

Jak neuklouznout na šikmé ploše aneb Mocná síla adheze u žab a ještěřů

Některé skupiny terestrických bezobratlých živočichů, žab a ještěřů jsou vybaveny speciálními adhezivními orgány, které jim umožňují obratný pohyb i po velmi hladkém povrchu různých svislých i převislých ploch. Je pozoruhodné, že ač se tyto orgány u daných vzájemně nepříbuzných živočišných skupin vyvinuly nezávisle, mají nápadné strukturální a funkční podobnosti (došlo zde ke konvergentnímu vývoji). V přírodě znamenal vznik takových přilnavých struktur významnou inovaci, která svým nositelům dovolila proniknout do nových typů prostředí a obsadit nové ekologické niky. Účinnost těchto biologických adhezivních systémů je natolik silná a spolehlivá, že se v současnosti stala inspirací i pro technologický výzkum v oblasti vývoje umělých přichytných a spojovacích materiálů.



Adhezivní orgány živočichů jsou založeny na třech hlavních mechanismech zajišťujících přilnutí k povrchu pevných předmětů – vlhké, suché a chemické adheze (Favi a kol. 2014). Principem vlhké adheze je kapilarita – silové působení mezi molekulami povrchu orgánu živočicha, molekulami povrchu podložky a molekulami tekutiny, jež je mezi adhezivní orgán a podložku vylučována. Tento typ využívají především žáby (v menší míře se uplatňuje i u některých skupin hmyzu). Suchá adheze je založena hlavně na přitažlivých elektrostatických Van der Waalových silách působících přímo mezi povrchem adhezivního orgánu tvořeného mikroskopicky jemnými vláskovitými štěty a mikrostrukturou pevného podkladu. Setkáváme se s ní u mnoha šplhavých ještěřů, řady skupin hmyzu a u pavoukoců. Prostřednictvím chemické adheze pak lnou k podkladu např. někteří plži, vylučující do svého

ho slizu různé lepkavé substance. Podobně larvy některých skupin ryb a obojživelníků mají tzv. cementové žlázy a přichytávají se k podkladu pomocí mukózního sekretu, ježž těmito žlázami vylučují. V tomto článku soustředíme pozornost především na funkci adhezivních orgánů žab a ještěřů.

Žáby a vlhká adheze

Napříč různými čeleděmi žab se setkáváme s druhy, které mají konce prstů rozšířené v diskovité terčíky, s jejichž pomocí snadno šplhají po listech nízkých bylin i vysokých stromů, po hladkých mokřích skalních srážech nebo třeba i po vykachlikovaných stěnách toalet lidských příbytků v tropických krajinách. Většina z nich nemá také žádný problém se udržet na svislém nebo i částečně sklopeném skle.

Typickými šplhavými žábami jsou holartické a neotropické rosničky (Hyllidae), indomalajské i afrotropické létavky



1 Na rozdíl od terčíků na prstech žab fungují přichytné polštářky na končetinách mločků na principu přísavky – mločik amazonský (*Bolitoglossa altamazonica*). Río Nanay, Peru

2 a 3 Tvar adhezivních terčíků může být u zástupců stejné čeledi nebo i stejného rodu odlišný. Porovnání velkých na konci zarovnaných terčíků u bezblanky rodu *Pristimantis* (obr. 2) a malých okrouhlých terčíků bezblanky rodu *Oreobates* (3) ze stejné čeledi bezblankovití (Strabomantidae) a ze stejné lokality. Lejna, Sud Yungas, Bolívie

