

Voda ve sluneční soustavě

Ještě nedávno se tvrzení o jedinečnosti Země mohlo opírat o podmínku výskytu vody. Avšak během posledních desetiletí se ukázalo, že vody je ve sluneční soustavě víc než dost a naše planeta není jediným tělesem se světovým oceánem. Zásoby vody na některých tělesech jsou dokonce větší než na Zemi. Cílem tohoto článku je představit současné poznatky o původu a výskytu vody ve sluneční soustavě, zejména pak na tělesech, kde se její přítomnost významně podílela či podílí na formování povrchu.

Voda v mezihvězdném prostoru

Přítomnosti vody ve vesmírném prostoru, a to v jakémkoliv skupenství, by ještě v polovině 20. století nikdo nevěřil, neboť mezihvězdný prostor je prostředím více než nepříznivým, s všudypřítomným ultrafialovým zářením, které rozkládá každou molekulu na atomy. Avšak výsledky měření již od 90. let minulého století ukazují, že v mezihvězdném prostoru existují místa, kde se molekuly různých látek včetně vody vyskytují. Nejvíce se jich nachází v oblastech mezihvězdných prachoplynových mračen, kde prach dostatečně odstíní ultrafialové záření, které by mohlo vzniklé molekuly rozbít (Dishoeck 2011). V těchto prachoplynových mračnách, která bývají označována jako mlhoviny, je vody více, než se donedávna myslelo. Například v mračnu, jehož hmotnost by byla rovna hmotnosti našeho Slunce, je obsaženo tolik vody, že by dokázala naplnit několik desítek tisíc pozemských oceánů. Přitom běžné mlhoviny dosahují hmotnosti několika tisíc Sluncí.

Na Zemi se voda nachází ve třech skupenstvích – v pevném (v podobě ledu), v plynném (jako vodní pára) a zejména v kapalném, kdy má funkci důležitého činidla, v němž probíhají různé chemické reakce. V mezihvězdném prostoru je voda přítomna v podobě plynu a jako led, který vzniká na prachových zrnech. Ukázalo se, že prachová zrna nepatrných velikostí, od jednoho nanometru (1 nm) do jednoho mikrometru (1 μ m), mají při vzniku vody

nezastupitelnou úlohu, přičemž na jejich povrchu dochází k důležitým chemickým reakcím, fúzím a energetickým transformacím mezi jednotlivými atomy, a tak se zde hromadí molekuly různých sloučenin včetně vody (Dishoeck 2011). Molekuly vody, které obklopí prachová zrna, zmrznou za velmi nízkých teplot (méně než $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$) a vytvářejí ledová jádra s příměsemi amoniaku, formaldehydu, metanu, oxidů uhlíku či dalších zmrzlých plynů a sloučenin (Křížek 2005). Takto hluboce podchlazený led v mezihvězdném prostředí nevytváří krystaly, na rozdíl od známého obyčejného pozemského ledu, na němž bruslíme, anebo si jej dáváme do nápojů. Navíc se tento „zvláštní“ led při vystavení proudů vysokoenergetického záření, které je přítomno ve volném kosmickém prostoru, chová podobně jako kapalina, jež „asistuje“ při vzniku složitých organických molekul. Organický materiál uzavřený v kometárním ledu tedy mohl ovlivnit i vznik života na Zemi.

Marek Křížek

Univerzita Karlova,
Přírodovědecká fakulta,
katedra fyzické geografie
a geoekologie;
marek.krizek@natur.cuni.cz

