

## Válka proti opuncii – příběh jedné z nejhorších rostlinných invazí v novodobé historii člověka

Před 85 lety se v Austrálii chýlila ke konci válka farmářů, vlády a ochránců přírody s invazní rostlinou opuncí *Opuntia stricta*, jejíž porosty prakticky zničovaly využití krajiny a likvidovaly domácí vegetaci na ploše třikrát větší, než je rozloha České republiky. V období svého vrcholného nárůstu v r. 1925 zabírala tato rostlina pro sebe každým dnem asi 50 ha nové plochy a vyháněla farmáře a jejich rodiny z farem. Australská vláda ustavila radu pro boj s opuncí, národní i státní vlády australského svazu financovaly výzkumné eradikační programy. Nepomáhalo kuriózní nasazení plamenometů ani tanků z bojů první světové války ani jedovatých plynů. Nepomáhaly stovky tun jedovaté kyseliny arzeničné. Pomohl až drobný, nevýrazný, na opuncii svým rozmnožováním závislý motýl *Cactoblastis cactorum* z čeledi zavíječovití (Pyralidae), přivezený z Jižní Ameriky. Deset let po jeho vysazení invazní opuncie téměř zmizela. Na pozadí tohoto dramatu nabízíme informace o biologii CAM rostlin, k nimž opuncie patří, i zmíněného motýla a o budoucnosti jejich vztahu v antropocénu.

O vysokohorských rostlinách se traduje, že musejí být připraveny na to, že mohou prožívat každý den horké léto a každou noc mrazivou zimu – potřebují být adaptovány na extrémní střídání teplot. Suchozemské rostliny jsou přisedlé (sedentární), nemohou „utéct“ ze slunečního žáru, a nedokážou se významně zahřát vlastním metabolickým teplem (až na vzácné výjimky z čeledi árónovitých, *Araceae*, a hvězdicovitých, *Asteraceae*, např. árón plamátý – *Arum maculatum*, nebo také rostliny párama And klejovky – *Espeletia*). Musejí se také umět vypořádat s extrémním střídáním slunce a stínu (fotosynteticky aktivní ozářenosti) v čase, např. když přecházejí mraky, i v prostoru, kde se to týká třeba tzv. světelných skvrn v podrostu lesa. Sluneční záření představuje pro rostliny zdroj

energie, a tak její příkon může být chvíli moc malý a chvíli zase kriticky velký. Méně se už ale ví, že některé druhy rostlin v průběhu desítek a stovek milionů let evoluce našly způsob, jak si chemicky upravit vlastní prostředí tak, aby bylo příznivé pro asimilaci oxidu uhličitého (fotosyntézu). Jak vytvořit atmosféru, která připomíná chemickým složením dobu dinosaurů – geologické období křídý. Konkrétně jde o koncentraci  $\text{CO}_2$ , která tehdy bývala o více než jeden řád vyšší než současná (v r. 2015 poprvé překročila koncentrace v atmosféře Země 400  $\mu\text{mol CO}_2$  v 1 molu vzduchu, tedy 400 ppm; globální průměr pro r. 2020 byl 415 ppm). Tyto podivuhodné rostliny zažívají během části dne éru křídý, kdy zvýší koncentraci  $\text{CO}_2$  uvnitř listu na 4–5 tisíc ppm, a po většinu



