

Endoliti – extremofilní organismy v horninách

Život na planetě Zemi a především mikroskopické organismy jsou všudypřítomné. Dá se říci, že je určitě těžší najít zcela sterilní prostředí než prostředí s výskytem mikroskopického života. Živé mikroorganismy se vyskytují ve vysokých vrstvách atmosféry, na dně oceánů, na povrchu skalních výchozů a také v celé řadě vyloženě extrémních prostředí. Věda stále objevuje nové a nové druhy, které jsou schopné tolerovat extrémní teploty, pH, dostupnosti vody, salinity, radiace atd. (např. Živa 2017, 5: 208–213). V průběhu biologické evoluce došlo k zaplnění i takto nehostinných ekologických nik organismy, které se nazývají extremofilové. Definice extremofilního organismu ve spojitosti s mikroorganismy kolonizujícími horniny a minerály se také liší podle jednotlivých autorů a jejich zaměření: pro některé už samotný fakt rozvoje kolonizací v horninovém prostředí znamená, že jde o extremofila, častěji však bývají za ně považovány, pokud se lokalita jejich výskytu nachází v obecně nehostinném prostředí – typicky v oblasti pouští horkého typu, jako je Atacama v Jižní Americe, či mrazového typu, jako jsou Suchá údolí v Antarktidě.



Mikroorganismy kolonizující horniny a minerály nebo jejich přímé okolí se souhrnně označují jako lithobionti. Dále se dělí na epility, žijící na povrchu hornin (obr. 4), hypolity, vyskytující se např. pod oblázky, a endolity, kteří mohou přebývat uvnitř horniny (obr. 5–7). Endoliti se mohou dělit podle způsobu kolonizace, tedy v jakém specifickém prostředí se v dané hornině vyskytují. Chasmoliti jsou mikroorganismy kolonizující vnitřek horniny po puklinách otevřených okolnímu prostředí, kryptoendoliti obývají uzavřené dutinky a póry, hypoendoliti pórový prostor horniny v kontaktu s půdou. Toto rozdělení nám neříká nic dalšího o jednotlivých organismech nebo jejich společenstvech, a navíc situa-

ce na výchozu např. s hojností rozvolněných zvětrávacích krust, které bývají bohatě kolonizované, ukazuje komplexitu těchto systémů (uvedenému rozdělení se tedy v textu dále nevěnujeme). Vertikální stratifikace kolonizace, která je místy velmi pěkně pozorovatelná pouhým okem a často se projevuje zřetelnými barevně odlišnými vrstvami, mnohdy začíná na povrchu a pokračuje do nitra horniny a epility tak přecházejí v endolity. V našich středoevropských podnebních podmínkách s dostatkem srážek a relativně nízkou intenzitou ultrafialového (UV) záření jsou epility poměrně značně rozšířené a na první pohled identifikovatelné. Typickými organismy pokrývajícími výchozy a skalky jsou také

1 až 3 Výchoz sádrovce v poušti Negev, Izrael (obr. 1), v pohorí Harz, Německo (2) a v jižní Sicílii, Itálie (3)

4 Tmavá zvětrávací krusta kolonizovaná epility (mikroorganismy žijícími na povrchu hornin) na výchozu anhydritu v pohorí Harz

5 Barevná stratifikace v rámci endolitické kolonizace v sádrovci – tvořené mikroorganismy obývajícími vnitřek horniny. Jižní Sicílie

