

Úloha II.P ... velikost hor

10 bodů; průměr 4,83; řešilo 80 studentů

Na čem závisí výška nejvyšších hor na různých planetách? Pokuste se o kvantitativní odhad. Můžete přitom uvážit, jaké jsou nejvyšší hory na Zemi, Marsu a dalších známých planetách.

Karel obdivoval Olympus Mons.

Většina lidí bez pochyby zná nejvyšší horu Země, Mount Everest (8 848 m), ale už méně lidí zná nejvyšší horu Marsu, Olympus Mons (21 900 m), která je zároveň nejvyšší hora Sluneční soustavy. Člověka hned napadne otázka, jak můžou být hory tak vysoké a proč nemáme takové exempláře i u nás na Zemi? My se v této úloze pokusíme zodpovědět více obecnou otázku, a to na čem závisí výška nejvyšších hor na různých planetách.

Definice pojmů

Dříve než začneme se samotnou diskusí, co musí splňovat vysoká hora, je potřeba si ujasnit pár základních bodů. Nejprve samotný termín „hora“ je poměrně nejednoznačný a na světě můžete najít mnoho definic mluvících o prominenci nebo minimálním stoupání. My si zvolíme poměrně nevědeckou definici, že za horu budeme považovat terén, který se zvedá minimálně 300 m nad svým okolím. Definice hory nás nemusí zas tak trápit, zato více problematická je definice její výšky. Referenční bod Země je přirozeně hladina moře, ale na žádné jiné planetě existence povrchových moří nebyla potvrzena, proto se na tento způsob nemůžeme upínat. Obecně existuje několik způsobů, jak zvolit tento referenční bod, my zmíníme dva nejpoužívanější. První je zavedení nulové výšky pomocí tlaku. Například na Marsu se stanovila nulová výška na úrovni, kde byl tlak roven 610 Pa (trojný bod vody), takže pod touto úrovní se už nemohla nacházet tekutá voda. Tento přístup ale předpokládá atmosféru okolo planety, což není vždy zaručeno. Proto se spíše zavádí měření od planetárního geoidu, což je jistá ekvipotenciální plocha gravitačního pole, často popisovaná jako „tvar planety pokud by byla pokryta jen oceánem“¹. Tento systém se používá na Měsíci, Venuši, Zemi a přešlo se na něj i v případě Marsu. Správně bychom ho měli používat i my, ale pro náš model bude vhodnější, pokud budeme považovat nulovou výšku úpatí hory, nezávisle na pozici vůči geoidu. Podlé této definice bude potom největší hora Země Mauna Kea, havajská sopka, která má většinu své výšky (cca 6 000 m) pod hladinou moře a zbylé 4 km nad.

První model

Pokusme se sestavit nějaký prvotní model. Představme si, že hora je homogenní, z jednoho materiálu a samotná planeta je tuhá koule, která má tíhové zrychlení na povrchu g_p . Pokud bychom se pokusili vytvořit nejvyšší objekt na této planetě z daného materiálu, měli bychom zaručit, že podklad pod samotnou horou nezačne praskat pod tíhou hory. Tlak by se pak mohl propagovat dále skalou až na její okraje, kde by vyvrhl materiál, a v konečném důsledku by se hora zmenšila. Pokud použijeme tento model můžeme odhadnout tlak pod špičkou hory pomocí známého $P_h = h\rho g_p$ (předpokládáme, že tíhové zrychlení je konstantní) a porovnat ho s pevností v tlaku daného materiálu σ_c

$$\sigma_c > h\rho g_p \quad \Rightarrow \quad h_{\max} = \frac{\sigma_c}{\rho g_p}.$$

¹Tento systém se používá například i v GPS <https://en.wikipedia.org/wiki/Geoid>

Pokud uvažujeme Zemi, zvolme nějakou tvrdší žulu a můžeme dosadit $\sigma_c = 300 \text{ MPa}$ a $\rho = 2600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Výsledná maximální výška nám vyjde $h_{\max} \approx 12 \text{ km}$, což by se dalo srovnat s naší nejvyšší horou. Pro povrch Marsu z bazaltu (čediče)³ můžeme dostat výšku $h_{\max} \approx 30 \text{ km}$.