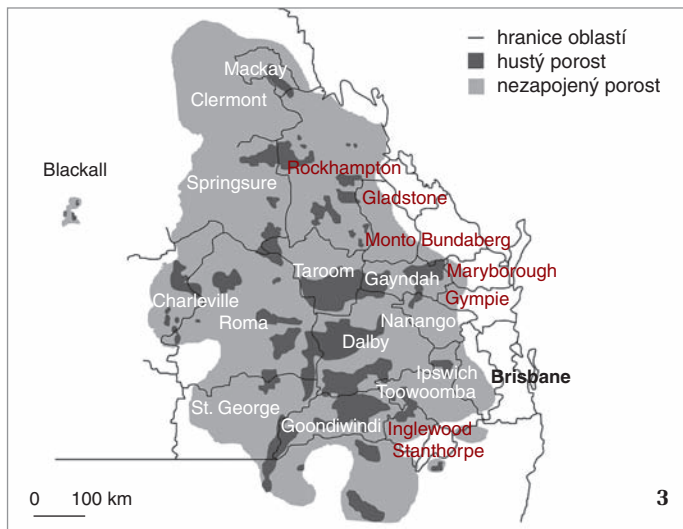
1 Rostliny opuncie vysoké přes 20 stop (více než 6 m) – „tichý teror“ ničí místní vegetaci a zabírající půdu farmářům. Centrální Queensland, Austrálie (1921). Foto: Státní knihovna Queenslandu  
2 Opuncie (nopál) *Opuntia stricta* pochází ze Severní, Střední i Jižní Ameriky. Za normálních okolností dorůstá velikosti nejčastěji 0,5 až 2 m a na zploštělých stoncích má areoly s 1–5 trny. Jedinec s plody. Foto R. Samek

noci období doby ledové s koncentrací  $\text{CO}_2$  kolem 130–180 ppm, která obklopovala naše předky asi před 20 tisíci let. Pěstitelé kaktusů už vědí, kam mířím – k rostlinám s metabolismem CAM (Crassulacean Acid Metabolism), k sukulentům, tedy rostlinám přizpůsobeným pouštním podmínkám a extrémnímu suchu. Střídavé denní zvyšování a snižování koncentrace  $\text{CO}_2$  o třicetinasobek i více přispívá k extrémně vysoké účinnosti využití vody při fotosyntéze, přežívání, zdatnosti a vysoké primární produkci CAM rostlin za podmínek, kdy jiné rostliny živoří nebo umírají. Jedněmi z těchto pozoruhodných druhů jsou i opuncie, nejrozšířenější rod kaktusů s výskytem od Patagonie po Kanadu.

### Stručná ekofyziologie CAM rostlin

Rostlinné tělo (suchá hmota) se skládá téměř z poloviny z uhlíku a téměř všechen uhlík získávají suchozemské autotrofní rostliny (tedy všechny zelené rostliny) z atmosféry. Dnes víme, že existují v zásadě tři skupiny druhů, které se liší biochemicko-fyziologickým mechanismem získávání (asimilace)  $\text{CO}_2$  z atmosféry obklopující listy – tzv.  $\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  a CAM rostliny. Celkový počet druhů cévnatých rostlin na Zemi přesahuje 250 tisíc, z toho CAM skupina zahrnuje asi 15–20 tisíc a  $\text{C}_4$  skupina zhruba tři tisíce druhů (na světové primární produkci se ale podílejí asi jednou čtvrtinou). Nejvíce z nich (např. všechny stromy) používá  $\text{C}_3$  cestu, která je sama o sobě energeticky nejméně náročná a spočívá v přímé fixaci  $\text{CO}_2$  enzymem ribulóza-1,5-bisfosfát karboxylázou/oxygenázou (Rubisco) v chloroplastech listového pletiva (mezofylu). Produktem fixace  $\text{CO}_2$  (karboxylace) jsou jednoduché sacharidy se třemi uhlíky v molekule (triózy) – proto název  $\text{C}_3$  cesta. Jde o sled biochemických pochodů, pro který se vžil název Calvinův (Calvinův–Bensonův) cyklus. Nejméně druhů obsahuje skupina  $\text{C}_4$  rostlin,





