

**Wniosek o habilitację:
Autoreferat**

Dr Simon John Cuthbert

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Geologii, Geofizyki
i Ochrony Środowiska**

9 maja 2022 r.

Autoreferat
Dr Simon J Cuthbert
Podsumowanie osiągnięć zawodowych

1. Imię i nazwisko:

Simon John Cuthbert

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

- Doktor (PhD) w dziedzinie geologii
 - *Instytucja nadająca tytuł:* University of Sheffield, Wielka Brytania
 - *Rok nadania stopnia naukowego:* 1985
 - *Tytuł rozprawy doktorskiej:* *Petrology and tectonic setting of relatively low-temperature eclogites from the Basal Gneiss Region, western south Norway.*
 - *Opiekun naukowy:* Dr Dennis Anthony Carswell
 - *Egzaminatorzy doktoratu:* Profesor Michael J. O'Hara (zewnętrzny); Profesor Barry Dawson (wewnętrzny).
- Tytuł licencjata nauk ścisłych z wyróżnieniem (BSc Hons) w dziedzinie geologii
 - *Instytucja nadająca tytuł:* University of Sheffield, Zjednoczone Królestwo
 - *Rok nadania stopnia naukowego:* 1979
 - *Tytuły rozprawy:* Praca terenowa: *Geology of the area around Capel Curig, North Wales*; Praca przeglądowa literatury: *Geology and evolution of the Lunar Highland crust.*

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

- **kwiecień 1987 – marzec 1989:** *University of Glasgow*, Wielka Brytania, Department of Geology & Applied Geology (Natural Environment Research Council Stypendium badawcze dla doktorantów); *Provenance of late-orogenic sediments in the Devonian basin of western Norway – relationships with basin evolution and exhumation of a high-pressure metamorphic terrain.*
- **grudzień 1989 – grudzień 2019:** Paisley College of Technology (następnie University of Paisley później *University of the West of Scotland*); Wykładowca nauk o Ziemi i środowisku.
- **październik 2019 – obecnie:** adiunkt, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie; (Pracownik badawczy, niepełny etat).

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy:

(a) **Zbińczy tytuł osiągnięć:** Kluczowe postępy w zrozumieniu procesów subdukcji i ekshumacji w skorupie kontynentalnej podczas orogenezy kolizyjnej, zapisanych w wysokociśnieniowych skałach metamorficznych i późnoorogenicznych basenach sedymentacyjnych.

(b) **Wybrane, opublikowane, recenzowane publikacje będące wynikiem osiągnięć:**

1. Wilks, W.J., **Cuthbert S.J.** 1994. *The evolution of the Hornelen Basin detachment system, western Norway: implications for the style of late orogenic extension in the southern Scandinavian Caledonides*. Tectonophysics 238, 1-30. 49 cytowań (WoS).
2. **Cuthbert, S. J.**, Carswell, D.A., Krogh-Ravna, E.J., Wain, A. 2000. *Eclogites and eclogites in the Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides*. Lithos 52, 165-195. 177 cytowań (WoS).
3. Carswell, D.A., Brueckner, H.K., **Cuthbert, S.J.**, Mehta, K., O'Brien, P. 2003. *The timing of stabilisation and the exhumation rate for ultra-high pressure rocks in the Western Gneiss Region of Norway*. Journal of Metamorphic Geology 21, 601 - 612. 100 cytowań (WoS).
4. Brueckner, H.K. & **Cuthbert, S.J.** 2013. *Extension, disruption, and translation of an orogenic wedge by exhumation of large ultrahigh-pressure terranes: Examples from the Norwegian Caledonides*. Lithosphere 5, 277-289. 19 cytowań (WoS).
5. Bottrill, A. D., van Hunen, J., **Cuthbert, S. J.**, Brueckner, H. K. & Allen, M. B. 2014. *Plate rotation during continental collision and its relationship with the exhumation of UHP metamorphic terranes: Application to the Norwegian Caledonides*. Geochemistry Geophysics Geosystems 15, 1766-1782. 18 cytowań (WoS).
6. Walczak, K., **Cuthbert, S.**, Kooijman, E. K., Majka, J. & Smit, M., 2018. *U-Pb zircon age dating of diamond-bearing gneiss from Fjortoft reveals repeated burial of the Baltoscandian margin during the Caledonian Orogen: U-Pb zircon dating of diamondiferous gneiss, WGR*. Geological Magazine. GEO-18-2102.R2. 7 cytowań (WoS).
7. Faryad, S. W., & **Cuthbert, S. J.** 2020. *High-temperature overprint in (U)HPM rocks exhumed from subduction zones: a product of isothermal decompression or a consequence of slab break-off (slab rollback)?* Earth Science Reviews, 202, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103108>. 17 cytowań (WoS).
8. Hughes, L., **Cuthbert, S.**, Quas-Cohen, A., Ruzié-Hamilton, L., Pawley, A., Droop, G., Lyon, I., Tartèse, R., Burgess, R. 2021. *Halogens in Eclogite Facies Minerals from the Western Gneiss Region, Norway*. Minerals, 11, 760. <https://doi.org/10.3390/min11070760>. 0 cytowań (WoS).

(c) **Tło naukowe osiągnięć.**

Osiągnięcia mieszczą się w dziedzinie nauk geologicznych (dziedzina nauk fizycznych i inżynierskich: nauki o Ziemi i środowisku) i dotyczą procesów, które tworzą główne pasy górskie (orogeny) na Ziemi. Najwyraźniej wykształcone łańcuchy górskie są rezultatem zderzeń kontynentów w ramach konwergentnych granic płyt tektonicznych, po zamknięciu basenu oceanicznego. Litosfera oceaniczna przedostaje się do płaszcza Ziemi pod rowami oceanicznymi, co jest procesem nazywanym "subdukcją". Obszar na Ziemi, który wyznacza górną powierzchnię zanurzającej się litosfery oceanicznej, nazywany jest "strefą subdukcji". Kontynenty położone na subdukowanej płycie tektonicznej składają się z grubszych, skał o mniejszej gęstości niż skorupa oceaniczna, więc kiedy docierają do granicy płyt, opierają się subdukcji i w efekcie są transportowane bardziej horyzontalnie przez subdukującą litosferę oceaniczną, "wbijając się" w sąsiadującą płytę, co prowadzi do skrócenia i pogrubienia mas skalnych na obu krawędziach płyt. Takie kolizje mogą dotyczyć krawędzi dwóch przeciwległych kontynentów lub kontynentu i łańcucha magmowego/wulkanicznego ("łuku"), który powstał na krawędzi górnej płyty w strefie subdukcji. Z tego względu

możemy mówić odpowiednio o "zderzeniu kontynent-kontynent" i "zderzeniu łuk-kontynent". Współczesnymi geologicznymi przykładami takich kolizji są, odpowiednio, Himalaje oraz położona na zachodnim Pacyfiku wyspa Tajwan. W takich przypadkach możemy przypuszczać, że obrzeżenie kontynentu docierające do strefy subdukcji zostanie wepchnięte pod skały przeciwległej płyty, podążając za litosferą oceaniczną do kanału subdukcyjnego (Fig. 1). Możemy postawić pytanie, jak daleko (a zwłaszcza, na jaką głębokość) dolna płyta jest w takich sytuacjach wciągana pod górną płytę na skutek pogrążania przed nią litosfery oceanicznej o wyższej gęstości. Oczywiście czynnikiem ograniczającym będzie względna gęstość skorupy kontynentalnej i płaszcz, do którego jest ona wciągana w kanale subdukcyjnym.

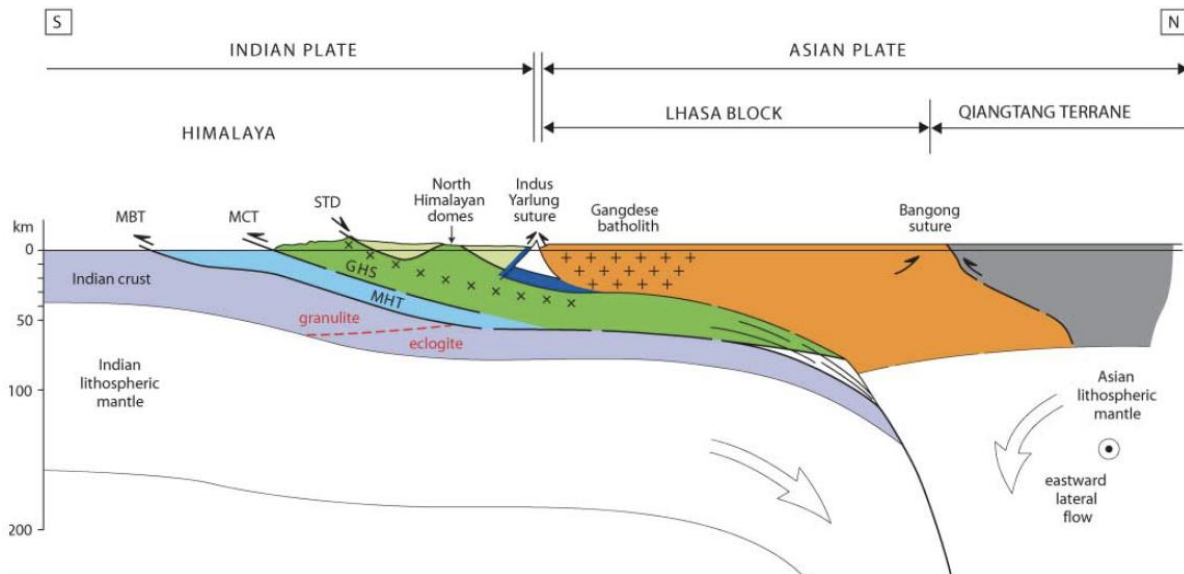


Figura 1 - Interpretacyjny przekrój przez centralne Himalaje w Nepalu i Tybecie ukazujący pełną strukturę litosferyczną i względne ruchy litosfery indyjskiej i azjatyckiej (Searle i in., 2011). Należy zauważyć, że starsza skorupa kontynentalna obrzeżenia płyty indyjskiej (kolor fioletowy) jest wprowadzana do płaszczu pod Tybetem i eklogityzowana w wyniku działania wysokiego ciśnienia, którym jest poddawana na tych głębokościach. Linia kolizji jest zaznaczona przez szew Indus-Yarlung (ciemnoniebieski i biały) oraz osady Tetydy (jasnozielony), wśród których odsłaniają się niewielkie relikty skorupy Oceanu Tetydy w postaci ofiolitów i związanych z nimi skał oceanicznych - jest to niewielka próbka skorupy utraconej głównie w wyniku subdukcji podczas zbiegania się dwóch płyt. Pokrywa osadowa płyty indyjskiej (Greater Himalayan Series - GHS - na ciemniejszym zielonym tle) jest ekstrudowana na południe między skorupą Indii a skałami płyty azjatyckiej i wylania się tam, gdzie powstają najwyższe góry, prezentując dowody na metamorfizm wysokotemperaturowy i częściowe przetopienie. Blok Lhasy w przedniej części krawędzi płyty azjatyckiej (pomarańczowy) zachowuje związany z subdukcją system wulkaniczny obrzeżenia kontynentu, którego powstanie poprzedza kolizję. Wszystkie te elementy mają swoje odpowiedniki w orogenezie kaledońskiej w Skandynawii, Grenlandii i na Wyspach Brytyjskich, jednak w przypadku tych ostatnich głębsze warstwy są odsłonięte na powierzchni w wyniku ekshumacji po orogenezie i dostępne dla bezpośrednich badań.

Dla petrologa i geodynamika zainteresowanego dolną skorupą kontynentalną w strefach kolizji ważne są cztery zagadnienia:

- W jaki sposób skały dostarczają informacji o sposobie przemieszczania się dolnej skorupy kontynentalnej i zmianach reżimu termicznego? Skały metamorficzne mogą wykazywać przemieszczenie pionowe, które wpływa na naprężenie litostatyczne (oś translacji "z"). Przemieszczenia poprzeczne mas skalnych względem siebie są również rejestrowane w strukturach i teksturach deformacyjnych, które są elementami tych samych skał metamorficznych, ale dostarczają informacji na temat poziomych ("x" i "y") składowych ruchu skał, co jest również interesujące dla geologa strukturalnego.
- W jaki sposób skały dostarczają informacji o reżimie termicznym stref subdukcji i orogenów, gdy napotykają cieplejsze wnętrza Ziemi? Rejestruje to, w jaki sposób ciepło jest przenoszone do subdukowanej skorupy z płaszczu, określa stopień przetopienia skorupy ziemskiej i wpływa na reologię i wytrzymałość skały.

- c) Jak zmiany w metamorficznych paragenezach mineralnych wpływają na właściwości petrofizyczne dolnej skorupy? Takie właściwości obejmują gęstość i wytrzymałość.
- d) Jaki przepływ materiału może zachodzić między skorupą dolnej płyty, a sąsiednimi masami skalnymi, które napotyka, na przykład nadległą skorupą kontynentalną górnej płyty lub płaszczem. Wymianie mogą ulegać zarówno stop, fluidy jak i masy skalne.

Wszystkie cztery aspekty są współzależne, być może z działaniem złożonych sprzężeń zwrotnych, które mogą prowadzić do nieoczekiwanych wyników, ale wszystkie mogą być wbudowane w modele dynamiczne (konceptualne, analogowe lub matematyczne). Możliwe jest też działanie innych czynników, które leżą poza polem działania petrologa zainteresowanego skałami krystalicznymi, takie jak ubytki materiału z systemu górskiego przez erozję na powierzchni Ziemi (zakres pracy geomorfologa) oraz zachowany zapis ubytku erozyjnego w sąsiednich basenach sedymentacyjnych (zakres pracy sedymentologa i petrologa osadowego). Wszystkie te aspekty były przedmiotem mojej pracy badawczej, czasami wszystkie w ramach tego samego indywidualnego zadania badawczego.

Kluczowym wskaźnikiem skał pograżanych na duże głębokości w strefach kolizji jest obecność skał typu eklogitów (Fig. 2). Ma on ten sam skład chemiczny co bazalt, najpowszechniejszy rodzaj skał tworzących skorupę ziemską, ale jego skład mineralny różni się od zwykłego bazaltu, ponieważ nie zawiera plagioklastu, zamiast którego dominują minerały o wysokim ciężarze właściwym, takie jak granat i piroksen bogaty w cząsteczkę jadeitową. Od początku XX w. przyjmuje się hipotezę, że takie skały powstawały w wyniku działania wysokich ciśnień statycznych (np. (Eskola, 1921; Gjelsvik, 1951) – w badaniach nad eklogitami w Norwegii). Zostało to potwierdzone w licznych badaniach doświadczalnych (m.in. Green i Ringwood, 1967) oraz powszechnym powiązaniu eklogitów z diamentami w ksenolitach z diatrem kimberlitowych, które są próbkami materiału płaszczca.

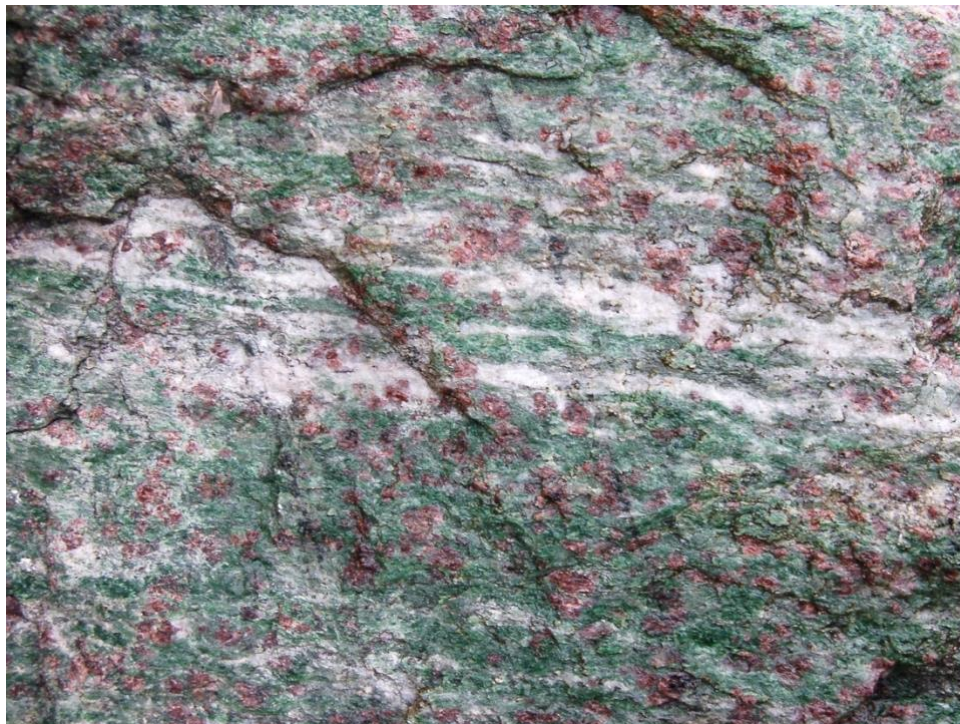


Figura 2 – Eklogit z Nordfjord w Norwegii. Składa się głównie z klinopiroksenu - omfacytu (zielony), granatu (czerwony) z niewielką ilością kwarcu, zoisytu, kyanitu i jasnej miki (białe smugi). Obecny jest również rutyl, ale nie jest on widoczny w skali zdjęcia. Ten przykład eklogitu powstał prawdopodobnie w wyniku wysokociśnieniowego metamorfizmu gabra. Pole widzenia około 30 cm. Zdjęcie wykonane przez wnioskodawcę.

Od końca lat sześćdziesiątych XX wieku metody określania ciśnienia i temperatury (P i T) formowania się skał, takich jak eklogit, rozwinęły się i stały się coraz bardziej wyrafinowane dzięki trzem kluczowym innowacjom technicznym:

- a) mikrosondzie elektronowej (EMPA) używanej do szczegółowej analizy chemicznej minerałów z rozdzielczością w skali mikrometrów, od niedawna wzbogacony o możliwość tworzenia ilościowych map chemicznych wnętrza ziaren minerałów o wysokiej rozdzielczości (Lanari i in., 2014).
- b) Opracowanie metod ilościowego wyznaczenia ciśnienia i temperatury (geotermobarometria) bazującej na chemii minerałów z wykorzystaniem termodynamiki równowagowej (Spear, 1993) oraz ze struktury atomowej inkluzji mineralnych (Enami i in., 2016).
- c) Opracowanie „wewnętrznie spójnych” baz danych termodynamicznych właściwości minerałów, stopów i substancji lotnych (np. Powell i Holland, 1985) wraz z metodami obliczeniowymi do modelowania stabilności paragenez mineralnych i konstruowania izochemicznych diagramów fazowych („pseudosekcje”) (tj. THERMOCALC (Powell i Holland, 1988; Holland i Powell, 2011; Perpl_X (Connolly, 2005) oraz Theriak-Domino (De Capitani i Petrakakis, 2010).

Połączenie tych technologii i metodologii pozwoliło na rekonstrukcję pionowego toru ruchu i związaną z nim ewolucję termiczną eklogitów, w których zachowały się mineralne relikty historii metamorficznej sprzed warunków facji eklogitowej (takie jak zonalność chemiczna granatów i związanych z nimi inkluzji stałych) i gdzie na drodze metamorfizmu retrogresywnego skała wytworzyła nowe zespoły minerałów, które rozwinęły się, gdy ulegała ona dekompresji w drodze na powierzchnię Ziemi (Fig. 1). Należy tu podkreślić eklogitę, ponieważ wysokociśnieniowy zespół minerałów zwykle najlepiej zachowuje się właśnie w takich skałach, przy czym te same metody są powszechnie używane dla skał ultramaficznych, w tym o pochodzeniu płaszczowym, jak również coraz częściej są stosowane do innych rodzajów skał, takich jak skały metaosadowe i kwaśne skały metamagmowe (ortognejsy). Ostatnie osiągnięcia metodologiczne umożliwiły modelowanie warunków, w których subdukowana skorupa w systemach górotwórczych ulega częściowemu topieniu (np. White i in., 2014).

Kluczowymi aspektami badań orogenezy są również chronologia ewolucji strukturalnej i metamorficznej oraz tempo deformacji i przemian metamorficznych. Rozwój czułej spektrometrii mas i coraz lepsza rozdzielczość przestrzenna w analizie izotopowej umożliwiają określenie wieku powstania skał metamorficznych. Eklogity okazały się przydatne do celów datowań radiometrycznych przy użyciu systemu izotopowego samar-neodym, ponieważ główne fazy mineralne eklogitu charakteryzują różne współczynniki podziału dla tych pierwiastków ziem rzadkich, umożliwiając analitycznie precyzyjne datowanie oparte na izochronie (Griffin i Brueckner, 1985). Datowania przy pomocy systemu izotopowego Sm-Nd oraz systemu Lu-Hf, który został opracowany później, wykorzystują stosunkowo wysokie temperatury zamknięcia tych systemów dla granatu i klinopiroksenu, więc dla eklogitów powstałych w reżimach termicznych strefy subdukcji (gdzie temperatury są stosunkowo niskie) uzyskane daty prawdopodobnie odpowiadają wiekom krystalizacji. Ponieważ fazy te są również wykorzystywane w termobarometrii, warunki ciśnienia i temperatury (P-T) można określić w tych samych głównych minerałach skałotwórczych, które są używane do datowania (Baxter i in., 2017). Dzięki temu możliwe stało się określenie głębokości tektonicznego pogrzebienia tych skał i czasu, w którym ono nastąpiło. Mniej więcej w tym samym czasie, gdy wykorzystanie wspomnianych systemów izotopowych stało się powszechne, rozwój metody datowania $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ przez stopniowe

ogrzewanie (Merrihue i Turner, 1966) umożliwił datowanie minerałów o niższych temperaturach zamknięcia (dla utraty Ar); od tej wiek dla retrogresywnej ścieżki p-T mogą określać również mika i amfibol (Dallmeyer i Gee, 1986), przy czym mika jest fengityczna i stanowi pierwotną fazę facji eklogitowej, a amfibol jest produktem retrogresywnego metamorfizmu eklogitu do amfibolitu podczas dekompresji i hydratacji. W założeniu miało to pozwolić na określenie wieku w określonych punktach na pionowej ścieżce ruchu zeklogityzowanych mas skalnych i powiązanie ich z ewolucją temperatury.

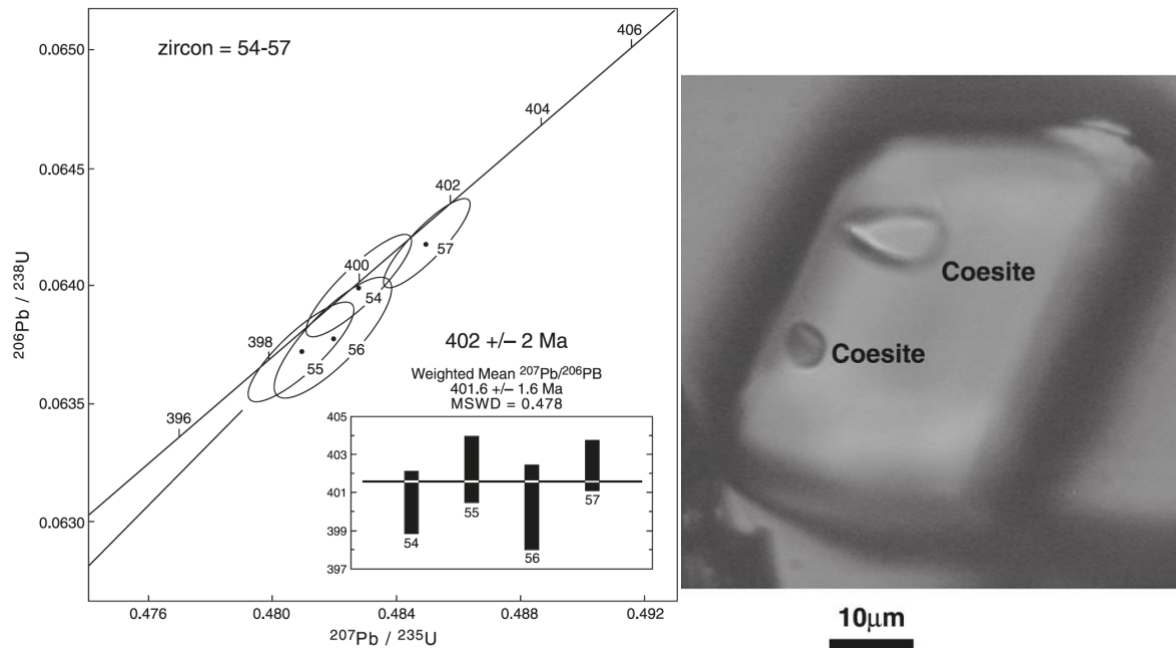


Figura 3 – Diagram konkordii wieków izotopowych (po lewej) dla systemów izotopowych U-Pb w metamorficznych cyrkonach z masywu eklogitowego w Western Gneiss Region w Norwegii (Carswell i in., 2002). Ten precyzyjny wiek został określony na podstawie analizy cyrkonów zawierających fazy metamorficzne charakterystyczne dla warunków bardzo wysokich ciśnień - coesyt (po prawej), omfacyt i granat. Jeśli więc przyjąć, że ziarna cyrkonu należały do tej samej paragenезы mineralnej co inkluzje i minerały matriks eklogitu, to uzyskana data określa czas wystąpienia metamorfizmu w warunkach facji eklogitowej. Dane te zostały szerzej omówione w pracy Carswell i in., (2003), - artykuł numer 4na stronie 2.

Te innowacje w geochronologii miały miejsce równolegle z rozwojem mikroanalizy systemu izotopowego U-Pb w cyrkonie, po pierwsze dzięki możliwości analizowania próbek o bardzo małej objętości, sięgającej rozmiaru ziarna lub podziarna metodą rozpuszczania i spektrometrii mas z jonizacją termiczną (TIMS) (Kamo i in., 2011). Po drugie, za pomocą technik próbkowania mikrowiązkowego, w szczególności spektrometrii mas jonów wtórnych (SIMS) (Schmitt i Vazquez, 2017) i spektrometrii mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej z mikropróbkowaniem za pomocą odparowania laserowego (LA-ICP-MS) (Zack i Kooijman, 2017). Cyrkon jest bardzo odporny na rozkład i przeobrażenia, dlatego ziarna często zachowują dwie lub więcej generacji wzrostu, często z "odziedziczonymi" jądrami magmowymi i obwódkami metamorficznymi. Zwiększona rozdzielczość przestrzenna, w połączeniu z obrazowaniem katodoluminescencyjnym lub ładunkowo-kontrastowym za pomocą mikroskopu elektronowego, pozwoliła na pobieranie próbek poszczególnych fragmentów minerału, co pozwala na uniknięcie mieszania się analiz z różnych grup wiekowych i objętości, w których mogła nastąpić utrata ołowiu promieniotwórczego. Niemniej jednak, cyrkon nie zawsze może być bezpośrednio powiązany ze składem głównych faz w skałach metamorficznych, więc określenie czasu różnych zdarzeń w ewolucji tych skał zależy od pośrednich metod, takich jak badanie obecności inkluzji mineralnych (Fig. 3) i zawartości pierwiastków śladowych (Zack i Kooijman, 2017). W przypadku tych ostatnich, metodami SIMS i LA-ICP-MS można

również analizować mikropróbki pierwiastków ziem rzadkich (REE) z rozdzielczością przestrzenną podobną do systemu izotopowego U-Pb. W eklogicie cyrkon, który wzrastał w obecności granatu i przy braku plagioklastu, powinien wykazywać charakterystyczne znormalizowane krzywe zawartości REE, które pozwalają na powiązanie objętości cyrkonu z główną paragenezą mineralną skały. W podobny sposób w eklogicie lub innych typach skał można wykorzystywać inne akcesoryczne minerały, takie jak monazyt, apatyt i rutyl (Zack i Kooijman, 2017). Takie podejście do bezpośredniego datowania epizodów metamorficznych, w ramach którego datowane minerały brały udział w znanych reakcjach metamorficznych (lub reakcjach minerał-stop), stało się znane jako petrochronologia.

