



Zakład Mineralogii i Petrologii

dr hab. Marek Awdankiewicz, prof. UWr

Wrocław, 22.05.2023 r.

Recenzja**rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Pieterka pt.****"Rekonstrukcja systemów magmowych wielkiej prowincji wulkanicznej Tharsis w kontekście przyszłych badań nad dystrybucją mineralizacji rudnej na Marsie"**

Recenzja ww. rozprawy doktorskiej wykonana została na podstawie pisma Przewodniczącego Rady naukowej dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu prof. dr hab. Grzegorza Rachlewicza z dnia 05.05.2023 r.

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Pieterka przygotowana została w Instytucie Geologii Uniwersytetu im Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Muszyńskiego (UAM) oraz dr Jakuba Ciążeli (CBK PAN) w oparciu o trzy publikacje naukowe. Rozprawa przedłożona jest w formie manuskryptu o łącznej objętości 197 stron. Manuskrypt składa się z dwóch zasadniczych części. W pierwszej, liczącej 60 stron, zawarte są streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim, a kolejne rozdziały przedstawiają wprowadzenie w problematykę, omówieni źródeł danych i metod badań, omówienie najważniejszych wyników, następnie wnioski oraz bibliografię. W dalszej części manuskrypt zawiera oświadczenia dotyczące zakresu i udziału Doktoranta i współautorów w przygotowaniu poszczególnych publikacji. Drugą, dominującą objętościowo część manuskryptu (137 stron) stanowią załączniki. Są to publikacje wchodzące w skład rozprawy - ich pełne wersje wraz z obszernymi materiałami uzupełniającymi i dokumentującymi wykonane badania (mapy, fotografie, wykresy itd.).

Kluczową częścią rozprawy są trzy recenzowane artykuły naukowe w języku angielskim, wszystkie opublikowane 2022 r. w czasopismach z listy JCR. Są to następujące prace:

1. Pieterek, B., Ciążela, J., Lagain, A., Ciążela, M. (2022). Late Amazonian dike-fed parasitic volcanism in the Tharsis volcanic province on Mars. *Icarus*, vol. 386, 115151. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115151>
2. Pieterek, B., Laban, M., Ciążela, J., Muszyński, A. (2022). Explosive volcanism in Noctis Fossae region on Mars. *Icarus*, vol. 375, 114851. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114851>

3. Ciążela, J., Bakala, J., Kowalinski, M., Plocieniak, S., Zalewska, N., Pieterek, B., Mrozek, T., Ciążela, M., Paslawski, G., Steslicki, M., Szaforz, Z., Barylak, J., Kuzaj, M., Maturilli, A., Helbert, J., Muszyński, A., Rataj, M., Gburek, S., Józefowicz, M., Marciniak, D. (2022). Concept and design of Martian far-IR ORE Spectrometer (MIRORES). *Remote Sensing*, 14, 2799. <https://doi.org/10.3390/rs14122799>

Łączny współczynnik wpływu tych artykułów wynosi 12.663 (2022 r.), a suma punktów MEiN jest równa 380. Czasopisma, w których ukazały się publikacje, to uznane periodyki o międzynarodowej randze, co odzwierciedlają ich wysokie wskaźniki bibliometryczne. Dwa pierwsze artykuły przygotowane zostały w czteroosobowych zespołach, w których Doktorant był pierwszym autorem. Zgodnie z oświadczeniami współautorów, Doktorant odegrał dominującą rolę w przygotowaniu tych publikacji: uczestniczył we wszystkich etapach badań, koordynował badania, uczestniczył w interpretacji i dyskusji wyników jako autor istotnych koncepcji, przygotował ryciny, tabele, załączniki, odpowiadał za przygotowanie manuskryptu i uczestniczył we wszystkich etapach procesu publikacyjnego, w tym jako autor korespondencyjny. Trzecią publikację przygotował zespół 20 autorów, na obszernej liście autorów Doktorant jest wymieniony jako szósty. Zgodnie z oświadczeniami współautorów, Doktorant był ważnym członkiem zespołu przygotowującego artykuł: brał udział w wytypowaniu perspektywicznych obszarów badawczych, w opracowaniu i przygotowaniu charakterystyki spektralnej siarczków i krzemianów, odpowiadał za przygotowanie referencyjnej próbki pirytu, miał znaczący udział w przygotowaniu większości ilustracji, wniósł cenne uwagi merytoryczne w toku edycji tekstu. Przedstawione oświadczenia potwierdzają wiodącą rolę Doktoranta w przygotowaniu rozprawy, jak też dokumentują jego kompetencje w zakresie efektywnej pracy zespołach badawczych.