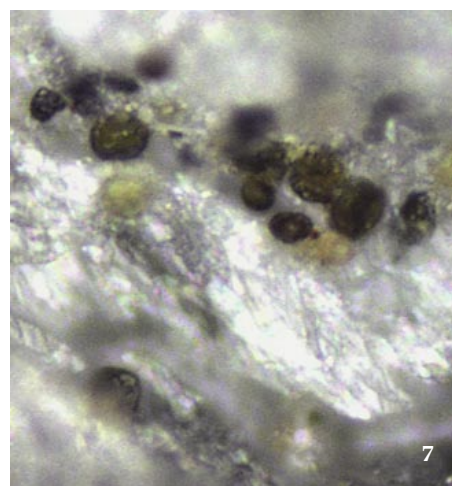
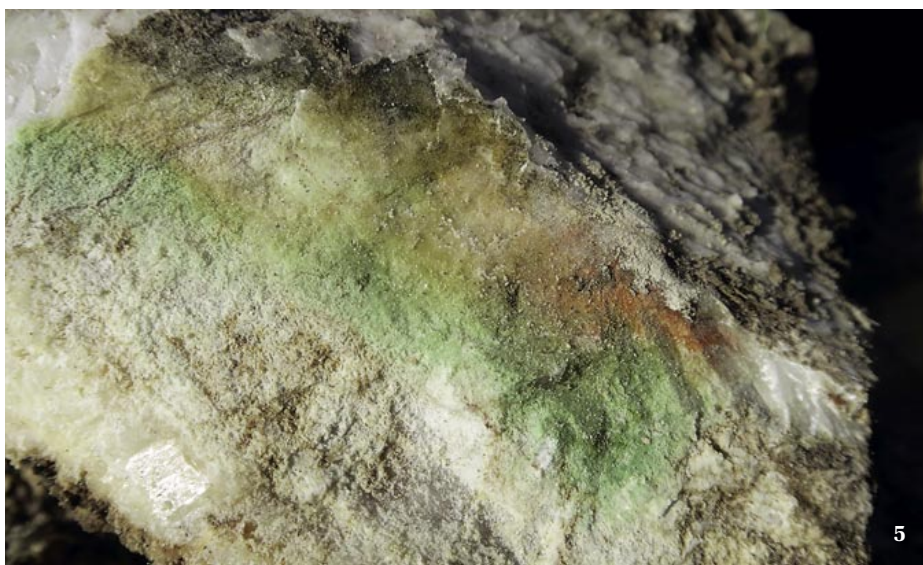
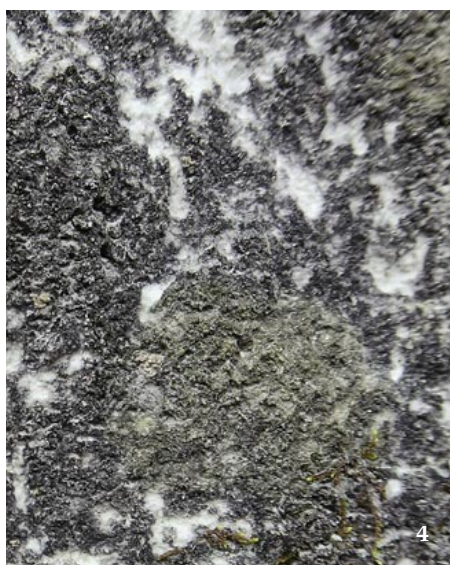
6 Endolitická kolonizace pod povrchem sádrovcového výchozu v poušti Negev

7 Mikrofotografie skupiny buněk endolitů a jejich ochranných obalů bohatých na pigment scytonemin v sádrovci z jižní Sicílie. Scytonemin pomáhá organismus chránit před ultrafialovým zářením (bližší v textu).

lišejníky a mechy. Čím je prostředí nehostinnější, tím více jsou lithobionti nuceni uchýlovat se pod povrch a vyhledávat tam ochranu. Typickým příkladem hypolitů jsou mikroorganismy (nejčastěji jde o sinice, v menší míře o zelené řasy), které naleznete, pokud odklopíte oblázky a valouny křemene v na první pohled zcela života prosté části Negevské pouště v Izraeli. Extremofilní mikroorganismy zde osídlují vyschlou jílovito-písčitou půdu, která je v kontaktu s oblázky, formou prstencových kolonií na rozhraní půdy a minerálu. Tento zdánlivě jednoduchý habitat poskytuje ochranu před UV zářením a zároveň částečná průsvitnost křemene ve viditelném spektru zajišťuje dostatek sluneční energie pro fotosyntézu. Kondenzace pouštní vlhkosti na povrchu hladkého kamene doprovázená jejím vsakem a následnou relativní ochranou před odparem je také nezbytnou podmínkou pro rozvoj takové kolonizace. Endoliti obývají podpovrchový prostor v hornině a výše zmíněná vertikální stratifikace projevující se směrem do hloubky charakteristickou sekvencí na sebe navazujících barevných vrstev v pořadí černá, oranžovo-červená a zelená (obr. 5) má své opodstatnění (viz dále).

