

Jaroslav Petr

DESATERO POHYBŮ

Zvířata na souši, ve vodě
a ve vzduchu



argo / dokořán

Jaroslav Petr

DESATERO

POHYBŮ

**Zvířata na souši, ve vodě
a ve vzduchu**

ARGO / DOKOŘÁN

Jaroslav Petr
DESATERO POHYBŮ
Zvířata na souši, ve vodě a ve vzduchu

Copyright © Jaroslav Petr, 2024

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této publikace nesmí být rozmnožována a rozšiřována jakýmkoli způsobem bez předchozího písemného svolení nakladatele.

Druhé vydání v českém jazyce (první elektronické).
Odpovědná redaktorka Alžběta Knappová.
Obálka, sazba podle návrhu Pavla Růta
a konverze do elektronické verze Michal Puhač.
Vydalo v roce 2024 nakladatelství Dokořán, s. r. o.,
Holečkova 9, Praha 5,
dokoran@dokoran.cz, www.dokoran.cz,
jako svou 1 271. publikaci (431. elektronická).

ISBN 978-80-7675-179-8

Ivaně

OBSAH

<i>Úvod</i>	9
Chůze a běh	11
Plavání	59
Létání	101
Skákání	169
Šplhání	187
Plazení	203
Pohyb pod zemí	215
Potápění	231
Jízda na zvířatech	249
Pohyby částí těla	263
<i>Přehled použité literatury</i>	291
<i>Rejstřík</i>	325

ÚVOD

Pohyb patří k základním atributům pozemského života tak neodmyslitelně, že ho většinou bereme jako samozřejmost – koho překvapí, že pstruh plave, netopýr létá a mravenec běhá? –, přitom ale představuje jednu z nejdůležitějších a nejužasnějších aktivit všech živočichů. Naši předci měli ke zvířatům mnohem blíže, důkladně je znali a jejich pohyb je fascinoval. Dnešní lidské obyvatele planety dělí od nejbližšího kousku jakž takž nenarušené přírody v průměru asi deset kilometrů a v mnoha koutech světa včetně toho našeho je to ještě mnohem dál. Ztrácíme přímý kontakt s přírodou a spolu s ním se vytrácí i úžas nad pohybem zvířat. Často si vystačíme s několika málo evergreeny, jako je běh geparda, střemhlavý let sokola nebo zápolení lososů s dravým proudem peřejí. Příroda však nabízí bezpočet úchvatných a často zcela nenápadných zvířecích výkonů. Řada živočichů pochoduje po vodní hladině, larvy některých brouků se pohybují pomocí kola, pavouci se nechávají na kořist vystřelit z praku a drobní roztoči využívají při přesunech z květu na květ jako aerotaxi kolibříky.

Nejednou zůstáváme na povrchu pozoruhodných dějů. V knihách najdeme do detailu vyobrazené kosti, svaly a šlachy přední nohy koně, chybí v nich však vysvětlení, jak štíhlá končetina ustojí bez poškození dopad zvířete s jezdcem po skoku přes Taxisův příkop. Žasneme nad tím, že se velryba vorvaňovec potopí na tři a tři čtvrtě hodiny do tříkilometrových hloubek, ale obvykle si ani nepoložíme otázku, jak to tento kytovec dokáže. Čím ho příroda pro takový výkon vybavila? Ze seriózních vědeckých propočtů založených na nejmodernějších poznacích vyplývá, že se vorvaňovec po hodině a čtvrt strávené pod hladinou začne topit. Kde bere sílu na víc než trojnásobně dlouhý ponor? Možná se bojíme ptát, abychom si nemuseli přiznat, že mnohému ze zdánlivě prostého pohybu zvířat stále ještě nerozumíme.

Příroda před nás staví bezpočet podobných záhad. Mořští ptáci terejové se vrhají na kořist střemhlavým pádem z výšky 70 metrů, do vody dopadají rychlostí kolem 100 km/h, a přitom si nesrazí vaz. Tibetská antilopa čiru uběhne stokilometrovou vzdálenost průměrnou rychlostí 70 km/h v nadmořských výškách, kde řídký horský vzduch obsahuje v porovnání se vzduchem při hladině moře jen polovinu kyslíku. Špačci vytvářejí na podzim tisícíhlavá hejna a z nejasných důvodů předvádějí na obloze akrobatické manévry v těsně semknutých šicích, aniž by třeba jen na okamžik hrozilo, že se ve vzduchu srazí.