Tento model má ale několik nedostatků. V první řadě, argument o tom, že materiál pod horou praskne, není úplně správný. Pokud je skála v uzavřeném prostoru, tak víme z inženýrství, že její maximální pevnost v tlaku taky roste, protože materiál nemá kam utéct. Teorie o tom, že daný materiál se kvůli aplikovanému tlaku odplíží a začne se chovat jako tekutina narazí na stejný problém, a to, že tekutina nemá kam odtéct a také se nemusí chovat stejně jako v laboratoři. Zároveň v horninách ani zdaleka neplatí Pascalův zákon, který jsme potichu předpokládali a tlaky se určitě nebudou šířit tak dobře. Jednoduchý protipříklad může být když použijeme jako materiál písek. Každý ze zkušeností ví, že pokud zatlačíme jemně na bábovičku, tak okamžitě praskne. Tím pádem má malou pevnost v tlaku. Ale i přesto se dokážou vytvořit vysoké duny, které určitě nekolabují, i když jsou z křehkého materiálu. Proto bychom se měli pokusit sestavit nějaký sofistikovanější model, který uvažuje se samotnou geologií planety a ne jenom vlastnostmi materiálů.

Přesto má toto řešení hodnotu jako dimenzionální analýza. Ačkoliv výšku hory ovlivňuje hodně parametrů, nejpodstatnější pravděpodobně budou tíhové zrychlení a materiál (hustota, pevnost). Všechny tyto parametry jsou obsažené v rovnici výše, dávají nám správné jednotky, tudíž se dá předpokládat, že reálná hodnota bude podobného řádu.

Izostatická rovnováha

Nejprve se soustředíme na Zemi. Na Zemi funguje takzvaný koncept izostatické rovnováhy. Před zhruba 250 lety si lidé začali klást otázku, proč je u velkých pohoří, jako například v Himalájích, přibližně stejná gravitace jako všude jinde, i když by hory měly kvůli svojí hmotnosti generovat větší gravitační sílu. Z tohoto pozorování vyplývá, že nějaká plošná hmotnost by měla být všude stejná, a tedy i tlak by měl být někde hluboko pod povrchem vyrovnáný. Otázka, jak toho docílit, byla zodpovězena dvěma způsoby. První způsob, kterému se říká Prattova rovnováha, spočívá v tom, že pod horu dáme více lehkého materiálu, který nepůsobí tak velkou gravitací, a kompenzuje přidanou sílu od samotné hory. Tedy pod horou máme tlustší zemskou kůru (která má poměrně malou hustotu), která nahrazuje hustší materiál zemského pláště, který by se tam jinak nacházel. Druhý způsob je, že samotná hora má menší hustotu než zbytek povrchu, takže ve výsledku má stejnou hmotnost jako okolí, a tedy i stejnou gravitaci. Tento způsob se označuje jako Airyho izostatická rovnováha. Časem se zjistilo, že Prattova rovnováha se objevuje hlavně na kontinentech a Airyho rovnováha zase převládá na dnech oceánů, například na oceánských hřbetech. Jelikož se nejvyšší hory nachází na souši, budeme se řídit Prattovou rovnováhou.

Jak už jsme zmínili, hory k vyrovnání gravitace vytváří jakési kořeny a tyto kořeny můžou být hluboké jenom jako litosféra, jinak se dostanou do astenosféry, kde se změní na tekutinu. Můžeme vypočítat, jak vysoká hora by vytvořila takto hluboké kořeny. Pokud budeme mít horu o výšce h , tlak na úrovni povrchu bude $p_+ = h\rho_{\text{hora}}g$. Toto musí být vykompenzované úbytkem tlaku kvůli kořenu hory. Původní hydrostatický tlak byl $p_0 = d\rho_{\text{plášť}}g$, ale pokud se část zemského pláště přemění na kořen hory, tlak se změní na $p_1 = d\rho_{\text{hora}}g$. Aby nastala

²<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3d4056a86e79481cb6a80c89caae1d90>

³<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9642f0c676740659233201627b67b73>