O kterých organismech se bavíme?

Mezi extremofily najdeme zástupce všech tří hlavních domén života: Bacteria, Archaea a Eukaryota. V rámci lithobiontů jsou nejčastěji zastoupeny sinice, tedy fotosyntetizující bakterie, které patří mezi primární producenty. Kokální sinice se zástupci rodů *Chroococcidiopsis*, *Gloeocapsopsis*, *Gloeocapsa*, *Synechococcus* a *Gloeotheca*, vláknité sinice, typicky z rodů *Nostoc*, *Scytonema*, *Symplacstrom*, *Microcoleus* nebo další zástupci řádu *Oscillatoriales*. Mezi Archaea patří množství extremofilních organismů specializujících se typicky na prostředí s vysokou salinitou, např. v místech, kde se získává sůl kamenná z mořské vody několikanásobným odpařováním v odpařovacích pánvích (anglicky salterns). Zde jde o zástupce rodů *Halobacterium*, *Haloferax*, *Halorubrum*, *Haloarcula* a *Halococcus*. Mezi další známé halofilní mikroorganismy patří bakterie *Salinibacter* a *Ectothiorhodospira* nebo zelená řasa *Dunaliella*. Důležitou součástí extremofilních kolonizací bývají také mikroskopické houby, které poskytují dodatečnou ochranu před UV zářením, pokud jsou melanizova-



né – jejich vlákna obsahují zvýšenou koncentraci pigmentů ze skupiny melaninu. Příkladem je *Neocatenulostroma* kolonizující sádrovcové zvětrávací minerální krusty v nejsušší části pouště Atacama. Další často se vyskytující houby v endolitických a epilithických společenstvech patří k rodům srpovnička (*Fusarium*), štětičkovec (*Penicillium*) a kropidlák (*Aspergillus*). Specifickou kategorií jsou rody tvořící lišejníky symbiózou s fotosyntetickými řasami nebo sinicemi, např. šálečka (*Lecidea*), misnička (*Lecanora*), drobnovýtruska (*Acarospora*) nebo krásnice (*Caloplaca*) či terčník (*Xan-*

thoria), často se vyskytující také v extrémních prostředích.

Epilithi a endolithi

Mikroorganismy kolonizující horniny najdeme ve všech podnebných páslech a obdobně široká je i pestrost osídlovaných horninových typů ve formě výchozů. V klimatu tropického, subtropického a mírného pásu s dostatkem srážek a absencí jiných extrémnějších podmínek dochází k rozvoji epilithických kolonizací na všech typech hornin od vyvřelin přes metamorphy až k sedimentárním horninám. Naproti tomu v oblas-

tech s mimořádně limitovanými srážkami, teplotními extrémy a vysokou intenzitou UV záření, jako jsou typicky horké a na druhé straně mrazové pouště a také vysokohorské polohy, jsou extremofilní mikroorganismy nuceny volit strategii pro přežití přesunem pod povrch horniny. Různé horniny mají odlišný kolonizační potenciál, jinými slovy, není tedy jednoznačné, zda v nich dojde k makroskopicky viditelnému porostu a v jakém rozsahu a druhové pestrosti. Extremofilové v hornině osídlují její pórové prostory a i štěpné a jiné pukliny. Pokud se na hornině vyvinula zvětrávací