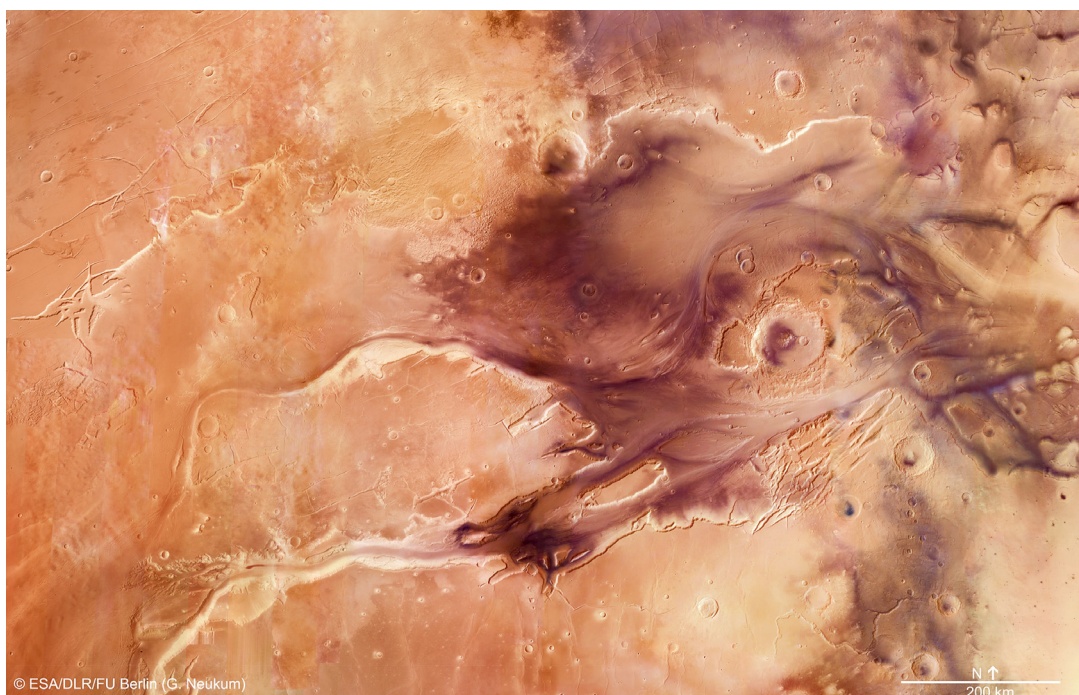
Původ vody na Zemi

Dnes víme, že se voda nachází i na jiných planetách a měsících sluneční soustavy (tab. 1). Avšak na každém z těchto těles se vyskytuje v jiné podobě a také tam hraje jinou roli. Odkud se tato voda vzala? A odkud pochází voda na Zemi? Na tuto jednoduchou otázku stále nedovedeme jednoznačně odpovědět. Chvilí se zdálo, že by přítomnost vody

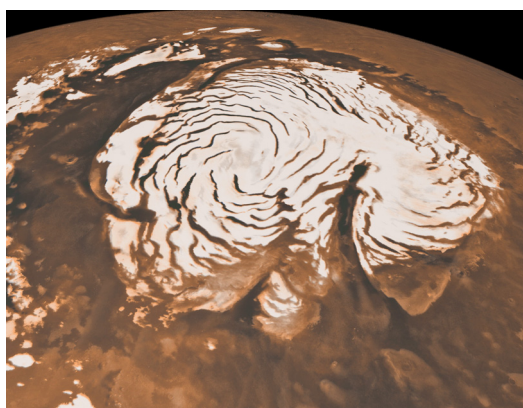
TAB. 1 Odhadované poměrové zastoupení vody na vybraných tělesech sluneční soustavy. (Celkové zásoby vody na Zemi tvoří 1 386 000 000 km³. Sestaveno na základě dat NASA.)

těleso	Měsíc	Merkur	Mars	Enceladus	Ceres	Europa	Callisto	Titan	Ganymedes
Násobek množství vody na Zemi	2×10^{-11}	2×10^{-7}	3×10^{-3}	$2-3 \times 10^{-2}$	$1-2 \times 10^{-1}$	2–3	17–27	20–29	36–39

OBR. 1 Jeden z nejdelších systémů údolí na Marsu – Kasei Vallis s charakteristickým postupným spojováním údolí, v nichž se nacházejí ostrovy kapkovitého tvaru, je jedním z projevů činnosti kdysi povrchově tekoucí vody. Snímek: ESA / DLR / FU Berlin (G. Neukum).