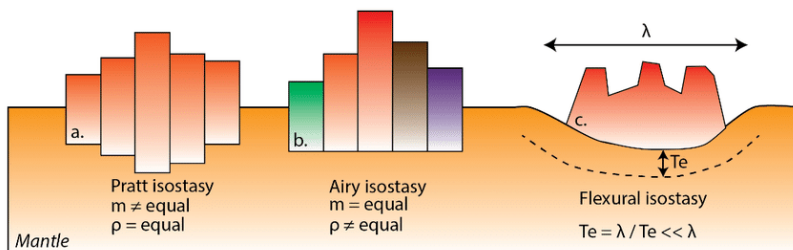
rovnováha, musí platit

$$p_+ = p_0 - p_1 = d(\rho_{\text{plášť}} - \rho_{\text{hora}})g = h\rho_{\text{hora}}g$$

$$h = \frac{\rho_{\text{plášť}} - \rho_{\text{hora}}}{\rho_{\text{hora}}} d$$

Pokud dosadíme hustotu pláště jako hustotu jeho hlavní horniny (perioditu) $\rho_{\text{plášť}} = 3,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, dále $\rho_{\text{hora}} = \rho_{\text{žula}} = 2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a $d = t_{\text{lit}} = 100 \text{ km}$, získáváme

$$h = 26 \text{ km} .$$



Obrázek 1: Různé typy izostatické

rovnováhy. Zdroj: <https://www.researchgate.net/profile/Anouk-Beniest/publication/323184004/figure/fig4/AS:594126588370944@1518662225083/Three-types-of-isostasy-a-Pratt-isostasy-assumes-an-equal-density-and-unequal-mass.png>

Toto je definitivně horní odhad, jelikož jsme nezakomponovali do modelu další jevy, například že pod takovými velkými tlaky, které jsou pod horou, horniny mění svojí strukturu a vznikají tzv. metamorfované horniny, které mají z pravidla větší hustotu. Tento proces je ale poměrně pomalý a v prvním přiblížení nehraje zásadní roli. Obecně se ale hustota hory bude měnit s hloubkou a Airyho rovnováha bude taky hrát svoji roli. Pro tento moment jsme ale s tímto výsledkem spokojeni.

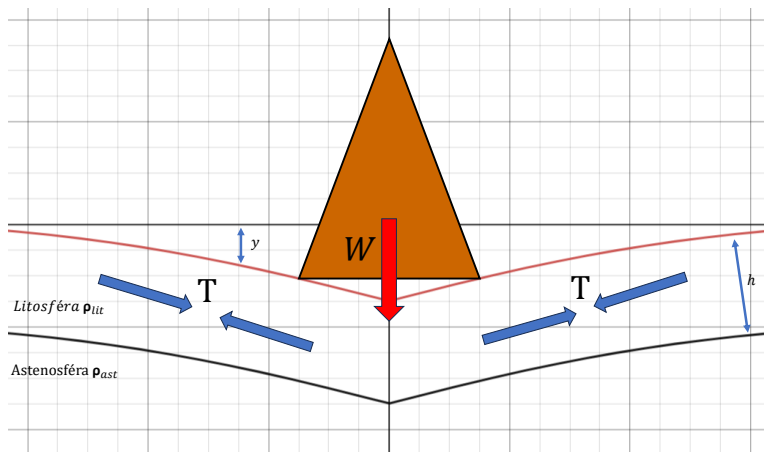
Otázka je, zda se tento model dá rozšířit i na další planety. Ze satelitních dat Marsu víme, že gravitace je pod jeho horami daleko větší a izostatická rovnováha není dosažena. Proto se tento model nedá použít na Marsu a podobně i pro další planety. Ani na Zemi se nedá vždy s tímto předpokladem fungovat, ačkoliv je v drtivé většině případů splněna. Asi nejznámější taková výjimka je Mauna Kea, kde se gravitační anomálie vyskytuje a ani Prattova nebo Airyho rovnováha zde není dosažena. Zde ale můžeme použít jiný model, který budeme více zkoumat v další sekci.

