

Nowe podejście do zrozumienia aktywności wulkanicznej na ciałach planetarnych

Dr Sam Poppe

Centrum Badań Kosmicznych
Polskiej Akademii Nauk

FEBRUARY 2024


doi.org/10.33548/SCIENTIA999



EARTH & ENVIRONMENTAL
SCIENCES

 Scientia





Nowe podejście do zrozumienia aktywności wulkanicznej na ciałach planetarnych

Zrozumienie, w jaki sposób podpowierzchniowa aktywność magmowa wpływa na skorupę ziemską, ma kluczowe znaczenie dla dokładnego prognozowania erupcji wulkanów. **Dr Sam Poppe** i jego zespół z Centrum Badań Kosmicznych PAN opracowali wielometodyczne podejście łączące skalowane modele laboratoryjne, badania terenowe, obserwacje innych ciał planetarnych i modele numeryczne w celu określenia wpływu dynamiki wypierania magmy na skorupę ciał planetarnych, takich jak Ziemia, Księżyc i Mars. Dzięki lepszemu zrozumieniu mechaniki wulkanów, ich praca może poprawić przewidywanie erupcji na Ziemi i zrozumienie przeszłej aktywności wulkanicznej na otaczających nas księżycach i planetach.

Zrozumienie zagrożeń związanych z wulkanami

Wulkany to miejsca na powierzchni planety, przez które wydostaje się lawa oraz materiały wulkaniczne takie jak popiół i gazy. Ziemia składa się ze stałego żelaznego jądra wewnętrznego, płynnego żelaznego jądra zewnętrznego, głównie stałej warstwy płaszcza skalnego i stałej skorupy. Tam, gdzie warunki w płaszczu lub skorupie sprzyjają obecności stopionej skały, tworzą się plamy niezwykle gorącej płynnej skały (magmy). Magma ta może przedostać się do skorupy ziemskiej, a następnie zestalić się na płytszych poziomach lub wydostać się na powierzchnię i spowodować erupcję wulkanu.

Zrozumienie dynamiki zbiorników magmy i ruchów podpowierzchniowych pod skorupą jest niezbędne do stworzenia dokładnego obrazu czasu i nasilenia epizodów wzburzenia i erupcji, umożliwiając nam prognozowanie i, co najważniejsze, łagodzenie zagrożeń, jakie aktywność wulkaniczna stanowi dla ludności.

Dynamika magmy pod powierzchnią planet

Ruch magmy może wpływać na powierzchnię planety na wiele sposobów. Gdy magma wypychana jest w górę przez skorupę skalistego ciała planetarnego, często ochładza się i krzepnie, zanim dotrze do powierzchni.

W takim przypadku poziomo rozprzestrzeniająca się magma rozdziela warstwy skalne i może stać się grubszą partią magmy o kopolastym wierzchołku i płaskiej podstawie, znaną jako lakolit. Naukowcy najczęściej badają lakolity na Ziemi poprzez obserwacje terenowe na nieaktywnych i odsłoniętych wulkanach.

Pęknięte kratery na Księżycu

Badanie lakolitów na dobrze zachowanych i niezerodowanych powierzchniach innych ciał planetarnych pozwala naukowcom lepiej zrozumieć aktywne wulkany na Ziemi. Na dnie kraterów uderzeniowych na ciałach skalistych, takich jak Księżyc czy Mars, zaobserwowano pęknięcia i wybrzuszenia, które przypisano płytkim lakolitom pod powierzchnią. Jednak brak danych podpowierzchniowych sprawia, że ich pochodzenie jest nadal słabo poznane. Ponieważ kratery z pęknięciami dna na powierzchni Księżyca można obserwować tylko z kosmosu, naukowcy muszą polegać na modelach, aby ilościowo zbadać deformację skorupy.

Naukowcy opracowali różne modele, aby zrozumieć procesy zachodzące pod powierzchnią ciał planetarnych. Modele te zakładają jednak, że warstwy skalne są elastyczne (materiały, które nie odkształcają się trwale) i wykazują liniową zależność między naprężeniem (siła przyłożona do materiału na określonym obszarze) a odkształceniem (spowodowanym przyłożoną siłą).

Ponieważ obserwowane na Ziemi deformacje wywołane przez magmę są często nieelastyczne, gdyż występuje trwałe odkształcenie warstwy skalnej, a architektura intruzji magmy może być zróżnicowana i złożona, prowadzi to do niedopasowania dostępnych modeli do rzeczywistych efektów i utrudnia stworzenie dokładnego obrazu intruzji magmy. Niewielu badaczy opracowało modele numeryczne w celu określenia, w jaki sposób nieelastyczne zmiany wywołane przez magmę wpływają na wzorce deformacji powierzchni, a jak dotąd żaden z nich nie został zastosowany do kraterów księżycowych i marsjańskich.