na Zemi mohly mít „na svědomí“ komety, zejména tzv. „malé vodní“, které jsou téměř výhradně budovány vodním ledem a mají zcela jiné složení než „velké komety“. Ve skutečnosti je historie pozemské vody daleko složitější a její původ je nutné hledat jinde, neboť současné výzkumy ukazují, že většina komet má jiný poměr deuteria (^2H) a vodíku, než jak je tomu v molekulách pozemské vody. Z hlediska podobnosti poměru deuteria a vodíku má blíže k pozemské vodě led z asteroidů a některých meteoritů, zejména tzv. uhlíkatých chondritů (Sarafian a kol. 2014). Nicméně není možné vyloučit možnost, že se poměr deuteria a vodíku během formování Země změnil. A tak kromě vody kometárního původu není možné vyloučit možnost, že pozemská voda vznikla a pochází stejně jako celá planeta z materiálu přítomného v dané části protoplanetární mlhoviny, tj. že má nebulární původ (Genda, Ikoma, 2008).



OBR. 2 Snímek severní polární čepičky na Marsu, pořízený sondou Mars Global Surveyor (NASA / JPL-Caltech / MSSS). Průměr severní polární čepičky činí cca 1100 km, u jižní je to o 100 km více.

Na druhou stranu obdobný poměr deuteria a vodíku jako je v pozemských oceánech byl zjištěn i v horninách přivezených z Měsíce v rámci misí Apollo. To by spíše nahrávalo tomu, že obě tělesa (Země i Měsíc) měla stejný zdroj vody a tím by byly asteroidy a meteoroidy.

Stanovit stáří pozemského oceánu je zřejmě podstatně snazší úkol než zjistit původ vody na Zemi. Výzkumy vycházející ze studia krystalů zirkonu (Valley a kol. 2014) a poměru nuklidů kyslíku (^{16}O a ^{18}O) ukazují, že oceán se objevil už v raných fázích vývoje Země a jeho stáří je odhadnuto na minimálně 4,4 mld. let (Wilde a kol. 2001).

Voda na Marsu

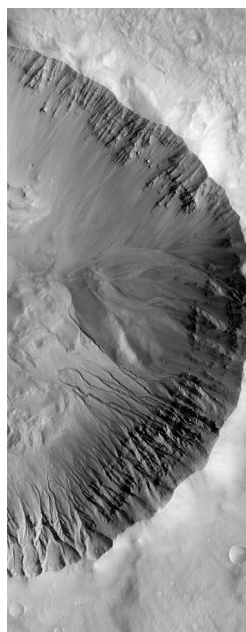
Kdyby probíhala soutěž o nejzáhadnější planetu našeho planetárního systému, jistě by vyhrál Mars. Bez nadsázky lze říci, že o značnou část popularity této planety se postarala voda. Nejen ta, která již na povrchu není, a dala například vzniknout údolním systémům či deltám a korytům (Křížek 2003), v nichž se nalézají valouny, ale i voda, která na povrchu Marsu zůstala, ať už v podobě pověsných polárních čepiček, či jako součást permafrostu (více Křížek 2015). Ještě před prvními snímky získanými kosmickými sondami byl Mars označen za planetu, na níž by mohla existovat voda, protože jeho polární čepičky byly pozorovatelné již v dalekohledech. S příchodem družic se objevily snímky, které ukazují mnoho tvarů nesoucích zřetelné stopy po působení tekoucí vody, jako systémy údolí, vyschlá řečiště (obr. 1), strže či náplavové kužely a delty. Charakteristickým rysem marsovských údolí, z nichž k největším patří Kasei

Vallis, Ares Vallis, Tiu Vallis, je jejich postupné rozšiřování od horních částí, přičemž v dolních částech dosahují až stokilometrové šíře (Křížek 2003). Výškový rozdíl mezi horními a dolními částmi údolí činí 1–2 km, někdy až 4 km, délka těchto údolí je až 1000 km. Začínají většinou v oblastech s chaotickým reliéfem a ústí do rozsáhlých pánví nebo rovin. Tato údolí pravděpodobně vznikla během katastrofických povodní způsobených uvolněním zmrzlé vody obsažené v permafrostu. Vše napovídá tomu, že k takovému povodním došlo na Marsu několikrát.