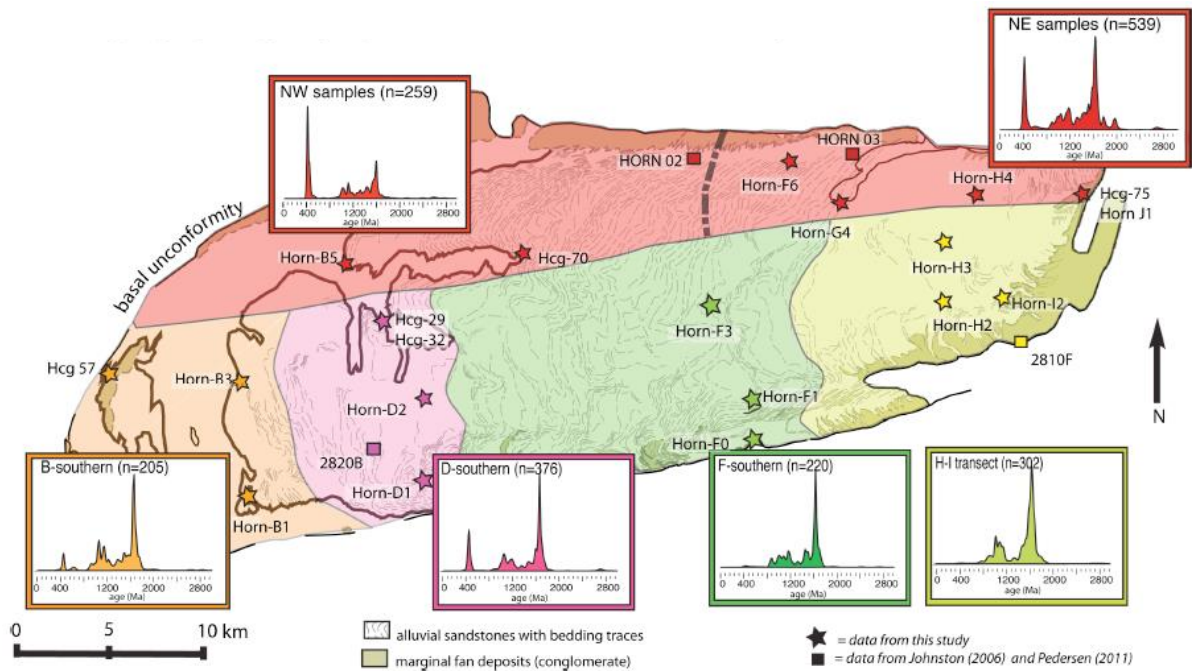


Figura 4 – Przykład zastosowania spektrów wieku cyrkonów detrytycznych w badaniach proveniencyjnych: Wykresy estymacji jądrowej gęstości (prawdopodobieństwa) wieku U-Pb cyrkonów detrytycznych w środkowodewońskich piaskowcach śródogórskich w basenie Hornelen, w zachodniej Norwegii, z Templeton (2015) (praca doktorska, w której wnioskodawca pełnił rolę). Przestrzenne zróżnicowanie próbek pod względem wielkości populacji wieku wczesnego syluru, które wywodzi się z późnokaledońskiego terranu ofiolitowo-lukowego, jest zgodne z wynikami wcześniejszych badań proveniencji opartych na klastach z konglomeratów, a prowadzonych przez Cuthbert (1991).

Minerały akcesoryczne wykorzystywane w petrochronologii, podobnie jak minerały pochodzące z aktywności magmowej, są odporne na wietrzenie i erozję, więc często utrzymują się w osadach jako detrytyczne minerały ciężkie. Tym samym stanowią one zapis procesu wypiętrzania pasm orogenicznych i ekshumacji wysokociśnieniowych skał metamorficznych. Dane te można uzupełnić badaniami chemicznymi powszechnych detrytycznych minerałów krzemianowych, takich jak miki i granat, których pochodzenie z wysokociśnieniowych skał metamorficznych może odzwierciedlać ich charakterystyczny skład chemiczny. Detrytyczne minerały akcesoryczne, zwłaszcza cyrkon, mogą ponadto dostarczać informacji o zerodowanych skałach magmowych, w tym o ich wieku, typach i źródłach magmy oraz środowisku tektonicznym. Cyrkon magmowy, ze względu na swoją niezwykłą odporność chemiczną i mechaniczną, często wytrzymuje postdepozycyjny metamorfizm, dlatego takie informacje można uzyskać zarówno ze skał metaosadowych, jak również z niezmetamorfizowanych skał osadowych. Badania spektrów wiekowych dużych populacji cyrkonów detrytycznych mogą pomóc w ustaleniu "odcisków palców" pradawnych osadowych obszarów źródłowych, co ułatwia identyfikację skorupowego pochodzenia terranów tektonostratygraficznych, z których powstały orogeny (Fig. 4).

Wnoszą istotny wkład w zrozumienie rozwoju skorupy ziemskiej, zwłaszcza w połączeniu z innymi cechami izotopowymi ziaren jak na przykład stosunkami izotopowymi O i Hf (Fig. 5) (Kemp i in., 2006).

Takie podejście do proveniencji skał odegrało znaczną rolę w moich badaniach nad procesami ekshumacji w trakcie orogenezy (Fig. 3), skorupowymi źródłami allochtonów oraz w trwających pracach nad wzrostem skorupy fanerozoicznej (nr rej. OSF OPUS 2021/41/ B/ST10/03679 zatwierdzony w grudniu 2021 r.).

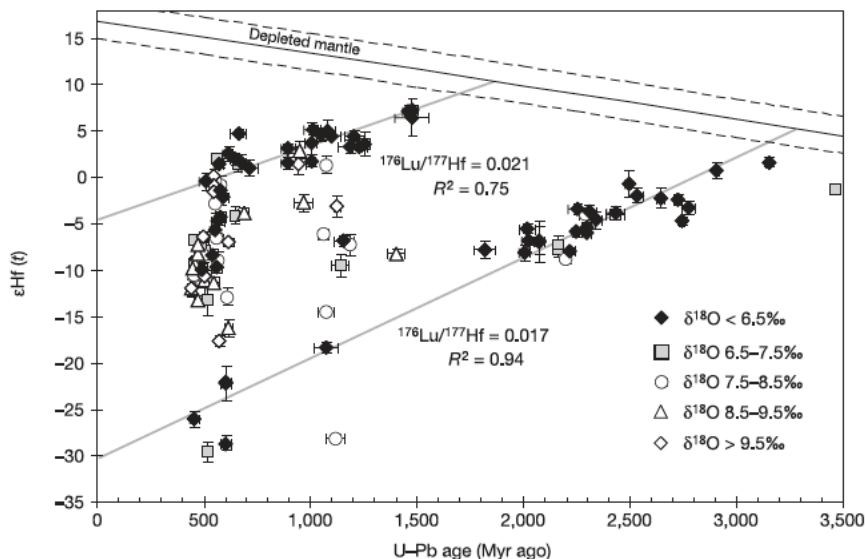


Figura 5 – przykład zastosowania połączonych izotopów Hf i izotopów tlenu w cyrkonach z Kemp i in., (2006). W tym przykładzie stosunki izotopowe są używane jako wskaźnik wzrostu skorupy ziemskiej na superkontynencie Gondwana; wieki pochodzą z analiz izotopowych U-Pb detrytycznych cyrkonu analizowanych przy użyciu SIMS, przy czym izotopy Hf i O są mierzone dla tych samych ziaren. Dwa liniowe układy o niskich znormalizowanych stosunkach izotopów O ($\delta^{18}O$) oznaczone czarnymi symbolami wskazują główne epizody magmowego wzrostu skorupy ziemskiej przez ekstrakcję magmy z płaszcza w okresie około 3,3 Ga i 1,9 Ga. Punkty między tymi układami wskazują na przeobrażanie pierwotnej skorupy przez przetapianie i metamorfizm, zwykle obejmują również interakcję z hydrosferą w procesach przypowierzchniowych, które dają wyższe wartości $\delta^{18}O$. Podejście to zostanie zastosowane w rozpoczynającym się, finansowanym przez OSF, projekcie badania rozwoju kontynentów w okresie fanerozoicznym, koncentrującym się na kompleksie płaszczowin Koli w Skandynawii, który otrzymali Walczak, Cuthbert i inni.

Od lat 80. ubiegłego wieku głównym przedmiotem moich badań są obszary zbudowane z gnejsów, w których występują eklogity i inne relikty metamorfizmu wysokociśnieniowego. Główny nacisk kładę na orogen kaledoński w Skandynawii (Fig. 8), gdzie Western Gneiss Region (WGR) stanowi dobrze zachowany i łatwo dostępny przykład olbrzymiego kontynentalnego kompleksu eklogitowego (Carswell i Cuthbert, 2003). WGR jest jednym z kilku takich obszarów na świecie, których wiek waha się od paleoproterozoiku do miocenu; inne ważne przykłady to orogen Dabie-Sulu we wschodnio-centralnych Chinach, Alpy Europejskie, Warycydy Europejskie i Masyw Białomorski w północno-zachodniej Rosji (Zhang i in., 2011). Stosunkowo niewielkie warstwy i soczewy eklogitów znajdują się na tych terenach w obrębie gnejsów felzytowych (Fig. 6). Eklogity stanowią zaledwie kilka procent powierzchni całego terenu. W gnejsach przeważają protolity magmowe ("ortognejsy"), ale dość często występują również protolity osadowe. Z tego względu tereny te są niewątpliwie masami skorupy kontynentalnej. Ważnym i charakterystycznym składnikiem tych gnejsowo-eklogitowych kompleksów jest występowanie granatonośnych skał ultramaficznych (piroksenitów i perydotytów), z których wiele (tzw. "perydotyty orogeniczne") bardzo przypomina pochodzące z płaszcza ksenolity znajdujące w skałach

wulkanicznych, przez co wnioskuje się, że takie ciała ultramaficzne w gnejsach goszczących powstały również w płaszczu (Reverdatto i in., 2008; Zhang, i in., 2011).

Pozornie paradoksalną cechą masywów gnejsowo-eklogitowych jest to, że paragenazy mineralne dominujących gnejsów są charakterystyczne głównie dla facji amfibolitowej i granulitowej, co sugeruje, że w nieodległym czasie wykształciły się one pod znacznie niższym ciśnieniem niż zamknięte w nich skały maficzne i ultramaficzne facji eklogitowej. Powszechnie przyjmowane założenie, że ciśnienia rejestrowane przez metamorficzne zespoły mineralne są litostatyczne, a zatem korelują się wyłącznie z głębokością nadkładu, prowadzi do wniosku, że te różnorodne skały przeszły metamorfizm na odmiennych głębokościach, mimo że obecnie są ze sobą ściśle powiązane. Co więcej, kontakty między eklogitami i gnejsami zostały stektonizowane, a pierwotne, przedtektoniczne relacje kontaktowe (np. intruzywne) nie są znane. Paradoks ten wywołał poważne kontrowersje w latach 70. i 80. ubiegłego wieku, koncentrujące się wokół WGR. Pełna historia tych kontrowersji została podsumowana przez (Brueckner, 2018); w tej pracy przedstawiono najważniejsze szczegóły, a niektóre kluczowe elementy zostaną omówione w odniesieniu do wybranych prac poniżej.

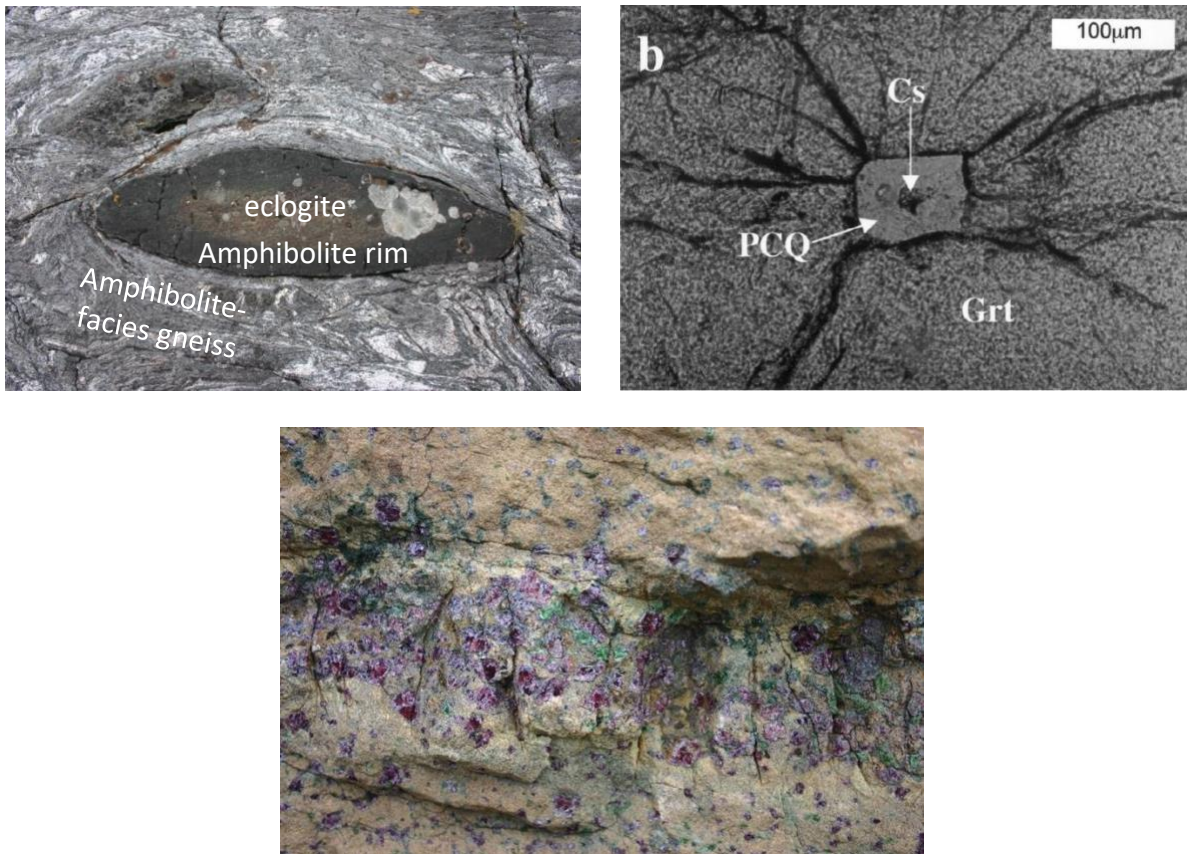


Figura 6 – Góra L: Typowy wygląd eklogitu w masywie gnejsowym jako soczewka zamknięta w ortognejsie; eklogit ma ciemną obwódkę zbudowaną z amfibolitu, gdzie eklogit przeszedł metamorfizm retrogresywny niższe ciśnieniowy i kofacyjny z sąsiadującym gnejsiem. Takie ciała eklogitowe często występują w rojach, prawdopodobnie z powodu tektonicznego rozzerwania maficznych dajek lub silli. Obszar zdjęcia ma szerokość około 2 m. U góry P: zdjęcie mikroskopowe inkluzji coesyty w granatach z eklogitu. Coesyt (CS) to mały relik, który przeszedł polimorficzną transformację do kwarcu o niższym ciężarze właściwym (PCQ), aby utworzyć szeroką, wypukłą krawędź na tle granatu - gospodarza. Należy zwrócić uwagę na radialne spękania, sugerujące wzrost objętości podczas transformacji coesyt-kwarc i rozzerwanie gospodarza. Źródło: Cuthbert i in. (2000). U dołu: perydotyt granatowy i websteryt granatowy typowy dla masywów ultramaficznych, pochodzący z płaszczu subkontynentalnego, odsłaniający się w masywie eklogitowo-gnejsowym. Zdjęcie autorstwa wnioskodawcy. Pole widzenia ma około 50 cm.

Kontrast facji, wraz z obecnością skał ultramaficznych o oczywistym pochodzeniu płaszczowym, doprowadził do hipotezy, że te, wraz z eklogitami, zostały wprowadzone do gnejsów jako ciała stałe w wyniku jakiegoś procesu tektonicznego, który przeniósł je z płaszczu w górę do skorupy kontynentalnej (hipoteza „egzotycznego płaszczu”).

Alternatywna hipoteza zakłada, że eklogity miały wspólną historię ze swoimi gnejsowymi gospodarzami przed ich pogrzebaniem i metamorfizmem facji eklogitowej podczas kolizji kontynentalnej; metamaficzne protolity eklogitów były intruzywnymi gabrami, bazaltowymi skałami wulkanicznymi lub skałami niskiego stopnia metamorfizmu z jakiegoś wcześniejszego cyklu orogenicznego, a obecne niskociśnieniowe paragenazy mineralne gnejsów były wynikiem selektywnego, retrogresywnego metamorfizmu podczas ekshumacji (hipoteza „skorupa in situ”). Paradoks pogłębił się, gdy w eklogitach z WGR odkryto coesyt (Smith, 1984). Coesyt to odmiana polimorficzna krzemionki o wysokim ciężarze właściwym, która jest stabilna przy ciśnieniu wyższym niż ciśnienie stabilności kwarcu, co odpowiada głębokości przekraczającej 100 km, typowej dla górnego płaszczu Ziemi.

Rozwiązanie tej kontrowersji wymagało znalezienia dowodów na wspólną ewolucję metamorficzną eklogitów i gnejsów oraz bezpośrednich dowodów na wysokociśnieniowy metamorfizm gnejsów felsyczynnych, lub jakiegoś przekonującego mechanizmu, dzięki któremu ciała stałe głębiej położonych skał o wysokiej gęstości, mogą być wprowadzane do wyżej położonych, skał o niskiej gęstości. Ostatecznie wszystkie te kwestie zostały rozwiązane w sposób wystarczający, by wykazać, że gdy obrzeżenie paleokontynentu Baltica uległo przejściowej subdukcji pod paleokontynent Laurentii, osiągając głębokości górnego płaszczu, cały WGR uległa metamorfizmowi typu eklogitowego, osiągając lokalnie warunki p-T w polu stabilności coesyty, a nawet diamentu, co udokumentowano w *Artykule 2 i 3*, (Carswell i Cuthbert, 1986; Carswell i Cuthbert, 2003). Ponieważ skorupa kontynentalna została umieszczona poniżej klina sublitosferycznego płaszczu Laurentii, skały ultramaficzne o wysokiej gęstości mogły być porywane w górną część płyty skorupy Baltiki, wspomagane przez ich negatywną wyporność (Brueckner, 1998), dając w ten sposób zadowalające wyjaśnienie dla pozornie szczególnego przypadku tektonicznego wprowadzenia ultramafitów pochodzących z płaszczu.

Ten zmodyfikowany model in-situ niesie ze sobą znaczące implikacje geologiczne i geofizyczne oraz nasuwa nowe pytania, które omówiłem w wymienionych powyżej publikacjach:

- Zastosowanie modelu in-situ do całej masy skorupy ziemskiej zawierającej eklogity, implikuje fakt, że bardzo duże masy skorupy kontynentalnej o pozytywnej wyporności zostały wprowadzone do płaszczu na głębokości przekraczające 100 km (w niektórych przypadkach na znacznie większą głębokość). Subdukcja skorupy kontynentalnej stanowi istotną modyfikację standardowego paradygmatu płyt tektonicznych. Potrzebny jest pewien mechanizm, aby przeciwdziałać wyporowi głównie felsycznej skorupy, aby umożliwić jej zagłębienie się w płaszcz o wyższej gęstości (2, 5, 7; Cuthbert i Carswell, 1982; Cuthbert i in., 1983; Cuthbert, 2019).
- W jaki sposób pogrzebanie masywów gnejsowo-eklogitowych wiąże się z ogólną ewolucją tektoniczną w orogenach? (2, 4, 5, 7; Cuthbert i in., 1981; Cuthbert i in., 1983; Carswell i Cuthbert, 1986).
- Biorąc pod uwagę ciągłą niepewność co do autochtonicznego pochodzenia wielu ciał eklogitowych, czy możliwe jest, że niektóre z nich (nawet jeśli można wykazać ich niskociśnieniowe pochodzenie) zostały faktycznie wprowadzone przez działanie tektoniczne; na przykład, czy niektóre mogą być zeklogityzowanymi ofiolitami, podobnymi do tych w Alpach europejskich? (Agard i Handy, 2021; Cuthbert i in., 1983; Cuthbert, 2021).

- Za pomocą jakiego mechanizmu (mechanizmów) takie głęboko pogrzebane masy skalne powracają na powierzchnię (tj. jak są ekshumowane)? (1, 4, 5; Cuthbert i in., 1983; Cuthbert, 1991).
- W jaki sposób metamorfizm wysokociśnieniowy wpływa na właściwości petrofizyczne subdukowanej skorupy kontynentalnej (np. gęstość, reologię) i jak to z kolei wpływa na mechaniczną ewolucję orogenów? Jak efektywne są przeobrażenia metamorficzne? (Cuthbert i Carswell, 1982; Cuthbert, 1995; (Cuthbert, 2019; Cuthbert i Włodek, 2021).
- Jakie są fizyczne i chemiczne interakcje między subdukowaną skorupą kontynentalną a płaszczem, do którego została wprowadzona? Czy ma to jakieś implikacje dla geochemii płaszczu? (7, 8; Cuthbert i in., 2010; Brueckner i in., 2010; Brueckner i Cuthbert, 2022).
- Czy perydotyty orogeniczne są źródłem danych o ewolucji płaszczu i stanowią uzupełnienie dla danych z ksenolitów? (2, 8; Brueckner i in., 2010; Brueckner i Cuthbert, 2022; Hughes i in., 2021).

Moje badania wniosły znaczący wkład we wszystkie te zagadnienia.

Oprócz poszerzenia znaczenia procesów zderzeń kontynentalnych i metamorfizmu wysokociśnieniowego, moje badania wniosły kluczowy wkład w zrozumienie skandynawskiego segmentu orogenu kaledońskiego. Następnie zostanie podany krótki przegląd tego orogenu w celu zdefiniowania kontekstu dla tej pracy. Szczegółowy opis został niedawno opublikowany w (Corfu i in., 2014)

Orogen kaledoński (Fig. 7) był kolizyjnym pasmem górskim, który powstał w wyniku zamknięcia paleoceanu Japetus, z tektoniką konwergentną działającą od późnego kambru do ostatecznego zderzenia paleokontynentu Laurentii z Baltica i fragmentami Gondwany w dewonie. Południowe ramię orogenu, pas Appalachów we wschodniej Ameryce Północnej, przez cały ten czas było głównie orogenum akrecyjnym. Niektóre fragmenty pasa kaledońskiego na Wyspach Brytyjskich należą do tego systemu, ale zostały oddzielone od Ameryki Północnej podczas kenozoicznego otwarcia Oceanu Atlantyckiego. Północny segment, zwany kaledonidami, leży wzdłuż przeciwległych regionów przybrzeżnych Skandynawii i Grenlandii, obejmując również północną Szkocję; reprezentuje on orogen kolizyjny w stylu himalajskim, ale zachowuje również relikty orogenów akrecyjnych sprzed kolizji z okolic i wewnątrz Japetusa. Elementy grenlandzkie i skandynawskie zostały połączone w jedno pasmo orogeniczne przed otwarciem Atlantyku. Trzecie ramię, orogen Tornqvista, rozciąga się od Szkocji i południowej Norwegii do Niemiec i Polski. Orogen kontynuuje się na obrzeżach współczesnego Oceanu Arktycznego na Svalbardzie, północnej Grenlandii i Kanadzie. Części skandynawskie i grenlandzkie składają się ze stosów daleko przetransportowanych płaszczowin, które zostały przeniesione przez kraton Laurentii i Fennoskandii podczas ostatecznego zderzenia tych kontynentów w późnym sylurze (orogeneza „skandynawska”).

Kaledonidy skandynawskie w Norwegii, Szwecji i północnej Finlandii zbudowane są ze stosu nasuniętych płaszczowin („allochtonów”) pochodzących od podstawy w górę od skorupy Fennoskandyjskiej i jej od pre- do synorogenicznej pokrywy osadowej, terranów pochodzących z Japetusa (ofiolity i systemy łukowe) i obrzeżenia Laurentii (Fig. 8). Te allochtony zostały przesunięte kilkaset kilometrów na wschód lub południowy wschód przez zachodnią część Bałtyku na głównej nieciągłości - głównym nasunięciu kaledońskim (MCT), powierzchni poślizgu wyznaczonej horyzontem łupków alunowych wieku tremadockiego.

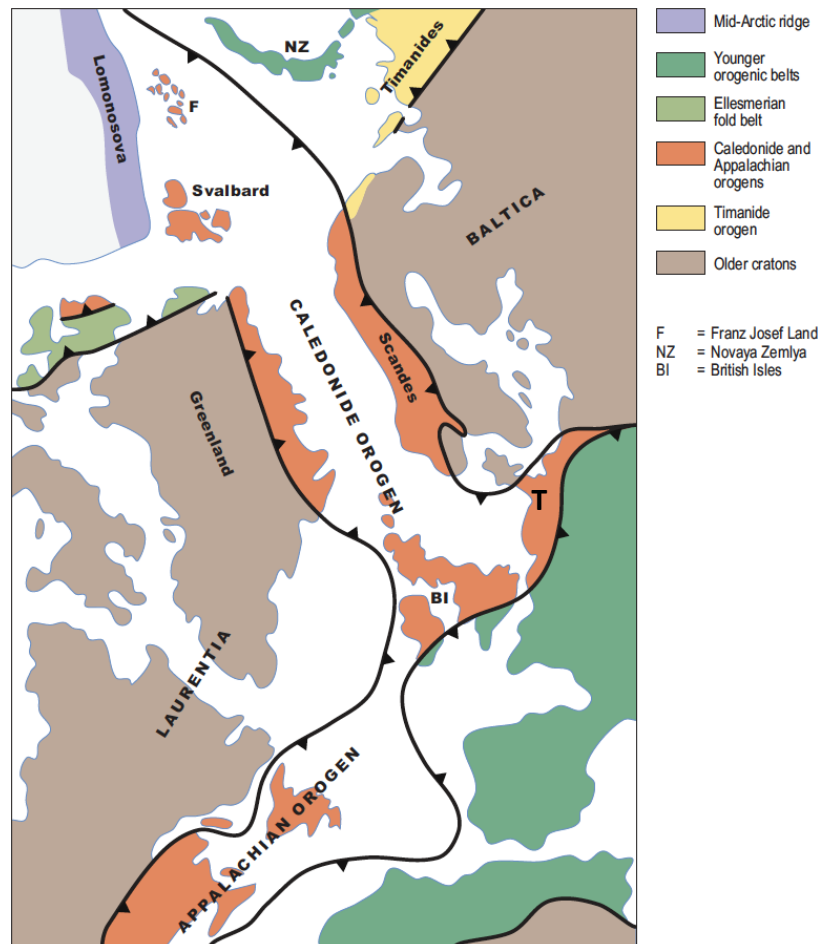


Figura 7 – System orogeniczny Kaledonidy - Appalacy – Tornqvist (T) przedstawiony przed otwarciem basenu Oceanu Atlantyckiego. Czarna pogrubiona linia ukazuje współczesny ślad po frontach deformacji górotwórczych. Źródło: (Gee i Stephens, 2020).

