



Kraków, 6 czerwca 2019

W grafach widać uniwersalne piękno gór

Góry mają charakter. Ciągi łagodnych, falistych wzniesień i szerokich dolin, znane z Karpat, Appalachów czy niższych partii Alp, silnie kontrastują ze strzelistymi wierzchołkami, poszarpanymi graniami i głębokimi wąwozami wysokich Tatr czy Pirenejów, a te różnią się od niedostępnych, pokrytych śniegami himalajskich bądź andyjskich gigantów, z których zboczy zamiast wód spływają długie jęzory lodowców. Za tak ogromną różnorodnością kryje się jednak zadziwiające podobieństwo struktur.

Za pomocą grafów i fraktali naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie przyjrzeni się budowie górskich masywów naszej planety. Pod statystyczną lupę trafiły tak różnorodne pasma jak Alpy, Pireneje, Góry Skandynawskie, Góry Betyckie, Himalaje, Andy, Appalache, Góry Atlas i Alpy Południowe. Analiza, przedstawiona w artykule opublikowanym w czasopiśmie „Journal of Complex Networks”, zaowocowała nieoczekiwanym spostrzeżeniem. Okazuje się, że w strukturze ziemskich masywów górskich kryje się uniwersalne podobieństwo. Widać je w łańcuchach górskich na wszystkich kontynentach, niezależnie od wielkości szczytów, ich wieku, ani nawet od tego, czy są one pochodzenia tektonicznego, czy wulkanicznego.

„Na pozór główną cechą wspólną różnych łańcuchów górskich jest tylko to, że patrząc na nie trzeba wysoko zadzierać głowę. Rzeczywiste podobieństwo staje się widoczne dopiero wtedy, gdy przekształcimy zwykłą mapę topograficzną gór w mapę graniową, a więc taką, która przedstawia przebieg osi wszystkich grani”, mówi dr hab. Jarosław Kwapien (IFJ PAN), po czym uzupełnia: „Oś grani to linia przebiegająca wzdłuż grzbietu górskiego w taki sposób, że po obu jej stronach teren opada. Jest to więc przeciwieństwo osi doliny”.

Górskie granie nie są oddzielnymi od siebie tworam. Łączą się w wielką, rozgałęzioną strukturę, przypominającą drzewo: od grani głównej („pnia”) prowadzą dłuższe lub krótsze granie boczne pierwszego rzędu („konary”), od nich odchodzą granie boczne drugiego rzędu („gałęzie”), a od tych następne i następne. Całość ma wyraźnie hierarchiczną budowę, a liczba wszystkich poziomów złożoności zależy od wielkości obszaru pokrytego górami i może sięgać nawet kilkunastu. Struktury tego typu przedstawia się w postaci różnych grafów. Na przykład każda grań danego masywu może być potraktowana jako węzeł. Dwa węzły łączy się za pomocą linii (krawędzi grafu), gdy odpowiadające im granie także się łączą. W tak zbudowanym grafie jedne węzły mają dużą krotkość (są połączone z wieloma węzłami), podczas gdy inne – małą.

Grafy skonstruowane dla różnych masywów mają różną strukturę (topologię). Jednym z narzędzi jej badania jest rozkład krotkości węzłów, zawierający informację o liczbie węzłów danej krotkości. W typowych rozkładach duże wartości pojawiają się przy węzłach o małej krotkości, ponieważ tych jest najwięcej. Węzłów o dużej krotkości – hubów – na ogół jest niewiele. W przypadku gór główny

hub, zazwyczaj odpowiadający najdłuższej grani badanego łańcucha górskiego, ma krotność sięgającą kilku tysięcy. Huby drugiego rzędu, czyli granie boczne grani głównej, mają krotności rzędu kilkuset. Najwięcej jest węzłów o krotności jeden. Ich liczba może sięgać kilkuset tysięcy.

„Rozkład krotności węzłów graniowych okazuje się mieć charakter potęgowy. Oznacza to, że liczba węzłów o jakiejś krotności i na przykład liczba węzłów o krotności dwukrotnie mniejszej są w stałej relacji, niezależnie od wybranej krotności. Każdy fragment rozkładu powiększony o pewien stały czynnik wygląda jak całość, co oznacza, że żadna skala nie jest wyróżniona”, mówi dr Kwapień.

Rozkłady potęgowe spotyka się w grafach reprezentujących układy występujące w przyrodzie (np. badając powiązania między białkami i enzymami w żywej komórce), jak i w naszej własnej działalności (takiej jak cytowania prac naukowych, współpraca aktorów w filmach, sąsiedztwo wyrazów w tekstach, powiązania stron internetowych). Często opisują one struktury samopodobne, fraktalne. Jednym z modelowych przykładów naturalnych fraktali są właśnie góry. Ich komputerowe modele są wręcz generowane przez algorytmy wykorzystujące geometrię fraktalną. Potęgowa topologia grafów graniowych nie powinna więc nikogo dziwić. Zaskoczeniem okazała się za to wartość wykładnika potęgi.

„Niezależnie od rodzaju gór, wykładnik potęgi rozkładu przyjmował wartości z bardzo wąskiego przedziału wokół liczby $5/3$. Jeśli weźmiemy pod uwagę dokładność naszej metodologii, ów wąski przedział wartości może nawet oznaczać, że wykładniki w każdym badanym przypadku były wręcz takie same!”, zauważa dr Kwapień.

