

CHEMIE A TERRAFORMACE MARSU

VLADIMÍR KOCOUR a OTTO PASTOR

*Ústav logistiky a managementu dopravy, Fakulta dopravní
ČVUT v Praze, Konviktská 20, 120 00 Praha 1
kocouvl1@fd.cvut.cz; pastor@fd.cvut.cz*

Klíčová slova: Mars, terraformace, chemie povrchu Marsu

Chemie povrchu Marsu

Svým chemickým složením je ve sluneční soustavě Zemi nejpodobnější planeta Mars. Mars má podobné složení a strukturu jako Země. Jádru, o kterém se předpokládá, že je horké a kovové, má průměr přibližně 1250 km. Zda je také tekuté, jako jádro Země, či nikoli, je dosud předmětem sporů. Plášť je tlustý 1500 až 2000 km a tvoří ho silikátové horniny. Kůra Marsu je na různých místech různě silná, což souvisí s reliéfem povrchu. Kůra o tloušťce 45 až 80 km je tvořena převážně silikátovými horninami s příměsí mnoha dalších prvků. O povrchu Marsu máme díky kosmickým sondám a meteoritům z Marsu přesnější představy než o jeho nitru. Povrch Marsu je tvořen převážně horninami ze skupiny čedičů, avšak s vyšším zastoupením křemičitanů než mají pozemské čediče². Za načervenalou barvu povrchu Marsu jsou odpovědné oxidy železa. Velmi rozšířenou sloučeninou na Marsu je také voda, která tvoří podstatnou část bílých polárních čepiček. Vodní led se nachází také na vrcholech nejvyšších hor. Hory a pohoří na Marsu jsou sopečného původu. V roce 2005 byl objeven led ukrytý pod povrchem v rozsáhlém zamrzlém oceánu o rozměrech 800×800 km pokrývajícím část severní polokoule. Voda je vázána také v hydrátech. Značná část povrchu Marsu je pokryta sypkým materiálem (regolitem) vzniklým větrnou erozí. Podpovrchový oceán pokrývá jen slabá vrstva regolitu, jeho tloušťka se odhaduje na pouhý 1 metr.

Mars je menší než Země. Jeho hmotnost dosahuje pouze jedné desetiny hmotnosti Země. Mars má rovníkový průměr 6792 km a polární průměr 6752 km. Otočí se kolem své osy jednou za 24 h 37,5 min, tedy za téměř stejnou dobu jako Země. Střední hustota Marsu je 3900 kg m⁻³, což je méně než v případě Země. Proto se usuzuje, že Mars má mnohem menší kovové jádro v porovnání se Zemí. S tím patrně souvisí i skutečnost, že Mars nemá takřka žádné magnetické pole. Některé oblasti Marsu však vykazují trvalou magnetizaci, což podporuje hypotézu, že Mars kdysi magnetické pole měl.

Na Marsu, stejně jako na Zemi se vyskytují také těžší prvky, včetně radioaktivních. Radioaktivní rozpad těžších prvků je zdrojem vnitřního tepla Marsu. Na Marsu pravdě-

podobně v minulosti existoval přírodní jaderný reaktor podobně jako na Zemi (v Oklo v Gabonu)³. Na tuto možnost se usuzuje na základě rozložení thoria a draslíku na povrchu Marsu.

Atmosféra Marsu je mnohem řidší než atmosféra Země. Tlak na povrchu činí průměrně 0,610 kPa (v porovnání se 101,325 kPa na Zemi) a značně kolísá v závislosti na výškových poměrech. Zásadní rozdíl oproti Zemi je chemické složení atmosféry: tvoří ji z 95,3 % oxid uhličitý. Dusík, který je na Zemi podstatnou složkou atmosféry, zaujímá v atmosféře Marsu jen 2,7 %. Argon tvoří 1,2 %. Nepatrně (řádově setiny procenta) jsou zastoupeny další plyny: kyslík, oxid uhelnatý, vodní pára, oxid dusnatý. Ve stopovém množství byly zaznamenány také vzácné plyny, ozón a k překvapení vědců také methan. Původ methanu na Marsu je nejasný. Existují hypotézy, podle kterých je methan důkazem života na Marsu v podobě mikroorganismů, v poslední době se však vědci přiklánějí spíše k domněnce, že methan vzniká účinkem ultrafialového záření.