kteřá je také evolučně nejmladší a která, pravděpodobně v důsledku nedostatku  $\text{CO}_2$  v atmosféře Země před 10–40 miliony let, vyvinula mechanismus koncentrující  $\text{CO}_2$  uvnitř listu.  $\text{C}_4$  rostliny fixují hydratovaný  $\text{CO}_2$  nejprve fosfoenolpyruvát karboxylázou (PEP-karboxylázou) a vytvářejí jako první stabilní produkt organické kyseliny se čtyřmi uhlíky v molekule (proto  $\text{C}_4$  cesta), nejčastěji kyselinu jablečnou (malát). Ta odchází do specializované části listového pletiva, do buněk obklopujících cévní svazky. Zde specifické enzymy odštěpí  $\text{CO}_2$ , který nemá možnost uniknout do okolí, a proto se zde hromadí ve vysoké koncentraci a stává se substrátem pro následnou fixaci enzymem Rubisco podobně jako u  $\text{C}_3$  rostlin. Výhodou této komplikované dvojí fixace je, že  $\text{C}_4$  rostliny díky vysoké koncentraci  $\text{CO}_2$  prakticky nevykazují fotorespiraci – oxygenaci substrátu pomocí Rubisco za „přítavného“ uvolnění už jednou fixovaného  $\text{CO}_2$ . Velký a složitý enzymový komplex Rubisco si totiž nese stopu toho, že se vyvinul v časně fázi vývoje života, kdy v atmosféře Země ještě nebyl kyslík. Reakční centrum Rubisco tak v sobě může vázat nejen molekulu  $\text{CO}_2$ , ale i  $\text{O}_2$  (odtud slovo oxygenáza v názvu enzymu). Oxid uhličitý však váže „ochotněji“ (s větší afinitou) než kyslík.

CAM rostliny se dají stručně charakterizovat tím, že za tmy, kdy jsou vlhčí a chladnější podmínky, přijímají  $\text{CO}_2$  z atmosféry otevřenými průduchy na listech nebo zelených stoncích a asimilují jeho hydratovanou formu, hydrogenuhličitanový anion ( $\text{HCO}_3^-$ ), na kyselinu jablečnou pomocí PEP-karboxylázy podobně jako  $\text{C}_4$  rostliny. K tomu dochází v cytoplazmě buněk. Na rozdíl od  $\text{C}_4$  rostlin však kyselina jablečná neodchází do jiných buněk v jiné části listu, ale transportuje se do vakuoly ve stejné buňce a zde se v průběhu noci hromadí. To je možné pozorovat např. na snižování pH pletiva CAM rostlin během noci (kaktusy se v noci stávají kyselějšími). Ve dne se jablečnan z vakuoly přenáší zpět do cytoplazmy, dekarboxyluje se a uvolněný  $\text{CO}_2$  se v chloroplastech fixuje enzymem Rubisco; to vše za uzavřenými průduchy, tedy při minimální možné ztrátě vody a bez možnosti úniku  $\text{CO}_2$  z asimilačního orgánu (listu, stonku) zpět do atmosféry. Uvedený popis procesů je zjednoduše-

ním toho, co se odehrává v CAM rostlině během střídání dne a noci. Z důvodu stručnosti jsme vynechali přechodné fáze režimu průduchů a fixace  $\text{CO}_2$  při rozednávání a stmívání, podmínkami prostředí indukované přechody mezi CAM a  $\text{C}_3$  cestami i u jednoho stejného druhu a jedince, volnoběžný (idling) a cyklický režim u CAM rostlin a další nuance. Podrobnosti najdete např. v review Ulricha Lüttge (2004, dostupné on-line).

V důsledku vysoké afinity PEP-karboxylázy pro  $\text{CO}_2$ , se v noci snižuje koncentrace  $\text{CO}_2$  uvnitř listů (stonků) CAM rostlin k velmi nízkým hodnotám (130–180 ppm) a přes den pracuje Rubisco při koncentracích  $\text{CO}_2$  na úrovni 4–5 tisíc ppm. Jde tedy o ideální podmínky z hlediska kinetiky karboxylačních enzymů pro asimilaci  $\text{CO}_2$  při minimu spotřebované vody. Můžeme nalézt vhodnější rostlinu, která by lépe uspokojovala naše očekávání v době hrozcího sucha a v době, kdy usilujeme o maximální výnosy zemědělských plodin?