Przesunięcie to może być również postrzegane jako plastyczne płynięcie w kierunku zachodnim skorupy Baltici poniżej stosu płaszczowiny i obrzeżenia Laurentii, co jest użyteczną perspektywą, gdy rozważa się WGR (Western Gneiss Region) i inne masywy gnejsowo-eklogitowe. Orogen jest przerywany oknami tektonicznymi, w których tarcza Fennoskandyjska poniżej MCT pojawia się ponownie na powierzchni przez stos płaszczowiny w głębi pasa orogenicznego. Co najmniej trzy z tych okien odsłaniają masywy gnejsowo-eklogitowe, w których proterozoiczne skały podłoża zostały przeobrażone podczas intensywnego tektonizmu i metamorfizmu kaledońskiego, równoczesnego z transportem allochtonów skandynawskich. Największym oknem tektonicznym jest WGR, który od XIX wieku był przedmiotem badań skał metamorficznych facji eklogitowej, a obecnie jest głównym terenem mojej pracy. Od południowego wschodu do północnego zachodu przez WGR oddziaływanie skandyjskiej deformacji waha się od bardzo niskiego stopnia metamorfizmu i ograniczonego tektonizmu do metamorfizmu facji eklogitowej z coesytem i diamentem z szacunkowymi metamorficznymi ciśnieniami > 4 GPa i wszechobecną przebudową strukturalną. Kiedy po raz pierwszy rozpoznano ten gradient, przypisano go prekambryjskiemu epizodowi metamorficznemu w obrębie kratonu Fennoskandii (Krogh, 1977), ale najwcześniejsze datowanie eklogitów w latach 70. i 80. ujawniło, że sygnalizowały one kaledońskie przeobrażenie starych skał tarczowych (Krogh, i in., al., 1974; Griffin i Brueckner, 1985). Trend gradientu wskazuje, że ta ogromna masa skorupy kontynentalnej została pogrzebana (subdukowana) na coraz większe głębokości w kierunku północno-zachodnim, co jest zgodne z pogrążaniem jej poniżej krawędzi kontynentalnej Laurentii (jeśli przyjmie się hipotezę metamorfizmu eklogitów in situ). Gdy pod koniec lat 70-tych rozpocząłem pracę, powyższy scenariusz dopiero zaczynał się

kształtować. *Cuthbert i in.* (1983) była pierwszą próbą zintegrowania metamorfizmu w warunkach facji eklogitowej w WGR z ogólną ewolucją tektoniczną w kaledonidach skandynawskich.

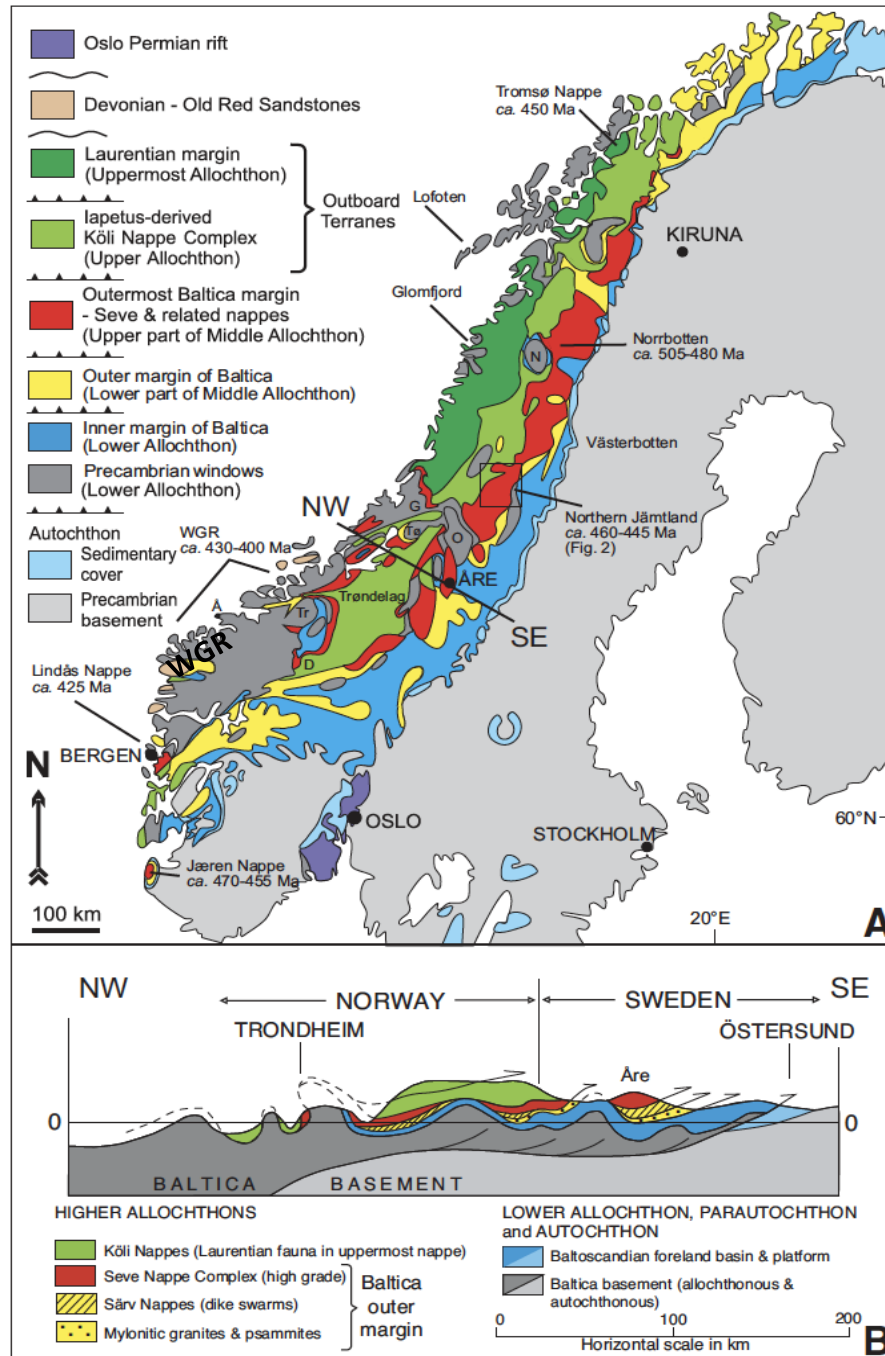


Figura 8 – Mapa tektonostratygryficzna i przekrój kaledonidów skandynawskich. Kolorowe jednostki oznaczają wyraźne zespoły nasuniętych płaszczowin. Ciemniejszy szary oznacza wschodnie tektonicznych okien podłoża krystalicznego, które odsłaniają się przez allochtony; „WGR” to Western Gneiss Region, gigantyczny maszyn eklogitowo-gnejsowy o ultrawysokociśnieniowym pochodzeniu, utworzony z Fennoskandzkiego (tj. prekambryjskiego) podłoża krystalicznego i jego pokrywy. Linia przekroju przecina lokalizacje dwóch głębokich otworów wiertniczych COSC w pobliżu Åre (Międzynarodowy Kontynentalny Program Wiertnictwa Naukowego) i związanych z nimi badań geofizycznych; wnioskodawca pracuje obecnie nad rdzeniami wiertniczymi wraz z zespołem COSC. Źródło: (Gee i in., 2012).

Ważną cechą kaledonidów skandynawskich jest obecność skał typu eklogitów na kilku poziomach tektonostratygryficznych w obrębie allochtonów, a także tendencja do starzenia się tych skał im wyżej znajdują się w stosie płaszczowin (Fig. 9). Cuthbert i Carswell (1990)

przypisali to postępującej akrecji nowych masywów gnejsowo-eklogitowych na obrzeżach Baltici.

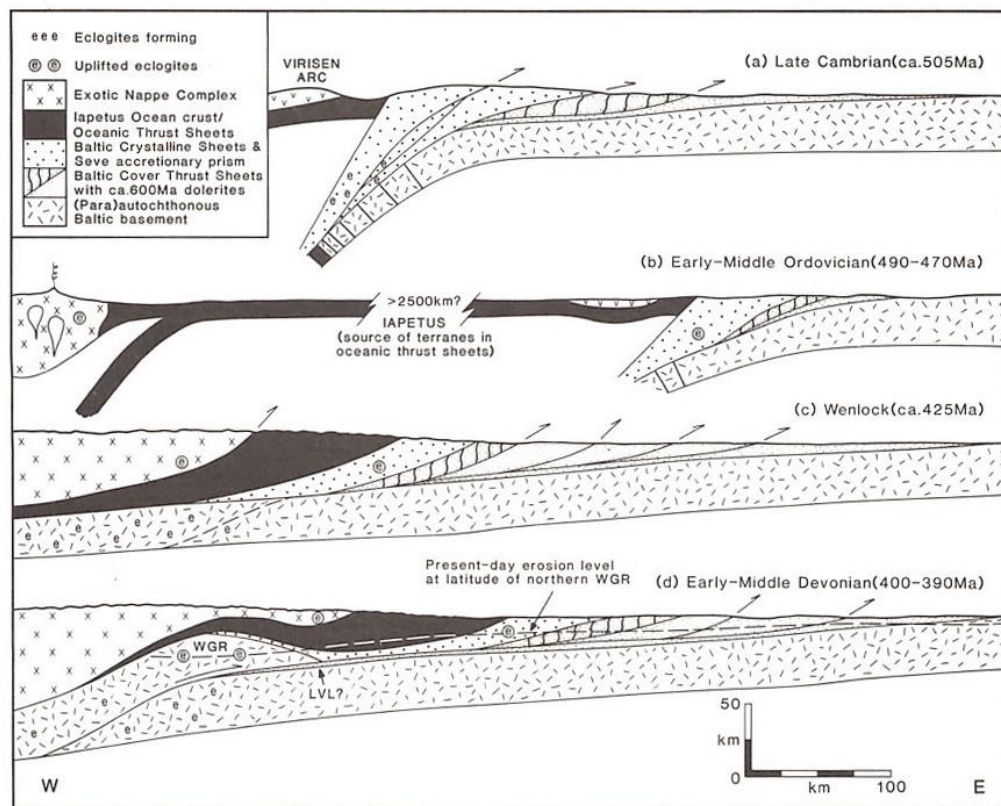


Figura 9 – Model geodynamiczny wyjaśniający liczne wysokociśnieniowe epizody metamorficzne w kaledonidach skandynawskich opracowany przez Cuthbert i Carswell (1991). Status „Łuku Virisen” i jego rola we wcześniejszych epizodach metamorfizmu ultra-wysokociśnieniowego jest przedmiotem ciągłych badań wnioskodawcy i ostatnich pomyslnie rozpatrzonych wniosków o dofinansowanie. Rozwój takich modeli (np. Brueckner, 2006) uwzględniał możliwość, że w obrębie płaszczowin istnieją dowody na wiele epizodów subdukcji i tworzenia eklogitów („dunks”).

Starsze eklogity w allochtonach powyżej WGR poprzedzały kulminacyjne zderzenie skandyjskie, więc przypisano je zderzeniom luko- i kontynentalnym powstałym w Japetusie z kontynentem. Te pre-skandyjskie epizody tektoniczno-metamorficzne były przedmiotem intensywnych badań w ciągu ostatnich kilku lat z kluczowym wkładem zespołu AGHi Uppsala University - Orogenic Dynamics Team, do którego dołączyłem w 2017 roku. Diamentonośne ultrawysokociśnieniowe skały metamorficzne o wieku przedskandyjskim zostały odkryte w Kompleksie Płaszczowin Seve, allochtonie pochodzącym z najbardziej wysuniętej części kontynentalnego obrzeżenia Baltici (Klonowska i in., 2017; Klonowska i in., 2021). Artykuł 7 odnosi się do tego tematu, argumentując, że skorupa kontynentalna subdukowana w zderzeniach luko- i kontynentalnych może podlegać dalszej subdukcji zgodnie z tzw. hipotezą „double dunk” (Brueckner i Van Roermund, 2004; Brueckner, 2006). Przyczyna tego wczesnego metamorfizmu ultra-wysokociśnieniowego (UHP) jest niepewna; podczas gdy kolizja skorupy Baltici z niezidentyfikowanym zewnętrznym terranem jest prawdopodobna, dokładne pochodzenie takiego terranu lub terranów oraz kontekst tektoniki płyt są niejasne. W ramach prowadzonych obecnie badań analizuje się możliwą rolę płaszczowin pochodzących z Japetusa w środkowej i północnej Szwecji (Kompleks

Płaszczowin Köli i Norwegii (Carter i in., 2021; Cuthbert, 2021) w świetle najnowszych koncepcji usystemów kolizji łuk-kontynent.

Obecna architektura tektoniczna orogenów, takich jak kaledonidy skandynawskie, jest wynikiem nie tylko tektoniki konwergentnej (nasunięcia), ale także tektoniki ekstensywnej, która funkcjonowała w późniejszych etapach orogenezy kolizyjnej (Fig. 10).

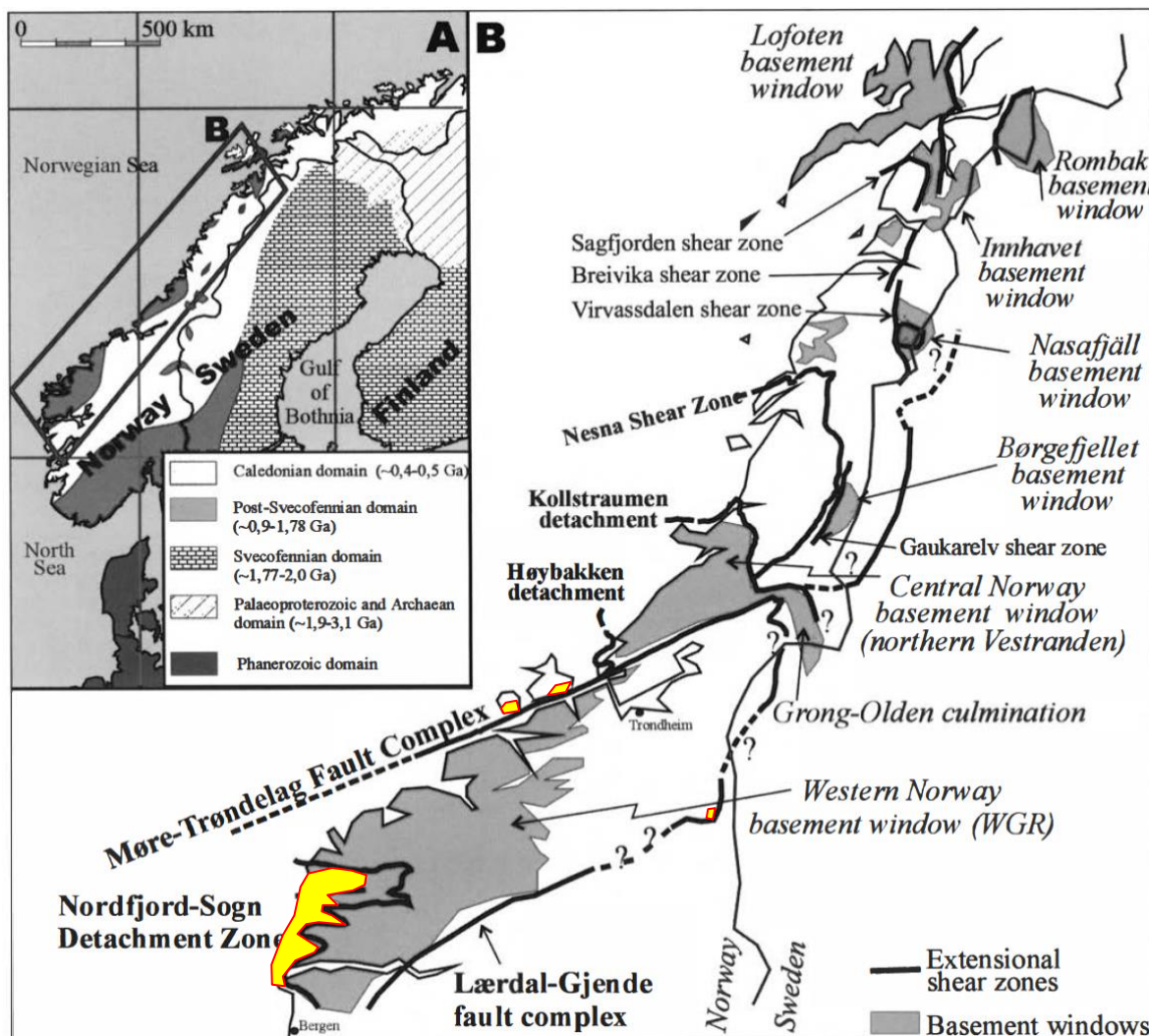


Figura 10 - Mapa strukturalna kaledonidów skandynawskich przedstawiająca główne strefy ścinania (grube czarne linie) i ich związku z głównymi systemami uskoki przesuwczych, takimi jak kompleks uskoki More-Trondelag (Braaten et al., 2002). „Strefa wydzielenia Nordfjord-Sogn” jest górną granicą strefy ścinania gigantycznego masywu eklogitowo-gnejsowego WGR, która akomodowała większość ekshumacji skał ultra-wysokociśnieniowych z głębokości >100 km. Rozległość struktur ekstensyjnych i wielkość przemieszczeń pokazuje, że obecna architektura tego orogenu jest w rzeczywistości zdominowana przez struktury ekstensyjne (o wergencji ku wnętrzu górotworu), które znacząco zmodyfikowały architekturę płaszczowin powstałą podczas kulminacyjnej, konwergentnej kolizji skandynawskiej. Żółte obszary podkreślają związane z nimi pokłady molasy typu „redbed” o wieku od późnego syluru do środkowego dewonu.

Górna graniczna strefa ścinania WGR zaznacza widoczną zmianę facji metamorficznych z nagłym wzrostem zarejestrowanych ciśnień metamorficznych, co sugeruje usunięcie bardzo dużego odcinka skorupy ziemskiej (np. (Norton, 1987; Norton i in., 1990)). Jest to bardzo duża powierzchnia odkłucia (tj. uskoki normalny o małym kącie nachylenia), będąca jedną z największych stref ścinania na świecie. Dowody na tektonikę ekstensyjną przybierają formę dużych uskoki normalnych i stref ścinania, często związanych z odwracaniem ruchu starszych nasunięć (Fossen, 2010). Ekstensja mogła dotyczyć całego pasa orogenicznego, np. gdy dywergencja płyt zastąpiła konwergencję z powodu efektów odległych naprężeniowych związanych z tektoniką płyt, lub mogła mieć miejsce podczas trwającej

konwergencji, gdy dochodzi do kolapsu górnych poziomów pasa orogenicznego nad pogrubionym i osłabionym termicznie korzeniem orogenu (Platt i Vissers, 1989; Wilks i Cuthbert, 1994)). W niektórych przypadkach wydłużenie może być jedynie pozorne, na przykład gdy plastyczna skorupa jest ekstrudowana jako płaszczowiny między klinem orogenicznym a dolną płytą, co nazywa się „przepływem kanałowym” (Grujic, 2006; Grimmer i in., 2015) w którym to przypadku górna strefa ścinania, ograniczająca ekstrudowany kompleks płaszczowin, ma normalny (tj. o wergencji w kierunku orogenu) kierunek ruchu. We wszystkich takich przypadkach normalne uskoki mogą otworzyć przestrzeń akomodacyjną dla zbiorników śródgórskich, które będą rejestrować historię erozji i ekshumacji orogenu. Tematów tych w odniesieniu do kaledonidów skandynawskich i ogólnie obowiązujących zasad dotyczą *Artykuły 2, 5 i 6*.

d) **Opis kariery zawodowej i osiągnięć.**

Poniższa narracja opiera się na ośmiu kluczowych publikacjach wymienionych powyżej, ale zaczyna się od opisu moich studiów doktoranckich, w których tematy w narracji zostały po raz pierwszy rozwinięte:

Moje badania doktoranckie w latach 1979-1983 były studiami masywu gnejsowo-eklogitowego, zachodniego – lub "bazalnego" – regionu gnejsowego w Norwegii. Kluczowe wyniki, udokumentowane w (Cuthbert, 1981; Cuthbert i in., 1983; Cuthbert, 1985) wykazały, że protolity eklogitów były grolami bazaltowymi wtargniętymi w skały granitowe i że te ostatnie zostały również przekształcone w eklogitowe facies mineralne zespoły. Wykazało to niezbicie, że cała masa gnejsowa tego bardzo dużego masywu skorupy kontynentalnej prawdopodobnie dzieliła warunki wysokiego ciśnienia zarejestrowane w eklogitach; wynika z tego, że ta ogromna masa wypornej skorupy została poddana tektonicznemu pochówkowi na głębokości płaszczu. To, w połączeniu z wcześniej ustalonym gradientem PT w poprzek WGR (Krogh, 1977) i nowymi danymi geochronologicznymi pokazującymi, że metamorfizm eklogitów miał miejsce od późnego syluru do wczesnego dewonu, stanowiło podstawę modelu tektonicznego, w którym skorupa Baltici została zepchnięta pod krawędź Laurentii podczas końcowych etapów orogenezy kaledońskiej. Ponadto, wykorzystano dostępne dowody geofizyczne, aby wykazać, że ten niezwykle rozległy masyw gnejsowo-eklogitowy ostatecznie został odsłonięty na powierzchni Ziemi, ponieważ szew kolizyjny został cofnięty w kierunku przedgórza jako nowa skorupowa płaszczowina, a WGR został przetransportowany nad skrzydłem zrzuconym. Problem sposobu usuwania nadkładu nad eklogitami (ekshumacji) rozwiązano, modelując ekshumację w oparciu o erozję, co stanowiło wczesne zastosowanie metody opracowanej przez (England i Richardson, 1977) i porównując wymaganą skalę czasową w celu dopasowania obliczonych ciśnień (głębokości) do danych dotyczących wieku izotopowego. Zadowolające dopasowanie można było uzyskać jedynie poprzez odwołanie się do pewnego typu tektoniki ("tektonika grawitacyjna"), co okazało się trafnym posunięciem, gdyż tektoniczne modele ekshumacji zdominowały badania w tej dziedzinie na następne dwie dekady.

Model tektoniczny opracowany podczas tych studiów doktoranckich (Fig. 11) (Cuthbert, i in., 1983) był, według mojej wiedzy, pierwszym, który wykazał, że masyw eklogitowo-gnejsowy może być odpowiednikiem terenowym dla podsuniętej skorupy kontynentalnej poniżej współczesnych orogenów kolizyjnych, takich jak Himalaje i Zagros, co zobrazowano metodami geofizycznymi. Był to jeden z najwcześniejszych modeli, który w pełni zintegrował eklogity z ewolucją skandynawskiego orogenu kaledońskiego. Koncepcja imbrakcji skorupy ziemskiej przeżywa swój renesans (Young, 2018). Nasz artykuł

poruszonowpływ metamorfizmu facji eklogitowej na właściwości petrofizyczne skorupy pod nasunięciem; obejmuje to znaczny wzrost gęstości skał felsytowych, które mogą zmniejszać wyporność skorupy ziemskiej (tzw. mechanizm „kotwicy eklogitowej” (Richardson i England, 1979). Dokonano również pewnych spekulacji jakościowych na temat ewolucji termicznej i ścieżki p-T skorupy w związku z bliskością leżącego u jej podstawpłaszcza. Chociaż nasze modelowanie ilościowe nie uwzględniało ewolucji termicznej, późniejsze badania (Medaris i Wang, 1986) wykorzystywały te same metody do określania szybkości erozji i izostatyki, awykazały, że przewidywane ścieżki p-T mogą w sposób uzasadniony odtwarzać zonalność chemiczną minerałów w skałach facji eklogitowej. Koncepcje przedstawione w tej pracy zostały rozwinięte w kolejnych publikacjach, uwzględniające starsze kaledońskie kompleksy eklogitowo-gnejsowe w wyższych allochtonach w Skandynawii (Cuthbert i Carswell, 1990) i uogólnione na inne orogeny w (Carswell i Cuthbert, 1986). Nasze badania poprzedziły odkrycie coesyty w skałach facji eklogitowej w WGR przez (Smith, 1984), które wykazały, że podsuwana skorupa musiała zostać umieszczona w płaszczu, a zatem podlegała formie subdukcji („subdukcja Ampferera” lub „subdukcja A”). Temat ten został ponownie poruszony w *Artykule 3*.

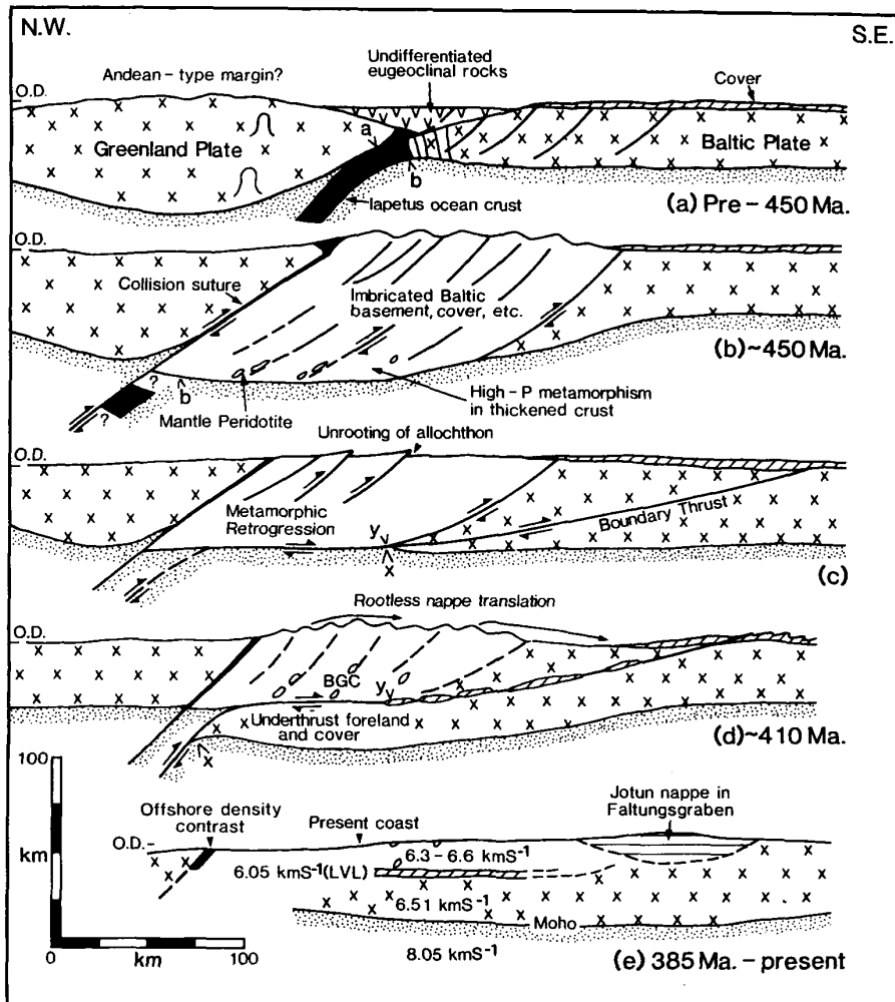


Figura 11 – Model tektoniczny przedstawiony w Cuthbert i in. (1983) w celu wyjaśnienia metamorfizmu facji eklogitowejj Western Gneiss Region kaledonidów norweskich. Model zakładał wysokociśnieniowy metamorfizm „in-situ” eklogitów, który obejmował również macierzyste felsytowe gnejsy i był wspierany przez izostaticzne modelowanie ekshumacji, zakładając zarówno erozję, jak i denudację tektoniczną. Model poprzedzał odkrycie coesyty, który wymaga głębszej subdukcji skorupy kontynentalnej, w głąb górnego płaszczu (przy założeniu, że ciśnienie wydedukowane termodynamicznie jest litostaticzne). Wciąż kilka cech modelu pozostaje istotnych dla nowszych scenariuszy tektonicznych.