Kromě popsaných izolovaných údolí, jež mají charakter obrovských odvodňovacích kanálů nacházejících se v mladších částech marsovského reliéfu, lze na jeho povrchu rozeznat údolí, která vytvářejí složité údolní sítě podobné pozemským. Tato údolí jsou značně hluboká (1–2 km) a vznikla dříve než ony „odvodňovací kanály“. Jejich původcem byla i v tomto případě s nejvyšší pravděpodobností voda. Další z vážných indicií potvrzujících přítomnost vody na Marsu je nález hydroxidů železa (goethit, limonit) a oxidů železa (hematit), které zjistila sonda Mars Global Surveyor svým infračerveným spektrometrem a jež způsobují načervenalé zbarvení povrchu Marsu. Na základě analogie z podmínek na Zemi se ví, že zmíněné minerály vznikají ve vodním prostředí. Na druhé straně však byly na povrchu Marsu nalezeny jiné minerály, jako například olivín, které by se ve vodním prostředí musely již za tisíc let rozpadnout. Lze tedy říci, že rozsáhlé rezervoáry kapalné vody na Marsu během posledního tisíce let s určitostí nebyly.

Kde se voda v takovém množství, aby vytvořila nalezené tvary, na Marsu vzala, a hlavně kam zmizela, to je otázka, která ještě není beze zbytku zodpovězena. Předpokládá se, že atmosféra Marsu byla v oněch „vodních“ epochách v důsledku aktivní vulkanické činnosti daleko hustší. Jak tato vulkanická činnost ustávala, chladl i povrch Marsu a kapalná voda, pokud neunikla do kosmického prostoru v podobě vodíku a kyslíku, se změnila v led ukrytý v současné době v permafrostu a v polárních čepičkách (obr. 2). Ty mají mocnost nejméně 2,5 km a obsahují kromě vodního ledu, který je tvoří z podstatné většiny, i jasně bílý led tvořený zmrzlým CO₂, tzv. suchý led, který sublimuje při teplotě kolem –79 °C. Bylo spočteno, že jižní polární čepička obsahuje tolik vody, že by dokázala pokrýt celý povrch Marsu oceánem hlubokým 11 metrů.

Během roku se polární čepičky zvětšují a zmenšují podle ročního období. Například v létě sahá severní polární čepička k 80° až 85° severní šířky, kdežto v zimě dosahuje až k 65° severní šířky. Z opakovaných záběrů družicových snímků se ukazuje, že povrch polárních čepiček se rychle mění. Proto se také na těchto polárních čepičkách nevyskytují

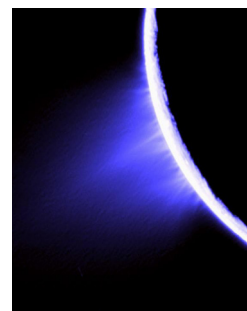


OBR. 3 Strže vyvinuté na svazích kráteru v oblasti Gorgonum Chaos na Marsu vznikly činností povrchově proudící kapaliny. Snímek: NASA / JPL / University of Arizona.