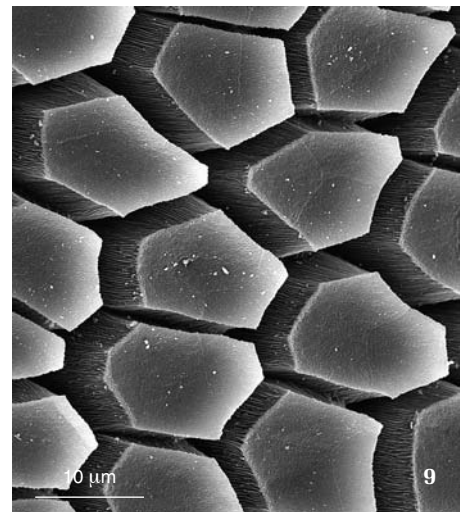
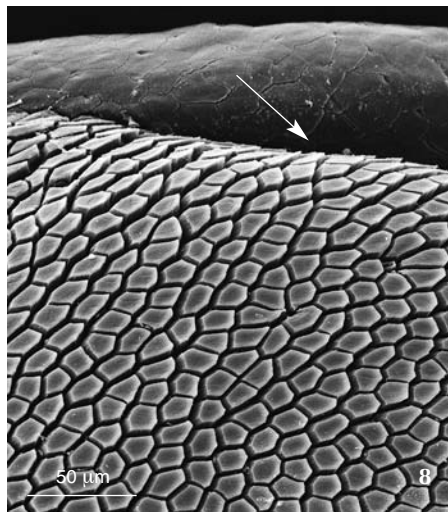
4 Náležitě dosednutí polštářkovitě vyklenuté spodní strany adhezivního terčíku na podložku zajišťuje u typických šplhavých žab mírné zalomení mezi předposledním a posledním článkem prstu. Jsou patrné i velké subartikulární hrbolky (na spodní straně prstů), které se na přilnutí prstů podílejí – japonečka zavalitá (*Buergeria robusta*) z čeledi létavkovití (Rhacophoridae). Tchaj-tung, Tchaj-wan

5 Vlhké skvrny na povrchu listu patrné po mírném odsunutí přední nohy rosničky zelenooké (*Osteocephalus taurinus*). Lesy západně od Manausu, Brazílie

6 Spodní (ventrální) strana adhezivních terčíků oddělených obvodovou

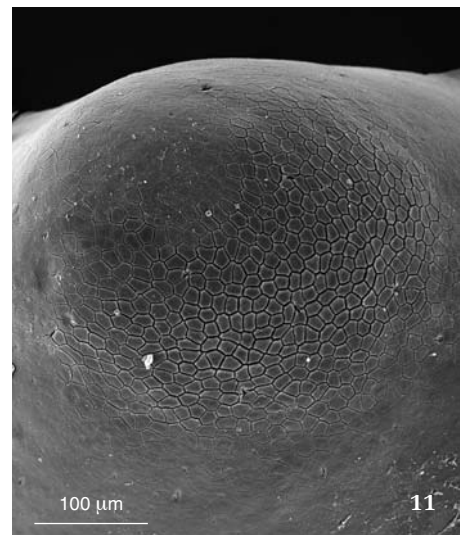
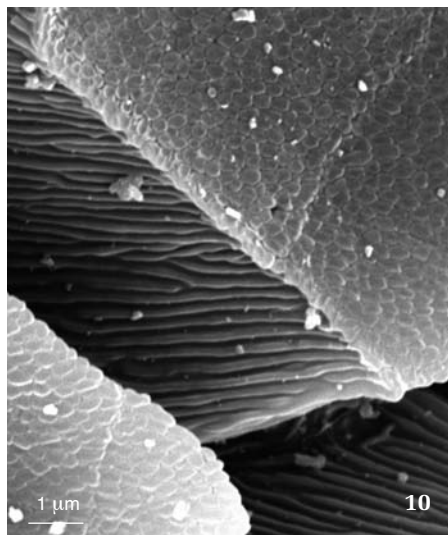


rýhou od krycího epidermálního epitelu prstů. Zřetelné jsou i subartikulární hrbolky, jež však obvodová rýha neohraničuje – rosnička zelenooká. Lesy jižně od Manausu, Brazílie
7 až 11 Ventrální strana prstu bezblanky dvojitěné (*Pristimantis bipunctatus*). Oblast Chanchamayo, Peru. Obvodová rýha oddělující běžný povrchový epitel ventrálního terčíku od adhezivního (obr. 7), obvodová rýha v detailu (8, viz šipka), adhezivní epitel vytvářející oddělené sloupky se základnou ve tvaru nepravidelných (obvykle) šestihranů (9), detail povrchu šestihranu odhalující ultrastrukturu nanosloupek (10) a povrch subartikulárního hrbolku (tuberkulu) s adhezivním epitelem pozvolna přecházejícím v epitel běžný (11). Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Foto J. Bulantová (obr. 7–11)



(Rhacophoridae) nebo afrotropické rákosníčky (Hyperoliidae). Adhezivní orgány prakticky identické stavby se ale vyvinuly i u šplhavých zástupců jiných nepřibuzných skupin žab – např. bezblanek (čeledi Eleutherodactylidae a Strabomantidae), pralesniček (Dendrobatidae), jižanek (Heleophrynidae) nebo skokanů (Ranidae).