Artykuł 1 był wynikiem badań przeprowadzonych podczas stypendium podoktorskiego UK Natural Environment Research Council na Uniwersytecie w Glasgow oraz w laboratoriach

geologii izotopowej Scottish Universities' Research and Reactor Center. Przez trzy poprzedzające to stypendium lata pracowałem jako geolog ds. poszukiwań i produkcji w firmie Britoil plc i miałem szczęście uczyć się od dwóch pionierów nowoczesnej tektoniki ekstensyjnej, Alan Gibbs i Alastair Beach (Gibbs, 1984; Beach i in., 1987), którzy następnie wykorzystywali swoje metody do opracowywania danych sejsmicznych z basenu Morza Północnego.

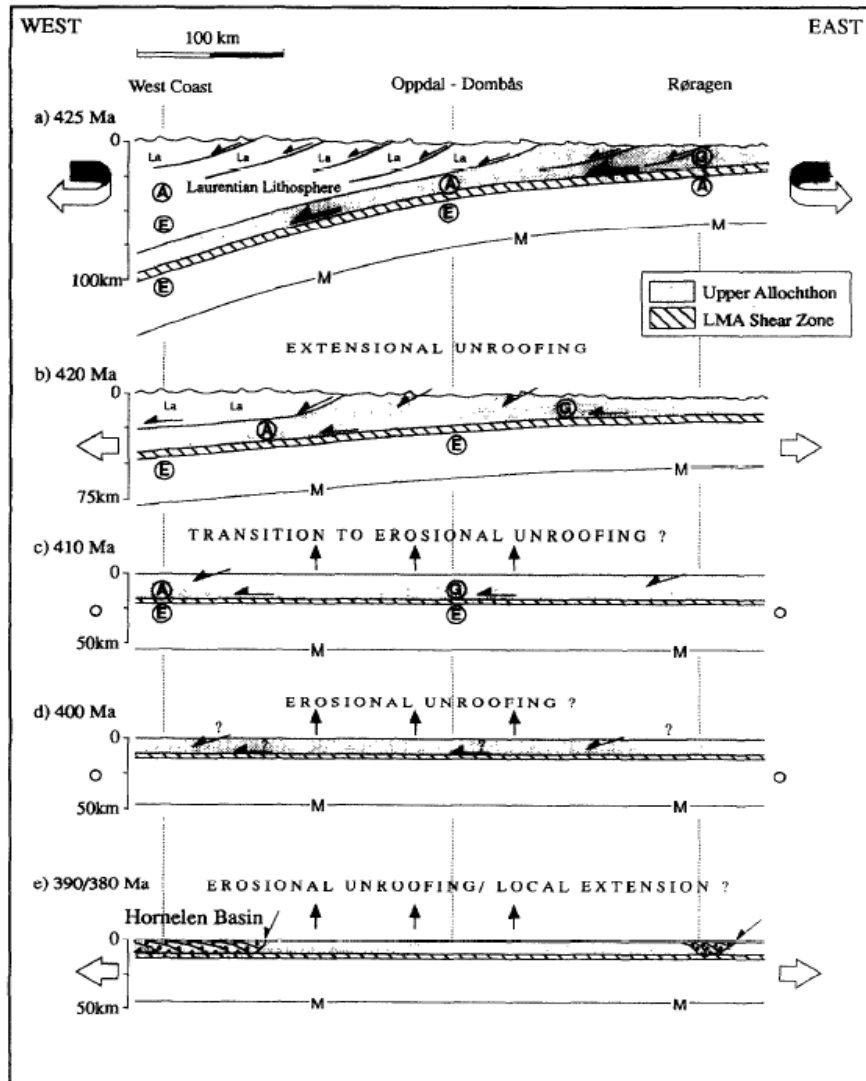


Figura 12 – Model Wilksa i Cuthberta (1994) dla ewolucji środkowo-dewońskich basenów typu "red-bed" w zachodniej Norwegii jako późnorożenicznych basenów "zapadliskowych" nad dużą powierzchnią odklucia (strefą ścinania) o niskim kącie nachylenia, który jednocześnie umożliwił rozczłonkowanie masywu eklogitowo-gnejsowego leżącego w jego podłożu. Scenariusz ten przypomina systemy kopuł metamorficznych Kordylierów w południowo-zachodniej części Stanów Zjednoczonych.

Modelowanie erozyjnej ekshumacji kompleksu gnejsowo-eklogitowego opracowane w (Cuthbert et al., 1983) wzbudziło pytania o zapis procesu odsłaniania, który może być odnotowany w późno-orogenicznych basenach sedymentacyjnych, takich jak dewońskie baseny piaskowca old-red w zachodniej Norwegii. Prace Hossack (1984) i Norton (1987) pokazały po raz pierwszy, że tektonika ekstensyjna była ważnym mechanizmem w późnych stadiach orogenicznych kaledonidów skandynawskich i może wyjaśniać niektóre przypadki ekshumacji wysokociśnieniowych skał metamorficznych, oraz że zwiększenie gęstości skorupy ziemskiej (jak sugerują eklogity) uczyniłoby taki proces prawdopodobnym. Rozszerzające się baseny powstałe na orogenach zawierałyby osadowy zapis erozyjnego wkładu w ekshumację i odzwierciedlałyby rozszerzającą się działalność tektoniczną podczas ekshumacji. W celu weryfikacji tego przypuszczenia przeprowadziłem szczegółowe badania

proweniencji osadów w basenie Hornelen, który leży powyżej kompleksu gnejsowo-eklogitowego WGR, w bliskim sąsiedztwie eklogitów UHP. Badania te połączyłem z petrologią metamorficzną i datowaniem wieku minerałów z klastów w zlepieńcachstożków napływowych (Cuthbert, 1991). Obliczenia termobarometryczne przeprowadzono przy użyciu funkcji średniego p-T w programie THERMOCALC (Powell i Holland, 1985). Podczas wizyty w laboratoriach geologii izotopowej na Uniwersytecie w Leeds przeprowadzono część datowań mik i amfiboli metodą K-Ar. Owocna współpraca z Mike Norton, Ken McClay i Bill Wilks z Royal Holloway & Bedford New College na University of London umożliwiła rozpoznanie późno-orogenicznej mylonitycznej strefy ścinania w rejonie Nordfjord, która miała do 4,5 km grubości i zwrot kierunku transportu przeciwny do MCT. Stanowiła ona część strefy odklucia Nordfjord-Sogn (NSDZ) (Norton, 1987).

Sukcesja rozwoju tekstur Norton i in. (1990) była identyczna z tą opisaną w metamorficznych kopułach Kordylierów w prowincji Basin & Range na południowym zachodzie USA (Lister i Davis, 1989), dlatego okno tektoniczne WGR zinterpretowano jako gigantyczną kopułę metamorficzną, poniżej ekstensyjnej powierzchni odklucia o niskim kącie nachylenia. Uważa się, że ekstremalna ekstensja bloku skrzydła wiszącego jest spowodowana "zapadaniem" się kaledońskiego stosu płaszczowin wywołanym wznoszeniem się pogrubionej warstwy skorupy ziemskiej, który składał się z kompleksu gnejsowo-eklogitowego WGR (Fig. 12). Moje badania klastów w konglomeratach (Cuthbert, 1991) wykazały, że osady klastyczne środkowego dewonu w basenie Hornelen wywodzą się wyłącznie z płaszczowin, a nie z leżących obecnie pod nimi skał WGR. Baseny dewońskie zostały wcięte uskoki normalnymi i poślizgowymi do wynurzającego się stosu płaszczowin, a zespoły klastów wywodziły się jedynie z płaszczowin – nie było populacji detrytycznych pochodzących z WGR. Po połączeniu danych strukturalnych i sedymentologicznych z przebiegiem zmian ciśnienie-temperatura-czas klastów, płaszczowin i WGR można było sformułować spójny model, w którym nadkład na UHP kompleksie gnejsowo-eklogitowym WGR został zdarty przez osunięcie się stosu płaszczowinowego, wzdłuż strefy ścinania w kierunku zachodnim, NSDZ, odwracając skandyjskie płaszczowinowanie w formie uskoku normalnego. Segmentacja bloku skrzydła wiszącego przez listryczne uskoki normalne otworzyła przestrzeń akomodacyjną dla osadów dewońskich, które wypełniły się detrytusem z płaszczowin (Fig. 12). Kiedy skały macierzyste w płaszczowinach schłodziły się do temperatur zamknięcia dyfuzyjnego Ar i Sr w mikach, WGR znajdował się jeszcze co najmniej 30 km głębiej i nie osiągnął on temperatury zamknięcia do czasu, lub nawet po rozpoczęciu, depozycji w basenie w środkowym dewonie (Wilks & Cuthbert, 1994).

Dane dotyczące klastów nie dały rozstrzygnięcia, kiedy i gdzie ostatecznie na powierzchni pojawiły się skały WGR, prawdopodobnie dlatego, że osady aluwialne, z których pobrano próbki nie miały dużych obszarów zlewni, z których osady uległy erozji. Jednak osiowy zespół piaszczysto-mułowcowy w centrum basenu Hornelen prawdopodobnie pochodził ze znacznie większej zlewni w głębi ładu orogenicznego. W późniejszym projekcie doktoranckim na Uniwersytecie Columbia w Nowym Jorku, przy którym pełniłem rolę zewnętrznego doradcy, skupiono się na tych piaskowcach i zastosowano badania izotopowe i geochemiczne detrytycznych cyrkonów (Fig. 4) i mik (Templeton, 2015). W ten sposób zidentyfikowano sygnał z WGR podczas późnej historii basenu Hornelen (tak jak jest on obecnie zachowany), a więc wydaje się, że skały zawierające eklogity przebiły się na powierzchnię gdzieś na wschodzie, podczas gdy płaszczowiny były nadal erodowane do basenu ze źródeł bliższych systemowi uskoku granicznych basenu. Szersza ewolucja NSDZ i innych basenów norweskiego dewonu oraz szersze znaczenie późnokaledońskiej tektoniki ekstensyjnej były przedmiotem licznych innych badań w latach 90. i 2000. (np. Andersen, 1998; Johnston i in., 2007; Fossen, 2010; Braathen i in., 2002) i syntetyzowane w

mechanistyczne modele łączące późnoorogeniczne ekstensyjne uskoki z odkłucia z ekshumacją WGR i szerszym obrazem tektoniki płyt w dwóch badaniach opisanych w *Artykułach 4 i 5*, poniżej.

Artykuł 2 był wynikiem wieloletniej współpracy z Tony Carswell z University of Sheffield w Wielkiej Brytanii i Erling Krogh-Ravną z University of Tromsø w Norwegii oraz studentką studiów doktoranckich Alice Wain z University of Oxford. Carswell, Krogh-Ravna i ja pobieraliśmy próbki skał facji eklogitowej na obszarze WGR w latach 90. podczas kilku kampanii terenowych finansowanych przez Carnegie Trust i British Council. Wain równolegle kończyła studia doktoranckie poświęcone badaniom skał UHP w rejonie Nordfjord, więc połączyliśmy wyniki naszych badań. Chcieliśmy poszerzyć bazę danych skał zawierających coesyty po odkryciu jego istnienia przez (Smith, 1984), sporządzić mapę ich rozmieszczenia w celu wyznaczenia obszarów występowania eklogitów HP (pole stabilności kwarcu) i UHP (pole stabilności coesyty), obliczyć warunki p-T dla eklogitów i skał ultramaficznych przy użyciu nowo dostępnych termobarometrów opracowanych przez Krogh-Ravnę i współpracowników (Krogh-Ravna & Terry, 2004) i lepiej określić przestrzenny rozkład warunków p-T eklogitów na obszarze WGR, pierwotnie rozpoznany przez (Krogh, 1977). Dodatkowo interesowały nas procesy transformacji zachodzące w poprzek strefy przejściowej HP-UHP, ponieważ zauważyliśmy, że w strefie przygranicznej, w rejonie Nordfjordu, wystąpiły charakterystyczne zmiany petrograficzne w eklogitach, takie jak zmiany chemicznej zonalności w granatach. Erling Krogh-Ravna z Uniwersytetu w Tromsø wykonał liczne analizy z użyciem mikrosondy elektronowej, które zostały wykorzystane w obliczeniach geotermobarometrycznych, oprócz tego wykorzystano również wcześniejsze analizy wykonane przez autorów. Nowe metody termobarometryczne pozwoliły po raz pierwszy na obliczenie bezwzględnych (a nie minimalnych) ciśnień w zwykłych eklogitach w kaledonidach, umożliwiając „zobrazowanie” gradientu ciśnienia (tj. głębokości) (Fig. 13). Kierowałem pracami nad syntezą i interpretacją tych wyników.

W tym czasie metamorfizm ultrawysokich ciśnień był już uważany za wystarczająco istotny, aby być przedmiotem Grupy Zadaniowej Międzynarodowego Programu Litosfery IUGS (*III-6 Ultra-high Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-type Orogenic Belts*), w którym byłem przedstawicielem Wielkiej Brytanii. Wczesne wyniki tych badań zostały opublikowane pod tym szyldem (Carswell i in., 1999; Carswell, i in., 2000) przed opublikowaniem pełnych wyników w Cuthbert, i in. (2000).

Odkryliśmy, że eklogity UHP zostały wyniesione na obszarze około 5000 km² w najbardziej wysuniętej na zachód części kompleksu zawierającego eklogity w WGR (około 25 000 km²). Warunki ciśnienia i temperatury dla eklogitów określały z grubsza liniowy gradient pola metamorficznego (Fig. 13) od SE do NW przez WGR $\sim 5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (odległość odpowiadająca głębokości podczas metamorfizmu przy założeniu ciśnienia litostatycznego). Odpowiadałoby to rozkładowi temperatury w pobliżu powierzchni subdukcji płyty kontynentalnej, chociaż ten schemat może być diachroniczny. Eklogity UHP (zdefiniowane na podstawie dowodów na obecność coesyty lub obliczonego P&T) mają zwykle granaty z niewielką lub płaską zonalnością chemiczną, podczas gdy w eklogitach HP zwykle występują granaty „progresywne” z inkluzjami mineralnymi niższych facji w ich jądrach. W strefie przejściowej między eklogitami HP i UHP, ciała eklogitów typu HP leżą blisko ciał typu UHP, a obliczone p i T znacznie się różniły, co sugeruje albo pewne tektoniczne zmelanzowanie, lub (jak preferowaliśmy) inny zakres zaawansowania reakcji i relaksacji dyfuzyjnej stref mineralnych podczas przechodzenia płytki przez fizyczne warunki tej przemiany. Ogólnie rzecz biorąc, to badanie eklogitów było pierwszym, które dostarczyło ilościowego „obrazu” formy i reżimu termicznego w bardzo dużej masie subdukowanej skorupy kontynentalnej. Ważną niepewnością dla tego spójnego obrazu był moment

metamorfizmu facji eklogitowej. Podczas gdy większość wieków metamorfizmu dla eklogitów w tym czasie była skandyjska (Griffin i Brueckner, 1985), niektóre z najwyższej ciśnieniowych skał leżało w jednostkach litotektonicznych, które przypominały wyższe jednostki w stosie płaszczowin (takie jak Kompleks Płaszczowin Seve), które już dostarczały starszych, ordowickich wieków dla eklogitów w obrębie głównych odsłoneń tego allochtonu w Szwecji (Mørk et al., 1988; Essex i in., 1997). Temat ten został dokładniej zbadany w *artykule 6*.

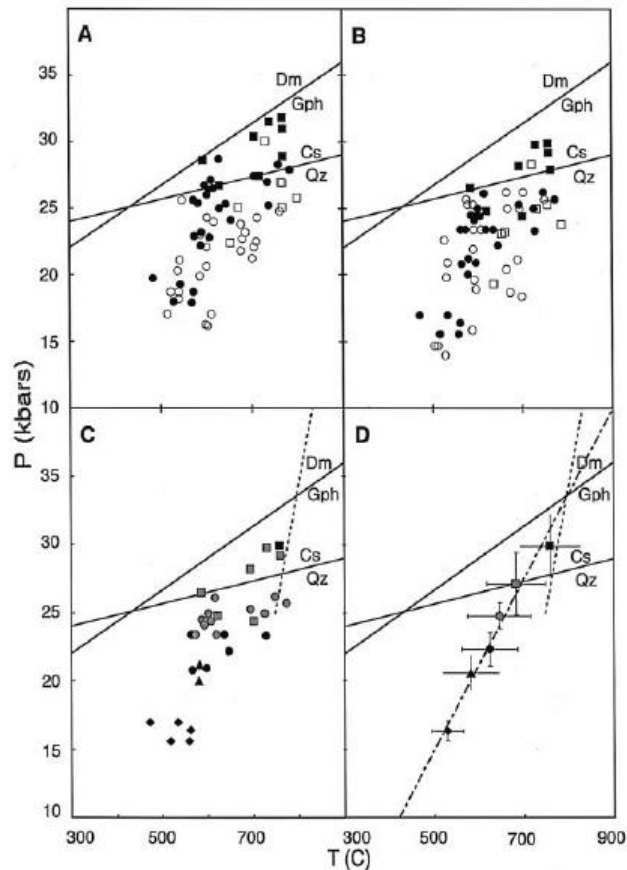


Figura 13 – Wykresy zależności ciśnienia (P) od temperatury (T) przedstawiające wyniki obliczeń termobarometrycznych dla eklogitów Kyanitowych + fengitowych z kompleksu eklogitowo-gnejsowego WGR, kaledonidy norweskie. Ciągłe ukośne linie to miejsca w przestrzeni P - T dla polimorficznych przejść od kwarcu (Qz) do koesytu (Cs) i grafitu (Gph) do diamentu (Dm). Panele A i B pokazują dwa różne sposoby łączenia kompozycji granatu i klinopiroksenu stosowanego w geobarometrze (symbole puste kontra pełne) oraz różne wybory modelu dla aktywności granatu. Czarne symbole na panelu B są najbardziej zgodne z obecnością koesytu obserwowanego w kilku próbkach i dają najmniejszy rozrzut punktów. Wykreślono je na panelu C według obszaru geograficznego, przechodząc od eklogitów glaukofanowych na południu (symbole rombów) do eklogitów koesytowych na północy (kwadraty) w całym badanym regionie. Krótka linia przerywana to izopleta geotermometru dla jednej próbki eklogitu, która nie zawierała fengitu, ale jest powiązana z gnejsami pelitycznymi, o których twierdzi się, że zawierają metamorficzny diament (minimum P jest określone przez przecięcie z krzywą $Gph + Dm$). Panel D pokazuje średnie p i T dla każdego regionu geograficznego w C ; linia kreska-kropka jest gradientem pola p - T , który prawdopodobnie daje rozkład temperatury wraz z głębokością wzdłuż subdukującej płyty kontynentalnej (choć zakres wartości prawdopodobnie nie jest w pełni zsynchronizowany).

Ostatnim aspektem tych badań był podobny przegląd skał ultramaficznych (perydotyty granatowe i piroksenity granatowe lub eklogity ortopiroksenowe (opx)). Wcześniej rozpoznano dwie klasy geochemiczne – perydotyty i eklogity opx pochodzące z intruzji maficzno-ultramaficznych, które rezydowały w skorupie Baltici na długo przed metamorfizmem („typ Fe-Ti”) oraz perydotyty i piroksenity pochodzące z subkontynentalnego płaszcza litosferycznego („typ Mg-Cr”). Perydotyty typu Fe-Ti i eklogity opx wykazały łądząco podobny zapis warunków p - T co zwykle eklogity, ale nbrak równowai dla reakcji typu "net-transfer" z udziałem glinu skomplikowała i zniekształciła ten szereg, a górna granica szacowań ciśnienia dała ekstremalne wartości prawie 5 GPa, znacznie wyższe niż w przypadku zwykłych eklogitów. Skały te są badane bardziej

szczegółowo, z naciskiem na ewolucję fluidów UHP i metasomatyzm, w *artykule 8*. Ultramafity płaszczą odsłaniają się prawie wyłącznie w domenie UHP i mają tendencję do lokalizacji wzdłuż granic podłoża krystalicznego i allochtonu, co jest zgodne z ich porywaniem przez skorupę, która została zasubdukowana do głębokości płaszczowych. Dały one również podobny szereg warunków p-T do eklogitów, ale pojawiły się pewne opublikowane dowody, że przynajmniej niektóre z ich UHP zespołów mineralnych utworzyły się podczas proterozoiku (Brueckner i in., 1996) i odnotowały starsze epizody związane z ogólną cyrkulacją płaszczą. Wstępnie wywnioskowano jednak, że skały te zostały porwane z różnych poziomów w płaszczu przez subdukującą skorupę WGR. Tematy te zostały szczegółowo zbadane w artykule (Brueckner i in., 2010), do którego wniosłem spostrzeżenia i interpretacje dotyczące kompleksu gnejsów otoczenia i eklogitów, oraz w Cuthbert (2009). Pierwszy z nich był jednym z kilku artykułów tej grupy, które potwierdziły proterozoiczne, a nawet archaiczne epizody petrogenetyczne dla ultramafitów Mg-Cr i zidentyfikowały dwa różne pasy tych skał w WGR, każdy z nich pochwycony z różnych głębokości płaszczą sublaurentyjskiego podczas skandyjskiej kolizji.

Artykuł 3 był kolejnym rezultatem kampanii terenowej w WGR, kontynuowanej w latach 2000-2003 z Tony Carswell i współpracownikami, w której kluczowe miejsca zidentyfikowane na podstawie poprzednich prac zostały skartowane, sprofilowane i opróbowane. Wyniki prac terenowych zostały opublikowane w przewodniku terenowym na Międzynarodową Konferencję Eklogitową, która odbyła się w Norwegii w 2003 r. (Carswell i in., 2003). Jedno z miejsc, w Saltaneset, w hrabstwie Sogn og Fjordane, odsłania spektakularny warstwowy eklogit coesytowy. Ten i niektóre pobliskie eklogity i gnejsy pelityczne okazały się mieć zachowaną zonalność chemiczną w granatach, więc można wywnioskować, że progresywna ścieżka subdukcji ciśnienie-temperatura przeszła od facji amfibolitowej przez eklogit kwarcowy do eklogitu coesyтового. Próbkę, które pobraliśmy z Saltaneset były datowane metodą Sm-Nd przez Hannesa Bruecknera z Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University i stały się przedmiotem tego artykułu w ramach multidyscyplinarnego badania, w którym dodaliśmy wymiar czasowy do szeregu warunków p-T przedstawionego w *artykule 2*. W tej pracy dokonano przeglądu dostępnych danych dotyczących wieku dla eklogitów WGR, w tym ponownie analizowanych cyrkonów z eklogitu Hareidlandet, z których uzyskano pierwszy kaledoński wiek dla eklogitu prawie 20 lat wcześniej (Krogh i in., 1974), co opisano w pracy towarzyszącej (Carswell i in., 2003). Analiza mikro-ramanowska inkluzji w tej populacji cyrkonu pozwoliła na zidentyfikowanie coesyty, a więc wiek reprezentował czas metamorfizmu UHP.

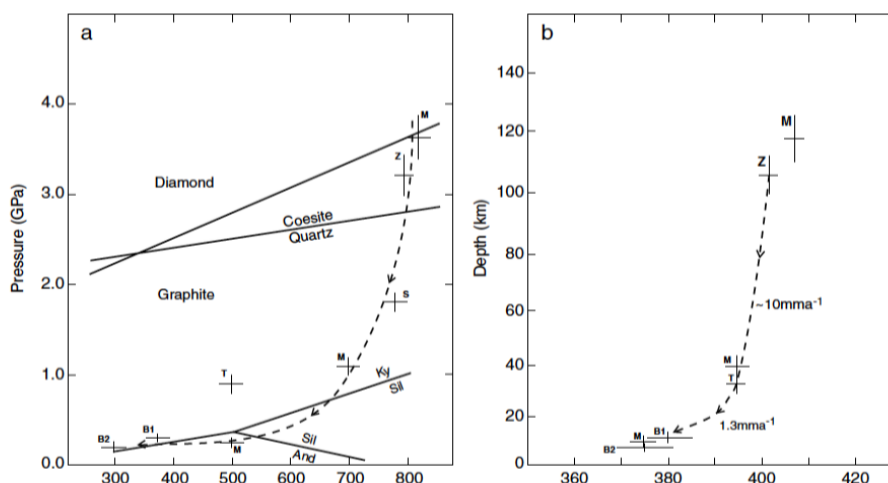


Figura 14 – Wykres ciśnienie-temperatura (a) i wykres głębokość-czas (b) dla eklogitów ultrawysokociśnieniowych w obszarach Nordfjord i Sørøyane w Western Gneiss Region z Carswell et al. (2003) podsumowujące oznaczenia p & T za pomocą konwencjonalnej termobarometrii mineralnej. Głębokość w (b) została wyznaczona przy założeniu, że obliczone ciśnienie jest litostatyczne, a czas wyznaczono na podstawie metod datowania radiometrycznego, dla których temperatury

zamknięcia były wystarczająco dobrze znane. Dzięki połączeniu tych technik możliwe było oszacowanie tempa ekshumacji dla wcześniej subdukowanego kompleksu eklogitowo-gnejsowego. 10 mm a^{-1} uznano za szybkie tempo, prawdopodobnie napędzane siłami wyporu ze względu na kontrast gęstości między płaszczem a bardzo dużą masą, głównie felsycznej skorupy, która została do niego wprowadzona. Zakłada się, że przeobrażenia metamorficzne w facji eklogitowej w skałach felsycznych, które zwiększyłyby ich gęstość, były nieefektywne, tak że większość subdukowanej skorupy zachowała znaczną część swojej pierwotnej wyporności.

W *artykule 3* przedstawiliśmy nowy wiek izochronowy Sm-Nd dla innego eklogitu WGR (Saltanaset), który był zbliżony do wieku cyrkonu z Hareidlandet i do wcześniej opublikowanych wieków studzenia z miki i tytanitu, sugerując bardzo szybką początkową ekshumację $\sim 10 \text{ mm a}^{-1}$. Wykazano to poprzez skonstruowanie synoptycznych krzywych ciśnienie-temperatura i temperatura-czas, które pozwoliły oszacować szybkość ekshumacji skał UHP (Fig. 14). To gwałtowne tempo wynoszenia było zgodne z obrazem tektonicznym ustalonym w *artykule 1*, gdzie siła wyporu bardzo dużej masy wcześniej zasubdukowanej skorupy kontynentalnej spowodowała ekshumację, akomodowaną przez tektoniczne „zapadnięcie się” górnej części pasa orogenicznego. Sugerowało to, że dominująca skorupa felsyczna nie przeszła bardzo wydajnej transformacji tworzącej zespoły mineralne o wysokim ciężarze właściwym charakterystyczne dla facji eklogitowej, które utrudniałyby jej transport ku górze; problem ten jest obecnie przedmiotem szczegółowego badania modelowego zwiększania gęstości felsycznej skorupy (np. Cuthbert, 2019). Nowsze badanie tych samych dwóch stanowisk badanych w *Artykule 3* (DesOrmeau i in., 2015) potwierdziło nasze wyniki i istnienie etapów UHP i HP w tej samej krótkiej skali czasowej. Co ciekawe, to samo badanie ujawniło populację cyrkonu o wieku ordowickim w eklogicie Hareidlandet. Jest to zgodne ze starszymi spekulacjami, że to bardzo duże ciało eklogitowe i jego metapelityczna otoczka są skorelowane z kompleksem płaszczowin Seve (najbardziej skrajna pasywna krawędź Baltici), który również rejestruje wydarzenia tektonowo-metamorficzne w ordowiku (omówione w *pracy 6* poniżej), jednak wieki te mogą datować protolit, co stanowi rzadki przykład metamorfizmu facji eklogitowej w skorupie maficznej powstały podczas kaledońskiego cyklu Wilsona, w przeciwieństwie do znacznie starszych, protolitów fennoskandyjskich. Wynika z tego możliwość że ciało z Hareidlandet i podobne duże eklogity w WGR są allochtoniczne i stanowią wyjątek od eklogitów „in situ” w gnejsach. Mogą reprezentować rodzaj ofiolitów podobny do tych w Alpach europejskich, które powstały w małych basenach oceanicznych przez ekstremalną ekstensję litosfery podczas przedorogenicznego ryftowania. Obecnie zgłębiam ten temat, który ma globalne znaczenie w ewolucji pasm orogenicznych (Cuthbert, 2021).