Małe wulkany w laboratorium

Dr Sam Poppe i jego zespół z Centrum Badań Kosmicznych PAN starają się zrozumieć przemieszczenia powierzchni i dynamiczne szczelinowanie podczas intruzji magmy w sposób ilościowy.

Szczególne trudność polega na tym, że obecne modele deformacji wulkanów nie uwzględniają złożoności skał, z których składa się skorupa ziemska, a nawet wulkany. Dr Poppe zauważa, że może to prowadzić do znacznego niedoszacowania objętości i położenia magmy pod wulkanami, które mogą potencjalnie wybuchnąć, a także do niedostatecznego zrozumienia sieci pęknięć tworzonych przez magmę pod wulkanami.

Podczas doktoratu w Brukseli dr Poppe początkowo opisał zachowanie magmy i przemieszczanie się skał w kontrolowanych środowiskach laboratoryjnych, stosując nowatorskie podejście ilościowe, które łączyło skalowane modele fizyczne z obrazowaniem rentgenowskim o jakości stosowanej w medycynie. Kluczowym elementem tej metody było przejście od jakościowych do ilościowych symulacji eksperymentalnych procesów magmowych.

Te fascynujące eksperymenty w piaskownicy – wykorzystujące piasek i tynk oraz złoty syrop jako analogi skał macierzystych i magmy – wykazały, że różne właściwości skał macierzystych prowadzą do różnych geometrii intruzji magmy. Zespół opracował pionierską metodę obrazowania eksperymentalnych „nietypowych przypadków” w 3D w czasie (tj. 4D) w celu ich ilościowego określenia.

Mapowanie dynamiki magmy w czasie

Laboratoryjne podejście dr Poppe zapewniło wewnętrzny wgląd w intruzję magmy w ziarnistym materiale skalnym skorupy, umożliwiając zespołowi ilościowe określenie wywołanych intruzją trójwymiarowych zmian i odkształceń w

czasie. Zaobserwowali tworzenie się grubych ukrytych kopuł i cienkich wałów w swoich skalowanych modelach, a także określili ilościowo deformację skały macierzystej i kształt intruzji dla różnych prędkości intruzji magmy i wysokości skorupy.

Eksperymenty te doprowadziły do jasnego wglądu w deformację płytkiej skorupy ziemskiej w warunkach laboratoryjnych. Następnym krokiem było wykorzystanie kombinacji symulacji numerycznych i obserwacji terenowych.

DeMo-Planet – projekt dotyczący modelowania

Dr Poppe i jego zespół z Centrum Badań Kosmicznych PAN potrzebowali dokładnego modelowania dynamiki pęknięć wywołanych przez magmę. Model numeryczny oparty na cząstkach pozwolił naukowcom na symulację pęknięcia i przemieszczania się skał wokół rosnącego ciała magmowego w górnej skorupie skalistego ciała planetarnego.

Dynamika pęknięcia została porównana dla skał o różnych właściwościach mechanicznych i pochodzących z różnych warunków grawitacyjnych, aby uwzględnić różnice w skałach na Księżycu, Marsie i Ziemi.

Dr Poppe wyjaśnia, że skały na Księżycu i Marsie zostały już mocno spękane przez uderzenia meteorytów. Aby zbadać deformację skorupy spowodowaną intruzją magmy na ciałach planetarnych typu ziemskiego, zespół wykorzystał połączenie testów laboratoryjnych, badań terenowych i symulacji numerycznych.

Głównym celem projektu DeMo-Planet było określenie, w jaki sposób na odkształcenia wywołane płytkimi intruzjami magmy na ciałach lądowych, takich jak Księżyc, wpływają właściwości skał skorupy, sieci pęknięć i reakcje chemiczne z udziałem ciepła. Wyniki te mogłyby zostać następnie wykorzystane do zapewnienia bardziej realistycznego

“

Model numeryczny oparty na cząstkach pozwolił naukowcom na symulację pęknięcia i przemieszczania się skał wokół rosnącego ciała magmowego w górnej skorupie skalistego ciała planetarnego.



Credits: Sam Poppe



podejścia do modelowania w celu zrozumienia dynamiki magmy w aktywnych wulkanach na Ziemi.

Zespół wybrał parametry dla swojego modelu na podstawie obserwacji geologicznych. „Używamy obserwacji terenowych i próbek skał z intruzji z epoki permu, z kamieniołomów w Sudetach w południowo-zachodniej Polsce do kalibracji naszych modeli numerycznych i ich walidacji, abyśmy mogli lepiej zastosować je do badania intruzji magmowych na Księżycu i Marsie, gdzie nie możemy przeprowadzić bliskich obserwacji terenowych” – wyjaśnia dr Poppe.