Naším jediným, jinak ale velmi typickým představitelem šplhavých žab je dobře známá rosnička zelená (*Hyla arborea*). A právě v jejím případě vidíme, že o charakteru a funkci adhezivních orgánů šplhavých žab panují často mylné představy. V řadě českých textů popisujících rosničku zelenou totiž až do současnosti přetrvává jedna velká nepřesnost. A sice označení jejích adhezivních terčíků





12



13



14

nevhodným termínem „přisavka“ nebo přísavné terčíky (např. Baruš a Oliva 1992, Dungel a Řehák 2005, Zwach 2008, 2013, a český překlad knihy Obojživelníci. Obrazový průvodce, Dufresnes 2021). O typický přísavný orgán využívající síly vzniklé podtlakem vzduchu mezi spodní stranou rozšířených konců prstů a podložkou zde totiž nejde. Ačkoliv např. Julian K. A. Langowski a kol. (2018) hypotetickou možnost určitého vedlejšího přísavného efektu nevylučují, není pochyb, že hlavní silou, která žábám umožňuje přichycení a pohyb na hladkých površích, je adheze. U obojživelníků se s efektivním využitím přísavných sil setkáváme jen u šplhavých mločků (čeleď Plethodontidae), kteří mají na končetinách skutečné přísavné polštářky vytvořené širokou kožní blánou spojující prsty až k jejich okrajům (obr. 1). Spodní strana těchto polštářků je hladká a zvlhčovaná slizovými žlázami. Přísavný podtlak vzniká tak, že mloček po došlápnutí odtáhne střed chodidla od podložky.

Vraťme se ale k žábám. Abychom dobře pochopili tajemství jejich snadného udržení a pohybu na hladkém povrchu, musíme se jim důkladně podívat na prsty – nejprve lupou, pak v elektronovém mikroskopu. Již při malém zvětšení vidíme, že diskovité rozšíření na konci prstů (v závislosti na druhu může být okrouhlé, oválné nebo na koncové, tedy distální straně rovně ukončené) nasedá na poslední prstový článek (obr. 2, 3 a na 1. str. obálky). U zástupců čeledi výrazně šplhavých žab, jako jsou rosníčkovití, létavkovití, rákosníčkovití, ale i rosněnkovití (Centrolenidae) či mantelovití (Mantellidae), se mezi předposledním a posledním článkem prstu nachází ještě malý chrupavčitý (někdy i zkostnatělý) útvar, jenž zajišťuje náležité zalomení konce prstu a plné přisednutí adhezivního terčíku k podložce (obr. 4). U čeledí zahrnujících jak šplhavé, tak terestrické formy žab (např. bezblankovití, pralesníčkovití nebo skokanovití) chrupavčitý útvar mezi předposledním a posledním článkem prstu i v případě přítomnosti adhezivních terčíků chybí. Při pohledu na spodní (ventrální) stranu terčíku si potom nemůžeme nepovšimnout, že epidermální buňky zde mají jinou strukturu než na svrchní (dorzální) straně (obr. 6). Vytvářejí jakýsi „polštářek“ specializovaných buněk, který je od



15

krycího epidermálního epitelu prstů ohraničený zřetelnou obvodovou rýhou (anglicky circumferential groove, obr. 6–8).

