment*, 775: 145792.
- Zieliński M., Dopieralska J., Bełka Z., Królikowska-Ciągło S., Walczak A., 2021b. Anthropogenic impact on environmental strontium isotope signatures ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) in Poland: implications for archaeological provenance and migration research. *Goldschmidt*, 4-9.7.2021, Lyon. Goldschmidt 2021 Abstracts,
<https://doi.org/10.7185/gold2021.3065>.


.....
(podpis wnioskodawcy)