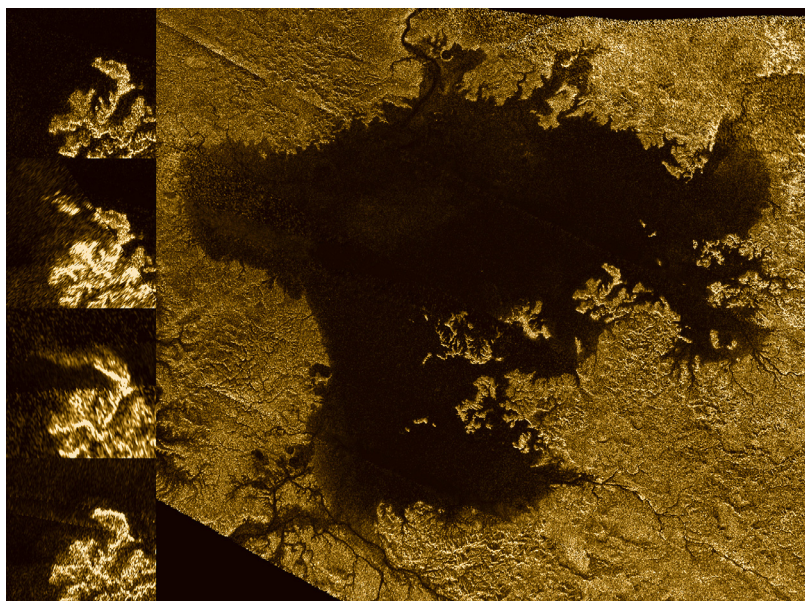
OBR. 4 Povrch Eury, do něhož je zapsán složitý vzor křížících se trhlin, které byly vyhojeny pronikající vodou. Mladší trhliny protínají starší a dokládají vícenásobnost procesů ve vývoji povrchu měsíce. Šíře snímku zachycuje cca 350 km a jeho rozlišení je 224 metrů na pixel. Snímek: NASA / JPL-Caltech / SETI Institute.

krátery, neboť stopy po impaktech zaniknou během jejich opakujících se sezónních proměn. Kromě sezónních cyklů se na změnách velikosti polárních čepiček podílejí i vnější vlivy s dlouhodobým efektem. Jinými slovy, podobně jako na Zemi existují i v historii Marsu doby ledové, přičemž v současné době dochází stejně jako na Zemi k oteplování a tání marsovských polárních čepiček (Fenton a kol. 2007). Je odhadováno, že v době posledního vrcholu ochlazení měly marsovské polární čepičky o 800 km větší průměr, než je tomu dnes.

Dříve si obě planety, Země a vulkanický Mars, byly daleko více podobné. Dnes se od sebe velmi výrazně liší právě zastoupením povrchové vody v kapalném skupenství. Může za to mimo jiné velmi řídká atmosféra Marsu (tlak je 150krát nižší než na Zemi), která je navíc hodně suchá, obsahuje totiž 10 000krát méně vody než atmosféra Země. Přesto vznikají na Marsu ve výškách 20–80 km oblaky z jemných ledových krystalků a během marsovských zim se v údolích objevují ranní mlhy. V takovýchto podmínkách na povrchu Marsu by se voda v kapalném skupenství fakticky okamžitě vypařila, přesto Mars Global Surveyor v oblasti Gorgonum Chaos objevil něco, co ukazuje, že v určitých oblastech by kapalná voda mohla alespoň po nějaký čas existovat. Při opětovném fotografování v oblasti Gorgonum Chaos byly objeveny strže (obr. 3), jež v předešlé sérii snímků neexistovaly. Vypadá to, že se na svazích vyskytly nové prameny, které vytvořily strže, a následně se tekoucí voda z části odpařila a z části přeměnila v led, který vytvořil světlé skvrny v místech strží. Kdyby byl podobný efekt pozorován na Zemi, nikdo by nepochyboval o přítomnosti povrchové vody.



OBR. 5 Výtrysky směsi vody, metanu, oxidu uhlíku a organických sloučenin z gejzírů na jižní polokouli Enceladu, pořízené v nepravých barvách sondou Cassini v listopadu 2005. Snímek: NASA / JPL / Space Science Institute.



OBR. 6 Velké uhlovodíkové jezero (Ligeia Mare) na Titanu. Obrázky v levém sloupci ukazují detail jedné z oblastí tohoto jezera v letech 2007, 2013, 2014 a 2015 (pořadí shora dolů). Díky nim byla objevena měnící se poloha břehové linie, což ukazuje na to, že zdejší jezera nejsou statická, ale mění se. Plocha tohoto druhého největšího rezervoáru metanu na Titanu je cca 150 000 km². Snímek: NASA / JPL-Caltech / ASI / Cornell.