Ke studiu struktury a funkce specializovaných adhezivních buněk potřebujeme elektronový mikroskop (v našem případě byl použit rastrovací neboli skenovací elektronový mikroskop SEM JEOL 6380 LV v Laboratorii zobrazovacích metod Viničná, Přírodovědecké fakulty UK – za asistencí patří poděkování Miloslavu Hylišovi). Ten nám odhalil, že tyto buňky mají sloupkovitý, obvykle šestihlanný tvar (počet hran může kolísat v rozsahu 5–8) a že jsou od sebe směrem k povrchu terčíku vzájemně zřetelně odděleny (obr. 8 a 9). Prostory mezi sloupkovitými buňkami jsou propojené a vytvářejí členitý, na povrchu otevřený systém kanálků. Mezi sloupkovité buňky ústí vývody slizových žláz a naplňují celou soustavu kanálků slizem (samotné žlázy se nacházejí hlouběji ve škáře). Tím, že jsou kanálky otevřené, může sliz snadno smáčet jak celé sloupkovité buňky, tak i podložku (např. list), na které se žába pohybuje (obr. 5).

Použijeme-li ještě silnější zvětšení, odhalíme, že apikální plochy sloupkovitých buněk (plochy dosedající na povrch podložky) jsou dále strukturované. Nanostruktura jejich povrchu opakuje v menším stavební plán, podle nějž jsou sestaveny sloupkovité buňky, neboť jsou celé pokryté malými, více či méně hranatými a vzájemně oddělenými miniaturními sloupky nazývanými nanosloupky (anglicky nanopillars, obr. 10). Jednotlivé nanosloupky mají mírně vyduché (konkávní) povrchové plochy a oddělující mezírky opět vytvářejí propojenou síť otevřených nanokanálků, do kterých proniká sliz.

12 Při šplhání v husté vegetaci žáby běžně kombinují adhezi s úchopem – létavka tchajwanská (*Zhangixalus moltrechti*). Lijia, Tchaj-wan

13 Adhezivní lamely umožnily mnohým gekonům snadno šplhat po vertikálních hladkých plochách a obsadit volné nadzemní biotopy. Příkladem je felsuma zlatoocasá (*Phelsuma laticauda*) původem z Madagaskaru, která byla zavlečena na Havajské ostrovy, kde se úspěšně zabydlela v porostech palm (Arecaceae) a pandanů (Pandanaeae).

Jedinec na řapíku palmového listu. Kailua-Kona, Havaj

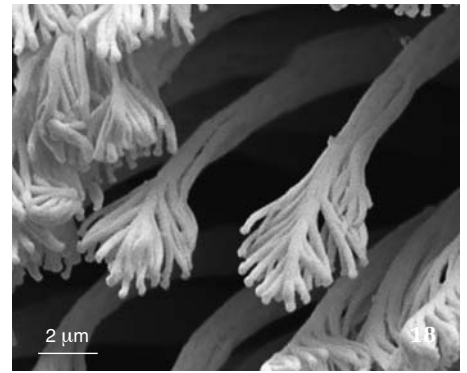
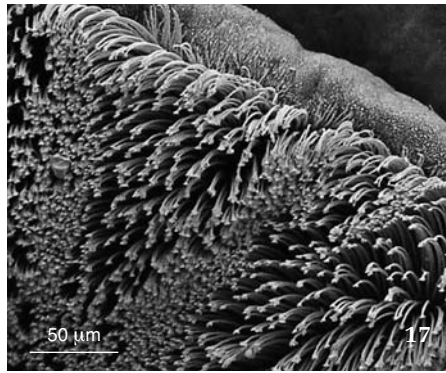
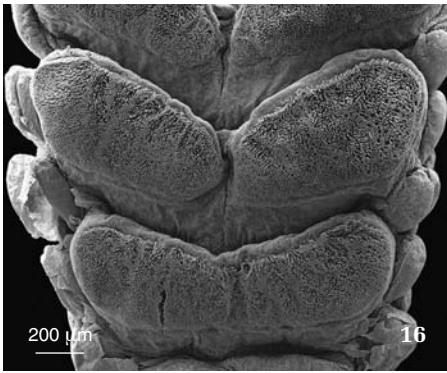
14 *Anolis rudokrký* (*Anolis carolinensis*) zachycený na větví jak adhezivními lamelami na spodní straně prstů, tak drápkami na konci prstů. Jižní Florida, USA. Snímky J. Moravce, pokud není uvedeno jinak

15 Příčné nedělené adhezivní lamely na rozšířených ventrálních plochách prstů kubánského chameleolise vouseatého (*Anolis barbatus*, dříve *Chamaeleolis barbatus*), kombinované s drápkami umístěnými na nerozšířených koncích prstů

16 až 18 Příchytné lamely na spodní straně prstu australského pagekona rodu *Oedura* v SEM. Spodní strana prstu s lamelami (obr. 16), detail štětů tvořících lamely (17) a koncové větvení štětů (18).