Pravděpodobně ne. Přesto se CAM druhy téměř nenacházejí v sortimentu významných zemědělských plodin; snad jen s výjimkou ananasu, agáve, kaktusů z rodu *Hylocereus* (plody pitahaya) a opuncie. Konkrétně se uvádí, že mezi 150 nejvýznamnějšími zemědělskými plodinami je 10 druhů  $\text{C}_4$  (např. kukuřice nebo cukrová třtina) a jen dva CAM – ananasovník chokolatý (*Ananas comosus*) a různé druhy opuncí (Nobel 1991). Čím to je? Dlouhověké kaktusy v přirozených podmínkách přirůstají velmi pomalu. Např. kaktus *Coryphantha vivipara* dorůstá v přírodě výšky 8 cm po 50 i více letech (Nobel 1981). Je růst CAM rostlin limitován něčím specifickým? Ví se, že popsané mechanismy asimilace  $\text{CO}_2$  jsou různě energeticky náročné. Zatímco pro zabudování jedné molekuly  $\text{CO}_2$  do triáz v Calvinově cyklu jsou potřeba tři molekuly ATP (a dvě NADPH – nikotinamidadeninindukleotidfosfátu, což je společné všem typům), u  $\text{C}_4$  rostlin to je už 4–5 ATP a u CAM dokonce 5,5 až 6,5 ATP v důsledku sekundární fixace  $\text{CO}_2$ . Fotorespirace, vyžadující energii navíc, ale u  $\text{C}_4$  a CAM rostlin neprobíhá. Ve výsledku jsou CAM rostliny přibližně o 15 % energeticky účinnější než  $\text{C}_3$ , ale o 10 % méně účinné než  $\text{C}_4$  rostliny. Rychlost fotosyntetické asimilace  $\text{CO}_2$  integrovaná za 24 hodin pro šestidruhové skupiny nejvýkonnějších

3 Oblasti jižního Queenslandu a hraniční severní část Nového Jižního Walesu postižené invazí opuncie. Rozsah a intenzita rozšíření opuncie v r. 1924. Podle: S. Raghu a C. Walton (2007), orig. R. Bošková

4 Porosty opuncie v eukalyptovém lese v oblasti Chinchilla (Queensland). Z archivu Australského národního muzea

5 Polní stanice, kde se vajíčka motýla *Cactoblastis cactorum* (viz obr. 7 a 8) připravovala pro distribuci majitelům pozemků. Chinchilla (1927)

6 Porost opuncie po žíru housenek *C. cactorum*

7 a 8 Dospělec motýla *C. cactorum* (obr. 7). Druh se přirozeně vyskytuje v jižní Brazílii, Argentině, Paraguayi a Uruguayi a kromě Austrálie byl introdukovan i do jiných oblastí světa. Jeho oranžové housenky s výraznými černými pásy nebo skvrnami (8) parazitují v dužnatých plochých listech opuncie. Vyvíjejí se podle teploty 2–4 měsíce, kuklí se na zemi pod opadem rostlin. Dospělý motýl se během života trvajících 9–11 dnů páří 3–4krát a samička pokaždé klade shluk 30–50 vajíček na povrch opuncí. Převzato z Wikimedia Commons (obr. 4–8), všechny snímky v souladu s podmínkami použití

9 Boční pohled na zploštělé senzoricke brvy (senzily) s receptory  $\text{CO}_2$  motýla *C. cactorum* (nahore) a příčný řez segmentem senzily (dole). Povrch je zvětšen výběžky a průhyby, majícími na svém dně nepatrné otvory, z nichž vybíhají tubuly dovnitř senzily a vytvářejí strukturu sbíhajících se membrán. Převzato z G. Stange a S. Stowe (1999), se svolením vydavatele

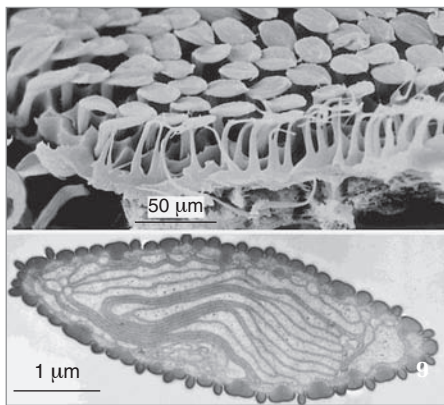
$\text{C}_3$ ,  $\text{C}_4$  a CAM rostlin vycházela přibližně stejně (Nobel 1991). Nepřekvapí proto, že některé druhy CAM rostlin mohou být velmi výkonné v produkci své biomasy, pokud mají vhodné podmínky pro růst.