Detailnější poznání pohybu živočichů by nám pomohlo vyřešit řadu problémů. Konstruktérů ponorek obdivují manévrovací schopnosti rejnoků. Projektanti hledají inspiraci pro zvýšení výkonu větrných turbín v ploutvích velryb keporkaků a od tiše létajících sov se snaží okopírovat recept na snížení hlučnosti rotujících lopatek. Letečtí inženýři sní o tom, že se jejich stroje budou jednou pohybovat vzduchem s minimální spotřebou energie, a napodobí tak albatrosy zdolávající obrovské vzdálenosti bez jediného mávnutí křídel. Sondy pro průzkum cizích planet kopírují pohyb šestinohého hmyzu, plazících se hadů nebo červů hloubících podzemní tunely. I věhlasní experti přiznávají, že je těžké vymyslet technické řešení, které by se vyrovnalo výsledkům, jakých dosáhla miliony let trvající evoluce.

Pohyb zvířat ale stojí za pozornost i bez vyhlídek na hmatatelný prospěch. Sledovat letící vážku, plazícího se hlemýždě nebo pstruha, který se drží uprostřed toku bystřiny a jen tu a tam mávne ocasní ploutví, je zážitek, jakému se jen tak něco nevyrovná. Věděl to už Hérakleitos z Efesu (540–480 př. n. l.), když tvrdil, že pohyb stojí za veškerou harmonií tohoto světa.

Lidským přičiněním se z této harmonie mnohé vytrácí. Až příliš často se stává, že vstupujeme pozemským organismům do cesty a bráníme jim v pohybu. Rybám stavíme do cesty přehradu, na ptáky a netopýry jsme nastražili smrtící pasti v podobě větrných elektráren a naše touha dostat se co nejrychleji na vzdálená místa zapříčinila budování pro zvířata jen těžko prostupných bariér v podobě silnic, dálnic, plavebních kanálů nebo železničních koridorů. I proto je důležité, abychom pohybu živých tvorů věnovali pozornost, porozuměli mu a respektovali jej. Dokonce i zdánlivě banální události, jako je skok žáby, plazení užovky nebo šplhání datla, v sobě skrývají neuvěřitelné příběhy.

CHŮZE A BĚH

V roce 1967 oslavila Alexandra David-Néelová sté narozeniny a jeden z novinářů se jí při té příležitosti zeptal, jak dokázala v roce 1924 na své cestě do Lhasy ujít pěšky bezmála 7 000 kilometrů drsnou náhorní plošinou Tibetu.

„To je celkem jednoduché,“ odpověděla francouzská cestovatelka a znalkyně východních náboženství. „Kladla jsem prostě jen jednu nohu před druhou.“

Chůze je úžasný způsob pohybu. Jeden krok se může jevit jako zcela nicotný počín, ale právě z takových na první pohled bezvýznamných kroků se skládají impozantní pouti. Naši pravěcí předkové vyšli z africké kolébky lidstva po svých a postupně osídlili všechny kontinenty s výjimkou Antarktidy.

Chodecké výkony zvířat se mohou zdát ve srovnání s tibetskou anabází Alexandry David-Néelové chabé, putování některých tvorů ale vzbuzují respekt. Mladá liška polární (*Alopex lagopus*), která se vydala hledat vlastní lovecký revír, doběhla za 76 dní ze Špicberků na Ellesmerův ostrov, vzdálený vzdušnou čarou bezmála 1 800 kilometrů. Vyhýbala se při tom nezamrzlým plochám a v pustině Severního ledového oceánu také pátrala po potravě, se všemi oklikami se tedy její cesta natáhla na 3 506 kilometrů. V průměru uběhla denně kolem 45 kilometrů, za jediný den jich však dokázala urazit až 150.