19 až 21 Postupné „rolování“ prstů u jihoasijského gekona obrovského (*Gekko gekko*), které umožňuje uvolnit prst ze silného přichycení k podkladu. Foto J. Bulantová (obr. 15–21)

Sloupkovité buňky a jejich nanosloupky dokonale nasedají na povrch podložky, po které se žáby pohybují, a přesně kopírují různé jeho mikronerovnosti. Sliz vylučovaný do systému mezibuněčných kanálků proniká i do povrchových nanokanálků a vytváří velmi tenkou kontaktní vrstvu mezi adhezivními buňkami a pevnou podložkou. Plocha, již sliz díky členité struktuře adhezivního orgánu pokrývá, je přitom překvapivě velká. Např. u australské a novoguinejské rosnice siné (*Ranoidea caerulea*) bylo zjištěno, že díky systému kanálků mezi sloupkovitými buňkami je slizem smáčený povrch adhezivního terčíku téměř pětkrát větší, než by byl povrch pouze hladkého terčíku. Po započítání



povrchu nanosloupků a nanokanáleků je smáčený povrch větší dokonce šestapůlkrát (Langowski a kol. 2018).

Kapilární síly, které ve slizem naplněných mikroprostorech mezi adhezivním terčíkem a podložkou vznikají, jsou překvapivě silné a spolu s třením, jež je zvyšováno vklíněním sloupkovitých buněk a jejich nanosloupků do mikroskopických nerovností povrchu podložky, zajišťují zářábám naprostou jistotu v přichycení a pohybu na hladké ploše. V přírodě tak můžeme třeba pozorovat, jak rosničky, létavky a další druhy stromových žab bravurně překonávají skokem dlouhé vzdálenosti mezi listy rostlin, jak dokážou přesně skočit za sedící kořisti a při doskoku ji ulovit nebo jak se při náhodném pádu zachytí příhodného blízkého listu i jen jednou nohou a vytáhnou se do bezpečné pozice na jeho povrch. Rosněnky najdeme setrvávat dlouhé hodiny přichycené na spodní straně listů v pozici hřbetem dolů a jejich samce můžeme zastihnout, jak spolu na listech urputně bojují. Gravidní samice šplhavých žab pak snadno zvládají pohyb na hladkých listech s výrazně zvýšenou hmotností těla danou množstvím zralých vajíček v ovariích a se značným přívažkem v podobě přidržujícího se samce.

Hladké povrchy v přírodě najdeme také na vodou ohlazených balvanech a skalách v blízkosti proude tekoucích potoků a vodopádů. I na těchto mokřých a značně kluzkých podkladech se žáby díky svým adhezivním orgánům dokážou udržet a pohybovat. Patří mezi ně třeba některé asijské skokanovité žáby rodu *Amolops*, *Odorrana* a *Staurois*. Studium jejich adhezivních terčíků odhalilo speciální uzpůsobení na rychlejší odvádění přebytečné vody z prostoru mezi dosedlým terčíkem a skalním povrchem (blíže Drotlef a kol. 2015). Lze očekávat, že podobná uzpůsobení budou mít i jihoafrické jižanky (Heleophrynidae), obývající okolí horských kaskádovitých potoků.

Vedle adheze a tření se při šplhání žab samozřejmě uplatňují i další přízpůsobení a mechanismy. Prsty stromových žab jsou uzpůsobené k tomu, aby mohly objímat tenké větvičky i řapíky listů a dokázaly se zachytávat okrajů listů (obr. 12). K udržení na hladkém povrchu pomáhá i přilnutí celou plochou břišní strany, největší efekt má u menších druhů žab nebo u nedorostlých nedospělých jedinců. Mnohé ještě ukáže podrobné studium struktury povrchu kůže na břišní straně žabího těla. Již nyní víme, že adhezivní sloupkovité buňky nemusejí být omezeny jen na terčíky na koncích prstů, ale že se v různé míře mohou vyskytovat i na subartikulárních hrbolcích (obr. 4 a 11) a na dalších místech dlaňové nebo chodidlové strany předních a zadních končetin.