### Test produktivity CAM rostlin, který se vymkl kontrole

Australský kontinent se v období pozdní křídly (asi před 90 miliony let) oddělil od Gondwany a stal se izolovaným ostrovem (zatím spojeným s Antarktidou). V té době ještě nedozruly CAM rostliny velkého rozšíření, a proto se před zavlečením cizích



druhů člověkem nacházel v Austrálii jen jediný druh rostlin s CAM syndromem, nízký beztrnný keř suchých lokalit západní Austrálie *Sarcostemma australe* (nyní *Cynanchum viminale* subsp. *australe*) z čeledi toješťovitých (*Apocynaceae*). V Austrálii se kaktusy přirozeně nevyskytují. S kolonizací australského východního pobřeží Angličany od r. 1788 (asi již s příplutím první flotily 11 lodí kapitána, později generálního guvernéra Arthura Phillipa) se do Austrálie dostaly první rostliny opuncie *O. stricta* (obr. 2). Měly posloužit jako potravina pro červce nopálového neboli nopálovce karmínového (*Dactylopius coccus*), hmyz chovaný pro produkci červeného barviva (košenily) používaného v té době k barvení tradičních anglických vojenských uniforem. Ať tak či onak, první zaznamenaný výskyt *O. stricta* byl r. 1840 v Parramatta (dnes součást Sydney) v Novém Jižním Walesu a následně severněji na další lokalitě ve stejném státě (Scone v Hunter Valley) a jedné v jižním Queenslandu (Darling Downs). Do r. 1870 byly rostliny považovány za užitečný doplněk místní flóry a doplněk stravy skotu v období sucha. Poté nastal zlom. Z několika rostlin na zmíněných lokalitách se opuncie (anglicky nazývaná prickly pear – „pichlavá hruška“) rychle šířila a v r. 1900 pokrývala hustým porostem již 40 tisíc km<sup>2</sup>, v r. 1913 to bylo 63 tisíc km<sup>2</sup>, za dalších 7 let už 176 tisíc a v r. 1930 porůstala 240–270 tisíc km<sup>2</sup> plochy Nového Jižního Walesu a Queenslandu (Osmond a kol. 2008), tedy přibližně rozlohu Velké Británie nebo trojnásobek České republiky (obr. 3). Obrovské plochy řídkých suchých lesů a pastvin hustě zarostlé přibližně metr vysokými rostlinami s dužnatými plochými pichlavými stonky opuncie se staly neprostupnými pro lidi i zvířata. Expanze přivedla rozvrat farem, životní tragédii pro rodiny mnoha farmářů; stala se vážným socioekonomickým problémem. Dobové novinové titulky píší o „tichém teroru, který zabírá naše dědičná území“ (obr. 1 a 4). Odhaduje se, že v době vrcholu expanze postupovala opuncie každý den o dalších asi 50 ha a činila je nevyužitelnými pro zemědělskou potřebu. Na 1 ha plochy porostu bylo údajně více než 300 tun suché hmoty opuncie a odhad její celkové biomasy v r. 1929 dosahoval 15 miliard tun. Přesné geobotanické údaje z 20. let o invazi a důsledcích opunciové monokultury pro místní ekosystémy chybějí. Ekofyziologové té doby



ještě neměli znalosti o biochemicko-fyziologických zvláštностech těchto rostlin a jejich biologii, a proto byl boj s ní obtížný. V literatuře tehdy sice existovaly záznamy denních změn kyselosti tkáně sukulentních druhů, ale měření výměny plynů během dne a noci ještě nebylo možné. Opuncie měla výhody proti domácí vegetaci ve velmi vysoké účinnosti využití vody typické pro CAM rostliny – má mimořádně nízký poměr hmoty kořenů k nadzemní hmotě (asimiláty tedy investuje primárně do tvorby asimilačních orgánů), má velký potenciál rozmnožovat se vegetativně – na plochých zelených stonkových segmentech (kladodíích neboli fylkladíích) v místech nazývaných areoly jsou spirálo-

vitě rozložené axilární pupeny, které mohou regenerovat v nové rostliny – a množí se i semeny. Klima severu Nového Jižního Walesu a jihu Queenslandu v Austrálii připomíná americkou domovinu opuncie, nežili tu ale její přirození nepřátelé (kromě již zmíněného červce rodu *Dactylopius* i motýl z rodu *Cactoblastis*).