Některá zvířata pravidelně migrují. To ovšem bývá pro živočichy nesmírně náročné, a proto migrace podstupuje jen osmina všech obratlovců, mezi suchozemskými savci je to dokonce pouhé jedno procento. Nejdelší cesty podniká severoamerický poddruh soba známý jako karibu (*Rangifer tarandus caribou*). Zjara se jejich stáda přesouvají o 1 300 kilometrů dále na sever a na podzim se zase stejnou cestou vrací. Sobi ale nezůstávají na jednom místě ani na letních pastvinách či v zimovištích. Když tedy připočteme k jejich pravidelným migracím letní a zimní „místní pochůzky“, zjistíme, že každoročně nachodí asi 5 000 kilometrů.

Zvířecí chodečtí rekordmani se ale nerekrutují z řad migrujících savců. Poddruh osla asijského označovaný jako kulan (*Equus hemionus kulan*) nepodniká pravidelné pouti, přesto během roku naběhá mongolskými stepy přes 6 000 kilometrů. Ani on však nedrží primát nejzdatnějšího chodce zvířecí říše. V patách kulanům jdou smečky vlků (*Canis lupus*), pro které jsou divocí osli vítanou kořistí. Mongolští vlci naběhají ročně více než 7 000 kilometrů, tedy zhruba tolik, co ušla Alexandra David-Néelová na cestě do Lhasy. Na rozdíl od francouzské cestovatelky absolvují vlci tuhle porci kilometrů rok co rok.

Chodecké výkony člověka jsou ale také impozantní. Rok a půl staré batole odcupitá při svých běžných aktivitách každou hodinu v průměru 2 400 kroků. I když při tom asi sedmnáctkrát upadne, našlape na svých krátkých, nejistých nožkách úctyhodnou vzdálenost 700 metrů. A to se nikam neubírá, nikam nechvátá, za ničím se nehoní. Jen tak se batolí. V dospělosti jsme s to ujít mnohem delší trasy. Veterán americké armády Holly Harrison dokončil v roce 2018 pěší pouť z argentinského města Ushuaia v Ohňové zemi do aljašského Prudhoe Bay. Za 530 dní ušel 23 305 kilometrů.

Z VODY NA SOUŠ

Pozemský život se zrodil v moři a tomuto prostředí zůstával dlouho věrný. Přejít živočichů na pevnou zem proto patří k těm nejvýznamnějším evolučním počínům, jaké se na naší planetě odehrály. Vodní tvorové se ocitli ve zcela novém, krajně nehostinném prostředí. Řada těchto invazí byla určitě neúspěšná, ale nakonec živočichové přechod na souš zvládli a natrvalo ji osídlili.

„Velký skok“ z vody na pevnou zem kladou mnozí odborníci do siluru před 444 až 419 miliony let. Z tohoto období pochází i jeden z nejstarších známých suchozemských tvorů, dvoucentimetrová mnohonožka *Kampecaris obanensis* – stáří její fosilie se odhaduje na 425 milionů let. Evoluční rodokmeny sestavené na základě rozdílů v dědičné informaci zástupců současné fauny nabízejí scénář, podle kterého mnohonožky ani nečekaly, až se na pevnině uchytí vyšší rostliny, a podnikly suchozemskou invazi již před 535 miliony let. Podobně si snad pospíšili i předci štírů a pavouků, kteří se mohli prohánět po suché zemi už před 500 miliony let. Za hmatatelný důkaz tak časného průniku živočichů na souš považují někteří vědci zkamenělé stopy nožek, které tyto tvorové otiskli do bahna. Jedinou skupinou členovců, která opustila moře průkazně až v době, kdy se pevnina zazelenala suchozemskou flórou, by tak byli šestinozí předci dnešního hmyzu. Ti se usídlili na pevnině asi před 433 miliony let.