Zaobserwowana homogeniczność wynika z faktu, że w każdym miejscu naszej planety główne mechanizmy odpowiedzialne za górską rzeźbę są w zasadzie takie same. Do wypiętrzenia terenu niezbędne są ruchy tektoniczne lub aktywność wulkaniczna, jednak najważniejszym czynnikiem rzeźbotwórczym jest erozja wodna i lodowcowa. Woda i lód prowadzą do pękania i kruszenia skał oraz przenoszą rozdrobniony materiał ku nizinom. W ten sposób powstają żleby, kaniony i doliny górskie, a zatem i granie. Ponieważ ciekły wodne tworzące system odwadniający dany teren mają z natury strukturę drzewiastą (oczywiście poza obszarami pustynnymi), podobna struktura pojawia się też w przypadku systemu grani. Dlaczego jednak wzajemne relacje między liczbą grani o różnej liczbie rozgałęzień są do siebie tak podobne dla różnych typów gór?

„Sytuacja staje się jaśniejsza, gdy oprócz wody weźmiemy pod uwagę grawitację”, tłumaczy dr Kwapień. „Gdy materiał skalny zostaje rozdrobniony, zaczyna podlegać dynamice ciał sypkich niezależnie od swojego składu chemicznego. Ciało sypkie na zboczach mogą się utrzymać tylko wtedy, gdy kąty nachylenia tychże nie są zbyt duże. Zbocza po prostu nie mogą być zbyt strome. To dlatego w naturze głębokość dolin jest ograniczona ich własną szerokością. Wąskie kaniony rzeczne o niemal pionowych ścianach istnieją tylko na wczesnym etapie formowania się rzeźby. W dojrzałych formacjach górskich występują rzadko, bo ich ściany zdążyły już ulec pochyleniu”.

Istnienie systemów rzecznych odprowadzających wodę z danego obszaru, erozja krusząca skały i drażniąca doliny oraz grawitacyjne osuwanie się gruzu skalnego powodują, że granie nie mogą być ani dowolnie blisko, ani dowolnie daleko od siebie. Istnieje ich optymalne uporządkowanie, niezależne od własności pasma górskiego i nadające górom pewnych uniwersalnych cech.

Powyższe obserwacje znajdują uzupełnienie w innym spostrzeżeniu fizyków z IFJ PAN, dotyczącym wymiarów fraktalnych struktur graniowych. Wymiar fraktalny opisuje, jak bardzo chropowata jest struktura badanego obiektu. Linia pojedynczej grani ma wymiar 1. Gdyby linie (granie) były rozmieszczone niezwykle gęsto, ich wymiar fraktalny odpowiadałby wymiarowi powierzchni, a zatem byłby równy 2. Krakowscy badacze wykazali, że jeśli struktury graniowe zostaną przedstawione jako grafy, których węzłami są przecięcia grani (to właśnie w przecięciach najczęściej są szczyty), a krawędziami grafów są granie łączące szczyty, to wymiary fraktalne takich grafów będą z dobrym przybliżeniem równe liczbie... $5/3$.

„W jednych grafach widać hierarchię struktur górskich, w drugich ich fraktalność. W obu przypadkach dla wszystkich typów gór napotykamy te same wartości odpowiednich liczb. Ten uniwersalizm daje do myślenia”, stwierdza prof. dr hab. Stanisław Drożdż (IFJ PAN, Politechnika Krakowska).

Skoro różne masywy górskie są tak podobne pod względem analizowanych wielkości, gdzie leżą źródła górskiej różnorodności? Czy za pomocą teorii grafów i geometrii fraktalnej będzie można je badać? Czy uda się stworzyć model, w którym ewoluujący graf będzie imitował kolejne etapy formowania się rzeźby górskiej? Wreszcie, czy transformację map graniowych w grafy będzie można zastosować w praktyce, na przykład w kartografii? Na te pytania – i wiele innych – odpowiedzą dopiero przyszłe badania.

Instytut Fizyki Jądrowej PAN (IFJ PAN) w Krakowie zajmuje się strukturą materii i własnościami oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po wnętrza cząstek elementarnych. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość” o statusie Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW) na lata 2012-2017. Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. W klasyfikacji MNiSW Instytut został zaliczony do kategorii naukowej A+ w grupie nauk ścisłych i inżynierskich.

KONTAKT:

dr hab. **Jarosław Kwapien**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel: +48 12 6628146
email: jaroslaw.kwapien@ifj.edu.pl

prof. dr hab. **Stanisław Drożdż**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel: +48 12 6628220
email: stanislaw.drozd@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

1. „Universal features of mountain ridge networks on Earth”
R. Rak, J. Kwapien, P. Oświęcimka, P. Zięba, S. Drożdż
Journal of Complex Networks (2019) 0000, 1–21
DOI: 10.1093/comnet/cnz017

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ190606b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2019/06/06/IFJ190606b_fot01.jpg
Ziemskie masywy górskie współdziela te same uniwersalne cechy. Stają się one widoczne, gdy mapy topograficzne (tu: Alp Liguryjskich) przekształca się w mapy grani. (Źródło: IFJ PAN)

IFJ190606b_fot02s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2019/06/06/IFJ190606b_fot02.jpg
Sieci graniowe różnych pasm górskich. Węzłami są tu przecięcia grani, krawędziami – same granie. Od lewego górnego rogu: Alpy, Góry Betyckie, Pireneje, Góry Skandynawskie, Himalaje (część), Alpy Południowe, Andy (część), Góry Atlas. (Źródło: IFJ PAN)