Praskající deska

Pokud není hora nadzvedávána vztlakem ze zemského pláště, tak zde ještě existuje další mechanismus, jak vytvořit sílu, která udrží celou horu. Pokud se podíváme na Havaj na sopku Mauna Kea, zjistíme, že její podloží se deformuje pod tíhou celého masivu. Litosférická deska se zde ohýbá, tvoří se v ní napětí, které produkuje sílu, která se snaží tlačit desku zpět do původní polohy. Tato síla tlačí proti váze hory a způsobuje, že celý systém je v rovnováze. Tento proces

je například dobře popsáný v tomto článku, kde používají podobný model, jaký vytvoříme právě teď my. Samotná tíha hory ohýbá litosférické desky, které se tím pádem více propadávají do tekuté astenosféry, kde kámen roztaje. V teoretickém limitu jsme definitivně schopni tuto desku ohnout až do takového úhlu, že deska praskne a hora se (při velkém zemětřesení) propadne do hlubin Země.

Toto můžeme také vyjádřit matematicky, když si vypůjčíme rovnice, které používají inženýři pro odhad ohybu desky a napětí v ní. Představme si těžký objekt, který položíme na desku o jisté tloušťce a elasticitě. Pokud bychom se snažili popsat vzniklou prohlubeň přesně, museli bychom použít tenzory napětí, což je jednoduše příliš komplikované pro naši úlohu. Situaci si ale můžeme zjednodušit, pokud si představíme, že z každé strany hory je ohebná deska jako na obrázku 2, která je na prvním konci pevně upevněna a na druhém připojena k hoře. Tím si zároveň převedeme úlohu do 2D. (Jako další z možných modelů si také můžeme představit, že deska je pod horou propojená a ne rozdělená.) Tyto „trámy“ se pod horou ohýbají a jejich tuhosti zase vytvářejí sílu, která kompenzuje tíhu masivu.



Obrázek 2: Náčrt ohýbání litosférické desky.

Diferenciální rovnice pro tyto desky se dá vyjádřit jako

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = q,$$

kde $y(x)$ je funkce, která nám říká, o kolik se terén propadl v závislosti na vzdálenosti od centra hory, q je síla působící na desku na jednotku šířky a na jednotku délky (tedy tlak v jednotkách Pa), E je Youngův modul pružnosti a I je takzvaný geometrický moment setrvačnosti průřezu⁴, který je pro obdélník rovný $I = h^3/12$, kde h je hrubost desky. Tato hodnota je vztažena na šířku desky, respektive základny hory (označme si ji b). Klíčová je pro nás hodnota q , která se pomocí vztahové síly dá vyjádřit jako

$$q = p_{vzt} - p_g = g(\rho_{ast} - \rho_{lit})y.$$

⁴Area moment of inertia

Všimněme si, že tento člen zatím popisuje jenom sílu vzniklou ponořením desky do astenosféry, neříká nic o tíze samotné hory. Tu definujeme jednoduše tím, že výsledná vztlaková síla jí musí být přesně rovna⁵. Pokud tedy sečteme všechnu tuto sílu, dostaneme

$$F_{\text{tot}} = b \int_{-\infty}^{\infty} q dx = 2b \int_0^{\infty} q dx = 2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}}) \int_0^{\infty} y dx,$$

kde jsme se soustředili jenom na pozitivní směr x , abychom si zajistili, že řešení je symetrické a počítali jenom s kladnými vzdálenostmi x , správně by tam měla být absolutní hodnota. Tuhle rovnici si na chvíli odložíme a začneme řešit předchozí diferenciální rovnici. Pokud ještě nemáte zkušenosti s řešením diferenciálních rovnic, řešte je pomocí WolframAlpha, nebo pokud chcete vidět jen řešení, můžete následující část přeskočit.