Voda na Europě, Enceladu a Titanu

Dalšími, z hlediska přítomnosti vody zajímavými tělesy sluneční soustavy jsou Jupiterovy měsíce Callisto, Ganymedes a zejména Europa. Povrch posledně jmenovaného měsíce je velmi hladký a je tvořen ledovou krustou (obr. 4), která je mocná minimálně 3–4 km a maximálně 10–30 km. Pod ní se nachází oceán slané kapalné vody, jež občas vystupuje podél trhlin až k povrchu a fakticky zde plní roli lávy. Absence impaktních kráterů na povrchu Europy dokazuje, že je mladý, dynamický a postupně se přetváří. V roce 2014 Hubbleův teleskop zaznamenal nad povrchem Europy mračno vodní páry a na povrchu měsíce byla pozorována ložiska hydratovaných solí. Nicméně nejlepším důkazem existence podpovrchového oceánu hlubokého až 100 km je existence indukovaného magnetického pole, vznikajícího interakcí podpovrchové slané vody a magnetosféry Jupitera. Obdobné důkazy ukazují rovněž na existenci globálních oceánů na Callisto i Ganymedu. Nicméně pouze u Europy vodní oceán zřejmě naléhá přímo na horninové podloží. Právě možnost obohacení o látku z horninového prostředí dělá z Europy nejlepšího mimozemského kandidáta na existenci nějakých forem života v naší sluneční soustavě.

Rovněž Saturnovy měsíce vykazují přítomnost nemalého zastoupení vody. Sonda Cassini odhalila v roce 2005 na Enceladu obrovské gejzíry (obr. 5), které chrlí vodu do takové výše, že molekuly vody opouštějí gravitační pole tohoto Saturnova měsíce. Na jedné straně oslabují ionosféru Saturnu a na druhé straně pomáhají vytvářet jeden ze Saturnových prstenců, označovaný jako E (Hansen 2006). Bílé ledové částice z Enceladu dokonce dopadají na další dva Saturnovy měsíce – Tethys a Dione.

Podobně jako na Enceladu, tak i na největším Saturnově měsíci – Titanu se předpokládá existence podpovrchového globálního vodního oceánu. Nicméně na jeho povrchu se lze, kromě projevů kryovulkanismu (obdoba pozemské sopečné činnosti, kde však dochází k výronům chladné hmoty, např. vodního ledu, amoniaku, metanu, místo roztavených hornin), produkujícího rozbředlou ledovou hmotu ze směsi vody a čpavku, setkat i s řekami a jezery (obr. 6). Nicméně tato jezera a řeky nejsou tvořeny vodou, ale metanem (Dermott, Sagan 1995). Metan na Titanu vytváří analogii vodního cyklu, který známe ze Země. Z povrchu Titanu, kde se vyskytuje v kapalně fázi, se metan odpařuje do dusíkové atmosféry a pak dopadá zpět ve formě srážek. To vše se odehrává při teplotách kolem -179°C .

Závěr

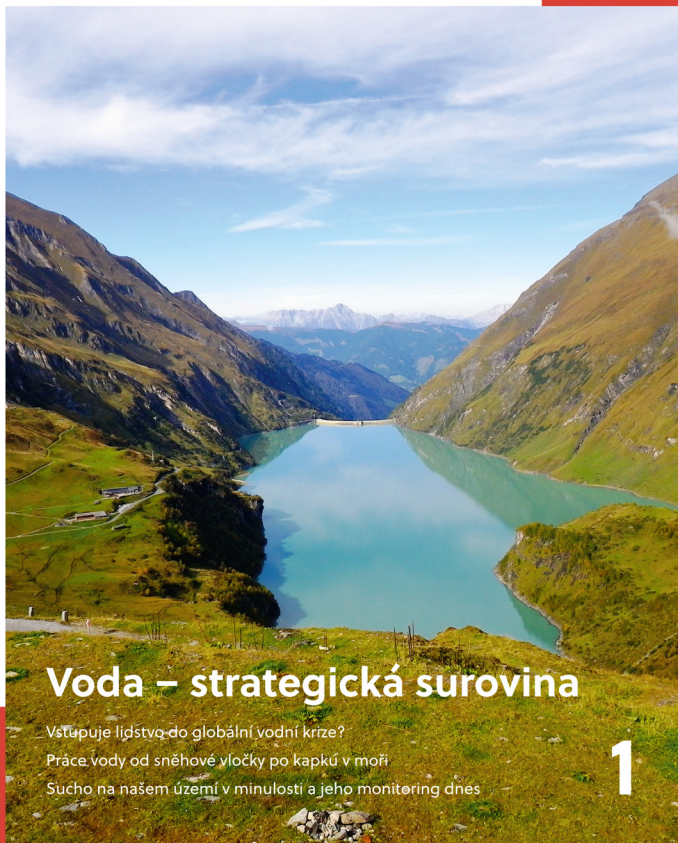
Ukazuje se, že voda má ve sluneční soustavě daleko větší rozšíření, než se donedávna myslelo. Rovněž role a podoby vody se mění na různých tělesech v jednotlivých částech sluneční soustavy. Voda na mnohých tělesech zejména ve vnější části sluneční soustavy supluje roli lávy. Na druhou stranu se ukazuje, že jiné látky mohou mít obdobný vliv na formování reliéfu jako voda či mohou vytvářet obdobu pozemského vodního cyklu.