Terraformace Marsu

Planeta Mars je velmi atraktivní destinací pro kosmické sondy. V minulosti jich byly desítky. Všechny sondy vyslané k Marsu byly zatím automatické a sloužily k získávání dat o povrchu Marsu, fyzikálních procesech, marsovském počasí a nepřímo i o nitru Marsu. Lidstvo se ale s tímto stavem nespokojí natrvalo. Velmi pravděpodobně bude Mars v příštích desetiletích kolonizovat. Přesné datum pilotovaného letu k Marsu je stále odkládáno z mnoha důvodů. K nim patří i řídká atmosféra Marsu a nízká teplota na jeho povrchu. Přiblížení parametrů teploty a tlaku atmosféry parametrům na Zemi se nazývá terraformace. Mars má obrovské rezervy vody v podpovrchovém zmrzlém oceánu. Toho lze využít při terraformaci^{5,6}.

Řízený pád měsíců na Mars

Zdá se, že nejrychlejší způsob, jak zvýšit hustotu atmosféry Marsu, je pozměnit dráhu Marsova měsíce Phobos nebo Deimos (nebo obou) tak, aby se dostaly na sestupnou dráhu a dosáhly povrchu Marsu¹. Namíříme-li měsíc nebo oba měsíce do podpovrchového oceánu, vysublimuje velké množství vodní páry, a tlak a teplota na povrchu vzrostou. Nejvyšší nárůst teploty nastane v místě dopadu, nicméně následky dopadu ovlivní celou planetu. Celkově vyšší teplota patrně způsobí také sublimaci části zmrzlého oxidu uhličitého uloženého v polárních čepičkách. Ačkoli část oxidu uhličitého a vodní páry unikne z Marsu nebo bude disociována slunečním zářením, tento

proces bude relativně pomalý. Prvních několik desetiletí nebo století po pádu zůstane atmosféra hustší než dnes. Tato skutečnost pomůže lidstvu při kolonizaci Marsu.

Zásadní otázka je, jak přeměrovat Marsův měsíc na sestupnou trajektorii. Pravděpodobně nejjednodušší způsob je použít reaktivní raketové motory. Současná raketa Saturn V má tah 34 meganewtonů (první stupeň) po dobu 150 sekund. Dá se předpokládat, že po roce 2050 budou k dispozici pohonné jednotky mnohem silnější než současný Saturn V. Omezené množství energie, které lze získat chemickými reakcemi, by si však vyžádalo vývoj jaderného pohonu založeného na termojaderné fúzi.

Analýzujeme problém blíže.

Oba Marsovy měsíce obíhají po téměř kruhových drahách takřka v rovině Marsova rovníku. Parametry měsíců a jejich drah jsou následující:

Měsíc	Phobos	Deimos
Poloměr dráhy r_0 , km	9 380	23 460
Oběžná rychlost v_0 , km s ⁻¹	2,138	1,352
Doba oběhu T , den	0,319	1,262
Hmotnost m , kg	$10,659 \cdot 10^{15}$	$1,476 \cdot 10^{15}$

Energeticky nejméně náročný způsob, jak zařídit pád měsíce na Mars, je snížit původní oběžnou rychlost v_0 na novou rychlost v_1 takovou, aby se měsíc dostal na novou, eliptickou dráhu s nejbližším bodem ve vzdálenosti původní kruhové dráhy $r_1 = r_0$ a s nejbližším bodem ve vzdálenosti r_2 , která bude rovna poloměru Marsu. Poloměr Marsu je 3402,5 km. Vyjdeme ze zákona zachování energie

$$E_{k1} + E_{p1} = E_{k2} + E_{p2}$$

kde $E_{k1} = \frac{1}{2} m v_1^2$ je kinetická energie měsíce po zpomalení v nejbližším bodě nové dráhy,

$$E_{p1} = -\kappa m M / r_1$$

je potenciální energie měsíce v nejbližším bodě nové dráhy, $E_{k2} = \frac{1}{2} m v_2^2$ je kinetická energie v nejbližším bodě nové dráhy (tj. ve vzdálenosti poloměru Marsu od středu Marsu) r_2 a

$$E_{p2} = -\kappa m M / r_2$$

je potenciální energie v nejbližším bodě nové dráhy (tj. ve vzdálenosti poloměru Marsu od středu Marsu) r_2 . Dále uplatníme zákon zachování momentu hybnosti, který pro nejbližší a nejbližší bod nové dráhy můžeme psát ve skalárním tvaru