Úpravou dostáváme

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = g(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}}) y,$$

$$\frac{d^4 y}{dx^4} - \frac{g(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})}{EI} y = 0.$$

Po zavedení faktoru $\lambda = \sqrt[4]{g(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})/(4EI)}$ můžeme napsat řešení této diferenciální rovnice jako

$$y = (A \sin(\lambda x) + B \cos(\lambda x)) \exp(-\lambda x) + (C \sin(\lambda x) + D \cos(\lambda x)) \exp(\lambda x).$$

Konstanty A, B, C, D určíme z počátečních podmínek. Aby nám řešení nedivergovalo, tak musí členy s pozitivní exponenciálou být nulové $C = D = 0$. Zbylé dvě konstanty se budou lišit podle toho, s jakým modelem pracujeme. Pokud budeme uvažovat model, kde se deska neláme pod horou, ale je spojitá, pak v bodě $x = 0$ je deska vodorovná a $dy/dx = 0$. Zároveň si vzpomeňme na naši rovnici o tíze hory, která nám dává další informaci. Dohromady tedy

$$0 = \frac{dy}{dx} (y = 0) = \lambda((-A - B) \sin(\lambda x) + (A - B) \cos(\lambda x)) \exp(-\lambda x) \rightarrow 0 = A - B,$$

$$F_{\text{tot}} = W = 2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}}) \int_0^{\infty} y dx = 2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}}) \frac{A}{\lambda},$$

kde W je tíha hory, kterou deska nese. Konstanty jsou tedy $A = B = \frac{\lambda W}{2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})}$ a funkce popisující prohnutí desky vyjde jako

$$y_{\text{spoj}} = \frac{\lambda W}{2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} (\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)) \exp(-\lambda x).$$

Pro druhý model, kde jsou desky rozlomené, je důležité si rozmyslet, v čem se tato situace liší. Konce jsou volné, a proto na jejich konci neucítíme žádnou sílu od dalších vrstev, tudíž tam také moment síly bude nulový. Pokud znovu zapátráme v tabulkách zjistíme, že moment se dá vyjádřit jako

$$M = \frac{EI}{R} \approx EI \frac{d^2 y}{dx^2} = 0,$$

⁵Rozmyslete si, jak bychom tuhle informaci mohli zakomponovat už do samotné rovnice pro q .

kde R je poloměr křivosti, který se dá aproximovat $R \approx d^2y/dx^2$. Proto musí být druhá derivace nulová. Pokud použijeme zase podmínku o celkové síle, bude řešení následovné:

$$y_{\text{lom}} = \frac{\lambda W}{bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} \cos(\lambda x) \exp(-\lambda x)$$

Maximální propad je v obou modelech intuitivně největší v bodě $x = 0$ a pro zlomené desky by měl být 2krát větší za stejné tíhy na desku. Později uvidíme, že tento faktor vymizí a oba modely předpovídají stejný maximální propad. Teď už známe, jak se terén okolo hory mění se vzdáleností, ale potřebujeme ještě znát napětí v deskách. S tím nám opět pomůžou tabulky, které nám řeknou, že napětí se vypočte jako

$$\sigma = \frac{Et}{2R} = \frac{Et}{2} \frac{d^2y}{dx^2},$$

kde t je hrubost litosférické desky. Po dosazení pro první model dostáváme

$$\sigma_{\text{spoj}} = \frac{Et}{2} \left| \frac{d^2y}{dx^2} \right| = Et \frac{\lambda^3 W}{2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} |\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)| \exp(-\lambda x)$$

a pro druhý

$$\sigma_{\text{lom}} = \frac{Et}{2} \left| \frac{d^2y}{dx^2} \right| = Et \frac{\lambda^3 W}{bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} |\sin(\lambda x)| \exp(-\lambda x).$$

Nejvyšší napětí v prvním modelu je zřejmě v bodě $x = 0$. U druhého musíme funkci zderivovat a položit ji rovnu nule

$$\frac{d\sigma_{\text{lom}}}{dx} = -Et \frac{\lambda^4 W}{g(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} (\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)) \exp(-\lambda x) = 0 \quad \Rightarrow \quad \cos(\lambda x) = \sin(\lambda x)$$

$$x_{\text{max}} = \frac{\pi}{4\lambda}.$$

Proto je maximální napětí v desce rovno

$$\sigma_{\text{spoj}}^{(\text{max})} = Et \frac{\lambda^3 W}{2bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})},$$

pro model se zlomenou deskou pak

$$\sigma_{\text{lom}}^{(\text{max})} = Et \frac{\lambda^3 W}{\sqrt{2}bg(\rho_{\text{ast}} - \rho_{\text{lit}})} \exp\left(-\frac{\pi}{4}\right).$$

Oba modely se liší jen v číselném prefaktoru, kdy pro první máme $1/2 = 0,5$ a pro druhý $1/\sqrt{2} \cdot \exp(-\pi/4) = 0,322$.