krusta, může být právě ona kolonizována přednostně. Pórový prostor navíc zadržuje vodu, která představuje nejčastější limitující faktor. Bývá také často mechanicky a chemicky modifikován mikroorganismy (hyfami hub) a mění se i rychlost a způsob zvětrávání a vznikají např. krusty. Pravděpodobně právě soudržnost horniny je důležitějším faktorem než její převládající chemické složení. Třeba pískovce, tvořené převážně zrný křemene a menším podílem tmelů obsahujících např. karbonáty a oxohydroxidy železa, jsou velmi porézní. Naopak tvrdé magmatické horniny (hlubinné i výlevné) s pestrým minerálním složením odolávají zvětrávání a jsou kolonizovány převážně po puklinách. Horniny se rovněž diametrálně liší mírou prostupnosti slunečního záření různých vlnových délek. Krátkovlnné UV záření má zanedbatelnou hloubku prostupu pod povrch horniny a organismy jsou tak lépe chráněny před fotochemickým buněčným poškozením týkajícím se zejména nukleových kyselin. Na druhou stranu horniny s převahou tmavých minerálů efektivně absorbují i světlo ve viditelném spektru, které tak není dostupné pro fotosyntézu. Z tohoto hlediska jsou fotosyntetizujícími mikroorganismy nejnárodněji kolonizovány světlé, průsvitné až průhledné horniny. Do této kategorie se řadí i evaporitické horniny vznikající krystalizací minerálů z vodných roztoků, nejčastěji mořské vody. Příklady takových hornin jsou vápence, tvořené modifikacemi uhličitane vápenatého (CaCO_3) kalcitem nebo aragonitem, dolomitické horniny obsahující navíc uhličitane hořečnatý (MgCO_3) a také jejich metamorfní analogy, mramory. Evaporitické horniny tvořené sádrovcem ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhydritem, bassanitem a dalšími např. hořečnatými sírany jsou relativně vzácnější, nicméně se ukazují jako velmi vyhledávaný habitat díky své vysoké průhlednosti, štěpnosti a malé odolnosti. Halit neboli sůl kamenná (NaCl) a v menší míře i další chloridy vyskytující se ve formě krust či výchozů v aridních oblastech jsou příklady vysoce rozpustných evaporitických hornin a krust na dně periodicky vysychajících pánví nebo bezodtokých jezer, které bývají kolonizovány extrémofilními organismy ze skupiny halofilů.

Velmi slaná prostředí

V odpařovacích pánvích dochází ke krystalizaci minerálů z mořské vody v sekvenci podle jejich rozpustnosti. Takto vzniklé minerály označujeme souhrnně jako evapority a horniny jimi tvořené mají celou řadu zajímavých vlastností s ohledem na možnosti kolonizace extrémofilů a uchovávání organické hmoty. Při odparu krystalizují nejprve uhličitany jako kalcit, následně sádrovec a nakonec ekonomicky nejvýznamnější halit. Voda v odpařovacích nádržích na výrobu soli z mořské vody obsahuje halofilní extrémofilů, často v tak velkém množství, že má zářivě růžovou barvu. V průběhu krystalizace minerálů se tvoří dnové krusty, které jsou postupně kolonizovány a mikroorganismy jsou tak zachyceny do nově vzniklého agregátu. Odpařovací nádrže proto mohou sloužit jako modelové systémy pro podobné procesy vzniku vrstev evaporitických minerálů v geologické minulosti Země. Jeden takový významný proces, známý jako Messinská salinitní krize, probíhal v celkem nedávné geologické minulosti na konci miocénu (před asi 5,9 až 5,5 miliony let) v oblasti Středozemního moře. Došlo při něm v důsledku pohybů litosférických desek k přehrazení Gibraltarské úžiny a přeměně Středozemního moře v bezodtokou pánev, kde v aridních podmínkách přetrvávaly zbytky hypersalinních jezer. Mořské soli se v obrovských objemech ukládaly v podobě evaporitických minerálů. V současnosti jsou důkazem až 3 km mocné vrstvy halitu a dalších minerálů uložené pod mořským dnem v levantské pánvi východního Středozemního moře a také výchozy evaporitických minerálů na pevninských lokalitách a ostrovech v oblasti Středozemního moře. Extrémně rozpustný halit se obvykle na povrchu nedochovává. Existují výchozy evaporitů, některé i značného rozsahu, jako Vena del Gesso v Itálii, které jsou tvořené výhradně sádrovcem. Sedimentace sádrovce ve spojitosti s tektonickými procesy dala vzniknout makroskopicky velmi odlišným sádrovcovým horninám. Nacházíme mikrokrytalický světlý sádrovec typu alabastr, dále horninu tvořenou světlé šedými krystaly sádrovce o velikosti až několika centimetrů a rovněž polohy z průsvitných medově