$$r_1 m v_1 = r_2 m v_2$$

tedy

$$r_1 v_1 = r_2 v_2$$

V této úvaze jsme považovali hmotnost samotného Marsu $M = 6,4185 \cdot 10^{23}$ kg za mnohem větší, než hmotnosti měsíců. Mars ovšem také rotuje a to ve směru oběhu měsíců. Rychlost rotace na rovníku Marsu je $v_{rot} = 0,239$ km s⁻¹. Tu je třeba odečíst od rychlosti v nejbližším bodě v_2 a získáme rychlost tečného dopadu $v_2^c = v_2 - v_{rot}$. Ve

skutečnosti by stačilo zpomalit měsíce o něco méně, aby se nejbližší bod nové dráhy dostal do atmosféry Marsu – o zbytek by se postaral brzdný účinek atmosféry a měsíc by po určitém počtu oběhů dopadl na Mars.

Výsledné rychlosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Měsíc	Phobos	Deimos
v_1 , km s ⁻¹	1,559	0,680
v_2 , km s ⁻¹	4,298	4,689
v_2^c , km s ⁻¹	4,059	4,450
E_{k2}^c , J	$8,781 \cdot 10^{22}$	$1,461 \cdot 10^{22}$

E_{k2}^c je kinetická energie pohybu měsíce v okamžiku pádu na Mars. Můžeme předpokládat, že většina této energie se při pádu na Mars přemění na teplo (z menší části také na deformaci a destrukci hornin na povrchu Marsu, může dojít k malé změně rychlosti rotace Marsu, atd.).

Atmosféru Marsu po pádu měsíce nebo obou měsíců zahustí především oxid uhličitý (který už nyní tvoří 95 % atmosféry planety) a vodní pára, které se do atmosféry uvolní značné množství.

Přesné množství vody není známo a odhady se mění podle nových poznatků kosmických sond. Množství H₂O na Marsu se odhaduje na $5 \cdot 10^6$ km³ ($5 \cdot 10^{18}$ kg) (cit.⁴). Většina vodního ledu je vázána v polárních čepičkách, avšak přibližně $6 \cdot 10^4$ km³ ($6 \cdot 10^{16}$ kg) vodního ledu se nachází ve středních šířkách (součást permafrostu). Přibližně $3 \cdot 10^{10}$ km³ ($3 \cdot 10^{10}$ kg) sezónně sublimuje do atmosféry a opět desublimuje zpět na povrch. Na Marsu prakticky nemůže existovat voda v podobě kapaliny, protože průměrný atmosférický tlak na povrchu je 0,610 kPa. Tento tlak odpovídá zhruba tlaku zemské atmosféry ve výšce 30 km nad mořem.

Průměrná teplota na Marsu je -63 °C. Pokud má po pádu Marsova měsíce dojít k vypaření zmrzlého oceánu, musí se led o nízké teplotě nejprve ohřát na teplotu tání 0 °C, potom musí být dodáno skupenské teplo sublimace (případně skupenské teplo tání, teplo potřebné k ohřátí vody na teplotu varu a skupenské teplo varu).

Další látkou, která se uvolní do atmosféry, je CO₂, který v oblasti polárních čepiček existuje v pevné fázi. Část CO₂ sublimuje a desublimuje v důsledku střídání ročních období. CO₂ sublimuje při teplotě -78 °C.

Pokud by se kinetická energie obou měsíců přeměnila úplně na teplo, stačilo by toto teplo k ohřátí a odpaření $3,308 \cdot 10^{16}$ kg H₂O, tedy asi 0,7 % veškeré vody na Marsu. Otázkou zůstává, do jaké výšky by se odpařená vodní pára rozprostřela. Atmosféra Marsu se skládá ze tří hlavních vrstev: spodní (do výšky 45 km), střední, ve které dochází k tryskovému proudění (jet stream) (45–110 km) a horní (nad 110 km).

Výška vrstvy	45 km	10 km	5 km
Hustota vodní páry	0,005 kg m ⁻³	0,223 kg m ⁻³	0,436 kg m ⁻³

Hustota vzduchu na Zemi je $1,28 \text{ kg m}^{-3}$.