Literatura a zdroje dat

- DERMOTT, S., SAGAN, C. (1995): Tidal effects of disconnected hydrocarbon seas on Titan. *Nature*, 374(6519), 238–240.
- DISHOECK, E. (2011): Water in space. *Europhysics News*, 42(1), 26–31.
- FENTON, L. K., GEISSLER, P. E., HABERLE, R. M. (2007): Global warming and climate forcing by recent albedo changes on Mars. *Nature*, 446(7136), 646–649.
- GENDA, H., IKOMA, M. (2008): Origin of the ocean on the Earth: Early evolution of water D/H in a hydrogen-rich atmosphere. *Icarus*, 194(1), 42–52.
- HANSEN, C. J. (2006): Enceladus Water Vapor Plume. *Science*, 311(5766), 1422–1425.
- KŘÍŽEK, M. (2003): Mars a jeho reliéf. *Geografické rozhledy*, 12(4), 108–109.
- KŘÍŽEK, M. (2005): Voda ve vesmíru. In: Kol. autorů: *Živel voda*. Agentura Koniklec, Praha, 154–157.
- KŘÍŽEK, M. (2015): Strukturní půdy. *Geografické rozhledy*, 25(2), 32.
- SARAFIAN, A. R., NIELSEN, S. G., MARSCHELL, H. R., MCCUBIN, F. M., MONTELEONE, B. D. (2014): Early accretion of water in the inner solar system from a carbonaceous chondrite-like source. *Science*, 346(6209), 623–626.
- VALLEY, J. W., CAVOSINE, A. J., USHIKUBO, T., REINHARD, D. A., LAWRENCE, D. F., LARSON, D. J., CLIFTON, P. H., KELLY, T. F., WILDE, S. A., MOSER, D. E., SPICUZZA, M. J. (2014): Hadean age for a post-magma-ocean zircon confirmed by atom-probe tomography. *Nature Geoscience*, 7(3), 219–223.
- WILDE, S. A., VALLEY, J. W., PECK, W. H., GRAHAM, C. M. (2001): Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409(6817), 175–178.

Abstract

Water in the Solar system. This paper deals with the origin and occurrence of the water in the Solar system and presents its role and importance especially for the development of Earth-type planets and selected large moons.



Voda – strategická surovina

Vstupuje lidstvo do globální vodní krize?

Práce vody od sněhové vločky po kapku v moři

Sucho na našem území v minulosti a jeho monitoring dnes

1

Tento soubor (článek) je vlastnictvím časopisu Geografické rozhledy a podléhá právní ochraně. ■ Vydavatel i nakladatel časopisu si vyhrazují právo článek zveřejňovat na webových stránkách a sociálních sítích časopisu za účelem propagace časopisu. ■ Dílo není určeno ke komerčnímu využití. Smí se šířit, pokud jsou korektně uvedeny údaje o autorovi, článku a jako zdroj citován časopis Geografické rozhledy.