Kartowanie minerałów i właściwości mechanicznych

Projekt DeMo-Planet opierał się na współpracy wielu badaczy pracujących zarówno w środowisku obliczeniowym i laboratoryjnym, jak i w terenie. Naukowcy kalibrują wytrzymałość skał dla numerycznych eksperymentów laboratoryjnych przy użyciu eksperymentalnie uzyskanych wartości dla naturalnych skał. Naukowcy projektu charakteryzują sieci pęknięć w skorupie ziemskiej za pomocą środowiska cyfrowego, a także kartują deformacje powierzchni Księżyca i Marsa.

Inni badacze w ramach projektu zebrali próbki skał wulkanicznych i osadowych w celu skompilowania bazy danych ich właściwości mechanicznych. Próbki skał zostały przeanalizowane w laboratoriach uniwersyteckich w Brukseli i Strasburgu w celu ustalenia ich dokładnego składu i integralności strukturalnej.

Realistyczne nieelastyczne modele numeryczne

Eksperymentalne aspekty projektu są uzupełniane symulacjami numerycznymi w celu uzyskania pełniejszego obrazu dynamiki skał skorupy ziemskiej. Dr Poppe i ówczesna doktorantka a obecnie dr Alexandra Morand wykorzystali metodę elementów dyskretnych (DEM; numeryczne podejście do obliczania ruchu i efektów dużej

[scientia.global](https://www.scientia.global)

liczby małych cząstek) do badania deformacji i dynamicznego pęknięcia, jednocześnie wizualizując naprężenia i odkształcenia pod powierzchnią skorupy ziemskiej.

Opracowany przez zespół model DEM symuluje wylew magmy w jednorodnej skorupie skalnej, umożliwiając intruzję magmy. Kluczowe informacje uzyskane eksperymentalnie na temat właściwości skał i sieci pęknięć zostały wykorzystane do dopracowania modelu, a naukowcy zbadali również wpływ zastosowania bardziej realistycznego heterogenicznego ośrodka skorupy. W ten sposób zespół mógł modelować dynamiczną intruzję magmy w osłabionych heterogenicznych skorupach planetarnych.

Deformacja i dynamiczne tworzenie się szczelin nad lakolitami

Zespół wykorzystał multimetodyczne podejście do modelowania dynamicznej intruzji magmy w symulowanej skorupie opartej na cząstkach. Po skalibrowaniu podczas eksperymentów laboratoryjnych parametrów wytrzymałości skał potrzebnych do symulacji, systematycznie badali wpływ głębokości intruzji i różnych rodzajów parametrów wytrzymałości skał na odkształcenia, naprężenia i pęknięcie skorupy.

Wysoka sztywność skorupy (odporność na zginanie) doprowadziła do szeroko rozprzestrzenionego pęknięcia, podczas gdy niska sztywność spowodowała skoncentrowany i bardziej scentralizowany wzór pęknięcia. Odkrycia te pomogły zespołowi zrozumieć wzorce rozmieszczenia pęknięć nad lakolitem.

Modelowanie kraterów na Księżycu i Marsie

Skupiając się na kraterach na powierzchniach ciał planetarnych, zespół modelował dynamiczne pęknięcie i przemieszczanie w skorupie podczas symulowanej inflacji lakolitu. Naukowcy zbadali również wpływ grawitacji na odkształcenia, naprężenia i pęknięcie

nad napompowanymi lakolitami na Księżycu, Marsie i Ziemi.

Dr Poppe i jego zespół wykorzystali swoje multimetodyczne podejście, aby lepiej zrozumieć, w jaki sposób właściwości mechaniczne skorup planetarnych kontrolują intruzję magmy. Pomogło im to zrozumieć wzorce rozmieszczenia pęknięć nad intruzjami lakolitu w płytkich skorupach skalistych ciał planetarnych.

Metoda ta zapewnia również innym naukowcom ilościowe podejście do badania dynamicznego pęknięcia, intruzji magmy i dynamiki deformacji skorupy, które są niezbędne do zrozumienia mechanizmów leżących u podstaw pęknięcia i deformacji dna kraterów oraz rozwoju systemów hydrotermalnych na ciałach takich jak Księżyc czy Mars.

Przyszłość modelowania wulkanów

Przyszłe badania nad dynamiką wulkanów mogą obejmować poszerzenie i różnicowanie metod eksperymentalnych oraz włączenie multidyscyplinarnych podejść analitycznych do jednoczesnego modelowania dynamiki wulkanicznej w warunkach laboratoryjnych. Innym sposobem na poprawę dokładności modelowania byłoby zwiększenie rozmiarów eksperymentów w dedykowanych magazynach lub laboratoriach zewnętrznych, aby zbliżyć się do rzeczywistej skali procesów wulkanicznych. Zespół mógłby następnie wykorzystać informacje uzyskane z tych eksperymentów do kierowania, kalibracji i walidacji zaawansowanych modeli numerycznych.