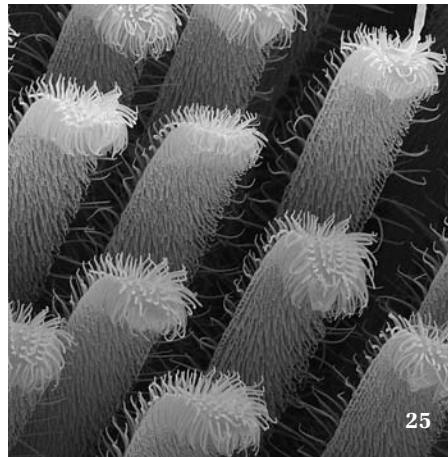
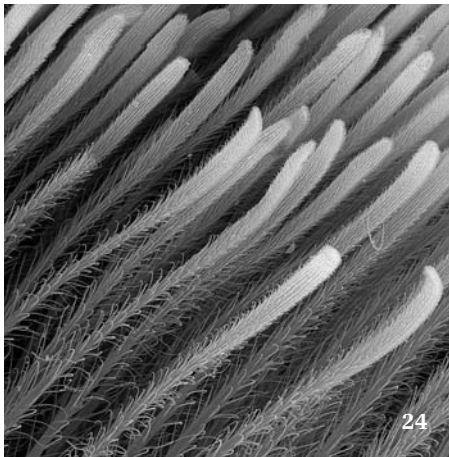
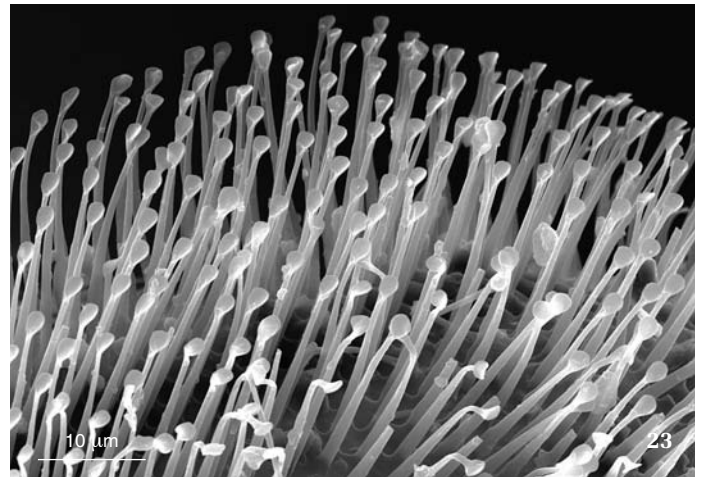
Je zřejmé, že rozsah a rozmístění adhezivních struktur na končetinách a charakter textury kůže na koně a ventrální straně stehen žab odpovídají způsobu života jednotlivých druhů – šplhavější stromové žáby mají tyto plochy větší než druhy žijící spíše na zemi nebo ve vodě (obr. 3 a 4). Odpovědi na otázku, jak se adhezivní orgány u jednotlivých skupin žab vyvinuly, jak se liší u nepříbuzných druhů, ale i příbuzných druhů obývajících různá prostředí, nebo jak se adhezivní orgány a jejich funkce mění v průběhu ontogenetického vývoje jedince či během sezonního kolísání klimatických podmínek, musí přinést další výzkum.