Výstup z vody na souš nebyl jednoduchý a živočichové se při něm museli vypořádat s celou řadou evolučních výzev. Tou první byla ochrana proti vysychání organismu. Mnohonožky a další členovci si vypomohli několika způsoby. Povrch těla mají potažený tenkou a nepropustnou vrstvičkou z tuků a vosků, jež je chrání i v největších vedrech. Vodou šetří i při odstraňování zplodin látkové výměny – jedovatý čpavek v těle neředí a nezavávají se ho vodnatou močí, ale promění ho na kyselinu močovou, kterou pak vyloučí v pevném skupenství speciálními žlázami, pracujícími podobně jako ledviny obratlovců. Za „utěšnění“ organismu ale zaplatili suchozemští tvorové tíže dýcháním. Mnoho vodních živočichů přijímá kyslík z vody povrchem těla, to však suchozemským členovcům nepropustný kryt nedovolí. Pro dopravu vzduchu do nitra těla si

éra	perioda	začátek před současností v milionech let	délka trvání v milionech let
čtvrtohory (kvartér)		3	3
třetihory (terciér)	neogén	23	20
	paleogén	66	43
druhohory (mezozoikum)	křída	145	79
	jura	201	56
	trias	252	51
prvohory (paleozoikum)	perm	299	47
	karbon	359	60
	devon	419	60
	silur	443	24
	ordovik	485	42
	kambrium	541	56
starohory (proterozoikum)		2500	1959
prahory (archaikum)		4000	1500
hadaikum		4600	600

Zjednodušený přehled geologických období Země. Silné čáry vyznačují období masového vymírání pozemského života na pomezí jednotlivých period.

proto vyvinuli dýchací soustavy, které zajistí průnik kyslíku do tkání a vyloučení oxidu uhličitého z tkání.

Na pevnině nastává problém i s rozmnožováním. Vodním živočichům stačí vypustit pohlavní buňky do okolí a spolehnout se, že se vajíčka se spermii někde potkají, zatímco suchozemští členovci museli najít způsob, jak dopravit samčí sperma do pohlavních orgánů samice. Pro tento účel si vyvinuli často velmi složité námluvy a páření, které nedovolí, aby sperma a vajíčka došly v nehostinných podmínkách souše újmou.

Život na pevnině klade odlišné nároky na celou řadu dalších životních aktivit, smyslovými vjemy počínaje a pohybem konče. Vzduch například vede zvuky hůře než voda. Klade živočichovi menší odpor, ale na druhé straně ho zase skoro vůbec nenadnáší. S tím vším se členovci vypořádali, protože byli velice přizpůsobiví a také jim základní koncepce stavby a funkce jejich organismů takovou adaptaci dovozovala. Třeba medúzám jejich rosolovité tělo tuto šanci nenabídlo.

ČTYŘMA NOHAMA NA PEVNÉ ZEMI

První obratlovci zamířili z moře na suchou zem zhruba před 400 miliony let, v geologickém období devonu, kdy už souš obývali početní zástupci flóry

a bezobratlých živočichů. Obratlovci byli v devonských mořích hojně zastoupeni rybami. Mnohé z nich se chránily před nepřáteli kostěným pancířem. Byly to skutečné těžké váhy, které potřebovaly pro volný pohyb ve vodě dodatečný vztlak. K tomu se jim z vychlípeniny horní části jícnu vyvinul plynový měchýř. Spojovací trubice mezi jícnem a měchýřem jim dovolovala, aby si měchýř plnily spolykaným vzduchem. Ten přicházel vhod i v situacích, kdy ve vodě dramaticky ubylo kyslíku a dýchání žábami rybám nestačilo. Vypomáhaly si s ním například ve špatně okysličených vodách sluncem prohřátých mělčin.

Kam až mohly tito tvorové dovést dýchání atmosférického kyslíku plynovým měchýřem, předvádějí dnešní dvojdyšné ryby (*Dipnoi*), reprezentované africkými, australskými a americkými bahníky. Australští bahníci (*Neoceratodus*) mají zachované žábry, u jejich afrických a amerických příbuzných (*Protopterus* a *Lepidosiren*) už tento orgán zakrněl natolik, že ho využívat nemohou. Na vzduchu dýchají všichni bahníci plynovým měchýřem proměněným na primitivní plíce.

Při přesunech se devonské ryby odrážely silnými končetinami ode dna. U některých už jsou na kostře ploutví jasně patrné základní rysy budoucích nohou suchozemských živočichů. Blíže k tělu je ploutev tvořena jednou mohutnější kostí, ze které se u suchozemských čtyřnožců vyvine na přední končetině kost pažní a na zadní kost stehenní. Na ni pak v ploutvi pravěkých ryb nasedá dvojice kostí, které dají evoluci vzniknout předloktí s kostí vřetenní a loketní a holeni s kostí holenní a lýtkovou.