Artykuł 4 stanowi powrót do geodynamicznego znaczenia metamorfizmu facji eklogitowej i subdukcji litosfery kontynentalnej. W jego ramach współpracowałem z Hannesem Bruecknerem z Columbia University w Nowym Jorku, aby zbadać skutki ekshumacji bardzo dużego kontynentalnego kompleksu UHP w stosie płaszczowin („klina orogenicznego”) podczas kolizyjnego orogenu. Opracowaliśmy dedukcyjny model (Fig. 15), który opierał się na licznych badaniach strukturalnych aspektów ekstensji górotworu w południowej Norwegii (np. Cuthbert i in., 1983; Milnes i in., 1997; Andersen, 1998; Fossen, 2010). Główną tezą było to, że przybycie bardzo dużej masy skorupy kontynentalnej w górę z kanału subdukcyjnego rozrywa klin orogeniczny i przenosi jego oddzieloną przednią część biernie („piggy back”) ku przodowi, otwierając okno tektoniczne na zapleczu orogenu, w którym kompleks gnejsowo-eklogitowy byłby odsłonięty, jak w WGR (Fig. 15).

Rozciągnięcie klina prowadzące do pęknięcia spowodowałoby otwarcie basenów śródgórskich, takich jak baseny piaskowca old red w zachodniej Norwegii. Przedstawiono dwa scenariusze – „edukcję”, w której subdukowany brzeg kontynentalny jest całościowo wycofywany ze strefy subdukcji i po prostu odwraca swoją ścieżkę subdukcji lub oderwanie się dużych płyt w kanale subdukcji, które podnoszą się i nawarstwiają u ujścia kanału subdukcyjnego. Argumentowano, że oba miałyby podobny wpływ na klin orogeniczny.

Nowatorstwo tego modelu polegało na tym, że oferował alternatywne (lub dodatkowe) wyjaśnienie późniejszej orogenicznej translacji płaszczowin w kierunku przedpola, w której płaszczowiny są przenoszone biernie na dużej ekshumowanej masie, zamiast być wynikiem „zapadnięcia się” orogenu i aktywnego obocznego rozprężenia stosu płaszczowin. Argumentowaliśmy, że mechanizm ten może mieć ogólne zastosowanie w orogenach kolizyjnych.

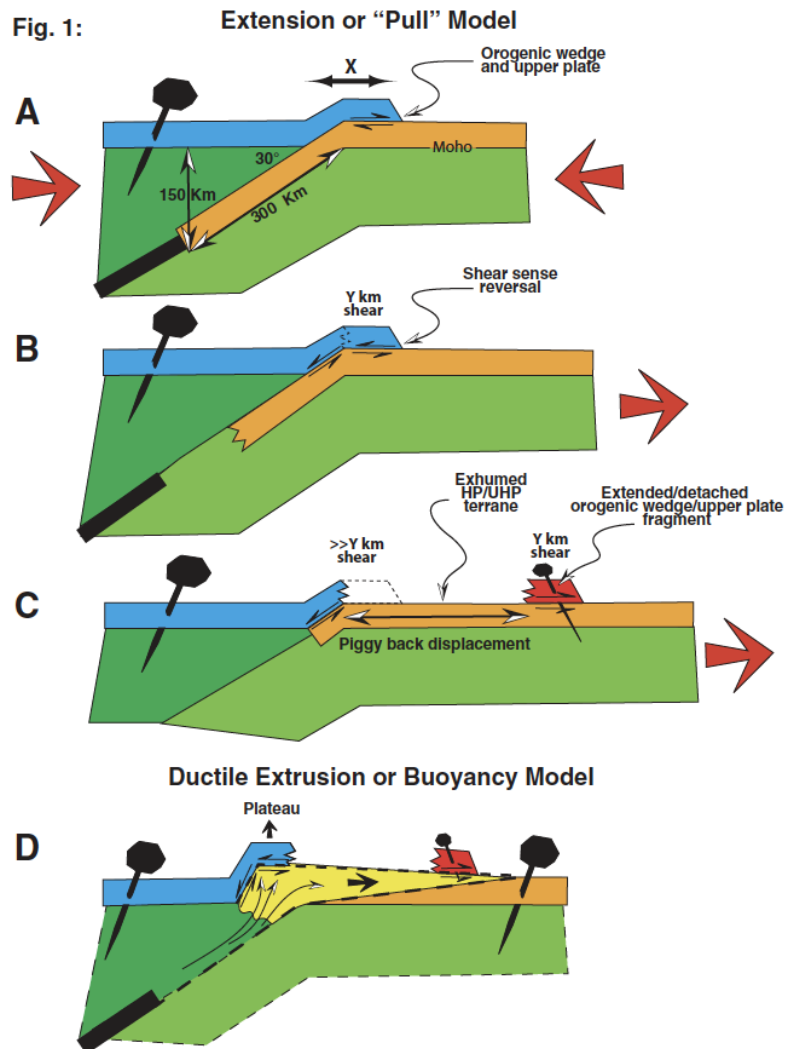


Figura 15 – Ogólny model wpływu ekshumacji dużej masy zasubdukowanej skorupy kontynentalnej na klin orogeniczny (Brueckner i Cuthbert, 2013), pokazany w przekrojach. Duża, wyporna masa poruszająca się w górę do ujścia kanału subdukcji rozciąga i odrywa podatny koniec klina orogenicznego i przenosi go biernie w kierunku przedpola. Pokazane są dwie wersje – A-C, w której poddana płyta kontynentalna „edukuje”, czyli po prostu odwraca swoją ścieżkę subdukcji, a cała płyta odwraca swój ruch; i D, w którym duży płat lub płaszczowina subdukowanego kontynentu odrywa się od swojej litosferycznej płyty i wznosi się w górę kanału pod wpływem własnej siły wyporu.

Artykuł 5 kontynuujemy temat modelowania tektonicznego i współpracę z Hannesem Bruecknerem. Połączyliśmy siły z grupą modelowania numerycznego Jeroana van Hunena na University of Durham w Wielkiej Brytanii. Modelowanie zostało wsparte grantem Europejskiej Rady ds. Badań Naukowych dla van Hunena. Doktorant Andrew Bottrill zajął się programowaniem i obliczeniami, aby pomóc nam zbadać geodynamikę orogenów kolizyjnych w skali orogenu, w których krawędzie kontynentów podlegają przejściowej subdukcji. Po raz kolejny nasze modelowanie opierało się na doświadczeniach ze skandynawskich kaledonidów, a ich podstawową zasadą było to, że model powinien być przetestowany i zweryfikowany z danymi strukturalnymi i metamorficznymi z badań

terenowych – to była moja rola. Była to wczesna próba stworzenia dynamicznego modelu 3D kolizyjnego orogenu i pierwsza zastosowana do kaledonidów.

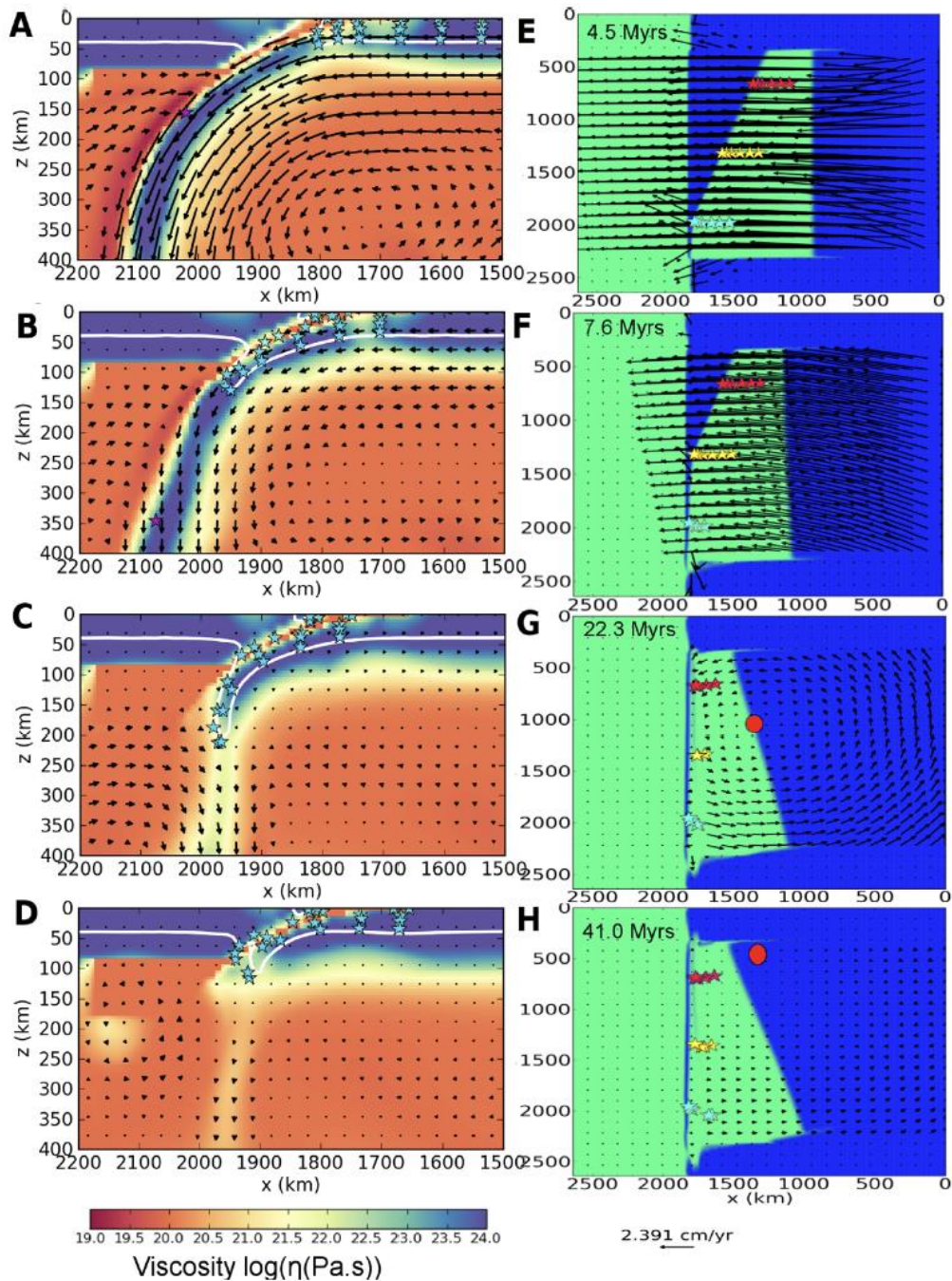


Figura 16 – Sekwencyjne przekroje (po lewej) i widoki mapy (po prawej) trójwymiarowego modelu numerycznego kolizji kontynentalnej (Bottrill et al., 2014). Kolory w sekcjach wskazują na lepkość (sztywność), która przedstawia litosferę głównie w kolorze niebieskim. Na mapach skorupa kontynentalna jest zielona, a oceaniczna w kolorze niebieskim. Kolorowe gwiazdy to znaczniki, które są reperami w odniesieniu do ich położenia na poruszającej się skorupie kontynentalnej. Strzałki pokazują wektory ruchu chwilowego o długości proporcjonalnej do prędkości. Poruszający się kontynent przesuwają się prostopadle do kontynentu nieruchomego, ale przybywa diachronicznie ze względu na swój kształt. Początkowo róg lub cypel oddziałuje na nieruchomy kontynent i jest subdukowany, ściągany przez połączoną z nim litosferę oceaniczną, która przed nim subdukowała. Jej opór na subdukcję wywołany siłą wyporu powoduje, że płyta zwalnia w narożniku, i jednocześnie powoduje obrót całej płyty. Po tym, jak płyta oceaniczna oderwie się, gwałtownie rozrywając się w kierunku północnym wzdłuż granicy ocean-kontynent, subdukowana skorupa kontynentalna jest edukowana i ponownie ulega rotacji. Model ten odtwarzał metamorficzne ścieżki ciśnienia i temperatury lepiej niż zderzenie ortogonalne z równoległymi krawędziami i generuje szereg ruchów względnych, które dawałyby podobne wzorce strukturalne do tych obserwowanych w kaledonidach południowej Skandynawii.

Porównano dwa scenariusze: pierwszy, w którym prostokątny kontynent zbliżył się i zderzył z innym kontynentem prostopadle i ze zderzającymi się krawędziami równoległymi do siebie; i drugi (Fig. 16), w którym kontynent w płycie subdukującej również zbliżył się prostopadle, ale jego krawędź natarcia jest ukośna w stosunku do drugiego kontynentu, tak że kolizja jest diachroniczna, a początkowy kontakt jest punktowy. Odkrycia były interesujące, ponieważ zderzenie diachroniczne, skośne powoduje głębszą subdukcję kontynentu, a więc lepiej odtwarza warunki UHP, ale tylko na jednym końcu orogenu (przypomina to formę kaledonidów skandynawskich z WGR na jednym końcu). Oba scenariusze pokazują oderwanie się płyty na styku litosfery kontynentalnej i oceanicznej, co prowadzi do działania przypominającego edukcję w dość przybliżonej skali modelu; subdukowane obrzeżenie kontynentu jest całkowicie wycofywane z kanału subdukcji ze względu na jego siłę wyporu, co popycha całą płytę do tyłu, odwracając polaryzację interakcji płyt. Jednak w modelu diachronicznym oderwanie rozpoczyna się we frontalnym narożniku po osiągnięciu głębokości UHP i szybko rozprzestrzenia się wzdłuż całego orogenu. Ponieważ oderwanie jest diachroniczne, a subdukujący narożnik ma większą siłę wyporu, powoduje to obrót w zderzającej się płycie, tak że basen oceanu zamyka się jak nożyce. Ma to wpływ na rozkład naprężeń w klinie orogenicznym i odtwarza niektóre strukturalne aspekty (skręcanie) ewolucji basenu dewońskiego w południowej Norwegii. Obrotowe zachowanie modelu jest częścią tytułu artykułu, ale był to nieoczekiwany i ważny wynik modelu, który może mieć zastosowanie w innych orogenach, takich jak Dabieshan w Chinach czy też waryscydy.

Artykuł 6 to początek mojej współpracy z Orogen Dynamics Team (ODT) AGH w Krakowie i Uniwersytetu w Uppsali pod kierownictwem Jarosława Majki. W uznaniu mojej rozległej wiedzy na temat masywów eklogitowych w skandynawskich kaledonidach zostałem zaproszony do współpracy, jako ekspert zewnętrzny w ramach finansowanego przez NCN projektu „CALSUB” (Subdukcja kaledońska wzdłuż krawędzi baltoskandyjskiej). Projekt ten odzwierciedlał odnowione zainteresowanie płaszczowinami kaledońskimi w środkowej i północnej Szwecji, częściowo katalizowane przez nowy projekt głębokich wierceń kontynentalnych, COSC-1, wraz z powiązаныmi profilowaniami geofizycznymi, które objęły region frontu kaledonidów i leżące poniżej fennoskandyjskie podłoże krystaliczne (Gee et al. al., 2010). ODT skupił się na ogromnym kompleksie płaszczowin Seve (SNC) (Fig. 8), w którym odkryto UHP skały metamorficzne z diamentem, które były starsze niż skandyjskie eklogity w WGR i powstały we wcześniejszym cyklu orogenicznym kaledońskim, prawdopodobnie w wyniku zderzenia kontynentu z łukiem wysp (Mørk i in., 1988; Majka i in., 2014). Skały te zostały porównane z Kompleksem Krystalicznym Wysokich Himalajów, uważanym przez niektórych za ekshumowane w procesie podatnej ekstruzji („przepływu kanałowego”), ale ewidentnie okupowały znacznie głębsze poziomy orogenu niż skały himalajskie i przez to oferują wgląd w korzeń orogeniczny współczesnych Himalajów. To globalne znaczenie zostało docenione przez przyznanie środków z Międzynarodowego Kontynentalnego Programu Wierceń Naukowych (ICS DP) na wykonanie dwóch głębokich otworów wiertniczych (COSC-1 i 2) w pobliżu Åre w Szwecji (Lorenz i in., 2015). Kompleks płaszczowin Seve rozciąga się w środkowej i południowo-zachodniej Norwegii i jest również inkorporowany do WGR, gdzie jest znany lokalnie jako Blåhø Nappe. Jednostka ta zawiera mikrodiamenty (Dobrzhinetskaya i in., 1995) w gnejście pelitycznym na wyspie Fjørtoft i wykazuje inne dowody na metamorfizm UHP w pobliżu, w rejonie Nordøyane (Terry i in., 2000). Metamorfizm facji eklogitów diamentowych przypisywano konwencjonalnie epizodowi skandyjskiemu, ale ponieważ możliwa jest również analogia z SNC w Szwecji gdzie UHP metamorfizm jest wcześniejszego wieku, wyzwaniem staje się rozróżnienie dwóch zdarzeń UHP w tej części WGR.

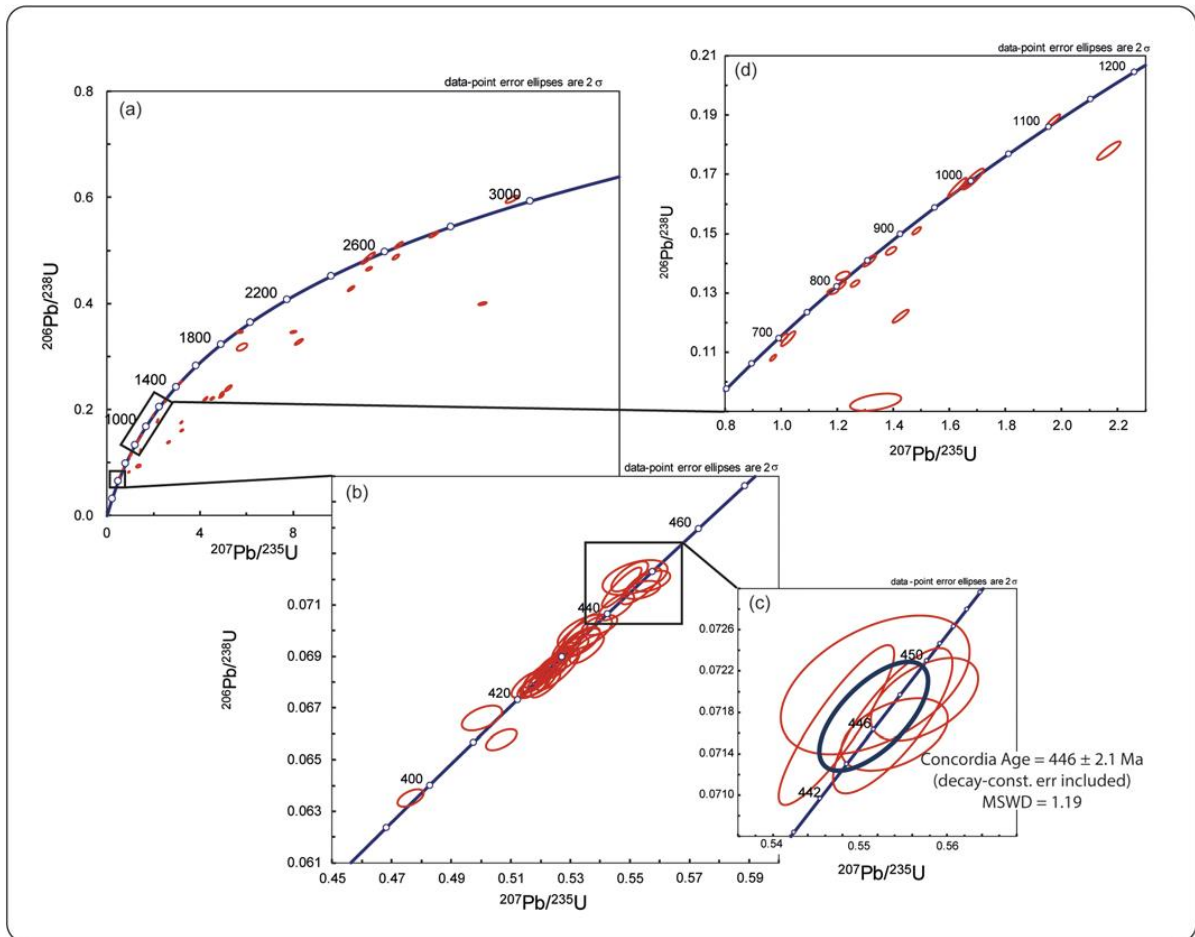


Figura 17 – Diagram konkordii izotopów wieków izotopowych U-Pb dla cyrkonu w płaszczowinie Blahø (=Seve?) w północnej części Western Gneiss Region z (Walczak i in., 2019). Grupa wieków od ordowiku do wczesnego dewonu została uznana za odpowiadającą dwóm epizodom wysokociśnieniowego metamorfizmu, w tym co najmniej jeden miał miejsce w warunkach ultrawysokiego ciśnienia (subdukcji) i zgodny z modelem „double dunk”. Grupa wieków około 446 Ma poprzedza ostateczną kolizję skandyjską, która wpłynęła na znaczną część WGR i prawdopodobnie wynika z kolizji Baltici z egzotycznym (lukowym?) terymem na paleoceanie Japetus.

W 2010 roku wraz z kolegą Hermann Van Roermund przeprowadziłem szczegółowe badania analityczne monacytu w gnejsie pelitycznym Fjørtoft w celu datowania metodą U-Th-Pb całkowity na uniwersytecie w Utrechcie w Holandii. Uzyskaliśmy spektrum wiekowe odpowiadające epizodowi skandyjskiemu, ale także wieków wczesno- i późnoordowickich, wskazujące na jeden lub więcej przedskandyjskich epizodów metamorficznych wysokiego stopnia, podobnych wiekiem do tych w szwedzkim SNC (Cuthbert i Van Roermund, 2011). To zachęciło nas do dalszego badania spektrum wiekowego tej kluczowej lokalizacji i łut szczęścia pozwolił nam uzyskać separaty cyrkonowy tej samej próbki, w której mikrodiament został odkryty w Fjørtoft przez separację termochemiczną (Dobrzhinetskaya i in., 1995).

Badania metodą spektrometrii masowej sprzężonej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie i mikropróbkowaniem przy pomocy ablacji laserowej przeprowadzone w laboratorium NORDSIM Muzeum Historii Naturalnej w Sztokholmie dały podobne spektrum wiekowe (Fig. 17) do przedstawionego w artykule o geochronologii monacytu, wskazując na epizody metamorficzne i/lub częściowe przetopienie zarówno podczas zderzenia skandyjskiego, jak i podczas wcześniejszych wydarzeń ordowickich, podobnie do etapów metamorficznych zapisanych w SNC w Szwecji. Bezpośrednie powiązanie uzyskanych wieków z formowaniem się diamentów nie było możliwe, ale wykazano, że ta allochtoniczna jednostka w WGR miała złożoną, polimetamorficzną ewolucję, prawdopodobnie obejmującą dwa epizody subdukcji kontynentalnej, jak postulowano w tak zwanej hipotezie „double dunk” (Brueckner i Van Roermund, 2004). Ciekawym, dodatkowym wynikiem tych badań

był zestaw wczesnosylurskich wieków cyrkonu, które zbiegają się czasowo z epokami intensywnego ryftowania i magmatyzmu znanego z leżących powyżej oceanicznych terranów w kaledonidach skandynawskich, co paradoksalnie miało miejsce podczas ostatniego etapu zamykania się Japetusa, podobnie jak kolizja z Laurentią (Slagstad & Kirkland, 2017). Wzmacnia to możliwość powiązań między metamorfizmem HP/UHP w SNC, a zewnętrznym łukiem i terranami ofiolitowymi kaledońskiego górnego allochtonu w Norwegii i Szwecji (patrz Cuthbert & Carswell, 1990) i zachęciło nas do zbadania ewolucji oceanicznego Kompleksu Płaszczowin Köli w Szwecji. W tym celu zaangażowaliśmy doktorantkę Isabel Carter, stypendystkę- absolwentkę AGH. Bada ona ewolucję metamorficzną Kompleksu Płaszczowin Köli i stosuje innowacyjne petrochronologiczne techniki izotopowe weryfikując roboczą hipotezę, że te egzotyczne płaszczowiny reprezentują orogen akrecyjny, który został stworzony podczas fazy zamknięcia Japetusa w cyklu Wilsona. Niedawno pozyskaliśmy środki z Narodowego Centrum Nauki na badania terenowe i laboratoryjne, aby realizować ten pomysł w kaledonidach arktycznych północnej Szwecji.

Artykuł 7 był wybiegającym w przyszłość artykułem przeglądowym, który zajmował się aspektami ewolucji termicznej subdukowanej skorupy kontynentalnej w strefach kolizji i podkreślającym wpływ mechanizmu pęknięcia płyty zidentyfikowanego w *artykule 5* i innych numerycznych modelach tektonicznych, m.in. (Duretz i in., 2012). Praca powstała we współpracy z prof. Shahem Wali Faryadem z Uniwersytetu Karola w Pradze, po zaproszeniu mnie do wygłoszenia tam w 2015 roku prezentacji na temat kaledonidów skandynawskich. Temat ten został oparty na odkryciach Faryada dotyczących kontynentalnych kompleksów skał UHP w waryscydach Europy Środkowej (Faryad i in., 2016), w których zidentyfikowano anomalnie gorący reżim termiczny – „impuls” termiczny – podczas dekompresji skał UHP. Zostało to przypisane pęknięciu płyty, które wystawiło subdukowaną płytę litosferyczną na działanie gorącej astenosfery w pobliżu „okna”, w którym płyta się rozdarła.

Badanie połączyło obliczenia szybkości ogrzewania i chłodzenia w oparciu o model dyfuzji chemicznej granatu opracowany przez (Faryad i Ježek, 2019) z przewidzianymi wzorcami stanów stabilnych termicznie w strefach subdukcji z wcześniej opublikowanych modeli (Peacock i in., 2005). Synteza uogólniła na podstawie konkretnego przypadku wariscydów wszystkie orogeny kolizyjne i powiązała systemy UHP z reżimami metamorfizmu ultrawysokich temperatur (UHT). Wykazanie, że modelowanie dyfuzji może identyfikować krótkotrwałe zdarzenia termiczne, w przypadku których nie można ustalić skali czasu za pomocą bezwzględnego datowania wieku przy użyciu metod izotopowych, oferuje cenne nowe informacje dla przyszłych badań nad orogeniczną ewolucją termiczną. Opracowany przez nas model termiczno-tektoniczny (Fig. 18) może wyjaśnić powszechnie obserwowany wszechobecnie zapis facji granulitowej w skałach, który wskazuje na wcześniejszy, chłodniejszy epizod facji eklogitowej.