8 Rozpouštěcí zvětrávací hříbtky na výchozu anhydritu a sádrovce jako jeden z krasových jevů

9 Detail krystalů variety sádrovce nazývané selenit na výchozu z jižní Sicílie

10 Několik centimetrů velké transparentní krystaly selenitu s okolní epilitickou kolonizací na výchozu v pohorí Harz

11 Charakteristické zdvojitěné sádrovcové krystaly – „vlaštovčí ocasy“ – na výchozu v Kalábrii, Itálie

zbarvených až zcela průhledných krystalů sádrovce o velikosti až desítek centimetrů, nebo dokonce metrů. U krystalů sádrovce, někdy označovaných jako varieta selenit (obr. 9 a 10), dochází k častému zdvojitění (dvojitnému srůstu krystalů) a výskytu „vlaštovčích ocasů“ (obr. 11).

V souvislosti s krystalizací evaporitických minerálů z vodných roztoků je třeba zmínit ještě možnost vzniku inkluzí v minerálech. Tyto „bubliny“ mohou být velmi malé (mikrometrické), ale i větší v řádu milimetrů. Inkluze jsou uzavřeny přímo v jeho nitru a nejčastěji vznikají syngeneticky – při krystalizaci minerálu. Mohou obsahovat plyny, kapaliny i pevné látky a ve vzácných případech zachycené mikroorganismy. Inkluze jsou izolovány od okolního prostředí a organické látky, přímo celé buňky nebo vícebuněčné mikroorganismy jsou tak lépe chráněny před oxidací a rozkladem. Detailní studium různých typů kolonizací a distribuce organické hmoty v evaporitických minerálech je důležité hned pro několik geovědních oblastí.

„Mladá“, recentní kolonizace se projevuje pigmenty (více dále v textu). „Staré“ (fossilní) organické složky byly v hornině uzavřeny v době, kdy minerály tvořící horninu krystalizovaly v prostředí podobném např. současným odpařovacím pánvím. „Stará“ organická složka je navíc v závislosti na svém stáří a faktorech diagenese přeměněna, obecně se označuje jako uhlíkatá hmota v horninách.

Biomarkery nejen extrémofilů

Při výzkumu extrémofilů a jejich pozůstatků, které se mohou zachovávat v horninovém prostředí, se využívají vhodné mole-



kulární markery, „stopy života“, nazývané biomarkery. Pojem biomarker má jiný význam v různých oborech, např. v ropné geologii. Zde však budeme operovat s biomarkery ve vztahu k astrobiologii, což je věda zabývající se mimo jiné hledáním života mimo planetu Zemi (blíže následující článek na str. 257–260).