Proměna ploutve na nohu schopnou kráčet po souši se zdá být komplikovaná, ve skutečnosti ale nemuselo jít o přehnaně složitý proces. To se ukázalo při experimentech na drobné rybce dániu pruhovaném (*Danio rerio*), známé mezi akvaristy jako „zebrička“. Stačí změna dvou genů a anatomická stavba ploutve se zásadně promění. Rybkám narostou v ploutvích nové kosti a mezi nimi vzniknou spoje, které nápadně připomínají klouby končetin suchozemských čtvernožců. Cesta k tvorbě kráčivých nohou s předloktím a holení je otevřena.

Podobně si ryby poradily s dalšími překážkami. Na suchu postrádaly vztlak vody, který jim v moři nadnášel tělo a usnadňoval pohyb, každá aktivita tak vyžadovala větší úsilí. S vdechovaným vzduchem ale získávaly více kyslíku, než kolik jej načerpaly z vody žábami. Díky tomu si mohly dovolit intenzivnější metabolismus, kterým si zajistily víc energie pro všechny životní činnosti. Souš navíc nabízela dostatek potravy v podobě rostlin i bezobratlých živočichů, o níž nebylo třeba soupeřit s konkurencí, kterou se to v devonských vodách jen hemžilo. Na pevnině také chyběli velcí predátoři. Přejech z vody na pevnou zem tak představoval silné evoluční pokušení.

O tom, jak tento proces vypadal, si můžeme udělat představu z 372 milionů let staré fosilie tvora s vědeckým jménem *Parmastega aelidae*. Žil v pobřežních tropických lagunách, dorůstal délky kolem jednoho metru a na první pohled

mohl připomínat malého krokodýla. *Parmastega* trávil hodně času na hladině s částečně vynořenou hlavou, což dokazuje stavba její postranní linie, která nezasahuje do horní části hlavy. Ryby tímto smyslovým orgánem vnímají vlnění a proudění okolní vody a na hlavě se jim postranní linie dělí do několika větví. V části hlavy, kterou *Parmastega* vystrkovala z vody ven, však byla postranní linie zbytečná. Dění na souši sledoval tento tvor silně vypouklýma očima a zřejmě pásl po bezobratlých tvorech pohybujících se v blízkosti vodních ploch. Podnikal výpady, při nichž se dostával až na pevnou zem, ale dlouho se tam nezdržel, protože ho přední chrupavčité končetiny mimo vodní živel neunesly.

Podstatně dále dospěl v dobývání souše tvor s vědeckým jménem *Tiktaalik roseae*, jehož zkamenělina byla objevena v kanadské Arktidě. I tento živočich se ze všeho nejvíc podobal malému krokodýlovi. Ploutvovité končetiny už měl vybavené mohutnými svaly a solidními kostmi, takže na souši unesly tíhu jeho těla. Zachoval si sice rybí žábry, ale dobře vyvinuté nozdry svědčí o schopnosti dýchat na vzduchu primitivními plicemi. Důležitou roli plic prozrazuje i dobře klenutý hrudní koš. *Tiktaalik* se pyšnil i anatomickou novinkou: hlava mu neasedala přímo na trup, ale nesl ji krk, který dovoloval větší rozsah pohybů. Zajistilo mu to úspěšnější lov v mělké vodě i na souši.

Životním stylem mohl *Tiktaalik* připomínat současnou rybu lezce obojživelného (*Periophthalmus barbarus*), která dorůstá délky kolem patnácti centimetrů. Ta obývá bahnitě mangrovové porosty na atlantickém pobřeží Afriky od Angoly až po Ghanu, kde si na ochranu před nepřáteli vyhrabává až metr hluboké nory. Tělo kryté šupinami jí povléká vrstva slizu, jež ji chrání před vysycháním, kdykoli se ocitne mimo vodu. Umí uzavřít žábry a zadržet v nich vodu, což jí usnadňuje hospodaření s kyslíkem. Zároveň dýchá i kůží a může po většinu dne pobývat mimo vodní živel. Ve vodě si lezec obojživelný napomáhá párem prsních ploutví k udržování rovnováhy, podobně jako jiné ryby. Na souši mu tyto ploutve slouží jako přísavka, kterou se uchytí k podkladu, a pojistí se tak proti stržení vodním proudem. Párem prsních a břišních ploutví se také odráží ke krátkým skokům. Při hledání nadějných lovišť a vhodného úkrytu vydrží hopsat po souši dlouhé hodiny, a zvládá dokonce šplhání po kamenech nebo kmenech stromů.