Pierwszą część rozprawy stanowi „Wprowadzenie”, w którym Doktorant przedstawia szersze tło rozprawy, poruszając zagadnienia takie, jak rola procesów wulkanizmu w ewolucji planet i Marsa, wiek wulkanizmu na Marsie, sondy marsjańskie, woda na Marsie, zasoby mineralne Marsa. W tym kontekście przedstawia koncepcję pracy - poprzez badania systemów magmowych wytypowanie możliwych stref występowania hydrotermalnej mineralizacji rudnej i dalej poszukiwania tej mineralizacji przy pomocy nowego typu spektrometru. Dalej sformułowane są trzy problemy badawcze obejmujące: 1) związki między aktywnością dużych wulkanów centralnych a wulkanizmem rozproszonym w prowincji Tharsis, 2) charakterystykę i genezę pola wulkanicznego Noctis Fossae oraz wchodzących w jego skład wulkanów, 3) określenie perspektywicznych obszarów występowania mineralizacji siarczkowej dla dalszych badań spektroskopowych. Dalej Doktorant omawia przebieg badań i przygotowania publikacji, wskazując na swoją rolę w realizacji poszczególnych etapów. Przedstawiona przez Doktoranta koncepcja pracy dotyczy istotnych problemów naukowych, a proponowane ujęcie łączy aspekty czysto naukowe z aplikacyjnymi.

W kolejnym, krótkim rozdziale zawarty jest słownik objaśniający skróty nazw sond marsjańskich i zainstalowanych na nich instrumentów, jak też okresów w historii geologicznej Marsa.

Rozdział 3 zatytułowany „Charakterystyka obszaru badań” omawia ważniejsze zagadnienia dotyczące prowincji Tharsis w globalnym kontekście geologicznym na podstawie wybranych, ważniejszych publikacji z

okresu ostatnich kilkunastu lat. Poruszana problematyka dotyczy budowy wewnętrznej Marsa, głównych cech morfologicznych powierzchni planety, globalnych procesów tektonicznych i ich ewolucji, stratygrafii Marsa. Szczególna uwaga poświęcona jest aktywności magmowej i wulkanizmowi tego obszaru, w tym wielkim wulkanom centralnym, mniejszym, rozproszonym strukturom wulkanicznym, jak również drobnym formom wulkanicznym (kanały lawowe, tunele lawowe). Przedstawione są też zagadnienia dotyczące składu mineralnego skał wulkanicznych prowincji Tharis (występowanie oliwinów oraz piroksenów zarówno bogatych, jak i ubogich w Ca) i zmian tego składu w czasie. Dostępczo omawiana jest metoda określania wieku poprzez zliczenia kraterów. Prezentowane zagadnienia są zilustrowane przez zaczerpnięte z cytowanej literatury, częściowo zmienione, mapy topograficzne i geologiczne Marsa oraz zestawienia danych stratygraficznych i chronologicznych. Ten rozdział rozprawy wskazuje na odpowiednie wykorzystanie przez Doktoranta bogatej literatury przedmiotu i jego wiedzę w zakresie geologii i wulkanizmu Marsa. Natomiast z punktu widzenia struktury rozprawy omówienie sposobu datowania powierzchni Marsa poprzez zliczanie kraterów bardziej pasowałyby do kolejnego rozdziału.

Rozdział 4 dotyczy metodyki badań. Scharakteryzowane są źródła danych: fotografie i pomiary topograficzne powierzchni wykonane ze sztucznych satelitów Marsa i udostępnionych przez agencje kosmiczne w domenę publicznej, oraz możliwości i sposób ich wykorzystania w zależności od rozdzielczości. Przedstawiona jest metodyka pomiarów morfometrycznych stożków wulkanicznych oraz metody analizy orientacji struktur liniowych. Scharakteryzowano też w zarysie metodykę datowania powierzchni Marsa. Przedstawione jest specjalistyczne oprogramowanie zastosowane przy poszczególnych etapach badań. Omówiona metodyka badań nie budzi zastrzeżeń, zastosowane metody wzajemnie uzupełniają się i pozwalają na kompleksową charakterystykę struktur wulkanicznych, a dobór metod jest odpowiedni dla zakładanych celów pracy.