Ještěři a suchá adheze

Adhezivní struktury plazů se vyvinuly nezávisle u tří vzájemně nepřibuzných skupin ještěřů. Obvykle mají podobu přichytných lamel umístěných příčně na spodní straně rozšířených prstů (subdigitální lamely, jejich počet, tvar a uspořádání se v závislosti na druhu a taxonomické skupině liší). Schopnosti hbitě šplhat po hladkých svislých plochách prosluli především mnozí gekoni (obr. 13 a na 3. str.

obálky). Podle současného systému jde o zástupce blízké příbuzných čeledí gekonovití (Gekkonidae), pagekonovití (Diplodactylidae), gekonkovití (Sphaerodactylidae) a čeledi Phyllodactylidae (spolu se skupinami s prsty bez adhezivních orgánů, tedy s gekončiky čeledi Eublepharidae, pagekony z čeledi Carphodactylidae a šupinonožkami čeledi Pygopodidae jsou shrnovány do souborného nadřazeného taxonu Gekkota). Subdigitální lamely velmi podobné stavby, jako mají široce rozšíření gekoni, slouží jako přichytný orgán také neotropickým anolisům (čeleď Dactyloidae, nověji Anolidae; obr. 14 a 15). Třetí skupinou ještěřů, u níž se vyvinuly přichytné lamely, jsou scinkové (Scincidae). Konkrétně jde o několik šplhavých zástupců asijských rodů *Lipinia* a *Prasinohaema*. Mikrostruktura adhezivních lamel scinků je buď podobná té, jakou mají gekoni a anolisové (ventrální strana lamel vybíhá v jemné rohovinové vláskovité štěty, které se na konci dál větví, obr. 16–18), nebo je i mírně odlišná (povrch lamel je zvlněný do volánkovitých záhybů, které mají roztržené okraje). V obou případech však adheze funguje na stejném principu elektrostatických Van der Waalsových sil (Williams a Peterson 1982).

Podobně jako u žab i u ještěřů znamenal vznik adhezivních orgánů významnou evoluční novinkou, která minimálně u gekonů a anolisů přispěla k jejich ekologické úspěšnosti a druhovému rozrůznění. Podle některých studií se např. uvnitř skupiny Gekkota adhezivní subdigitální lamely vyvinuly opakovaně alespoň 14krát (Griffing a kol. 2022). Existují ale i rody gekonů, kteří šplhají po skalách nebo kmenech stromů jen za pomoci drápků na prstech, bez schopnosti adheze (na skle se tudíž neudrží). Není proto náhodou, že mezi úspěšné synantropní a mnohdy i vysloveně invazní druhy plazů patří mnozí gekoni i někteří anolisové opatření adhezivními orgány. Stále dokonalejší mikroskopovací



22 až 25 Podobně jako u plazů funguje suchá adheze u mnohých zástupců hmyzu a pavoukovic. Detail koncové části chodidla mouchy domácí (*Musca domestica*) s adhezivním polštářkem (obr. 22) tvořeným množstvím chloupků se zploštělým zakončením (23). Těsně sousedící chloupky na chodidle stromového sklípkana rodu *Avicularia* (24) nabývající špachtlovitého tvaru a pokryté na ventrální i dorzální straně různě tvarovanými tenkými výběžky (25). SEM. K adhezii u hmyzu se v Živě ještě vrátíme v některém z dalších čísel. Foto J. Bulantová

Adhezivní orgány a bioinspirace

Studium adhezivních orgánů hmyzu a pavoukovic ukázalo, že ve většině případů pracují na principu suché adheze stejně jako u plazů a že mikroskopická struktura orgánů těchto bezobratlých a plazů je překvapivě podobná (viz obr. 22–25). S nadšátkou bychom tedy mohli říct, že obecně působící fyzikální zákony a síly „dotlačily“ evoluci u všech tří příbuzensky velmi vzdálených skupin ke stejnému velmi funkčnímu výsledku. Snad i proto poutá výzkum mechanismů adheze u živočichů zájem nejen biologů, ale také inženýrů v technologickém výzkumu. Hovoří o bioinspiraci, jež přináší vzory a nápady pro vývoj technologií, které by měly uplatnění jak v běžném lidském životě, tak možná dokonce při výzkumu vesmíru. Řada firem již vyrábí přírodu inspirované a ekologicky šetrné adhezivní a spojovací materiály, jež nacházejí využití např. při jednoduchém připevňování i velmi hmotných předmětů na hladké povrchy, při výrobě lezeckého vybavení i při konstrukci nástrojů vhodných k jemné manipulaci při výrobě počítačových procesorů. Předmětem vývoje jsou i různé robotické stroje, které by byly schopné bezpečného pohybu a práce na místech, kam člověk dobře nedosáhne – třeba na stěnách výškových budov nebo na povrchu vesmírných stanic v kosmickém prostoru. Herpetology stojící více na zemi může těšit vědomí, že na počátku těchto ambiciózních projektů je jejich výzkum drobných rosiček a gekonů.