Podobných pochodujících ryb je v přírodě víc. Dokonale své končetiny pohybu na souši přizpůsobila balitora jeskynní (*Cryptotora thamicola*). Třicentimetrová rybka byla objevena teprve v roce 1985 v ponorných řekách protékajících jeskyněmi v thajském pohoří Daen Lao. Peřeje a vodopády obchází po břehu po vlhkých kamenech a pomáhá si při tom nápadně velkými, vějířovitě tvarovanými prsními a břišními ploutvemi. Je to „čtvernozec“ s takřka plnohodnotnou chůzí. Radikální evoluční proměnou u ní prošly především břišní ploutve. Na rozdíl od jiných ryb nemá balitora jeskynní opěrné kosti těchto ploutví uložené volně v měkkých tkáních těla: zbytněly, protáhly se do délky a kloubem

se spojily s páteří, takže vytvářejí obdobu pánve suchozemských obratlovců a skýtají ploutvím solidní oporu. Mohutné svaly dovolují balitoře kráčet po pevném podkladu stylem, jakým chodí čtvernozí obojživelníci. Končetiny ji unesou a balitora proto při chůzi nevláčí břicho po zemi.

Početné příbuzenstvo balitory jeskynní najdeme i ve volně tekoucích vodách. Třetina z nich se kosti břišních ploutví přeměnily v náhražku pánve. Také tyto ryby zřejmě čas od času pobíhají po souši, vědci je ale při tom zatím nepřistihli. Podobně jako balitora žijí tito rybí chodci v prudce tekoucích vodách, což naznačuje, že z vody na souš a k chůzi po čtyřech končetinách se dá dojít různými evolučními cestičkami.

NOHA JAKO STROJ

Od končetiny, jakou se opíral o dno devonského moře *Tiktaalik roseae*, vedla ke končetinám dnešních živočichů dlouhá evoluční pouť. Během ní se končetiny proměnily v dokonalé stroje a nejednou dorostly impozantních rozměrů. Samec žirafy severní (*Giraffa camelopardalis*) Forest shlíží na návštěvníky zoo v australském Brisbane z výšky pěti metrů a 70 centimetrů a je Guinnessovou knihou rekordů registrován jako nejvyšší živočich planety. Za svůj rekord vděčí nejen dvoumetrovému krku, ale také zhruba stejně dlouhým předním nohám. Velekrab japonský (*Macrocheira kaempferi*) s končetinami dlouhými až 180 centimetrů za žirafami o mnoho nezaostává. Anatomickou stavbou se ale nohy obou tvoří liší jako den a noc.

Základní konstrukční materiál končetiny velekraba a dalších korýšů tvoří lehký, a přitom pevný chitin. Noha se skládá ze sedmi segmentů, k tělu se připojuje „kyčlí“ a zakončena je „drápkem“. Základem jednotlivých článků je chitinová trubice s tenkými stěnami. S minimální spotřebou materiálu, a tedy i velmi nízkou hmotností získává článek končetiny maximální pevnost. Svaly zajišťující pohyb jsou uloženy uvnitř trubice a ke stěnám se upínají šlachami. Aby se mohla končetina ohýbat, jsou tvrdé chitinové „trubky“ jednotlivých článků spojeny pružnou blánou. Ta je zvlněná a umožňuje pohyb v kloubech podobně, jako když dlouhý městský autobus „harmonika“ projíždí ostrou zatáčkou. Pevné chitinové konce sousedních článků do sebe zapadají a omezují ohýbání končetiny v kloubu na směry, jaké velekrab pro chůzi po mořském dně potřebuje. V principu stejné konstrukční řešení končetin najdeme u dalších bezobratlých tvorů, například pavouků, štírů nebo hmyzu.