Pokusme se teď dosadit nějaká data. Za W budeme dosazovat pro model spojitě desky $W = 1/2 \cdot 1/3 \cdot b^2 H \rho_{\text{lit}} g$, kde H je konečně výška hory. Všimněte si koeficientu $1/2$, který dostaneme z úvahy, že horu vlastně drží dvě desky kolmé na sebe, rovnoběžné s osou x , respektive y , povrchu. V druhém modelu musíme tyto desky rozdělit ještě na půl, protože každá spojená deska je ekvivalentní dvěma rozloženým $W = 1/4 \cdot 1/3 \cdot b^2 H \rho_{\text{lit}} g$. Finální hodnoty pro Zemi, Mars a Venuši, tedy tři planety, kde se domníváme, že existuje litosféra s astenosférou, jsou uvedeny v tabulce 1.

	Země	Mars	Venuše
Materiál kůry	Čedič	Čedič	Čedič
Tloušťka litosféry / km	100	150	70
E / Pa	1.00×10^{11}	1.00×10^{11}	1.00×10^{11}
Hustota litosféry / $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-3}$	2 700	2 700	2 700
Hustota astenosféry / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	3 300	3 550	3 400
Nejvyšší hora	Mauna Kea	Olympus Mons	Skadi Mons
Výška / m	10 200	21 900	10 700
Základna / km	200	600	700
Gravitační zrychlení / $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	9,8	3,7	8,9
Pevnost v tlaku / MPa	30	30	30
Model spoj napětí / MPa	370	630	1 900
Model spoj propad / m	2 800	8 000	11 600
Model zlom napětí / MPa	240	410	1 200
Model zlom propad / m	2 800	8 000	11 600

Tabulka 1: Porovnání vlastností kůry a litosféry Země, Marsu a Venuše.

Vidíme, že výsledné napětí je o řád výše, než je maximální napětí bazaltu (čediče), což nevěstí nic dobrého. Podle našeho modelu by se tedy hory měly už propadávat dávno do astenosféry a neměly by vůbec existovat. To je velký neúspěch našeho modelu a říká nám, že jsme nejspíše opomněli nějaký další velmi důležitý jev. Jedno z vysvětlení může být, že tlak zevnitř planety není způsobený jenom hydrostatickým vztlakem, ale i nějakými dalšími termodynamickými procesy. Pokud by to ale takto bylo, samotná funkce popisující propad terénu by se měla lišit od skutečnosti, ale tento model se už používá v geologii od minulého století a slavil ne jeden úspěch, například právě na Havaji⁶. Další možné vysvětlení je, že samotná litosféra je silnější a má daleko větší maximální napětí v takových extrémních podmínkách. Alternativně, napětí v litosférických deskách je nižší, než se zde vypočítalo a existuje nějaký mechanismus, jak ho bezpečně uvolnit. Tento odhad je samozřejmě jenom odhad a zanedbali jsme mnoho efektů. Například hustota skály se mění s hloubkou a mnoho parametrů uvedené v tabulce pro Mars a Venuši jsou spíše teoretické odhady, než data potvrzená skutečným měřením.

Eroze a zvětrávání

Samozřejmě velikost hory nezávisí jenom na tom, jak hora roste, ale také na tom, jakou rychlostí se zmenšuje. Nejvýznamnější způsoby, jak toho docílit je eroze a zvětrávání.