Kolejny rozdział 5 przedstawia zasadnicze wyniki badań i interpretacje zawarte w poszczególnych publikacjach. Pierwszy artykuł o charakterze regionalnym dotyczy genezy i wieku rozproszonego wulkanizmu w regionie Tharsis oraz związku rozpowszechnionych w regionie małych wulkanów z głównymi wulkanami centralnymi. Zidentyfikowano 659 budowli wulkanicznych o średnicy >1km, poddano analizie ich rozmieszczenie, wydłużenie kraterów szczytowych oraz określono wiek metodą zliczania kraterów. Nierównomierne rozmieszczenie małych wulkanów pozwoliło wydzielić 6 subprowincji wulkanizmu, a rozmieszczenie wulkanów powiązano z systemami dajek radialnych i koncentrycznych zasilanych z systemów magmowych sześciu głównych wulkanów centralnych prowincji Tharsis. Podobny lub młodszy wiek małych wulkanów i kalder szczytowych dużych wulkanów centralnych, potwierdza, zdaniem autorów, ich przynależność do wspólnego systemu magmowego, przy czym wulkanizm rozproszony pozostawał aktywny po ustaniu erupcji wulkanów centralnych. Wskazano też, że względnie młody wiek analizowanego wulkanizmu mógł być odpowiedzialny za aktywność hydrotermalną związaną z oddziaływaniem magmawoda.

W drugiej publikacji szczegółowej analizie poddane zostało jedno z pól wulkanicznych regionu Tharsis: pole Noctis Fossae. Ta publikacja podejmuje problem słabo rozpoznanego eksplozyjnego wulkanizmu na Marsie. Zidentyfikowano 25 stożków wulkanicznych o różnym stopniu zachowania, od silnie zerodowanych do dobrze zachowanych. Na podstawie danych morfometrycznych stwierdzono, że są to stożki scoria. Rozpoznano towarzyszące im potoki lawowe. Datowania wykazały ich zmienny wiek od ponad 300 Ma na południu i w centrum pola wulkanicznego do 200-50 Ma na północy. Wynik taki dokumentuje długotrwałą aktywność wulkaniczną obszaru, jak też wskazuje, że badane pole wulkaniczne należy do najmłodszych w rejonie Tharsis. Dyskutowanych jest szereg aspektów genetycznych, jak relacja czasowa między wulkanizmem a rozwojem rowów tektonicznych w regionie, prawdopodobny związek źródeł magmy z wulkanami Tharsis Montes, przyczyny eksplozyjności wulkanizmu i możliwa rola dla aktywności hydrotermalnej w regionie. Ponadto interpretacje zaprezentowane tym artykule przedyskutowane zostały w świetle najnowszych publikacji innych zespołów badawczych z 2023 r. W tych ostatnich pracach wykazane zostało występowanie wglębnych stref wzbogaconych w stop (magnę) pod niektórymi częściami prowincji Tharsis, m.in. pod badanym polem wulkanicznym Noctis Fossae, co jest spójne z określonym przez Doktoranta młodym wiekiem badanych stożków wulkanicznych.