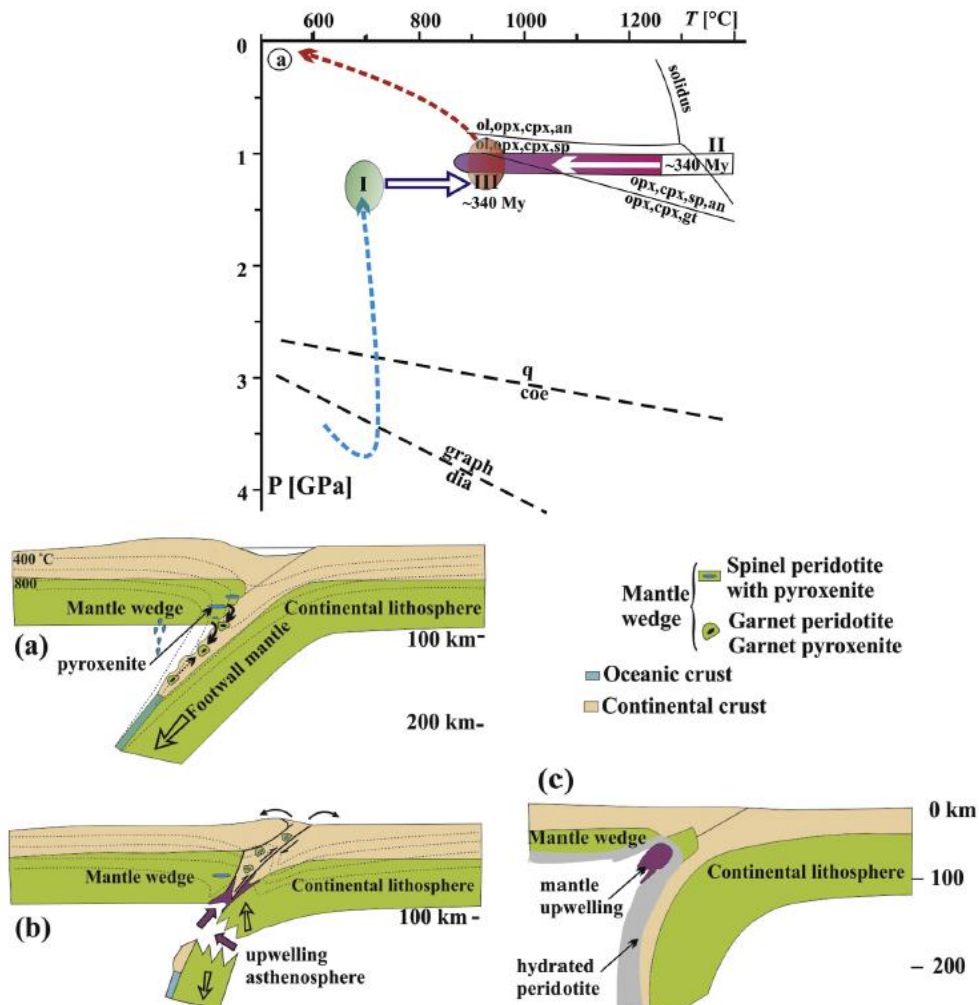


Figura 18 – U góry: Wykres ciśnienia (p) – temperatury (T) przedstawiający ewolucję termiczno-tektoniczną granulitu waryscyjskiego, który miał wcześniejszą historię facji eklogitowej (subdukcji) z (Faryad i Cuthbert, 2020). Dół (a-c): schematy tektoniczne przedstawiające wydedukowaną ewolucję tektoniczną od subdukcji przez zderzenie do ekshumacji. Przerywana niebieska strzałka pokazuje ścieżkę ciśnienie – temperatura – czas (ciśnienie-temperatura-t) dla przejścia od subdukcji do kolizji i wczesnej ekshumacji, gdy reżim termiczny był stosunkowo chłodny (model a); biała pozioma strzałka skierowana w lewo pokazuje ścieżkę stygnięcia bazaltowej magmy krystalizującej do granulitu, gdzie stop został wygenerowany w lub wokół upwellingu astenosfery, która przeniknęła przez pękającą i zapadającą się płytę oceaniczną (modele b i c). Adwekcyjne ciepło powodowało przegięcie ścieżki ciśnienie-temperatura-t ekshumowanych subdukowanych skał w kierunku wyższych T (pusta granatowa strzałka ciśnienie-temperatura skierowana w prawo) przed ostatecznym ochłodzeniem i ekshumacją na powierzchnię (czerwona przerywana strzałka). Ogrzanie to generowało powszechnie obserwowany wyraźny zapis metamorfizmu facji granulitowej w ekshumowanych skałach subdukowanych.

Artykuł 8 jest wynikiem badań, które rozpocząłem się na początku XXI wieku, kiedy moi koledzy Carswell i Krogh-Ravna oraz ja rozpoznaliśmy, że eklogity opx w WGR (patrz **Artykuł 2**) miały pewne cechy sugerujące ich pochodzenie metasomatyczne w warunkach UHP. Zostało to po raz pierwszy zaproponowane w (Carswell i Cuthbert, 2003) i niektórych materiałach konferencyjnych, ale dalsze dochodzenie zostało niestety przerwane przez śmierć Carswella. Idea ta została wzmocniona badaniami Johannes Vrijmoeda (Vrijmoed i in., 2006; Vrijmoed i in., 2013) na temat systemu żył metasomatycznych zawierających diament w perydotycie w Svartberget, niedaleko Moldefjord w Norwegii. W 2009 r. ten temat badawczy wznowiliśmy we współpracy z kolegami Giles Droop, Ray Burgess i Chris Ballantyne z Uniwersytetu w Manchesterze i uzyskaliśmy dofinansowanie z brytyjskiej Rady Badań nad Środowiskiem Naturalnym na studia doktoranckie przyznane Alexandra Quas-Cohen, której byłem współpromotorem. Jej praca magisterska, obroniona z sukcesem w 2014 roku, ustaliła rolę cieczy nadkrytycznych (bogatych w wodę i węglany stopów granitoidowych) w generowaniu tych spektakularnych skał w wyniku reakcji z perydotytami

i piroksenitami. Stanowiło to analogię terenową dla metasomatyizmu w płaszczu, który jest ważnym procesem generowania magm bogatych w pierwiastki litofilne, na przykład w systemach łukowych i prowincjach kimberlitowych. Praca Quas-Cohen miała obejmować badania nad halogenkami we fluidach w skałach facji eklogitowej, ale została przedwcześnie zakończona. Jednak Burgess kontynuował tę pracę z nowym studentem, Lewisem Hughesem, który ostatecznie pokierował tym artykułem. Stężenia halogenków mierzono przez napromieniowanie próbek w celu wytworzenia z nich izotopów gazu szlachetnego, które następnie analizowano metodą spektrometrii masowej. Dane dla faz stałych i inkluzji fluidalnych można uzyskać różnymi technikami ekstrakcji gazowej (Fig. 19).

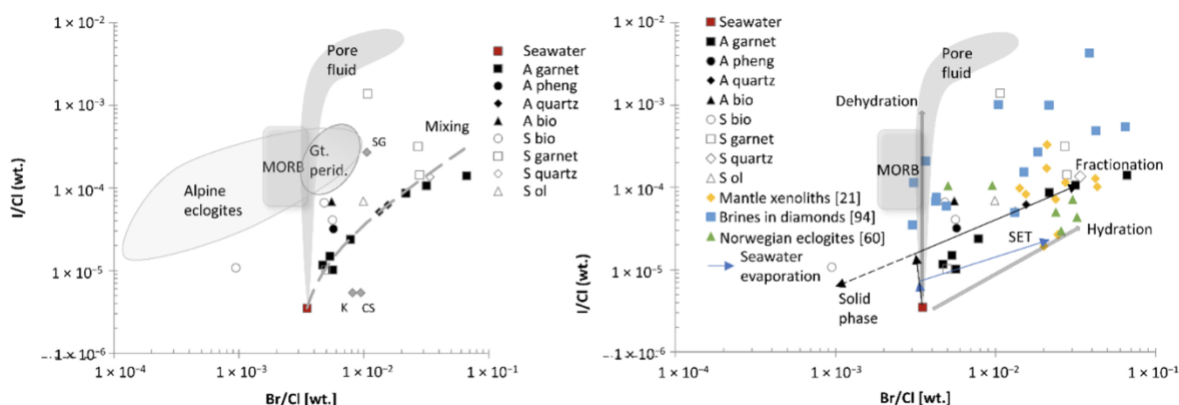


Figura 19 – Wykresy proporcji halogenków dla dwóch metasomatyicznych ultra-wysokociśnieniowych ciał maficzno-ultramaficznych w Western Gneiss Region, oparte na składzie płynów uwięzionych w różnych UHP fazach mineralnych, z (Hughes i in., 2021). Próbkę oznaczoną literą „A” pochodzą z Årsheimneset, Stadlandet i „S” z Svartberget koło Molde. Szare pola to zakresy wartości dla bazaltów z grzbietów śródoceanicznych (MORB), płynów porowych dla basenów sedymentacyjnych oraz alpejskich eklogitów ofiolitowych i perydotytów granatowych. W panelu po lewej stronie szare punkty danych oznaczone K, CS i SG dotyczą solanek wód gruntowych z kratonu, a szara linia przerywana to obliczona linia mieszania między składem współczesnej wody morskiej, a dowolnym fluidem. Należy zauważyć, że próbki norweskie (znajdujące się w starej skorupie kontynentalnej) wykazują wyraźnie wyższe wartości Br/Cl niż skały alpejskie, które były skorupą oceaniczną. W prawym panelu dodatkowe punkty danych są pokazane dla halogenków w diamentach kimberlitowych i ksenolitach płaszczowych, wszystkie z subkontynentalnego płaszczu litosferycznego, a także wcześniej opublikowane dane dla eklogitów maficznych w WGR. Niebieskie strzałki pokazują tendencję do parowania wody morskiej w dwóch etapach z początkową dehydratacją, następnie nasyceniem chlorkami i sekwestracją Cl w formie soli. Wzorec danych dla minerałów krzemianowych UHP jest podobny do tego trendu, ale prawdopodobnie można go wyjaśnić procesem frakcjonowania obejmującym krzemiany, a nie sole; preferencyjną sekwestracją Cl do faz uwodnionych, takich jak miki i amfibol (modelowane przez czarne strzałki). Zestaw danych z WGR można wyjaśnić frakcjonowaniem solanek kratonicznych, które zostały zubożone w Cl w stosunku do Br przez odparowanie płytkiej wody morskiej i wzbogacone w I w stosunku do Cl przez oddziaływanie z materią organiczną, prawdopodobnie w wyniku interakcji z pokrywą łupków ilastych. Dalsze frakcjonowanie takich fluidów było spowodowane krystalizacją miki (i prawdopodobnie apatytu), która sekwestrowała Cl. Widoczny trend mieszania może być artefaktem tego dwuetapowego procesu frakcjonowania. Rozprzestrzenie się I/Cl może sugerować duże różnice w składzie wczesnych płynów lub udział solanek osadowych (np. dane punktowe z granatu wskazane czerwoną strzałką, które są prawdopodobnie reliktem bardzo wzbogaconego w I wczesnego fluidu). Podobieństwo wyników tego badania do sygnatur halogenkowych płaszczu SCLM sugeruje, że podobne interakcje z kontynentalnymi solankami kratonicznymi, zmodyfikowanymi przez metamorfizm i metasomatyizm UHP, mogły przyczynić się do niejednorodnego składu SCLM.

Kluczowym wynikiem tego badania była propozycja, że subdukcja skorupy kratonicznej, takiej jak w WGR, przenosi fluidy, które zajmowały solankową warstwę wodonośną charakterystyczną dla tarcz prekambryjskich, a nie solanki wody morskiej tradycyjnie powiązane z oceanicznymi systemami subdukcji. Badane skały miały pochodzenie skorupowe (perydotyty Fe-Ti – patrz artykuł 2), ale analogia ze skałami perydotytowymi w płaszczu sugeruje nowy pomysł, że solanki ze skorupy kontynentalnej mogą być znaczącym alternatywnym źródłem fluidów w budżecie halogenkowym subkontynentalnego płaszczu litosferycznego. Badania są wciąż bardzo świeże, więc nie można jeszcze ocenić ich konkretnego wpływu, ale istnieje duży potencjał, aby kontynuować badania orogenicznych perydotytów w kompleksach gnejsowo-eklogitowych. Oprócz zaangażowania w opracowanie metasomatyicznego modelu petrogenyzy eklogitów opx, moje wieloletnie doświadczenie w badaniach ewolucji tektonicznej kaledonidów skandynawskich i kratonu

wschodnioeuropejskiego miało decydujące znaczenie w rozpoznaniu znaczenia solanek tarczy granitowej jako źródła halogenków. We wczesnych etapach tej współpracy z Manchester University dołączyła do nas doktorantka Florentina Enea z Portsmouth University w Wielkiej Brytanii, której byłem również współpromotorem. Jej badania nad geochemią rutylu jako znacznikiem subdukcji (Enea i in., 2014; Enea, 2012) ujawniły metasomatyczny sygnał ze skorupy kontynentalnej w kompleksach gnejsowo-eklogitowych (praca doktorska, IEC-9, abstrakt), który jest obecnie przygotowany do pełnej publikacji.

6. Prezentacja znaczącej działalności naukowej lub artystycznej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub kulturalnej, zwłaszcza w instytucjach zagranicznych

Przed dołączeniem do AGH moja kariera podoktorancka odbywała się w całości w Wielkiej Brytanii na University of Glasgow jako staż podoktorski, a następnie na University of the West of Scotland i jego poprzednikach, gdzie byłem wykładowcą nauk o Ziemi i środowisku. Poniżej podsumowano działania w każdym z tych ośrodków, a następnie podano informacje o krótszych okresach pracy w innych instytucjach w Wielkiej Brytanii i poza nią.

University of Glasgow, Department of Geology & Applied Geology, 1987-1989:

Wynikało to z przyznania przez UK Natural Environment Research Council stypendium podoktoranckiego na podjęcie badań nad późno-orogeniczną sedymentacją i ewolucją basenów śródgórskich w kaledonidach skandynawskich w celu powiązania ewolucji basenów z ekshumacją wysokociśnieniowych skał metamorficznych. Był to multidyscyplinarny projekt, który obejmował sedymentologię, geologię strukturalną, petrologię metamorficzną i geochronologię izotopową. Prace prowadzono na Uniwersytecie Glasgow z okresami pracy w Scottish Universities Research & Reactor Centre, East Kilbride (obecnie Scottish Universities Environmental Research Centre), University of Leeds w zakresie analizy izotopowej oraz brytyjskim National Remote Sensing Centre w Farnborough w zakresie analizy zdjęć satelitarnych pod kątem lineamentów strukturalnych. Współpraca z kolegami z Royal Holloway i Bedford New College na Uniwersytecie Londyńskim była ważnym elementem pracy, zwłaszcza w zakresie zagadnień dotyczących ewolucji strukturalnej i basenowej. Prace terenowe podjęte w Norwegii obejmowały wizytę na Uniwersytecie w Bergen w celu uzyskania danych terenowych z tamtejszego archiwum projektów magisterskich. Kluczowymi wynikami były prace, w których ustanowiono model ewolucji basenu, łączący ekshumację dużego kontynentalnego masywu HP/UHP, ekshumacyjne „zapadnięcie się” stosu płaszczowin, ewolucję termiczną masywu HP/UHP i stosu płaszczowinowego oraz depozycję osadów klastycznych czerwonego spągowca w basenie ograniczony uskokiem wciętym w stos płaszczowin (Norton i in., 1990; Cuthbert, 1991; Wilks i Cuthbert, 1994).

University of the West of Scotland (dawniej Paisley College of Technology, a następnie University of Paisley) 1989 - 2019

W grudniu 1989 r. zostałem wykładowcą nauk o Ziemi i środowisku. Instytucja ta miała charakter silnie zawodowy i dyscypliny naukowe skoncentrowane na ich zastosowaniach związanych z rozwiązaniami inżynierskimi i ochroną środowiska. Niemniej jednak, przez 30 lat, kiedy byłem tam zatrudniony, mogłem kontynuować moje „czysto naukowe” badania nad procesami orogenicznymi głębokiego poziomu poprzez badanie skał metamorficznych

facji eklogitowych. Jak szczegółowo opisano powyżej w odniesieniu do kluczowych artykułów, istotnymi osiągnięciami były:

- Odwzorowanie **przestrzennego wzorca ciśnienia metamorficznego (więc głębokości) w olbrzymim kontynentalnym masywie HP/UHP** jako krok w kierunku wizualizacji formy masy skorupy kontynentalnej, która uległa subdukcji podczas zderzenia kontynent-kontynent (Carswell i in., 1999; Cuthbert i in., 2000; Carswell i Cuthbert, 2003).
- **Ilościowe określenie tempa subdukcji** gigantycznego kontynentalnego masywu HP/UHP (Carswell i in., 2003).
- Opisanie, po raz pierwszy w kaledonidach skandynawskich, dowodów na **częściowe przetopienie eklogitu i powstawanie stopu trondhjemitowego**, który jest procesem o znaczeniu globalnym dla genezy magm adakitowych i tonalitywno-trondhjemitowo-granodiorytowych (TTG) oraz wzrostu skorupy kontynentalnej (Cuthbert, 1995; Larikova i Cuthbert, 2019).
- Opracowanie spójnego **modelu geodynamiczno-geochemicznego dla subkontynentalnego płaszcza litosfery ekshumowanego w orogenie kolizyjnym** (Cuthbert, 2009; Brueckner i in., 2010; Hughes i in., 2021). Jest to kontynuowane w formie zaproszonego artykułu przeglądowego na temat orogenicznych perydotytów w całym orogenie kaledonidów-Appalachów (Brueckner & Cuthbert, 2022) oraz we wstępnych konsultacjach z przemysłem (Sibelco) w sprawie oceny globalnych zasobów oliwinu dla wyrobów ogniotrwałych.
- Rozwój coraz bardziej wyrafinowanych dedukcyjnych i indukcyjnych **modeli geodynamicznych zderzeń i subdukcji kontynentów**, w tym modelu numerycznego 3D (Cuthbert i in., 1981; Cuthbert i in., 1983; Carswell i Cuthbert, 1986; Cuthbert i Carswell, 1990; Brueckner i Cuthbert, 2013; Bottrill i in., 2014; Faryad i Cuthbert, 2020). Ostatecznie powiązały one procesy zachodzące na głębokości w strefie subdukcji z ewolucją i depozycją w basenie przypowierzchniowym.
- Wczesne etapy modelowania **wplywu metamorfizmu na właściwości petrofizyczne subdukowanej skorupy kontynentalnej** i ich implikacje dla jej zachowania w orogenach kolizyjnych, oparte na rzadkich ortognejsach facji eklogitowej w WGR (Cuthbert, 2019; Cuthbert i Włodek, 2021). Ta praca jest kontynuowana przy użyciu modelowania izochemicznego diagramów fazowych i analizy obrazu map chemicznych (XMapTools / Bingo-Antidote - Lanari, et al., 2014).
- Współkierowałem doktorantką Florentiną Eneą wraz z kolegami Craig Storey i Rob Strachan z University of Portsmouth w Wielkiej Brytanii oraz Horst Marschall z University of Bristol w Wielkiej Brytanii, aby zbadać **geochemię pierwiastków śladowych w rutylu** w HP i UHP skałach metamorficznych z szerokiej gamy pasm metamorficznych na całym świecie w celu ustalenia podstaw rozpoznawania rutylu związanego z subdukcją w osadach archaiku i wczesnego proterozoiku, w celu zidentyfikowania najwcześniejszych zapisów subdukcji. Zaowocowało to udaną pracą doktorską Enea, F. (2012) *Rutyl: nowe narzędzie petrogenetyczne do badania starych stref subdukcji* (University of Portsmouth) i Enea et al. (2014), a obecnie przygotowywana jest kolejna publikacja.
- W badaniach terenowych w **Scottish Central Highlands** w latach 90. i 2000., finansowanych przez Carnegie Trust dla Universities of Scotland, wykartowałem przypadki występowania enigmatycznych reliktyw eklogitów neoproterozoicznych w podobnej do Moine grupie Badenoch, która stanowi podstawę kultowego terranu Dalradian (Leslie i in., 2013); prawdopodobnie rejestrują one kolizyjną aktywność tektoniczną w pogrenwilskim orogenie akrecyjnym („Valhalla Orogen”), a tym

samym rejestrują rozwój tektoniczny superkontynentu Rodinia, który poprzedza otwarcie paleoceanu Japetus (Cawood i in., 2010). Wstępne wyniki zostały przedstawione w (Cuthbert, 2007), a prace nad geochronologią izotopową są obecnie prowadzone z kolegami z Portsmouth University w Wielkiej Brytanii i Curtin University w Australii przy użyciu nowatorskiej metody mikrowiązki do datowania granatów przy użyciu izotopów Hf opracowanej przez (Simpson i in., 2021).

- Współpracowałem z koleżanką Anfisą Pylitsiną i jej współpracownikami z Rosyjskiej Akademii Nauk w Moskwie w **badaniach wysokociśnieniowych masywów** w środkowoazjatyckim pasie orogenicznym południowego Kazachstanu, wnosząc swoje doświadczenie w interpretacji podobnych skał z innych pasów orogenicznych (Pilitsyna i in., 2018; Pilitsyna i in., 2018).
- Dodatkowym osiągnięciem było metodologiczne zastosowanie nowatorskiej techniki „**obrazowania ładunkowo kontrastowego**” przy użyciu gazowego wtórnego obrazowania elektronów w niskopróżniowym skaningowym mikroskopie elektronowym jako pomocy w szybkim petrograficznym obrazowaniu mikrostruktur wewnątrzziarnowych w skałach metamorficznych (Cuthbert i Buckman, 2005) we współpracy z kolegami z Instytutu Naftowego na Uniwersytecie Herriot-Watt w Edynburgu. Metoda ta ma przewagę nad katodoluminescencją (która ma podobną podstawę fizyczną), zwłaszcza w przypadku minerałów bogatych w żelazo, które osłabiają sygnał CL. W naszych badaniach zobrazowaliśmy zablizniające się pęknięcia w granatach eklogitowych, dokumentując kruche pęknięcia działające pod ciśnieniem litostatycznym $>2,5$ GPa. Technika ta jest coraz częściej stosowana w naturalnych krzemianach, na przykład w obrazowaniu zonalności w cyrkonie w ramach przygotowań do datowania U-Pb, jako alternatywy dla CL (Campomenosi i in., 2020).

W czasie zatrudnienia na UWS byłem przewodniczącym bądź głównym organizatorem następujących konferencji, sympozjów i warsztatów:

- Goldschmidt Conference, Knoxville, lipiec 2010: Sesja 08c *Geochemical Processes in Continental Collision Zones* (współorganizator sesji). Wynik: Tematyczny zestaw artykułów (redaktor gościnny) opublikowany w *Lithos* (Zheng i in., 2012).
- Jesienne Spotkanie AGU San Francisco USA 2008: Sesja V21 *Frontiers of Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Deep Subduction: From Atomic Scales to Mountain Building* (Organizator Sesji).
- Mineralogical Society of Great Britain Walne Zgromadzenie, 2009 *Micro-Analysis, Processes, Time* (członek Komitetu Organizacyjnego, organizator sesji: *Deep Subduction and Exhumation of Continental and Oceanic Crust*).
- 33rd International Geological Congress, Oslo, Norwegia 2008 Sesja UHP-04 *Ultra High Pressure Metamorphism: Mineral Reactions, Geochemistry, Thermobarometry & Geochronology* (Przewodniczący Sesji). Wynik: Tematyczny zestaw artykułów (redaktor gościnny) *Twenty-five years of ultrahigh-pressure metamorphism* *European Journal of Mineralogy*, tom 21.
- *International Eclogite Field Symposium*, Portree, Szkocja, sierpień 2007 (organizator wiodący konferencji z ramienia Komitetu Koordynacyjnego Międzynarodowej Konferencji Eklogitowej). Sympozjum było wspólnym spotkaniem z Task Force IV Międzynarodowego Programu Litosfery. Było ono wspierane finansowo przez Mineralogical Society of Great Britain, Geological Society of London, International Lithosphere Programme, Carnegie Trust for the Universities of Scotland, Geological Society of Glasgow oraz Highland Geological Society. Oprócz sesji wykładowych i wycieczek terenowych po neoproterozoicznych skałach eklogitowych „Grenville” inlier Glenelg-Attadale Lewisian, Lochalsh, odbyła się dalsza wycieczka terenowa w

Bretanii. oraz Vendée, Francja, kierowana przez Gaston Godard (Institut de Physique du Globe de Paris). Efektem spotkania były dwa zestawy czasopism tematycznych: L. Dobrzhinetskaya i H.K. Brueckner (redaktorzy), *Ultrahigh pressure metamorphism: From Earth's interior to mountain building, in memory of D.A. (Tony) Carswell* pod redakcją i opublikowaną w *Lithos* 109, zeszyty 3-4, 2009; oraz Cuthbert S.J. *Eclogite Facies Rocks: A Window into Geodynamics and Lithospheric Evolution: A Celebration of the Career of Tony Carswell*, *Journal of the Geological Society* 166, 2009. Przewodnik po wycieczkach terenowych w Szkocji i towarzyszący artykuł przeglądowy zostały opublikowane przez współprzewodniczącego Craig Storey, wówczas na University of Bristol w Wielkiej Brytanii, w (Storey, 2008a, b).

- *Ultrahigh pressure metamorphism in the Western Gneiss Region of Norway*. 5th School of the European Mineralogical Union "Ultrahigh Pressure Metamorphism", Budapeszt, lipiec 2003 (opiekun). Prezentację uzupełniono rozdziałem w towarzyszącej monografii (Carswell i Cuthbert, 2003).
- *International Eclogite Field Symposium*, Selje, Norwegia, czerwiec 2003 (członek Naukowego Komitetu Programowego, współautor przewodnika terenowego (Carswell i in., 2003).
- Konferencja *Exhumation of Metamorphic Rocks*, University of Rennes, Francja, wrzesień 1999 (członek Komitetu Organizacyjnego z ramienia Towarzystwa Mineralogicznego Wielkiej Brytanii i UK Metamorphic Studies Group). Redagowałem tematyczny zestaw artykułów (Cuthbert & Ballevre, 2002).

W tym okresie byłem redaktorem gościnnym lub współredaktorem następujących zestawów tematycznych czasopism i książek:

- **Dobrzhinetskaya, L., Cuthbert, S.J., Faryad, W., Wallis, S.** (Editors) (2011) *Ultra-High Pressure Metamorphism of Continental Crust: 25 years since the Discovery of Coesite and Diamond*. Elsevier, Amsterdam.
- **Zheng, Y-F., Zhang, L., McClelland, W.C., Cuthbert, S.J.** 2012. *Processes in continental collision zones*. *Lithos* 136, 1-9.
- **Schertl, H.-P., Gilotti, J.A., Cuthbert, S.J., Perchuk, A.L.** 2009. *Twenty-five years of ultrahigh-pressure metamorphism*. *European Journal of Mineralogy* 21, 1083–1084.
- **Cuthbert S.J.** 2009. *Eclogite Facies Rocks: A Window into Geodynamics and Lithospheric Evolution: A Celebration of the Career of Tony Carswell*. *Journal of the Geological Society*, London 166, 735-737.
- **Cuthbert, S.J., Ballevre, M.** 2002. *Exhumation of metamorphic terranes: introduction*. *Mineralogical Magazine* 66, 1–3.