Optimistický scénář předpokládá, že nepochybně by se na odpaření H_2O nevyužila všechna kinetická energie měsíců. Kromě H_2O by částečně sublimoval i CO_2 . Větší množství CO_2 i H_2O v atmosféře by posílilo skleníkový efekt, což by vedlo k dalšímu nárůstu teploty a další sublimaci, především CO_2 . Zatím máme jen velmi přibližnou představu o nitru Marsu. Sonda Mars InSight, která ho má zkoumat, odstartuje v roce 2016. Pád Marsových měsíců na povrch Marsu by mohl vyvolat sopečnou činnost, která by atmosféru Marsu zahustila podstatně více. Nakolik však můžeme s vyvoláním sopečné činnosti počítat, ukáže až výzkum provedený sondou Mars InSight.

Bez ohledu na to, zda s následnou sopečnou činností na Marsu můžeme počítat či nikoli, uvedená metoda terraformace v sobě skrývá jedno úskalí. Do atmosféry se nedostane jen desublimovaný led, ale také prach a jiné sloučeniny (např. SO_2), které mohou působit proti skleníkovému efektu. Kromě toho budou uvolněny i látky, které jsou pro člověka jedovaté.

Další přístupy – nechme pracovat Slunce

Celý projekt sublimace ledového oceánu by se dal alternativním způsobem realizovat i bez svržení Phobosu a Deimosu na povrch Marsu. Ledový oceán je skrytý pod vrstvou regolitu silnou jen asi 1 m (cit.¹). Kdybychom tuto vrstvu dokázali odtěžit a přemístit jinam, ledový oceán na ploše $800 \times 800 \text{ km}$ by postupně vysublimoval působením slunečního záření. Tato „těžební verze“ by mohla být méně energeticky náročná. Byla by však také pomalejší a potýkala by se s problémem prachových bouří, které by odkryté části ledu znovu zanášely prachem. Pomalejší by byla i sublimace ledu.

Vývoj vhodných buldozerů pro Mars by mohl být podstatně jednodušší, než vývoj termojaderného pohonu pro změnu rychlosti měsíců. Úspěšná povrchová sonda Curiosity o velikosti dvou osobních automobilů dává naději, že „těžší těžební technika pro Mars“ může být vyvinuta relativně brzy, snad už během příštích 20 let. V každém případě by se jednalo o velký a náročný projekt přesouvání velkého množství zeminy. Ani na Zemi dosud nebyl tak velký souvislý a koordinovaný projekt uskutečněn.

Závěr

Oba uvedené přístupy povedou k zahuštění atmosféry z CO_2 vodní parou a změně chemie povrchu Marsu. Prostředí by se přiblížilo pozemskému: teplota a tlak vzduchu na povrchu by se zvýšily. Nové podmínky by byly z hlediska stáří naší civilizace stabilní. Dá se však očekávat, že nejméně 10 000 let by příznivější podmínky na Marsu vydržely – a to je pro lidstvo dostatečně dlouhá doba k tomu, aby se dokázalo na Marsu stabilizovat a vyvinout technologie, které by mu pomohly zvládnout i budoucí cyklické změny chemicko-fyzikálních podmínek na Marsu.

LITERATURA

1. Antonenko I.: *Large Amounts of Water Ice Found Underground of Mars*, [dostupné online], *Universtoday.com*, <http://www.universtoday.com/93059/large-amounts-of-water-ice-found-underground-on-mars/>, staženo 27. 1. 2012.
2. Barlow Nadine G.: *Mars: an Introduction to Its Interior, Surface, and Atmosphere*. str. 71. Cambridge University Press, New York 2008.
3. Brandenburg J. E.: *Evidence for a Large, Natural, Paleo-Nuclear Reactor on Mars* [dostupné online], <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/1097.pdf>, 42nd Lunar and Planetary Science Conference (2011).
4. Christensen Philip R.: *Elements 2*, 151 (2006).
5. Štědroň B.: *Forecast for Artificial Intelligence*, *FUTURIST 2004*.
6. Štědroň B., Lochman M.: *Mars se zemskou atmosférou v blízké budoucnosti?*, *Technický týdeník*, 1. 1. 2006.
7. Štědroň B.: *Prognostické metody a jejich aplikace*, C. H. BECK, Praha 2012.

V. Kocour and O. Pastor (*Department of Logistics and Transportation Management, Faculty of Transportation Sciences, Czech Technical University, Prague*): **Chemistry and Mars Terraformation**

The article describes chemical aspects of a new approach to Mars terraformation. With regard to similarity of chemical composition of the Earth and Mars, two ways of Mars terraformation are presented: driven the fall of Mars satellites Phobos and Deimos and evaporation of a frozen subsurface ocean with the help of ground work techniques adapted for Mars. Hazards associated with the former case is discussed.