Przedmiotem trzeciej pracy jest koncepcja i projekt spektrometru podczerwieni przeznaczonego do wykrywania i badania globalnego rozmieszczenia na powierzchni Marsa siarczków, w szczególności Cu i Fe (piryt, chalkopiryt i markasyt). Wymienione minerały należą do najbardziej rozpowszechnianych siarczków i są częstym składnikiem siarczkowych rud metali, w tym metali szlachetnych. Spektrometr zainstalowany na pokładzie Mars Reconnaissance Orbiter nie jest najlepszym przyrządem dla planowanych badań ze względu na niską rozdzielczość oraz pracę w zakresie spektralnym, w którym pasma absorpcyjne siarczków są maskowane przez krzemiany. Projektowany spektrometr, określony akronimem MIRORES (Martian far-IR Ore Spectrometer), ma pracować w zakresie dalekiej podczerwieni, co umożliwi efektywne wykrywanie siarczków wykazujących charakterystyczne cechy widma w zakresie 23-28 μm , w którym nie zachodzi nakładanie z widmami piroksenów, powszechnych w skałach Marsa. Ma przy tym posiadać niewielkie rozmiary i masę umożliwiające umieszczenie na mikrosatelicie Marsa. Zdaniem autorów, projekt ma szczególne znaczenie w kontekście wyboru celów przyszłych misji eksploracyjnych, kolonizacji Marsa, możliwości rozpoznania siarczkowych złóż metali. Ponadto wyniki zaprezentowane w publikacjach 1 i 2 wykorzystano do wskazania obszarów wulkanizmu rozproszonego jako potencjalnych celów poszukiwań siarczków. Aplikacyjny wątek jest aktualnie rozwijamy poprzez realizację projektów finansowanych przez Europejską Agencję Kosmiczną i Polską Agencję Kosmiczną.

W końcowej części rozprawy w rozdziale 6 zawarte są wnioski. Najważniejsze z nich dotyczą związków przestrzennych i czasowych wulkanizmu rozproszonego z wulkanami centralnymi, funkcjonowania systemów magmowych regionu Tharsis, wulkanizmu eksplozyjnego, wieku wulkanizmu i możliwości wznowienia aktywności w tym obszarze, oraz perspektyw poszukiwań mineralizacji siarczkowej, uwarunkowanych młodym wiekiem wulkanizmu, urozmaiconą rzeźbą terenu i brakiem pokrywy młodszych

skał osadowych. Podsumowując omówione wyniki badań i aspekty merytoryczne można stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska w istotny sposób pogłębia wiedzę o aktywności wulkanicznej na Marsie, szczególnie w odniesieniu do prowincji Tharsis, oraz wiedzę dotyczącą występowania i roli wulkanizmu eksplozyjnego na Czerwonej Planecie. Istotne są też wyniki aplikacyjne, przyczyniające się do rozwoju instrumentów satelitarnych oraz rozwoju koncepcji górnictwa kosmicznego.

Rozprawa nie jest wolna od pewnych wad o charakterze edytorskim i językowym. M.in tytuł głównej części manuskryptu „Streszczenie rozprawy doktorskiej” wydaje się nie całkiem trafny, lepiej byłoby tą część zatytułować „Główne tezy rozprawy doktorskiej” lub podobnie. Tekst rozprawy zawiera miejscami powtórzenia, np. dotyczące stratygrafii Marsa (w słowniku oraz w charakterystyce obszaru badań), metodyki datowań (częściowo w charakterystyce obszaru badań, częściowo w metodach badań), problematyki badań (we wprowadzeniu i w wynikach badań). Tekst manuskryptu jest, generalnie, starannie przygotowany i przejrzysty, jakkolwiek miejscami można spotkać nieprecyzyjne czy niejasne sformułowania (np. na s. 14 „Zróźnicowanie cech morfologicznych różnych stylów erupcji” - erupcje nie mają cech morfologicznych, chodzi zapewne o morfologię wulkanów czy stożków wulkanicznych) lub inne błędy językowe (np. sformułowania typu: „na podstawie obserwacji zaobserwowano...” czy „zliczanie prowadzono z wykorzystaniem programu, który wykorzystano do zaliczeń”). Wśród potknięć stylistycznych wymienić można trzykrotne powtórzenie przymiotnika „kluczowy” w pierwszych zdaniach streszczenia. Rzadko napotkać można niejasności merytoryczne, np. na str. 25 słabo zrozumiałe są objaśnienia dotyczące współczynnika impaktowego. Wymienione wady mają jednak niewielkie znaczenie w zestawieniu z ogólnie przejrzystym układem i językiem rozprawy.

Prezentowane w rozprawie wnioski skłaniają do stawiania kolejnych pytań do tyczących aktywności wulkanicznej na Marsie. Chodzi np. o podobieństwa lub różnice w przebiegu procesów magmowych i wulkanizmu na Marsie i Ziemi oraz o interpretację niektórych bardziej szczegółowych aspektów wulkanizmu marsjańskiego. Można wskazać dwa zagadnienia.