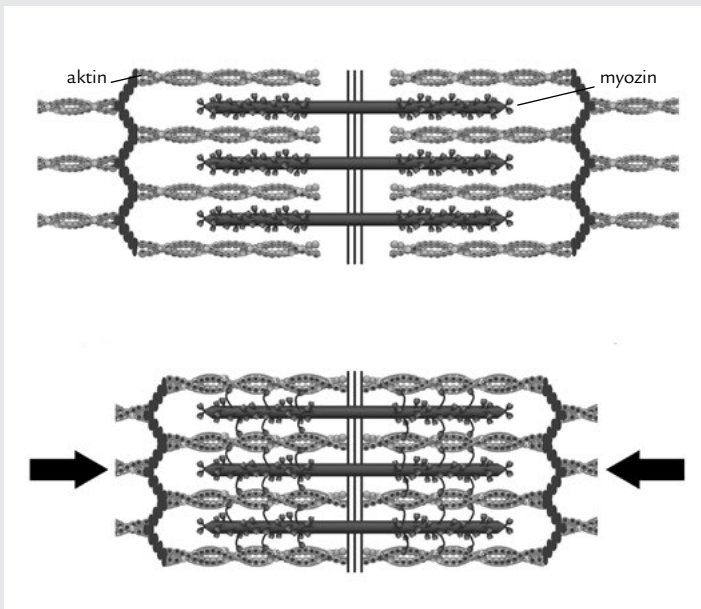
Čtyřnozí obratlovci mají končetiny konstruované úplně obráceně. Oporu jim skýtají silně mineralizované kosti, kolem kterých jsou uloženy svaly, přichycené ke kostem pružnými šlachami. Hlavice kostí jsou spojeny v kloubech elastickými vazy. Končetina se nepohybuje pouze pomocí svalů, ale

Svaly

Práce svalu má své zákonitosti. Na jejím počátku doputuje nervem ke svalovému vláknu vzruch, který dává svalu povel ke smrštění. V první reakci na něj se do svalu uvolní ionty vápníku. Ty se navážou na molekuly bílkoviny troponinu, navěšené na dlouhém tenkém vláknu bílkoviny aktinu. Troponin, jenž byl právě „pocukrován“ vápníkovými ionty, donutí své „nosné lano“ z aktinu k rotaci. Tímto natočením se na aktinovém vláknu odkryjí místa, kam se může navázat další významný aktér svalového stahu – bílkovina zvaná myozin.

Také molekuly myozinu jsou uspořádány do dlouhých vláken. Na rozdíl od tenkých aktinových jsou myozinová vlákna podstatně tlustší. Z každého vybíhají do všech stran „hlavičky“ molekul myozinu, proto vypadají tak trochu jako dlouhý stromek s hustým větrovím. Na konci každé „větvičky“ se nachází bambulovitá „hlavička“ myozinu, která se přichytává na odkrytá vazebná místa pootočeného aktinového vlákna. Následně se „větvička“ zkroutí a zatáhne při tom za připojené aktinové vlákno. Tím se aktinové a myozinové vlákno vůči sobě posunou a svalová buňka se zkrátí. Smrštěním buněk dochází ke stáhnutí svalu. Poté, co se sval stáhl, se aktinová a myozinová vlákna od sebe zase oddělí a sklouznou zpět. Stah povolí a sval se protáhne.

Každé smrštění svalu vyžaduje vydatnou porci energie. Pokud má sval pracovat opakovaně, musí načerpat novou energii a kromě jiného také „zamést“ volné vápníkové ionty. Tento „molekulární úklid“ vyžaduje určitý čas, a právě to je kámen úrazu při rychle se opakujících svalových stazích. Frekvence stahů svalu je omezená dobou, jakou potřebuje sval k tomu, aby byl znovu uveden do plné pohotovosti. Proto mají svaly na končetinách zvířat rychlostní limity.