Co tedy je a co není biomarker? Odpověď se vyvíjela s rozvojem poznání. Historicky byly mezi biomarkery řazeny např. aminokyseliny, obecně známé jako základní stavební jednotky proteinů. Jenže postupem času a zdokonalováním experimentů a pozorování bylo zjištěno, že aminokyseliny ve vesmíru vznikají i celou řadou čistě abiotických procesů, jak ukázal třeba známý Ureyův–Millerův experiment, při němž bylo dosaženo tvorby organických molekul, včetně aminokyselin, působením elektrického výboje ve směsi jednoduchých plynů. Již dále se ví, že aminokyseliny se vyskytují v nezanedbatelných množstvích např. v meteoritech a dokonce i meziplanetárním prostoru jako jedna ze skupin organických sloučenin. Postupně tedy docházelo ke zpřesňování pojmu biomarker. Moderní a zároveň asi nejrigoróznější definice říká, že jde o organickou molekulu, vznikající pouze biologickým procesem, tedy za účasti živého organismu. Typicky o molekuly s vysoce specializovanou funkcí v tomto organismu. S tím také souvisí to, že molekuly biomarkerů mají velmi specifické a charakteristické struktury, které jim udílejí zvláštní vlastnosti. Patří mezi ně řada molekul produkovaných extremofily, které jim pomáhají minimalizovat nebo eliminovat stresové faktory okolního prostředí. Extremofilové tyto molekuly vytvářejí v daleko větších množstvích, což je výhodné i pro jejich následné zachování či případnou detekci.

Velice zajímavou podskupinou biomarkerů jsou pigmenty. Už svou podstatou, vlastní barevností, signalizují, že jejich funkce v organismu bude souviset s interakcí se světlem. K typickým příkladům patří látky ze skupiny chlorofylu, nejčastěji zelené až modré, a pak karotenoidy, kterých existuje přes tisíc a jsou nejčastěji červené, oranžové a žluté. Chlorofyl a karotenoidy představují nezbytnou funkční

složku fotosystémů, v nichž dochází ke sběru energie světla a následné redukci molekul jako jedné ze součástí procesu fotosyntézy. Ta je samozřejmě zásadním procesem nejen pro extremofily. Z hlediska struktury jsou chlorofyly tvořeny základní tetrapyrrolovou kostrou s různými postranními řetězci, podle kterých se dají klasifikovat. Chlorofyly absorbují modré a červené světlo. Karotenoidy jsou terpenoidní látky vyznačující se konjugovaným řetězcem dvojných uhlíkových vazeb a případnými kruhy s funkčními skupinami a řetězci a absorbují modré a zelené světlo. Konjugovaná vazba dává molekulě barevnost a řadu dalších důležitých vlastností. Sekundární karotenoidy, jež některé extremofilní organismy produkují ve značných množstvích, slouží jako efektivní ochrana před škodlivým UV a viditelným zářením, zároveň jsou silnými antioxidanty. Další důležité pigmenty s hlavní funkcí ochrany před UV zářením zahrnují např. scytonemin a jeho deriváty i známý melanin. Scytonemin je medové barvy a některé mikroorganismy jej využívají při tvorbě ochranných obalů vně svých buněk (obr. 7). Poněkud záhadný gloeokapsin je fialové barvy se strukturou podobnou parietinu (antrachinonovému derivátu) vyskytujícímu se např. v lišejnících rodu terčník. Melanin je hodně tmavý až černý pigment, což naznačuje, že velmi dobře absorbuje světlo širokého rozsahu vlnových délek včetně výrazně krátkovlnného UV záření (maximum absorpce má 200 až 300 nm), které je nejničivější např. pro DNA. Z extremofilů je produkován typicky houbami, kde tvoří vnější vrstvu buněčné stěny hyf a spor. Struktura melaninu je navíc komplikovaná a je odvozená nejen od molekulárních prekurzorů, ale také charakterizovaná tvorbou vyšších struktur, ve finále tvořící heterogenní biopolymer. Kromě ochrany před UV zářením chrání před dehydratací, toxickými látkami a reaktivními formami kyslíku.