SEM snímky vznikly v Laboratoři zobrazovacích metod Viničná (VMCF), podporované projektem MŠMT ČR (LM2023050 Czech-Biolmaging).

Použitá literatura uvedena na webu Živy.

techniky navíc odhalují, že vedle typických lamel na prstech mohou být plazi vybaveni ještě dalšími strukturami usnadňujícími přichycení a šplhání formou adheze nebo alespoň zvýšeného tření v místě kontaktu s podložkou. Ukazuje se, že adhezivní funkci mohou mít třeba specializované šupiny na ventrální straně gekonů, anolisů a scinků, nicméně zvyšují tření při úchopu větviček a přispívají tak k jistějšímu šplhání chameleonů po vegetaci (Spinner a kol. 2014).

Při suché adhezii nedochází k vylučování žádné kapaliny mezi adhezivní aparát a podložku, ale tyto struktury se dostávají do kontaktu s podložkou přímo. Aby bylo elektromagnetické silové působení mezi přichytnou lamelou a podložkou účinné, musí být kontakt velice těsný. Z tohoto důvodu se tisíce jemných chloupkovitých štětů vybíhající z ventrální strany každé adhezivní lamely na koncích ještě dále násobně větví (obr. 17). Každá terminální větvička je pak zakončena tenkým plochým rozšířením (obr. 18), které dokáže pružně a přesně přilnout k těm nejjemnějším nerovnostem podkladu. Prsty gekona jsou tedy vybaveny neobyčejně mocným kartáčkovitě vyhlížejícím nástrojem s miliony přilnavých zakončení, která rozšiřují kontaktní plochu a generují nečekaně velké adhezivní síly. Lamely na jedné noze gekona obrovského (*Gekko gekko*) nesou přibližně 500 tisíc štětů a každý z nich má ještě

stovky terminálních větviček, jejichž zakončení je široké jen 0,2–0,5 μm. Lamely na jediné noze tohoto gekona mohou tak produkovat na hladkém kovovém povrchu adhezivní sílu až přibližně 10 Newtonů (Autumn a kol. 2000). To v přepočtu znamená, že jedna noha by mohla udržet tělo těžké až kolem 10 kg, tedy dospělý gekon se na podložce snadno udrží jedním prstem.

Nabízí se proto otázka, zda je vůbec tak silná adheze pro život šplhavých ještěřů potřebná a výhodná. Zdá se, že ano. Díky pevnému držení mohou lépe vzdorovat predátorům, snadněji zvládají velkou kořist, spíše přemohou soka při vnitrodruhových interakcích. Samice gekonů také potřebují uvolnit zadní končetiny, aby jimi mohly zachytávat, obracet a připevňovat kladená vejce apod. Nesmíme zároveň zapomínat, že kvalita a sklon přírodních povrchů nejsou jako v laboratoři. Hrubé, pružné, drolivé či vlhké substráty v přírodě efekt suché adheze významně snižují.

Síla adheze je však taková, že žáby i ještěři musejí při pohybu oddělovat adhezivní terčíky a lamely od povrchu tak, že je postupně „odlupují“ nebo „rolují“. Proces „odlupování“ terčíků žab probíhá odzadu dopředu. U ještěřů bylo zjištěno, že se na uvolňování prstů podílejí párové šlachy vedoucí k jednotlivým lamelám, jakož i změna tlaku krve v cévách prstů a v krevních zásobnících nad lamelami. Při oddělování prstů se tlak krve tisknoucí původně lamely k podložce snižuje a dochází k „rolování“ – prsty se na koncích postupně prohýbají a stáčí nahoru od podložky (viz obr. 19–21). Jakmile úhel dosednutí nadzvedávaných štětů lamel překročí 30 stupňů, adhezivní síly přestávají působit.