Kvantifikovat erozi je poměrně obtížné a většinou se používá nějaký empirický vztah, který počítá s koeficienty jednotlivých veličin, například koeficient srážek, koeficient pevnosti půdy atd. Proto se zde pokusíme jenom nějak shrnout, jaké vlastnosti by planeta neměla mít, aby se na ní vytvořila vysoká hora. V první řadě by na ní neměly často působit nějaké erodující jevy, například vítr nebo déšť. Obojí je ale velmi časté u plyných obrů, kteří, ačkoliv mají pevné jádro, na kterém se teoreticky můžou tvořit hory, mají také silné proudění plynů v atmosféře, které by určitě jakýkoliv vrchol srovnalo v krátkém časovém intervalu. Zároveň pokud je atmo-

⁶<https://www.semanticscholar.org/paper/Gravity-Anomalies-and-Flexure-of-the-Lithosphere-Watts-Cochran/5a583b7da654dacf795ac03df3697549fb9c7294>

sféra velmi hustá, eroze probíhá rychleji. Jestli jsou ale tyto faktory až tak zásadní pro tvorbu hor je spekulativní. Například nejvyšší hora na Venuši (Skadi Mons) je vysoká přes 6 kilometrů, přestože Venuše má velice hustou a turbulentní atmosféru z oxidu uhličitého. Toto pravidlo není tedy univerzální, ale určitě nám říká trend a to, že bychom neměli očekávat vysoké hory na plynných obrech.

Zvětrávání může mít podobný vliv na velikost hor. Obecně můžeme rozdělit zvětrávání na chemické a fyzikální (mechanické). Fyzikální zvětrávání je způsobené například rychlým ochlazením, které způsobí rychlé smrštění skály, při kterém může vzniknout napětí a skála praskne. Takové rychlé změny teploty se dějí na planetách bez atmosféry (Merkur nebo i téměř Mars), která normálně slouží jako izolant tepla. Jestli takový efekt opravdu ovlivňuje maximální výšku hory, je opět spekulativní, ale mohlo by to vysvětlovat, proč na Merkuru nevidíme tak vysoké hory.

Chemický způsob zvětrávání je o trochu složitější na odhad, na Zemi je hlavní zvětrávací kombinace oxid uhličitý s tekutou vodou, ale toto velmi záleží na rozrušované skále a atmosféře. Obecně by se zase dalo očekávat, že na Venuši, kde je atmosféra částečně tvořena oxidem siřičitým, by mohl být tento proces intenzivnější, ale vidíme, že i přesto se zde dokážou tvořit relativně vysoké hory.

Poslední koncept na toto téma, který zmíníme, je tzv. „glacial buzzsaw“. Před několika lety si vědci všimli, že většina vrcholů hor je vzdálená od sněžné čáry (výšky, kde zůstává sníh) přibližně stejně. To vedlo k vytvoření konceptu „glacial buzzsaw“, který popisuje erozi v takových výškách.

Klíčovými aspekty modelu „glacial buzzsaw“ jsou eroze ledovci a proces, kterým ledovce rychle a účinně zvětrávají skalní materiál a vrcholy hor, kterými procházejí. Tato eroze může být způsobena táním a opětovným zmrazením ledovce, což způsobuje fyzikální rozpukání skal a vytváření skalních dutin, které jsou následně erozivně zvětšovány. Důsledkem tohoto procesu je rychlá degradace vrcholů hor. Ledovce postupně snižují celkovou výšku těchto hor a udržují střední výšku na relativně konstantní úrovni. Tento model vysvětluje, proč nejsou některé hory vyšší, než by se mohlo očekávat vzhledem k jejich stáří a proč mají některá ledovcová údolí tak charakteristický tvar. Zároveň nám říká, že maximální výška hory není určena vlastnostmi planety, ale spíše lokálním klimatem. Tento model je avšak poměrně kontroverzní, většina experimentů a měření, která se ho snažila potvrdit, neprodukovala jednoznačné výsledky a není to všeobecně přijímaná teorie.

Závěr

Ačkoliv jsme se snažili vytvořit sofistikovaný model zemské kůry, naše odhady se liší od reálné hodnoty o jeden řád. Možné vysvětlení je, že jsme neuvážili všechny možné jevy a procesy, které se v systému litosféry a astenosféry dějí. Přesto máme aspoň řádový odhad pomocí dimenzionální analýzy z úvodu. Nejpodstatnější parametry ovlivňující maximální výšku hory na dané

planetě jsou gravitace, pevnost materiálu a eventuálně i hloubka astenosféry.

Jonáš Dej
jonas.dej@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.