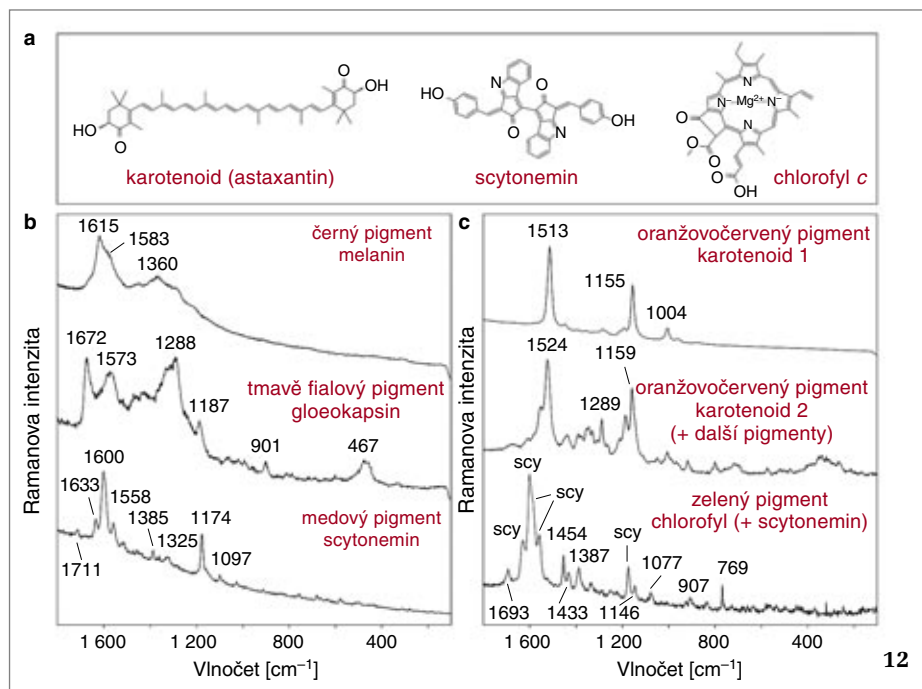
Mezi další, nepigmentové biomarkery patří některé molekuly jako cukr trehalóza a derivát aminokyseliny trimetylglucin (glycinbetain), sloužící k regulaci osmotického tlaku v buňce v prostředí se zvýšenou koncentrací rozpuštěných solí.

Biomarkery, jakožto organické látky, podléhají v přírodním prostředí degradaci, tedy přeměně nebo rozkladu. Možnost jejich zachování v horninovém prostředí závisí především na struktuře původní molekuly, jejím množství, substrátu a hornině, kde je rozptýlena, dále na fyzikálně-chemických podmínkách přeměny nebo diagenese a na čase, zásadním faktoru nejen v geologii. A co přítomnost biomarkerů mimo naši planetu?

Hledání biomarkerů na Marsu

Na příkladu Marsu se dají doložit prostředky lišící se potenciálem pro zachování biomarkerů. Povrch této planety je pro zachování biomarkerů („stop života“) naprosto nevhodný, protože je vystaven radiaci ze Slunce, která na rozdíl od Země není odstíněna magnetickým polem, hustou atmosférou s ozonovou vrstvou a dochází zde k fotodisociaci organických molekul. Marsovský regolit (nezpevněný materiál na povrchu) navíc obsahuje chemické látky s vlastnostmi velmi silných oxidantů, jako jsou např. chloristany. Dnes víme, že v dávné geologické minulosti Marsu byla období, kdy planeta měla hustou atmosféru, říční síť a mělká jezera nebo moře, a z té doby se dochovaly sedimentární horniny jako deltové sedimenty, jemnozrnné jezerní sedimenty bohaté na jílové minerály a také polohy evaporitických hornin tvořených minerály převážně ze skupiny síranů Mg a Ca. A s ohledem na předpoklad, že kapalná voda je základní podmínkou života, právě tyto horniny se dnes staly primárním objektem pro průzkum s cílem nalezení potenciálních biomarkerů.