### Válka a zbraně

Mechanický boj spočívající ve vykopávání a spalování rostlin byl fyzicky a energeticky náročný, nepřinášel výsledky. Vláda Nového Jižního Walesu a celonárodní vláda se spojily (údajně poprvé v tehdy 20leté historii Australského národního svazu) k finanční podpoře výzkumu a v boji proti opuncii. V r. 1919 byla založena Národní rada pro opuncii (Commonwealth Prickly Pear Board). První výzkumnou stanicí financovanou státem Queensland a pověřenou hledáním a testováním prostředků, které by likvidovaly opuncii, zorganizovala už v r. 1912 botanička Jean Whiteová (později White-Haneyová, 1877–1953). Získala doktorát v oboru botanika na univerzitě v Melbourne r. 1909 jako teprve druhá žena v Austrálii. Byla vůbec první ženou, kterou Austrálie zaměstnala na pozici vědce. Whiteová zřídila základnu v odlehlé části státu (poblíž osady Dulacca), v centru šíření opuncie, a experimentovala při hledání nejučinnějšího jedu proti této rostlině a jeho efektivního použití. Jako takové se ukázalo sprejování asimilačních stonků kyselinou arzeničnou (vzniká při rozpouštění oxidu arzeničného,  $As_2O_5$ , ve vodě) během dne. Poslední velkoplošný experiment, při kterém se spotřebovalo přes 400 kg  $As_2O_5$ , skončil v r. 1916, kdy spolupracovníci Jean odešli na válečná pole první světové války v Evropě. Zkušenosti z válečných zákopů byly přeneseny do dalšího boje s opuncii v r. 1919 a později. Zadýmování (fumigace) jedovatými plyny příliš úspěšně nebylo; byl patentován stroj na mechanické rozrušení rostlinných těl a následnou aplikaci kyseliny arzeničné v roztoku s kyselinou sírovou. „Děbelský“ německý vynález plamenometu byl nakonec zavržen kvůli vysoké spotřebě benzínu; také navrhované rozmačkání porostů opuncie pod pásy tanků bylo nakonec zamítnuto. Užití oxidu arzeničného, s kterým začala J. Whiteová, se navyšovalo v poválečných letech až do r. 1930, kdy se ho spotřebovalo asi 500 tun, v r. 1929 dokonce téměř 900 tun (Osmond a kol. 2008).

J. Whiteová si byla vědoma potenciálu biologické ochrany. Už během pokusů v letech 1912–16 vyzkoušela hmyz, kvůli kterému byla opuncie vysazena – červce nopalového – a zjistila, že je účinný hlavně proti vyšším „stromovým“ opuncím (*O. monacantha*). V dalších letech bylo zkoušeno více než 150 různých organismů živících se na opuncích a jiných kaktusech. V r. 1924 rozhodla Národní rada pro opuncii vyslat mladého entomologa Alana Dodda na jih USA, aby zde studoval a sbíral škůdce opuncí. Jako neúčinnější se zdála samička malého světlého motýla *Cactoblastis cactorum*, resp. jeho housenky, které se vylíhly z nakladených vajíček (obr. 7 a 8). Problémy s transportem hmyzu přes hranice USA vedly k tomu, že A. Dodd odjel do Argentiny, kde sbíral vajíčka nakladená na opuncie. Odtud za pomoci přátel a kolegů z Argentiny a z Jižní Afriky poslal housenky *C. cactorum* vylíhlé asi z 3 000 vajíček parníkem Nestor do Austrálie.