Dr Poppe ma nadzieję, że eksperymenty i modele numeryczne można połączyć w celu wypełnienia luk w naszej wiedzy na temat aktywności wulkanicznej, kierując przyszłymi badaniami skorupy ziemskiej i powierzchni innych ciał planetarnych. Poprzez pogłębianie wiedzy na temat wzburzenia magmy w aktywnych wulkanach na Ziemi i pasywnych poza nią, ta fascynująca praca może pomóc w monitorowaniu wulkanów, przewidywaniu erupcji i przyszłych planetarnych misjach eksploracyjnych.

MEET THE RESEARCHER



Dr Sam Poppe, Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, Polska

Dr Sam Poppe uzyskał tytuł licencjata i magistra geologii na Uniwersytecie w Gandawie. Następnie przeniósł się do Vrije Universiteit Brussel jako pracownik naukowy zajmujący się ryzykiem geologicznym w Afryce Środkowej. Dr Poppe uzyskał tytuł doktora w tej samej instytucji i przeniósł się do Pennsylvania State University jako stypendysta podoktorancki Fulbright-BAEF w celu zbadania laboratoryjnej geodezji wulkanów. Dr Poppe pracował również nad projektem MagmaTect-4D na Université libre de Bruxelles, zanim przeniósł się do Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk w 2021 r. jako główny badacz w projekcie modelowania intruzji magmy DeMo-Planet. Dr Poppe koncentruje się na deformacji strukturalnej budowli wulkanicznych na ziemskich ciałach planetarnych, aby lepiej prognozować erupcje wulkaniczne na Ziemi i pomóc w rekonstrukcji historii wulkanicznej innych ziemskich ciał planetarnych. Jest również członkiem zespołu naukowego Lunar Geology Orbiter finansowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną w 2023 roku. W projekcie DeMo-Planet dr Poppe łączy różne metody w celu modelowania dynamicznego pęknięcia powierzchni, indukowanego magmą, na Księżycu i Marsie.

KONTAKT

Centrum Badań Kosmicznych PAN, Bartycka 18A, 00-716 Warszawa, Poland

sam35poppe@gmail.com / sampoppe@cbk.waw.pl

sampoppevolcano.wixsite.com/sampoppe

cbkpan.pl/en/modelling-of-crustal-deformation-caused-by-magma-intrusion-on-terrestrial-planetary-bodies

[@SamPVolcano](https://twitter.com/SamPVolcano)

DALSZA LEKTURA

A Morand, S Poppe, C Harnett, *et al.*, Fracturing and dome-shaped surface displacements above laccolith intrusions: Insights from Discrete Element Method modelling, *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, 2024, JGRB_56627. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023.JB027423>

S Poppe, A Morand, CE Harnett, et al., A new model of deformation and dynamic fracturing above laccolith intrusions, *EGU General Assembly 2023*, Vienna, EGU23-1337. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1337>

S Poppe, A Morand, A Cornillon, C Harnett, Modeling of surface displacement and dynamic fracturing during magma emplacement at floor-fractured craters on the Moon and Mars, *EGU General Assembly 2023*, Vienna, EGU23-16365. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16365>

S Poppe, JT Gilchrist, ECP Breard, et al., Analog experiments in volcanology: towards multimethod, upscaled, and integrated models, *Bulletin of Volcanology*, 2022, 84, 52. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01543-x>

S Poppe, EP Holohan, O Galland, et al., An Inside Perspective on Magma Intrusion: Quantifying 3D Displacement and Strain in Laboratory Experiments by Dynamic X-Ray Computed Tomography, *Frontiers in Earth Science*, 2019, 7, 62. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00062>



KLUCZOWI WSPÓŁPRACOWNICY

Dr Alexandra Morand, Centrum Badań Kosmicznych, Polska Akademia Nauk (obecnie Uniwersytet w Bristolu, Wielka Brytania)

Prof. dr hab. Daniel Mège, Centrum Badań Kosmicznych, Polska Akademia Nauk

Prof. dr hab. Marek Awdankiewicz, Uniwersytet Wrocławski
Dr Claire Harnett, University College Dublin

Profesor dr Michael Heap, Uniwersytet w Strasburgu

Profesor dr Karen Fontijn, Université libre de Bruxelles

Profesor dr Matthieu Kervyn, Vrije Universiteit Brussel

Dr Björn Nyberg, Uniwersytet w Bergen

Dr Petr Brož, Instytut Geofizyki, Czeska Akademia Nauk

Prof. dr Michael Petronis, New Mexico Highlands University

Prof. dr Christelle Wauthier, Uniwersytet Stanowy Pensylwanii

FINANSOWANIE

Norweski Mechanizm Finansowy

Narodowe Centrum Nauki (NCN)

Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej (NAWA)

Vocatio (Belgia)

Find out more at scientia.global