Historie experimentálního pátrání po stopách života v podobě živých i odumřelých mikroorganismů nebo molekulárních stopách (biomarkerech) dokládajících přítomnost života v geologické minulosti Marsu začala v polovině 70. let 20. století. V rámci programu Viking (NASA – Národní úřad pro letectví a vesmír, USA) dosáhly povrchu Marsu dva přistávací moduly Viking 1 a 2, nesoucí množství analytických přístrojů připravených pro experimenty. Biologické experimenty zahrnovaly analýzy plynů uvolněných z půdy pomocí plynové chromatografie s hmotnostní



12 Struktura molekul vybraných pigmentů – biomarkerů (obr. a). Příklady Ramanových spekter pigmentů – melaninu, gloeokapsinu, scytoneminu, různých karotenoidů a chlorofylu – epilitů a endolitů sádrovce z lokality Wola Zagojska, Polsko (b, c). Spektra měřena laboratorním Ramanovým mikrospektrometrem.

13 Ruční Ramanův spektrometr při *in situ* detekci pigmentů endolitů na výchozu slínovců v poušti Negev. Snímky a orig. A. Culka

spektrometrií, inkubaci půdy a sledování výměny plynů a také využití izotopově značených živin (pomocí uhlíku ^{14}C) přidávaných do půdy za účelem zjištění případných aktivních metabolických procesů. Výsledky těchto experimentů nebyly jednoznačné a nyní víme, že falešně pozitivní výsledky mohou být vysvětleny čistě (foto)chemickými procesy. Následovala řada velmi úspěšných misí NASA představovaných rovery zkoumajícími Mars: Sojourner (1997), Spirit a Opportunity (2004), Curiosity (2012). V současnosti (od r. 2021) působí na povrchu Marsu rover Perseverance (NASA), jehož hlavní „náplní práce“ je pátrat po stopách života. Zkoumá lokalitu kráteru Jezero, který byl v minulosti opravdu jezerem a kde jsou dochované sedimentární horniny. Mezi používané analytické přístroje patří také dva Ramanovy spektrometry, jeden zabudovaný na robotické ruce roveru pro kontaktní měření, druhý teleskopický umožňující analýzy na vzdálenost až 12 m.

Ramanova spektroskopie je analytická metoda založená na rozptylu monochro-

matického záření (laseru) při interakci s molekulami vzorku a jejich vibračními módy. Takto rozptýlené záření obsahuje nová intenzitní maxima (projevující se ve spektech pásy vlnových délek odlišných od charakteristik původního laseru). Ramanovo spektrum dané látky nese jednoznačné informace o jejím chemickém složení a struktuře. Metoda umožňuje rychlou a ne-destruktivní, kvalitativní analýzu vhodnou pro identifikaci organických i anorganických látek s možností využití databází Ramanových spekter sloučenin (obr. 12). Pokročilá miniaturizace v současnosti dovoluje nasazení právě i v planetárním výzkumu, kde může sloužit k detekci a identifikaci organických látek a biomarkerů nebo k jednoznačnému určení minerálních fází.

Závěrem lze říci, že výzkum extrémofilních organismů žijících v horninách a zahrnující studium zachování a detekce biomarkerů v prostředích jejich vzniku nebo i na dochovaných výchozech poskytuje unikátní možnost interdisciplinární spolupráce. Propojují se zde oblasti mikro-

biologie i geochemie, výzkum může zahrnovat poznání podmínek původních sedimentárních prostředí i klimatu v minulosti. Některé lokality na extrémních místech na Zemi jsou považovány za marsovské analogy sloužící k instrumentálnímu a analytickému tréninku s přímou přenositelností pro oblast poznání minulých prostředí i hledání stop života na Marsu.

Výzkum mikroorganismů přežívajících v horninovém prostředí, detekce a charakterizace biomarkerů lithobiontů a dalších extrémofilních organismů byly podpořeny např. projekty Grantové agentury ČR (P210/10/0467, 17-04270S a 21-03322S).

Seznam použité literatury uvádíme na webové stránce Živy.

T | Ý | D | E | N | A | V

AKademie věd České republiky

TÝDEN AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY

3–9/11/2025 Objevujte pracoviště AV ČR

WWW.TYDENAVCR.CZ

f y i