Housenky v 6 klíčcích opustily 10. března 1925 Buenos Aires, 8. dubna Kapské město a 2. května dorazily do Melbourne, odkud ihned putovaly vlakem přes Sydney (6. května) do Brisbane (8. května), do laboratoře Národní rady pro opuncii v Sherwoodu. Část byla dopravena do polní stanice poblíž městečka Chinchilla (obr. 5; pro detaily viz dobová digitalizovaná korespondence na stránkách Australského národního archivu, odkaz na webových stránkách Živy). Z 80 tisíc vajíček lze vychovat více než 22 milionů vajíček v následující generaci a klima jižního Queenslandu dovolalo získat dvě generace ročně. V letech 1926–27 opunciová rada mezi majitele postižených pozemků na 61 místech distribuovala 10 milionů vajíček spolu s návody, jak s nimi naložit; v letech 1927–31 pak další 2,2 miliardy vajíček v baleních po 100 tisících kusech. Stalo se, co stěží někdo očekával. Během 10 let po vysazení uvolnilo biliony housenek všechen uhlík hromaděný téměř 100 let v tělech opuncí, a osvobodily desítky milionů hektarů pro původní vegetaci a zemědělské využití (obr. 6). Říkalo se, že když se člověk postavil do porostu opuncie, bylo slyšitelné „chroustání“ housenek během žíru. Uspělosti a městečka, která ve 20. letech zanikla nebo stagnovala, se obnovila, postavily se nové obchody, úřady, veřejné budovy. Místní dělili historii na éru před molem (before *Cactoblastis*, BC) a po molovi (post *Cactoblastis*, PC). V průběhu let se samovolně vytvořila rovnováha mezi populací opuncie a motýla tak, že dnes se v postižené oblasti vyskytuje průměrně méně než jedna rostlina opuncie na hektar volné krajiny.

#### Věnováno molovi s vděčností a úctou...

Pro připomínku invaze opuncie a úspěšného biologického boje lidé v postižené oblasti Austrálie vztyčili různé pomníky. Na počest *C. cactorum* byl zbudován památník v městečku Dalby (západně od Brisbane, na Warrego Highway v Queenslandu). V 80. letech byla vytvořena bronzová socha opuncie s motýly, jejich housenkami a vajíčky, která je umístěna v muzeu v Miles (jižní Queensland), kde vznikla výstava dokumentující boj s invazí opuncí (obr. 10). Už v r. 1936 vděční obyvatelé Boonargy, dalšího městečka na Warrego



10 Bronzová replika opuncie a motýlů *C. cactorum* vystavená v městečku Miles, jižní Queensland. Foto z archivu autora

Highway, vybudovali dřevěnou budovu s pamětní síní, jedinou na světě postavenou na paměť bilionů housenek, které přemohly technicky a agrochemicky nevladatelné miliardy tun trnité biomasy.

#### Trocha motýlí biologie skoro nakonec

V době hledání biologické „zbraně“ proti opuncii byl znám jen zlomek toho, co víme dnes o biologii CAM rostlin včetně opuncie *O. stricta* a o způsobu života motýla *C. cactorum*. Objev a provedení nebyvalé úspěšné biologické ochrany podnítily výzkum vztahů mezi opuncí a motýlem. Vědci si kladli např. otázku: Jak samička motýla pozná, že má naklást vajíčka právě na opuncii a ne na jinou okolní vegetaci (třeba listy eukalyptů)? Princip není těžké uhodnout. Základem vztahů mezi hmyzem a rostlinami jsou smyslové signály, např. vnímání těkavých (volatilních) látek, které slouží ke komunikaci mezi jedinci stejného druhu (např. feromony) nebo i nepříbuzných druhů (alomony) spojených např. v potravním řetězci. Pokud má z vylučování takové látky prospěch její příjemce (zde motýl) a škodu utrpí emitent (opuncie), mluvíme o kairomonech. Co je tedy kairomonem, podle něhož se orientuje *C. cactorum*? Výzkumy australských vědců v 90. letech 20. století ukázaly, že samička motýla při detailním zacílení na plochý „list“ opuncie není naváděna žádným specifickým kairomonem, ale že vnímá a řídí se podle snižující se koncentrace  $\text{CO}_2$  ve svém okolí. V úvodu jsme zmínili, že CAM rostliny v noci otevírají průduchy a fixují  $\text{CO}_2$ , který difunduje po spádu koncentrace dovnitř listu. Napříč tenkou hraniční vrstvou nemíchaného vzduchu nad listem se tedy v noci vytváří gradient  $\text{CO}_2$  (koncentrace klesá směrem do listu), který je tím větší, čím zdravější a životaschopnější „list“ opuncie je. Samička *C. cactorum* klade vajíčka po dobu asi dvou hodin po západu slunce, kdy při „tanci“ nad kladodii propátrává gradient  $\text{CO}_2$  v hraniční vrstvě opuncí a vybírá nejzdravější