Aplikacyjno-przemysłowy status University of the West of Scotland zachęcił mnie do poszerzenia zakresu badań o **zarządzanie ryzykiem środowiskowym, degradację materiałów budowlanych oraz ocenę geozasobów**, w oparciu o subdyscypliny mineralogii środowiskowej, geochemii i geomikrobiologii, wykorzystując moje umiejętności w zakresie analizy geomateriałów w fazie stałej. Niektóre znaczące wyniki tej pracy były następujące:

- **Właściwości historycznych materiałów budowlanych w obiektach zabytkowych**, w tym właściwości i petrografia tradycyjnych zapraw wapiennych, wietrzenie murów z

piaskowca oraz ocena efektów czyszczenia murów z piaskowca. Wynikało to z dużego programu czyszczenia XIX-wiecznych zasobów budowlanych z piaskowca w Glasgow w celu usunięcia czarnej patyny spowodowanej zanieczyszczeniem powietrza; zmieniło to wygląd miejskiego krajobrazu Glasgow w okresie postindustrialnej odnowy miast, ale często miało szkodliwy wpływ na powierzchnie murowane (Webster, 1992). Rozwiązanie tych zagadnień wymagało umiejętności w zakresie petrografii i właściwości petrofizycznych skał porowatych. Ponadto, w wyniku współpracy z uniwersytecką grupą badań betonu, poprowadziłem warsztaty dla praktyków zajmujących się konserwacją budynków, co doprowadziło do powstania na początku lat 90. uniwersyteckiej grupy Heritage Masonry Group we współpracy ze Scottish Lime Center. Prace tej grupy trwają do dziś.

Opublikowaliśmy badania dotyczące petrografii tradycyjnych zapraw wapiennych (Hughes i in., 1999); (Hughes i in., 1999); (Hughes i Cuthbert, 2000). Byłem dyrektorem ds. badań w ramach udanego projektu doktorskiego dotyczącego wietrzenia piaskowca przez mikroalgi ((Welton, 2003; Welton, et al., 2003) oraz innego doktoratu na temat *procesów rozkładu kamienia* w oczyszczonych i nieoczyszczonych budynkach w Szkocji (Żurakowska, 2015). Efektem tych prac było badanie wpływu biofilmów grzybów na *właściwości petrofizyczne próbek rdzenia złoża węglowodorów*, co miało istotne znaczenie dla charakterystyki zwilżalności piaskowca złożowego w analizie rdzeni pól naftowych; Analiza została przeprowadzona z kolegami Jimem Buckmanem i Adrianem Toddem z Heriot-Watt University w Edynburgu przy użyciu środowiskowego skaningowego mikroskopu elektronowego, który umożliwia analizy próbek mokrego materiału (Polsen, et al., 2010).

- **Ocena ryzyka toksycznych odpadów kopalnianych i innych zagrożeń jakości wody pochodzenia geologicznego:** Była to udana współpraca z geochemikiem środowiskowym, profesorem Andrew Hursthousem, finansowana przez University of Paisley (obecnie UWS), w której połączyliśmy konwencjonalne metody analizy chemicznej gleby z mineralogicznymi metodami mikroanalitycznymi. Obejmowało to badanie biodostępności arsenu i antymonu w glebach skażonych odpadami kopalnianymi i hutniczymi w historycznej kopalni antymonu w południowej Szkocji, w ramach którego wspólnie nadzorowaliśmy projekt doktorski doktorantki Judit Gal (Gal, et al., 2006; Gal i in., 2007). Współpraca z kolegami z Nigerii zaowocowała dwiema publikacjami na temat hydrogeochemicznych oddziaływań łupków bitumicznych (Chukwura i in., 2015; Nganje i in., 2020). Moja rola w tych badaniach polegała na zastosowaniu skaningowej mikroskopii elektronowej i proszkowej dyfraktometrii rentgenowskiej do charakteryzacji mineralogicznej.
- **Metody oceny ryzyka i stabilizacji toksycznych odpadów hutniczych:** Ta sama strategia, o której mowa powyżej, w której analiza geochemiczna gleby (metodą ekstrakcji sekwencyjnej) połączona z bezpośrednią mikroanalizą kruszywa fazy stałej została dostosowana do odpadów wielkopiecowych z przemysłu stalowego w projekcie finansowanym przez STEMCOR Global Holdings Ltd. (70 000 funtów) we współpracy z CORUS i Acellor-Mittal. W tym przypadku zastosowałem do analizy fazy stałej również mikrospektroskopię ramanowską. W ramach tej pracy współkierowałem doktorantem (Kiri Rogers) i oprócz pracy doktorskiej pt. *The impact of metal speciation on the recovery, re-use and disposal of steel process by-products* (2016), opublikowaliśmy wyniki przeglądu technik analizy sekwencyjnej do oceny ryzyka toksyczności odpadów stalowych (Rogers i in., 2015), oceny technik remediacji zagrożeń ze strony odpadów stalowych (Rogers i in., 2019a) oraz ulepszoną aplikację analityczną do oceny ryzyka w odpadach stalowych (Rogers i in., 2019b).

- **Geneza rud złota w Southern Uplands – Longford Down Complex, Szkocja:** Nasza wiedza geochemiczna w zakresie zanieczyszczenia gleb związanego z działalnością górnictwem doprowadziła do pozyskania funduszy ~1,2 mln GBP od małej firmy wydobywczej w 2014 r. w celu oceny pochodzenia enigmatycznego aluwialnego złota w złożu Leadhills na wzgórzach Scottish Border. Projekt został wstrzymany z powodu ograniczenia źródła finansowania, ale udało mi się opublikować obszerny przegląd mineralizacji złota w tym akrecyjnym goszczonym przez turbidyt złożu w kontekście orogenezy kaledońskiej, łączący akrecję tektonostratygraficzną terranów, petrogenezę granitoidów i ewolucję fluidów związane z delaminacją subdukcją płyty i rozprzestrzenienia aktywności magmowej (Rice i in., 2018), a które opierało się na niektórych moich doświadczeniach z tektoniki kolizyjnej w kaledonidach w regionie północnoatlantyckim. Badanie te zostały docenione, co zaowocowało zaproszeniem mnie do przyłączenia się do UK Arts and Humanities Research Council AHRC **Research Network on gold in Britain's auriferous regions, 2450–800 BC** <https://www.nms.ac.uk/collections-research/our-research/highlights-of-previous-projects/prehistoric-gold/research-network/>, na którym wygłosiłem prezentację „*Gold sources in Ireland and their characterisation*” w National Museum of Scotland we wrześniu 2018 roku.

Wkład w ocenę ryzyka środowiskowego w tym okresie na UWS obejmował również przyznanie w 2018 r. dotacji w wysokości ~ 30 000 funtów od Banku Światowego „*CPD B&E - Waste and Environment Management Programme (HFTC) for World Bank*” na szkolenie specjalistów ochrony środowiska z Kenii w zakresie zasobów wodnych i zagrożeń dla jakości wody, w których zapewniłem sesje i ćwiczenia terenowe dotyczące jakości wody.

Dwa zaproszenia do zorganizowania szkoleń dla specjalistów ds. zdrowia środowiskowego w Szkocji i Irlandii na temat kontrowersyjnych **skutków wydobycia gazu łupkowego** („szczelinowania”) na zdrowie publiczne pojawiły się w 2014 i 2015 r. w następstwie zaproszeń ze strony władz na ich dorocznych konferencjach, odpowiednio, w Edynburgh i Cork.

Uznanie mojej roli w ocenie ryzyka środowiskowego nadeszło w 2016 r. wraz z zaproszeniem do dołączenia do zespołu oceniającego wnioski o dotacje *Research Councils UK Global Challenges Research Fund* w celu wypłaty środków przyznanych przez główne krajowe agencje finansowane przez rząd Wielkiej Brytanii. GCRF to fundusz o wartości 1,5 miliarda funtów, który wspiera najnowocześniejsze badania w celu sprostania wyzwaniom, przed którymi stoją kraje rozwijające się. Jest to część oficjalnej pomocy rozwojowej Wielkiej Brytanii (ODA). Fundusz realizuje cele zrównoważonego rozwoju ONZ. Ma na celu maksymalizację wpływu badań i innowacji na poprawę możliwości rozwoju i jakości życia i w krajach rozwijających się 2016-2019.

W trakcie pracy na UWS odbyłem krótkie wizyty gościnne w celach badawczych w następujących instytucjach europejskich:

- **Bayerisches Geoinstitut** Europejski Zakład Wysokociśnieniowy, Niemcy. Kwiecień 2003, 2 tygodnie. Finansowany w ramach unijnego programu „Dostęp do infrastruktury badawczych”. Temat: *High pressure to ultrahigh pressure metamorphic transition in the Western Gneiss Complex, Norwegian Caledonides: Electron Microprobe study of the role of garnet growth and transformation in eclogites* (patrz (Cuthbert i Buckman, 2005) oraz (Carswell i Cuthbert, 2003).
- **Uniwersytet w Utrechcie, Holandia, Wydział Nauk o Ziemi, laboratorium**

mikrosondy elektronowej. Ufundowane przez University of the West of Scotland. 1 tydzień, marzec 2010. *In-situ chemical U-Pb-Th dating of monazite in a diamond-bearing pelitic gneiss* (patrz Cuthbert i Van Roermund, 2011).

- **Uniwersytet w Uppsali, Wydział Nauk o Ziemi, Szwecja**, sierpień 2016 i sierpień 2018: dwa dziesięciodniowe warsztaty geotrainersowe w kaledonidach skandynawskich Szwecji i Norwegii („TranScand”) prowadzone przez prof. Davida Gee (Uppsala) w celu zbadania oraz omówienia tektoniki, budowy i ewolucji kaledonidów skandynawskich. Pełniłem funkcję lidera wycieczek przez jeden dzień każdego geotrainersu w sektorze norweskim.
- **AGH Kraków, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska**, marzec 2019. Wizyta - wymiana pracowników w ramach programu ERASMUS+ z University of the West of Scotland w celu omówienia badań nad kaledonidami skandynawskimi, w tym trwającą wówczas pracę na temat datowania cyrkonów w gnejsie mikrodiamentowym z Fjortoftu, Norwegia (Walczak et al., 2019). Podjąłem się również nauczania petrologii metamorficznej studentów studiów magisterskich.

AGH University of Science & Technology, Kraków, Poland. 2019-obecnie

W październiku 2019 r. zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, dołączając do Zespołu Dynamiki Górotworu (ODT). Niektóre osiągnięcia od tego czasu do chwili obecnej to:

- Ukończenie i opublikowanie **badania geochronologicznego cyrkonu z mikrodiamentowego gnejsu pelitycznego z Fjortoft, WGR** (patrz Artykuł 7 (Walczak i in., 2019) i szczegółowe omówienie powyżej) we współpracy z koleżanką Katarzyną Walczak z AGH, innymi współpracownikami w ODT i personelem laboratorium NORDSIM w Sztokholmskim Muzeum Historii Naturalnej, pokazujące, jak złożona ewolucja i pochodzenie polimetamorficznej skały metaosadowej mogą zostać wyjaśnione za pomocą mikroanalitycznej spektrometrii mas.
- Publikacja artykułu przeglądowego na temat **reżimów termicznych kontynentalnych systemów subdukcji** we współpracy z prof. Shah Wali Faryad z Uniwersytetu Karola w Pradze (patrz artykuł 8 (Faryad i Cuthbert, 2020) i dyskusja powyżej).
- Rola współbadacza w pomyślnym złożeniu wniosku o grant „IAPETUS” (nagroda OSF OPUS nr rej. 2021/41/N/ST10/04298 kierowana przez dr. Jarosława Majkę) na zbadanie skał paleoceanu Japetus w kontekście czasowym i tektoniki płyt.
- Prowadziłem z sukcesem wnioski o przyznanie stypendium doktorskiego w Szkole Doktorskiej AGH w zakresie zastosowania **technik petrochronologicznych do datowania metamorfizmu i deformacji rozległych terranów oceanicznych w wyższych płaszczowinach kaledonidów skandynawskich**. Intencją było wyjaśnienie ewolucji tych terranów (kompleks płaszczowin Köli), które ewoluowały od wewnątrzoceanicznych stref subdukcji do orogenu akrecyjnego i wreszcie do orogenu kolizyjnego w stylu himalajskim. Stypendium zostało przyznane, a praca jest w drugim roku realizacji, po przeprowadzeniu dwóch kampanii terenowych. Wstępne datowanie cyrkonu metodą U-Pb zostało przeprowadzone i zostało zaprezentowane na spotkaniu Central European Tectonics Groups na Słowacji we wrześniu 2021 roku.
- Zakończenie szczegółowej analizy gnejsów granitoidowych z facji eklogitowej z rejonu Sunnfjord, WGR w Norwegii w celu zbadania **zwiększenia gęstości felsycznych skał skorupy kontynentalnej** podczas metamorfizmu HP i jego wpływu na ewolucję stref zderzeń kontynentalnych przy pomocy mikrosondy elektronowej w AGH. Wstępne

wyniki zostały zaprezentowane na spotkaniu Central European Tectonics Groups na Słowacji we wrześniu 2021 r. (Cuthbert & Włodek, 2021), na którym rozwinęły się wcześniej przedstawione idee (np. Cuthbert, 2019)). Przygotowywany jest krótki artykuł dla Mineralogii, a pełny raport zostanie złożony wiosną 2022 r. do Tectonophysics.

- Współbadacz w **udanej aplikacji do grantu badawczego OSF OPUS** *Jak rosła kontynenty? Komplex Kôli Nappe z kaledonidów skandynawskich jako naturalne laboratorium akrecji kontynentalnej*, reg. nie. 2021/41/B/ST10/03679, P.I. K. Walczak, AGH rekomendowany do dofinansowania w grudniu 2021 r.
- Mentor w **udanej aplikacji do grantu badawczego OSF PRELUDIUM** *Ewolucja tektoniczna terranów oceanicznych w Iapetus: podejście petrochronologiczne w kaledonidach północnej Szwecji*, reg. nie. 2021/41/N/ST10/04298 przyznany mojej doktorantce Isabel Carter z AGH i Uppsala University, Szwecja, rekomendowany do dofinansowania w grudniu 2021 r.

Inne prace toczące się obecnie w AGH dotyczą następujących zagadnień:

- **Przegląd perydotytów orogenicznych** w orogenie kaledonidów-Appalachów we współpracy z prof. Hannes Brueckner, Columbia University, New York, na zaproszenie czasopisma Gondwana Research, którego ukończenie planowane jest na marzec 2022 (Brueckner & Cuthbert, 2022).
- **Globalny przegląd zasobów materiałów ogniotrwałych z oliwinu**, obecnie w trakcie negocjacji z korporacją górniczą Sibelco.
- Badanie **możliwej subdukcji, eklogityzowanej skorupy oceanicznej** w allochtonach skandynawskich kaledonidów w Norwegii (Cuthbert, 2021), której finansowanie będzie poszukiwane w 2022 roku.

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

Nauczanie

Od 1987 roku uczyłem bardzo szerokiego zakresu zagadnień geologicznych i środowiskowych na poziomie licencjackim i magisterskim, które podsumowałem poniżej:

University of Glasgow 1987-1989:

- Petrologia skał wysokiego stopnia metamorfizmu.
- Tektonika ekstensywna i ewolucja basenów sedymentacyjnych.
- Geologia ropy naftowej i petrofizyczne techniki profilowania.
- Metody geologii terenowej i studia przypadków w Szkocji.

University of the West of Scotland (i jego poprzednicy) 1989-2019:

Uczyłem studentów w różnych dyscyplinach, od inżynierów budownictwa lądowego i mechanicznego, zarządzania odpadami i zasobami, po adeptów biologii (ekologii) i nauk o Ziemi. Pod koniec lat 90. wraz z moimi kolegami z małej grupy geologów opracowaliśmy w Szkocji pierwszy od ponad 100 lat nowy program studiów licencjackich z zakresu nauk o Ziemi, który z powodzeniem działał przez 12 lat, aż do jego zamknięcia w związku z przejściem pracowników na emeryturę. Byłem również członkiem zespołu, który opracował i prowadził dydaktykę w zakresie kursu magisterskiego z przygotowaniem do zawodu (MSc) w zarządzaniu środowiskowym, którego nazwę

później zmieniliśmy na zarządzanie odpadami i zasobami, i który nadal trwa (po ponad 25 latach). Podstawowe tematy, których nauczałem we wszystkich programach, to:

- Podstawowe zasady geologii
- Podstawy systemu Ziemi
- Geologia dla inżynierów budownictwa
- Podstawy krystalografii i mineralogii
- Petrografia mikroskopowa
- Geologia strukturalna
- Podstawy petrologii skał krystalicznych
- Budowa, skład i pochodzenie skorupy ziemskiej
- Podstawy geochemii
- Kartowanie terenowe i metody badań geofizycznych
- Podstawy i metody geologii zasobów
- Systemy informacji geograficznej
- Obiegi biogeochemiczne w systemie ziemskim
- Ochrona bioróżnorodności i georóżnorodności
- Gospodarka odpadami i zasobami oraz gospodarka w obiegu zamkniętym
- Czyste technologie
- Nauka o Ziemi
- Globalny obieg węgla, zmiany klimatu i sekwestracja dwutlenku węgla

Działalność dydaktyczna ERASMUS+ w AGH marzec 2019 (studenci studiów magisterskich):

- Metamorfizm typu Barrow w Szkocji
- Metamorfizm facji granulitowej
- Metamorfizm wysokich ciśnień i kontynentalne systemy subdukcyjne

Role organizacyjne:

Fakultatwnie:

- Lider Programu, licencjat Programy nauk o Ziemi 1998-2010
- Rekrutacja, studia licencjackie z nauk o Ziemi 1996-2010
- Lider Wspólnego Programu, studia magisterskie gospodarka odpadami i zasobami 2014-18
- Rekrutacja, studia magisterskie gospodarka odpadami i zasobami 1996-2019

Zewnętrzne ratyfikacje programów akademickich:

Zaproszony zewnętrzny asesor dla:

- Studia magisterskie - zrównoważone nauki o Ziemi, Uniwersytet w Plymouth, Wielka Brytania (2016)
- Studia magisterskie - Studia Przemysłu Naftowego i Gazowniczego, Glasgow Caledonian University, Wielka Brytania (2015)

Obsługa społeczności akademickiej:

Komisje przyznające finansowanie badań naukowych:

- Research Councils UK – Global Challenges Research Fund panel recenzji (2016-2019)

Komitety stałe organizacji konferencji, komitety społeczne:

- Przedstawiciel Wielkiej Brytanii International Ecogite Conference Co-ordinating Committee (2006-obecnie).

- Przedstawiciel Wielkiej Brytanii IUGS International Lithosphere Programme Task Group III-6 Ultra-high Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-type Orogenic Belts (2006-2011).
- Członek Komisji UK Metamorphic Studies Group – Wspólnej Grupy Specjalistycznej Mineralogical Society of Great Britain oraz Geological Society of London (sekretarz 1998-2001).
- Regularny recenzent czasopism naukowych, w tym Journal of Metamorphic Geology, Lithos, Journal of the Geological Society of London, Mineralogical Magazine, Minerals, Nature Communications, Acta Geologica Carpathica, Geosciences.
- Egzaminator zewnętrzny dla doktorantów od 1992 roku na uniwersytetach m.in. w Glasgow, Manchesterze, Liverpoolu, Edynburgu, Oksfordzie, Uppsali, Open University.

Rozpowszechnianie i propagowanie nauki:

- Studia otwarte / kształcenie dorosłych Tutor z geologii (w niepełnym wymiarze godzin), University of Glasgow Department of External Relations (od 2013 r.) prowadzenie kursów wstępnych z geologii, nauk o środowisku i jednodniowych zajęć z tematycznych aspektów nauk o Ziemi i planetarnych.
- Przewodniczący Geological Society of Glasgow (członek Rady 1990-obecnie, dwie kadencje jako sekretarz honorowy, jedna jako wiceprzewodniczący).
- Członek Zarządu, Scottish Geodiversity Forum (2013-2019).
- Członek Scottish Geodiversity Charter Working Group (od 2015 r. do chwili obecnej).
- Członek Glasgow Fossil Grove Museum Advisory Group (doradca techniczny ds. ochrony siedliska lasu kopalnego o znaczeniu międzynarodowym) 2016-obecnie.
- Regularny wykładowca publiczny i lider wycieczek terenowych przez ostatnie 40 lat do lokalnych towarzystw naukowych i edukacyjnych grup organizacyjnych w całej Wielkiej Brytanii w takich tematach jak geologia, planetologia, nauki o środowisku i podróże (średnio 5 rocznie).
- Audycja w środkach masowego przekazu BBC Radio Scotland “Out of Doors” - wywiad dotyczący geologii parków krajobrazowych okolic Glasgow (11.12.2010).
- Inspirujące podróże łączące geologię, krajobraz i kulturę, łączące sztukę i naukę, angażujące społeczności lokalne, szkoły i młodych studentów geologii:
 - **The Bedrock Walk** (2013): pięciodniowa podróż z plecakiem przez odległy region szkockich Highlands, w której spotykają się artyści, pisarze, performerzy, muzycy, geolog (ja) i ekolog-geograf, aby podzielić się doświadczeniami dotyczącymi krajobrazu, geologii i kultury szkockich Highlands oraz tworzyć nowe dzieła; sponsorowany przez Speygrian Educational Trust i Królewskie Szkockie Towarzystwo Geograficzne; jedna z serii podróży po dawnych drogach poganiaczy, aby inspirować i informować młodzież o ich dziedzictwie kulturowym i środowiskowym <http://storiesintheland.blogspot.com/p/the-bedrock-walk.html>, https://www.earthheritage.org.uk/wp/wp-content/uploads/2018/03/EH41_1-14f.pdf, <https://www.youtube.com/watch?v=3tNm9Pj1zPE>.
 - **Following the Cruise of the Betsey** (2014): podróż morska historycznym

zagłowcem przez Hebrydy Wewnętrzne, aby uczcić spuściznę szkockiej postaci kultury i komunikatora geologii, Hugh Millera, celem inspirowania i informowania szkockich dzieci i młodzieży; stworzyłem zasoby i zajęcia dla szkół oraz sponsorowałem pięciu młodych studentów geologii w celu uzyskania inspirujących doświadczeń, wraz z ekipą geologów, dziennikarzy, pisarzy, artystów wizualnych i dźwiękowych, filmowców i muzyków. Byłem współorganizatorem. Wspierane przez Królewskie Szkockie Towarzystwo Geograficzne i Towarzystwo Geologiczne Glasgow
<https://cruiseofthebetsey.wordpress.com/about/>,
<https://www.earthheritage.org.uk/wp/wp-content/uploads/2018/03/eh43F.pdf>,
<https://vimeo.com/129989765>.

- **Testimony of the Rocks – in the steps of Hugh Miller (2015)**: druga inspirująca podróż morska wśród szkockich wysp Atlantyku
<https://www.earthheritage.org.uk/wp/wp-content/uploads/2018/03/EH45f.pdf>,
<https://scotlandsgiodiversitycharter.org/2015/06/22/testimony-of-the-rocks-journeys-through-time-20-26-june-2015/>, <https://vimeo.com/132918394#>.
- Publikacje popularnonaukowe:
 - **Cuthbert, S. & Gilbert, J., 2019.** *Voyaging with Hugh Miller. In: Conversations in Stone: A Celebration of Hugh Miller's Legacy.* Reid, L. & Pancioli, E. (eds.). Edinburgh: Scottish Geodiversity Forum and Friends of Hugh Miller, pp. 25-33.
 - **Cuthbert, S.J. 2015.** *The Geologist.* Hugh's News: Newsletter of The Friends of Hugh Miller, No. 25, 8-9, Summer 2015.
 - **Cuthbert, S.J. 2015** *Appreciating the bedrock of civilisation.* Earth Heritage Magazine no. 41, Spring 2014.
 - **Cuthbert, S.J. 2015** *Geodiversity and Scottish wild land.* Wild Land News, Issue 84, Autumn 2013 pp. 10-13 pp. 20-22.
 - **Cuthbert, S.J. & Miller, A. 2015** *Scotland's geodiversity charter* (with Angus Miller). Wild Land News, Issue 84, Autumn 2013, pp. 14-15

Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Opieka doktorska i magisterska:

W brytyjskim systemie szkolnictwa wyższego pracownicy wydziału (wykładowcy) mogą nadzorować doktorantów i doktorantów, o ile posiadają stopień doktora z odpowiedniego przedmiotu. Rola Kierownika Studiów (promotora wiodącego; DoS) jest otwarta dla naukowców, którzy zdobywali doświadczenie jako współpromotorzy doktoratów. Jak pokazuje powyższa relacja, byłem DoS przy ukończonych projektach doktoranckich na University of the West of Scotland i współpromotorem dla czterech doktorów, w tym dwóch na innych uniwersytetach (Manchester i Portsmouth). W ciągu ostatnich 25 lat nadzorowałem również wiele projektów badawczych magisterskich w Wielkiej Brytanii. To doświadczenie pozwoliło mi przez ponad 25 lat pełnić funkcję zewnętrznego egzaminatora dla kandydatów na doktorantów w niektórych z najwyższej ocenianych uniwersytetów na świecie.

Prace cytowane

- Agard, P. & Handy, M., 2021. Ocean subduction dynamics in the Alps. *Elements*, Volume 17, pp. 9-16.
- Andersen, T., 1998. Extensional tectonics in the Caledonides of Norway, an overview. *Tectonophysics*, Volume 285, pp. 333-351.
- Baxter, E., Caddick, M. & Dragovic, B., 2017. Garnet: A rock-forming mineral petrochronometer. In: M. Kohn, M. Engi & P. Lanari, eds. *Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy & Geochemistry Vol. 83*. Washington DC: Mineralogical Society of America.
- Beach, A., Bird, T. & Gibbs, A., 1987. Extensional tectonics and crustal structure: deep seismic reflection data from the northern North Sea Viking graben. In: M. Coward, J. Dewey & P. Hancock, eds. *Continental Extensional Tectonics: Geological Society Special Publication No. 28*. Bath: Geological Society of London, pp. 467-476.
- Bottrill, A. D., van Hunen, J., Cuthbert, S. J., Brueckner, H. K. & Allen, MB., 2014. Plate rotation during continental collision and its relationship with the exhumation of UHP metamorphic terranes: Application to the Norwegian Caledonides. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Volume 15, p. doi:10.1002/2014GC005253.
- Braathen, A. et al., 2002. Orogen-parallel extension of the Caledonides in northern Central Norway: an overview. *Norwegian Journal of Geology*, Volume 82, pp. 224-241.
- Brueckner, H., 1998. Sinking intrusion model for the emplacement of garnet-bearing peridotites into continental collision orogens. *Geology*, Volume 26, pp. 631-634.
- Brueckner, H., 2006. Dunk, Dunkless and Re-dunk Tectonics: A Model for Metamorphism, Lack of Metamorphism, and Repeated Metamorphism of HP/UHP Terranes. *International Geology Review*, Volume 48, pp. 978-995.
- Brueckner, H., 2018. The great eclogite debate of the Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides: The in situ crustal v. exotic mantle origin controversy. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 36, pp. 517-527.
- Brueckner, H., Blusztajn, J. & Bakun-Czubarow, A., 1996. Trace element and Sm–Nd “age” zoning in garnets from peridotites of the Caledonian and Variscan Mountains and tectonic implications. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 14, pp. 61-73.
- Brueckner, H. & Cuthbert, S., 2013. Extension, disruption, and translation of an orogenic wedge by exhumation of large ultrahigh-pressure terranes: Examples from the Norwegian Caledonides. *Lithosphere*, Volume 5, pp. 277-289.
- Brueckner, H. & Cuthbert, S., 2022. Looking up at Mountain Building: Tracing Orogeny and Ancient Mantle Processes from Mantle Peridotites in the North Atlantic Caledonian/Appalachian system (invited, in preparation). *Gondwana Research*.
- Brueckner, H., Griffin, W.L., Carswell, D.A., Van Roermund, H.L.M., Cuthbert, S.J. 2010. The mantle and crustal evolution of two garnet peridotite suites from the Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides: An isotopic investigation. *Lithos*, Volume 117, pp. 1-19.
- Brueckner, H. & Van Roermund, H., 2004. Dunk tectonics: A multiple subduction/eduction model for the evolution of the Scandinavian Caledonides. *Tectonics*, Volume 23, p. TC2004.
- Campomenosi, N. et al., 2020. Establishing a protocol for the selection of zircon inclusions in garnet for Raman thermobarometry. *dodecaAmerican Mineralogist*, Volume 105, pp. 992-1001.
- Carswell, D. Brueckner, H. K., Cuthbert, S. J., Mehta, K., O'Brien, P. J., 2003. The timing of stabilisation and the exhumation rate for ultra-high pressure rocks in the Western Gneiss Region of Norway. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 21, pp. 601-612.
- Carswell, D. & Cuthbert, S., 1986. Eclogite facies metamorphism in the lower continental crust. Geological Society Special Publication No. 24. In: J. C. D. H. J. W. K. Dawson, ed. *The Nature of the Lower Continental Crust*. London: Geological Society of London, pp. 193-209.