Pola wulkaniczne na Ziemi, szczególnie tzw. monogenetyczne pola wulkaniczne, których zasadniczym elementem są bazaltowe stożki scoria, w warunkach ziemskich zwykle rozwijają się bez związków z wulkanami centralnymi, a ich specyfika wynika z odmiennego sposobu zasilania przez magmę (epizodyczna dostawa małych porcji stopu w polach wulkanicznych oraz bardziej ciągła dostawa większych ilości stopu w przypadku wulkanów centralnych). Natomiast przedstawione w rozprawie wyniki wskazują, że pola wulkaniczne prowincji Tharsis funkcjonowały w ścisłym powiązaniu z wielkimi wulkanami centralnymi regionu. Można rozważać, czy oznacza to, że systemy magmowe na Marsie funkcjonują inaczej niż ziemskie, czy też ta interpretacja wynika z bardziej ogólnego charakteru danych dostępnych dla wulkanizmu na Marsie.

Z problemów bardziej szczegółowych w rozprawie dyskutowane są m.in. możliwe przyczyny wulkanizmu eksplozyjnego i geneza stożków scoria w polu wulkanicznym Noctis Fossae. Wydaje się, że żadna z proponowanych koncepcji nie wyjaśnia jednoznacznie tego problemu. Np. w efekcie dyferencjacji magmy (w wyniku frakcjonalnej krystalizacji lub asymilacji skał skorupy Marsa) należałoby oczekiwać wzbogacenia

magmy nie tylko w składniki lotne, ale i w krzemionkę, i konsekwencji erupcji magmy o składzie np. bazaltowych andezytów, a nie bazaltów. Czy są jednak dane, np. spektroskopowe, umożliwiające weryfikację tej możliwości? Z kolei trzeci z rozważanych w rozprawie mechanizmów aktywności eksplozyjnej (interakcja magmy ze zmarzliną pod powierzchnią Marsa) powinna skutkować nie tylko eksplozywnością, ale i zmianą stylu erupcji z magmowego na freatomagmowy, czego efektem z kolei byłoby powstanie nie stożków scoria, lecz innego typu stożków piroklastycznych: na Ziemi byłyby to tzw. pierścienie tufowe. Takie jednak, jak dotąd, nie zostały rozpoznane na obszarze Noctis Fossae.

Wskazane powyżej problemy i pytania nie mają charakteru krytyki tez przedstawionych w rozprawie, lecz stanowią element dyskusji naukowej.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi skłaniają do jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Pieterka. Praca jest kompletna, zawiera wszystkie części i elementy, które powinny charakteryzować rozprawę naukową. Publikacje naukowe składające się na rozprawę ukazały się w renomowanych czasopismach międzynarodowych, a udział Doktoranta w ich przygotowaniu był wiodący (dwie publikacje) lub bardzo istotny (trzecia publikacja). Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień żywo dyskutowanych we współczesnej nauce. Opublikowane artykuły i rozprawa charakteryzują się wysoką wartością merytoryczną. Wyniki dostarczają nowych danych dotyczących wulkanizmu w prowincji Tharsis oraz nowych danych o wciąż słabo poznanym wulkanizmie eksplozyjnym na Marsie. Wyniki rozprawy mają również silnie znaczący aspekt aplikacyjny (projekt spektrometru MIRORES oraz wskazanie perspektywicznych obszarów badań). Rozprawa jest starannie przygotowana, drobne usterki edytorskie czy językowe mają drugorzędne znaczenie.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Pieterka stanowi oryginalne osiągnięcie badawcze, podejmujące zagadnienia zarówno o charakterze przyrodniczym, jak i aplikacyjnym. Doktorant zrealizował cel pracy, posiada wiedzę i umiejętności w zakresie prowadzenia badań i rozwiązywania problemów naukowych oraz opracowania wyników i przygotowania wartościowych publikacji. Osiągnięte wyniki stanowią istotny wkład do rozwoju nauki i uznać można je za ponadprzeciętne. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.- Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018,poz 1668, w tym art. 187, z późniejszymi zmianami). Przedkładam zatem wniosek do Rady naukowej dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu o dopuszczenia mgr inż. Bartosza Pieterka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Składam również wniosek o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.

Marek Andarsiewicz