pletivo s nejvyšší pravděpodobností úspěšného vývoje svých potomků. Nervová zakončení receptorů  $\text{CO}_2$  v labiu (spodním pysku) motýla (obr. 9) mají asi o dva řády větší citlivost (pod 1 ppm na pozadí současné atmosférické koncentrace  $\text{CO}_2$ ), než bývá gradient  $\text{CO}_2$  mezi listem a volnou atmosférou (Stange a kol. 1995, Stange 1997). Podobné senzory citlivé na  $\text{CO}_2$  nejsou u motýlů a hmyzu výjimkou, ale senzor *C. cactorum* je mezi motýly zřejmě jedním z nejcitlivějších (Osmond a kol. 2002). V pokusech byla schopnost kladení vajíček silně snížena v případě, kdy experimentátoři vystavili motýly a rostliny kolísavé koncentraci  $\text{CO}_2$  po setmění, nebo stabilní, ale podstatně zvýšené koncentraci (dvojnásobné v porovnání s atmosférickou). Pro zajímavost dodejme, že vnímání koncentrace  $\text{CO}_2$  a reakce na ni jsou u živočichů, rostlin, ale i hub a bakterií velmi důležité a rozšířené. Slouží i k vyhledávání kořisti (např. u komárů a jiného krevsajícího hmyzu), nebo naopak k úniku před predátorem, adaptaci na vnitřní prostředí hostitele i udržování homeostáze, také třeba k regulaci pohybů a vývoje počtu průduchů na listech rostlin (podrobněji např. Sage 2002, Cummins a kol. 2014).

#### Berme biologické invaze vážně

Invaze organismů na území mimo oblast jejich evoluce byly a jsou přirozené, ale značně urychlené existencí člověka, nověji až druhu *Homo sapiens*. Vlny jeho stěhování z oblastí Afriky a Středního východu a postupné osídlení všech kontinentů, tedy invaze samotného člověka, později domestikace rostlin a živočichů a přechod na zemědělský způsob života, zrychlení přepravy od koní přes plachetnice k nadzvukovým letadlům. To vše usnadnilo biologické invaze v éře antropocénu, vedlo k masovému vymírání druhů fauny, které v minulých desítkách milionů let nemá obdobu. Invaze opuncie spolu s Evropou do Austrálie a mnoho podobných příkladů ukazuje, jak drasticky může invadující organismus ovlivnit životní zájmy a lokální prostředí svého „přenašeče“. Analogie se současnou virovou pandemií se nabíjí.

Příběh opuncie však vyvolává i jiné souvislosti. Jak se budou vyvíjet vztahy mezi opuncí a motýlem v době pokračujícího (a zrychlujícího se) růstu atmosférické koncentrace  $\text{CO}_2$  způsobeného člověkem? Neztratí motýl kontrolu nad rostlinou? Nebude se opunciové kalamitní šíření za nějakou dobu opakovat? Podobně jako u mnoha komplexních interakcí živočichů a rostlin se na tuto otázku zatím nedá jednoznačně a seriózně odpovědět. Invaze rostlin do nepůvodních oblastí představují často biologickou časovanou bombu – řádově desetiletí se neděje nic a poté náhle dojde k rychlému až explozivnímu nárůstu populace invazní rostliny se všemi průvodními negativními jevy. Důkladné poznání a citlivé využití biologie invazních organismů nás těchto explozí může ušetřit.

Použité zdroje uvedeny na webu Živy. Blíže také např. Živa 1999, 2–6; 2018, 5.

Části textu týkající se reakce organismů na koncentraci  $\text{CO}_2$  byly podpořeny projektem Grantové agentury ČR (18-14704S).