- Carswell, D. & Cuthbert, S., 2003. Ultrahigh pressure metamorphism in the Western Gneiss Region of Norway. In: D. Carswell & R. Compagnoni, eds. *Ultrahigh Pressure Metamorphism: EMU Notes in Mineralogy Volume 5*. Budapest: Eotvos University Press, pp. 51-73.
- Carswell, D.A., Cuthbert, S.J., Krabbendam, M., Medaris, L.G Jr., Brueckner, H.K. 2003. *Guidebook to the Field Excursions in the Nordfjord - Stadlandet Area. International Eclogite Conference, Selje, Norway, June 2003*. Trondheim: NGU.
- Carswell, D., Cuthbert, S. & Krogh Ravna, E., 1999. Ultrahigh-pressure metamorphism in the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. *International Geology Review*, Volume 41, pp. 149-160.
- Carswell, D., Cuthbert, S. & Krogh Ravna, E., 2000. Ultrahigh-pressure metamorphism in the Western Gneiss Region of the Norwegian Caledonides. In: W. Ernst & J. Liou, eds. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision-type Orogenic belts: Final Report of the Task Group III-6 of the International Lithosphere Programme*. Columbia: Bellweather Publishing Ltd. for the geological Society of America, pp. 149-160.
- Carswell, D., Tucker, R., O'Brien, P. & Krogh, T., 2003. Coesite micro-inclusions and the U–Pb age of zircons from the Hareidland eclogite in the Western Gneiss Region of Norway. *Lithos*, Volume 67, pp. 181-190.
- Carter, I., Cuthbert, S., Walczak, K. & Majka, J., 2021. *U-Pb dating of zircon from the Northern Swedish Caledonides used to investigate the tectonic evolution of oceanic terranes in Iapetus*. Bratislava, Comenius University.
- Cawood, P. et al., 2010. Neoproterozoic orogeny along the margin of Rodinia: Valhalla orogen, North Atlantic. *Geology*, Volume 38, pp. 99-102.
- Chukwura, U., Udom, G., Cuthbert, S. & Hursthouse, A., 2015. Evaluation of hydrochemical characteristics and flow directions of groundwater quality in Udi Local Government Area Enugu State, Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, Volume 73, pp. 4541-4555.
- Connolly, J., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth & Planetary Science Letters*, Volume 236, pp. 524-541.
- Corfu, F., Andersen, T. & Gasser, D., 2014. The Scandinavian Caledonides: main features, conceptual advances and critical questions. In: F. Corfu, D. Gasser & D. Chew, eds. *New Perspectives on the Caledonides of Scandinavia*. Bath: Geological Society of London, pp. 9-43.
- Cuthbert, S., 1981. Stop 6-5: Gjøllanger - Sørødal Area. In: W. Griffin & M. Mørk, eds. *Excursions in the Scandinavian Caledonides: Uppsala Caledonide Symposium Excursion B1, Eclogites and Basal Gneisses in West Norway*. Uppsala: Uppsala University, pp. 70-73.
- Cuthbert, S., 1985. *Metamorphism and tectonic Evolution of Relatively Low-Temperature Eclogites in the Dalsfjord Area, Sunnfjord, West Norway*. Unpublished PhD Thesis, University of Sheffield.
- Cuthbert, S., 1991. Evolution of the Devonian Hornelen Basin, west Norway: New constraints from petrological studies of metamorphic clasts. In: A. Morton, S. Todd & P. Haughton, eds. *Developments in Sedimentary Provenance Studies. Geological Society Special Publication No. 57*. London: The Geological Society of London, pp. 343-360.
- Cuthbert, S., 1995. Trondhjemite Veins in Eclogite from the Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides; Evidence for Partial Melting. *Chinese Science Bulletin*, Volume 40 (Suppliment), pp. 103-104.
- Cuthbert, S., 2007. Evidence for eclogite-facies metamorphism in the Central Highland Migmatite Complex, Scotland. In: S. Cuthbert, H. Brueckner, C. Storey & J. Wheeler, eds. *International Eclogite Field Symposium, Lochalsh, Scotland 29th June - 6th July 2007*. Paisley, UK: University of Paisley, p. 16.
- Cuthbert, S., 2009. *Orogenic peridotites in the UHP Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides: Some new developments*. Xining, China, International Eclogite Conference, p. 33.

- Cuthbert, S., 2019. *Exploratory modelling of common crustal rock densities at ambient eclogite facies P-T conditions and some natural examples in a giant UHP terrain: Implications for buoyancy and collision tectonics*. Petrozavodsk, Russia, KRC RAS: Petrozavodsk, Russia.
- Cuthbert, S., 2021. *Large meta-eclogite massifs within the Western Gneiss Region, Scandinavian Caledonides: Subducted ocean-continent transition?* [Online] Available at: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16336>
- Cuthbert, S. & Balleve, M., 2002. Exhumation of metamorphic terranes: introduction. *Mineralogical Magazine*, Volume 66, pp. 1-3.
- Cuthbert, S. & Buckman, J., 2005. Charge contrast imaging of fine-scale microstructure and compositional variation in garnet using the environmental scanning electron microscope. *American Mineralogist*, Volume 90, pp. 701-707.
- Cuthbert, S. & Carswell, D., 1982. Petrology and tectonic setting of eclogites and related rocks from the Dalsfjord area, Sunnfjord, west Norway. *Terra Cognita*, Volume 2, pp. 315-316.
- Cuthbert, S. & Carswell, D., 1990. Formation and exhumation of medium-temperature eclogites in the Scandinavian Caledonides. In: D. Carswell, ed. *Eclogite Facies Rocks*. Glasgow: Blackie & Son Ltd., pp. 180-203.
- Cuthbert, S., Carswell, D., Krogh Ravna, E. & Wain, A., 2000. Eclogites and eclogites in the Western Gneiss Region, Norwegian Caledonides. *Lithos*, Volume 52, pp. 165-196.
- Cuthbert, S., Harvey, M. & Carswell, D., 1981. A plate tectonic model for the Basal Gneiss Complex of western south Norway – A working hypothesis. *Terra Cognita*, Volume 1, pp. 41-42.
- Cuthbert, S., Harvey, M. & Carswell, D., 1983. A tectonic model for the metamorphic evolution of the Basal Gneiss Complex, Western South Norway. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 1, pp. 63-90.
- Cuthbert, S., Qas-Cohen, A., Ballantyne, C., Burgess, R., Droop, G., 2010. *Norwegian garnet websterites: Analogues for mantle metasomatism?* Knoxville, The Geochemical Society, p. A201.
- Cuthbert, S. & Van Roermund, H., 2011. *Monazite U-Pb age spectrum for the Fjortoft diamond-bearing kyanite gneiss, Norway: Pre-Scandian provenance and Scandian decompression melting*. 9th International Eclogite Conference, Marianske Lazne, abstract volume.
- Cuthbert, S. & Włodek, A., 2021. *Granitoid eclogite-facies gneisses in the Western Gneiss Region giant (U)HP terrain, Norway: The role of water and implications for buoyancy during subduction*. Krakow, Polish Mineralogical Society.
- Dallmeyer, R. & Gee, D., 1986. ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral ages from eclogites within the Baltoscandian miogeocline: Implications for a polyphase Caledonian orogenic evolution. *Bulletin of the Geological Society of America*, Volume 97, pp. 26-34.
- De Capitani, C. & Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist*, Volume 95, p. 1006–1016.
- DesOrmeau, J., Gordon, S.M., Kylander-Clark, A.R.C., Hacker, B.R., Bowring, S.A., Schoene, B., Samperton, K.M. 2015. Insights into (U)HP metamorphism of the Western Gneiss Region, Norway: A high-spatial resolution and high-precision zircon study. *Chemical Geology*, Volume 414, pp. 138-155.
- Dobrzhinetskaya, L., Eide, E.A., Larsen, R.B., Sturt, B.A., Tronnes, R.G., Smith, D.C., Taylor, W.R., Posukhova, T.V. 1995. Microdiamond in high-grade metamorphic rocks of the Western Gneiss region, Norway. *Geology*, Volume 23, pp. 597-600.
- Duretz, T., Gerya, T., Kaus, B. & Andersen, T., 2012. Thermo-mechanical modeling of slab exhumation. *Journal of Geophysical Research*, Volume 117, p. B08411.
- Enami, M., Nishiyama, T. & Mouri, T., 2016. Laser Raman microspectrometry of metamorphic quartz: A simple method for comparison of metamorphic pressures. *American Mineralogist*, Volume 92, pp. 1303-1315.

Enea, F., 2012. *Rutile: a new petrogenetic tool to investigate old subduction zones*. Portsmouth: Unpublished PhD thesis, University of Portsmouth.

Enea, F., Cuthbert, S., Storey, C. & Marschall, H., 2014. Trace-element characteristics of rutile in HP-UHP rocks from the Western Gneiss Complex, Norway: implications for element mobility and provenance studies. *Geophysical Research Abstracts*, Volume 16, pp. EGU2014-16347-1.

England, P. & Richardson, S., 1977. The influence of erosion upon the mineral facies of rocks from different metamorphic environments. *Journal of the Geological Society, London*, Volume 134, pp. 201-213.

Eskola, P., 1921. *On the Eclogites of Norway*. *Skr. Norske Vidensk-Akad. i Oslo, Mat-naturv. kl.*, 8, 118 pp.

Essex, R., Gromet, L., Andreasson, P.-G. & Albrecht, L., 1997. Early Ordovician U-Pb metamorphic ages of the eclogite-bearing Seve Nappes, Northern Scandinavian Caledonides. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 15, pp. 665-676.

Faryad, S. W. & Cuthbert, S., 2020. High-temperature overprint in (U)HPM rocks exhumed from subduction zones; A product of isothermal decompression or a consequence of slab break-off (slab rollback)? *Earth-Science Reviews*, Volume 202, p. 103108.

Faryad, S. W. & Ježek, J., 2019. Compositional zoning in garnet and its modification by diffusion during pressure and temperature changes in metamorphic rocks; an approach and software. *Lithos*, Volume 332-333, pp. 287-295.

Faryad, S. W., Kachlik, V., Slama, J. & Jedlicka, R., 2016. Coincidence of gabbro and granulite formation 1 and their implication for Variscan HT metamorphism in the Moldanubian Zone (Bohemian Massif), example from the Kutná Hora Complex. *Lithos*, Volume 264, pp. 56-69.

Fossen, H., 2010. Extensional tectonics in the North Atlantic Caledonides: a regional review. In: R. Law, et al. eds. *Continental tectonics and Mountain Building: The Legacy of Peach and Horne*. London: Geological Society of London, pp. 767-793.

Gal, J., Hursthouse, A. & Cuthbert, S., 2006. Chemical availability of arsenic and antimony in industrial soils. *Environmental Chemistry Letters*, Volume 3, pp. 149-153.

Gal, J., Hursthouse, A. & Cuthbert, S., 2007. Bioavailability of arsenic and antimony in soils from an abandoned mining area, Glendinning (SW Scotland). *Journal of Environmental Science and Health, Part A - Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, Volume 42, pp. 1263-1274.

Gee, D.G., Janak, M., Majka, M., Robinson, P., Van Roermund, H.L.M. 2012. Subduction along and within the Baltoscandian margin during closing of the Iapetus Ocean and Baltica-Laurentia collision. *Lithosphere*, Volume 5, pp. 169-178.

Gee, D., Juhlina, C., Pascal, C. & Robinson, P., 2010. Collisional Orogeny in the Scandinavian Caledonides (COSC). *GFF*, Volume 132, pp. 29-44.

Gee, D. & Stephens, M., 2020. Regional context and tectonostratigraphic framework of the early-middle Paleozoic Caledonide orogen, northwestern Sweden. In: M. Stephens & W. Bergman, eds. *Sweden: Lithotectonic Framework, Tectonic Evolution and Mineral Resources*. Bath: Geological Society of London, pp. 481-494.

Gibbs, A., 1984. Structural evolution of extensional basin margins. *Journal of the Geological Society, London*, Volume 141, pp. 609-620.

Gjelsvik, T., 1951. Metamorphosed dolerites in the gneiss area of Sunnmore on the west coast of southern Norway. *Norges Geologiske Undersøkelse*, Volume 30, pp. 1-45.

Green, D. & Ringwood, A., 1967. An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Volume 31, pp. 767-833.

Griffin, W. & Brueckner, H., 1985. REE, Rb-Sr and Sm-Nd studies of Norwegian eclogites. *Chemical Geology (Isotope Geoscience)*, Volume 52, pp. 249-271.

- Grimmer, J. et al., 2015. Early- to mid-Silurian extrusion wedge tectonics in the central Scandinavian Caledonides. *Geology*, Volume 43, pp. 347-350.
- Grujic, D., 2006. Channel flow and continental collision tectonics: an overview. In: *Channel flow, ductile extrusion and exhumation in continental collision zones*. Bath: Geological Society of London.
- Holland, T. & Powell, R., 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 29, pp. 333-383.
- Hossack, J., 1984. The geometry of listric growth faults in the Devonian basins of Sunnfjord, W Norway. *Journal of the Geological Society, London*, Volume 141, pp. 629-637.
- Hughes, J. et al., 1999. Microstructures in historic Scottish lime mortars. In: M. Jones & R. Wakefield, eds. *Aspects of Stone Weathering, Decay and Conservation: Proceedings of the 1997 Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network Conference*. London: Imperial College Press, pp. 125-137.
- Hughes, J. & Cuthbert, S., 2000. The petrography and microstructure of medieval lime mortars from the west of Scotland: Implications for the formulation of repair and replacement mortars. *Materials & Structures*, Volume 33, pp. 594-600.
- Hughes, J., Cuthbert, S. & Bartos, P., 1999. Alteration textures in historic Scottish lime mortars and the implications for practical mortar analysis. In: J. Larbi, H. Pietersen & H. Janssen, eds. *Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Delft: Delft University of Technology, pp. 417-426.
- Hughes, L., Cuthbert, S.J., Quas-Cohen, A., Ruzie-Hamilton, L., Pawley, A., Droop, G., Lyon, I., Tartese, R., Burgess, R. 2021. Halogens in Eclogite Facies Minerals from the Western Gneiss Region, Norway. *Minerals*, Volume 11, p. 760.
- Johnston, S., Hacker, B. & Ducea, M., 2007. Exhumation of ultrahigh-pressure rocks beneath the Hornelen segment of the Nordfjord-Sogn Detachment Zone, western Norway. *Geological Society of America Bulletin*, Volume 119, pp. 1232-1248.
- Kamo, S., Corfu, F., Heaman, L. & Moser, D., 2011. The Krogh revolution: advances in the measurement of time. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Volume 48, p. 87-94.
- Kemp, A., Hawsworth, C., Paterson, B. & Kinny, P., 2006. Episodic growth of the Gondwana Supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon. *Nature*, Volume 439, pp. 580-583.
- Klonowska, I. et al., 2017. Microdiamond on Areskutan confirms regional UHP metamorphism in the Seve Nappe Complex of the Scandinavian Caledonides. *Journal of Metamorphic Geology*, p. doi:10.1111/jmg.12244.
- Klonowska, I., Majka, J., Janak, M., Petrik, I., Froitzheim, N., Gee, D.G., Cuthbert, S. 2021. Comment on the paper: "Evolution of a gneiss in the Seve nappe complex of central Sweden – Hints at an early Caledonian, medium-pressure metamorphism" by Li et al. (2020). *Lithos*, Volume 400-401, p. 106067.
- Krogh, E., 1977. Evidence for a Precambrian continent-continent collision in Western Norway. *Nature*, Volume 267, pp. 17-19.
- Krogh-Ravna, E. & Terry, M., 2004. Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists – an evaluation of equilibria among garnet–clinopyroxene–kyanite–phengite–coesite/quartz. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 22, pp. 579-592.
- Krogh, T., Mysen, B. & Davis, G., 1974. A Paleozoic age for the primary minerals of a Norwegian eclogite. *Annual Report of the Geophysical Laboratory. Carnegie Institution, Washington*, Volume 73, pp. 575-576.
- Lanari, et al., 2014. XMapTools: A MATLAB©-based program for electron microprobe X-ray imageprocessing and geothermobarometry. *Computers & Geosciences*, Volume 62, pp. 227-240.
- Larikova, T. & Cuthbert, S., 2019. Evidence for partial melting in eclogite from the Western Gneiss

Region, Norwegian Caledonides, and comparison with partial melting experiments. In: C. Mattinson, et al. eds. *Abstract volume of the 13th International Eclogite Conference*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Institute of Geology.

Leslie, A. et al., 2013. The Dalradian rocks of the northern Grampian Highlands of Scotland. *Proceedings of the Geologists' Association*, Volume 124, pp. 263-317.

Lister, G. & Davis, G., 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U.S.A. *Journal of Structural Geology*, Volume 1/2, pp. 65-94.

Lorenz, H. et al., 2015. COSC-1 – drilling of a subduction-related allochthon in the Palaeozoic Caledonide orogen of Scandinavia. *Scientific Drilling*, Volume 19, pp. 1-11.

Mørk, M., Kullerud, K. & Stabel, A., 1988. Sm-Nd dating of Seve eclogites, Norrbotten, Sweden - Evidence for early Caledonian (505 Ma) subduction. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, Volume 99, pp. 344-351.

Majka, J. et al., 2014. Microdiamond discovered in the Seve Nappe (Scandinavian Caledonides) and its exhumation by the “vacuum-cleaner” mechanism. *Geology*, Volume 42, p. 1107–1110.

Medaris, L. & Wang, H., 1986. A thermal-tectonic model for high-pressure rocks in the Basal Gneiss Complex of western Norway. *Lithos*, Volume 19, pp. 299-315.

Merrill, C. & Turner, G., 1966. Potassium-argon dating by activation with fast neutrons. *Journal of Geophysical Research*, Volume 71, pp. 2852-2857.

Milnes, A., Wennberg, O., Skar, O. & Koestler, A., 1997. Contraction, extension and timing in the southern Norwegian Caledonides: The Sognefjord transect. In: J. Burg & M. Ford, eds. *Orogeny Through Time. Geological Society, London, Special Publication 121*. London: Geological Society of London, pp. 123-148.

Nganje, T., Edet, A., Cuthbert, S. & Adamu, C., 2020. The concentration, distribution and health risk from potentially toxic elements in the soil - plant - water system developed on black shales in SE Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, Volume 165, p. 103806.

Norton, M., 1987. The Nordfjord-Sogn Detachment, W. Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, Volume 67, pp. 93-106.

Norton, M., Wilks, W. & Cuthbert, S., 1990. Discussion on - Palaeomagnetism, magnetic fabrics and the structural style of the Hornelen Old Red Sandstone, Western Norway. *Journal of the Geological Society, London*, Volume 147, pp. 411-416.

Peacock, S. et al., 2005. Thermal structure of the Costa Rica-Nicaragua subduction zone. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, Volume 149, pp. 187-200.

Pilitsyna, A., Tretyakov, A.A., Degtyarev, K.E., Alifirova, T.A., Batanova, V.G., Cuthbert, S. J., Kovalchuk, E.V., Ermolaev, B.V. 2018. Multi-stage evolution and protolith reconstruction of spinel-bearing and symplectite-bearing ultramafic rocks in the Zeltau Massif, Southern Kazakhstan (Central Asian Orogenic Belt). *Gondwana Research*, Volume 64, pp. 11-34.

Pilitsyna, A., Tretyakov, A.A., Degtyarev, K.E., Cuthbert, S. J., Batanova, V.G., Kovalchuk, E.V. 2018. Eclogites and garnet clinopyroxenites in the Anrakhai Complex, Central Asian Orogenic Belt, Southern Kazakhstan: P-T evolution, protoliths and some geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 153, pp. 325-345.

Platt, J. & Vissers, R., 1989. Extensional collapse of thickened continental lithosphere: A working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar arc. *Geology*, Volume 17, p. 540–543.

Polson, E. J., Buckman, J. O., Bowen, D., Todd, A. C., Gow, M. M. & Cuthbert, S. J. 2010. An environmental-scanning-electron-microscope investigation into the effect of biofilm on the wettability of quartz. *SPE Journal*, Issue March 2010, pp. 223-227.

Powell, R. & Holland, T., 1985. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 1. Methods and a worked example. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 3,

pp. 327-342.

Powell, R. & Holland, T., 1988. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 6, pp. 173-204.

Reverdatto, V., Selyatitskiy, Carswell, D.A., 2008. Geochemical distinctions between “crustal” and mantle-derived peridotites/pyroxenites in high/ultrahigh pressure metamorphic complexes. *Russian Geology and Geophysics*, Volume 49, pp. 73-90.

Rice, S., Cuthbert, S., Hursthouse, A., 2018. Tectono-magmatic controls of post-subduction gold mineralisation during late Caledonian soft continental collision in the Southern Uplands-Down-Longford Terrane, Britain and Ireland: a review. *Ore Geology Reviews*, Volume 101, pp. 74-104.

Richardson, S. & England, P., 1979. Metamorphic consequences of crustal eclogite production. In: overthrust orogenic zones. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 42, pp. 183-190.

Rogers, K., Hursthouse, A., Cuthbert, S., 2015. The Potential of Sequential Extraction in the Characterisation and Management of Wastes from Steel Processing: A Prospective Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Volume 12, pp. 111724-111755.

Rogers, K., McLellan, I., Cuthbert, S., Hursthouse, A., 2019. Enhanced characterisation for the management of industrial steel processing by products: potential of sequential chemical extraction. *Environmental Monitoring & Assessment*, Volume 191, p. 192.

Rodgers, K., McLellan, I., Cuthbert, S., Masaguer Torres, V. & Hursthouse, A. 2019. The Potential of Remedial Techniques for Hazard Reduction of Steel Process by Products: Impact on Steel Processing, Waste Management, the Environment and Risk to Human Health. *Journal of Environmental Research and Public Health*, Volume 16, p. 2093.

Schmitt, A. & Vazquez, J., 2017. Secondary ion mass spectrometry analysis in petrochronology. In: M. Kohn, M. Engi & P. Lanari, eds. *Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy & Geochemistry Volume 83*. Washington DC: Mineralogical Society of America, pp. 199-230.

Searle, M., Elliott, R. & Chung, S.-L., 2011. Crustal-lithospheric structure and continental extrusion of Tibet. *Journal of the Geological Society of London*, Volume 168, pp. 633-672.

Simpson, A. et al., 2021. In-situ Lu–Hf geochronology of garnet, apatite and xenotime by LA ICP MS/MS. *Chemical Geology*, Volume 577, p. 120299.

Slagstad, T. & Kirkland, C., 2017. Timing of collision initiation and location of the Scandian orogenic suture in the Scandinavian Caledonides. *Terra Nova*, Volume 30, pp. 179-188.

Smith, D., 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, Volume 310, pp. 641-644.

Spear, F., 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Washington D.C.: Mineralogical Society of America.

Storey, C., 2008a. The Glenelg-Attadale Inlier, NW Scotland, with emphasis on the Precambrian high-pressure metamorphic history and subsequent retrogression: an introduction and review. *Scottish Journal of Geology*, Volume 44, pp. 1-16.

Storey, C., 2008b. field guide to the Glenelg-Attadale Inlier, NW Scotland, with emphasis on the Precambrian high-pressure metamorphic history and subsequent retrogression. *Scottish Journal of Geology*, Volume 44, pp. 17-34.

Templeton, J., 2015. *Structural Evolution of the Hornelen Basin (Devonian, Norway) from Detrital Thermochronology*. New York: Unpublished PhD Thesis, Columbia University.

Terry, M., Robinson, P. & Krogh-Ravna, E., 2000. Kyanite eclogite thermobarometry and evidence for thrusting of UHP over HP metamorphic rocks, Nord yane, Western Gneiss Region, Norway. *American Mineralogist*, Volume 85, p. 1637 – 1650.

Vrijmoed, J. et al., 2013. Metasomatism in the Ultrahigh-pressure Svartberget Garnet-peridotite (Western Gneiss Region, Norway): Implications for the Transport of Crust-derived Fluids within the Mantle. *Journal of Petrology*, Volume 54, pp. 1815-1848.

Vrijmoed, J., Van Roermund, H. & Davies, G., 2006. Evidence for diamond-grade ultra-high pressure metamorphism and fluid interaction in the Svartberget Fe^{Ti} garnet peridotite-websterite body, Western Gneiss Region, Norway. *Mineralogy and Petrology*, Volume 88, pp. 381-405.

Walczak, K. Cuthbert, S., Kooijman, E. K., Majka, J. & Smit, M., 2019. U–Pb zircon age dating of diamond-bearing gneiss from Fjortoft reveals repeated burial of the Baltoscandian margin during the Caledonian Orogeny. *Geological Magazine*, Volume 156, pp. 1949-1964.

Webster, R., 1992. *Stone cleaning and the nature, soiling and decay mechanisms of stone: Proceedings of the International Conference held in Edinburgh, UK, 14-16 April 1992*. s.l.: Routledge.

Welton, R., 2003. *Algal degradation of natural stone masonry: implications for conservation and construction*. Paisley: Unpublished PhD thesis, University of Paisley.

Welton, R. et al., 2003. A preliminary study of the phycological degradation of natural stone masonry. *Environmental Geochemistry and Health*, Volume 25, pp. 139-145.

White, R.W., Powell, R., Holland, T. J. B., Johnson, T. E., Green, E. C. R., 2014. New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, Volume 32, p. 261–286.

Wilks, W. & Cuthbert, S., 1994. The evolution of the Hornelen Basin detachment system, western Norway: implications for the style of late orogenic extension in the southern Scandinavian Caledonides. *Tectonophysics*, Volume 238, pp. 1-30.

Young, D., 2018. Structure of the (ultra)high-pressure Western Gneiss Region, Norway: Imbrication during Caledonian continental margin subduction. *Geological Society of America Bulletin*, Volume 130, p. 926–940.

Zack, T. & Kooijman, E., 2017. Petrochronology and geochronology of rutile. In: M. Kohn, M. Engi & P. Lanari, eds. *Petrochronology: Methods and Applications. Reviews in Mineralogy & Geochemistry Volume 83*. Washington DC: Mineralogical Society of America, pp. 443-467.

Zhang, C., Van Roermund, H. & Zhang, L., 2011. Orogenic garnet peridotites: Tools to reconstruct paleo-geodynamic settings of fossil continental collision zones. In: L. Dobrzhinetskaya, S. W. Faryad, S. Wallis & S. Cuthbert, eds. *Ultrahigh-pressure Metamorphism: 25 years After the Discovery of Coesite and Diamond*. London: Elsevier Insights, pp. 501-540.

Zheng, Y.-F., Zhang, L., McLelland, W. & Cuthbert, S., 2012. Processes in continental collision zones: Preface. *Lithos*, Volume 136-139, pp. 1-9.

Zurakowska, M., 2015. *Stone decay in cleaned and non-cleaned sandstone buildings in west Scotland*. Paisley: Unpublished PhD thesis, University of the West of Scotland.

.....
(Applicant's signature)