funguje také jako systém pružin: při došlápnutí se šlachy a vazy napnou a pohltní při tom energii, po odrazu nohy od země se smrští a energie se z nich opět uvolní. Noha tak funguje zčásti jako katapult. Šlacha pracuje s vysokou účinností a úctyhodným výkonem – pohltní šedesátkrát více energie než stejně těžká ocelová pružina. Účinnost šlach a vazů při převodu pohybové energie na pružnou deformaci ale není stoprocentní a to s sebou nese rizika. Šlachy a vazy na noze běžícího koně se mohou natáhnout a opět smrštít během dvou sekund až pětkrát a po smrštění uvolní 93 % pohlcené energie. Zvíře díky tomu šetří silami a vystačí s polovičním množstvím kyslíku, než kdyby mu končetiny poháněly jen svaly. Zbývajících 7 % energie se ale mění na teplo, a koni se proto šlachy a vazy při intenzivním běhu citelně zahřívají (jejich teplota může vystoupat až na 46 °C). Buňky šlach při takovém zahřátí hynou a oslabené šlaše pak hrozí těžké poškození.

Princip pružinového pohonu využívají nejen vynikající běžci, jako je kůň, ale také těžkopádnější sloni. Generace badatelů byly přesvědčeny, že se sloni pohybují, aniž by ohýbali končetiny v kloubech. O tom, jak starý je tento omyl, svědčí i verše „Slon klouby má, leč pro poklonky ne; / má nohy k potřebě, ne k ohýbání“, které vložil William Shakespeare do úst Odysseovi v dramatu *Troilus a Kressida*, sepsaném někdy kolem roku 1602. Slavnému dramatikovi nelze mít omyl za zlé. O to, jak sloni končetinami pohybují, vedou spory vědci i v 21. století. Nová měření ale přesvědčivě dokazují, že i sloupovité nohy těžkotonážních tlustokožců fungují jako systém pružin, který pohlcenou energii vrací zvířeti při dalším kroku. Pětitonový slon díky tomu vyvine při běhu rychlost až 25 kilometrů v hodině. Podobnou rychlostí běhají díky pružným šlachám i další zvířecí těžkotonážníci, jako jsou hroši nebo nosorožci.

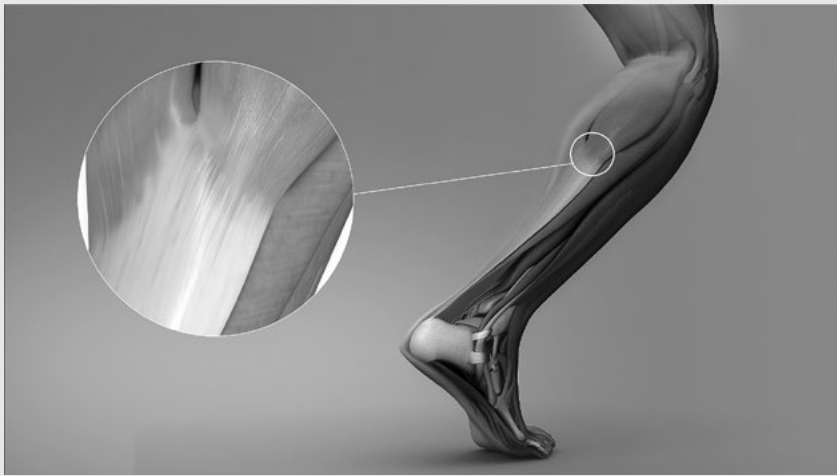
Rekordně velcí sloni afričtí (*Loxodonta africana*) váží až deset tun. Při chůzi či běhu jsou jejich nohy vystaveny s každým došlápnutím neuvěřitelně silným nárazům, které šlachy neutlumí. Sloní končetiny to vydrží jen díky anatomickým zvláštnostem, které objevil už v roce 1706 skotský chirurg Patrick Blair (1670-1728) při pitvě uhynulého slona z potulného cirkusu.* Blair došel k závěru, že slon má v noze kromě navenek jasně patrných pěti prstů ještě šestý, ukrytý uvnitř složitého propletence tkání. Celé generace anatomů Blairův nález odmítaly s odůvodněním, že se v chodidle slona nachází jen kousek chrupavky. Teprve velmi zevrubný výzkum slonů uhynulých v pokročilém věku odhalil, že se tato chrupavka postupně mění v kost. Blair se mýlil jen v tom, že útvar – odborně označovaný jako prehallux – považoval za opravdový prst. Ve skutečnosti se jedná o silně zvětšenou tzv. sezamskou kost, jež u menších předků slonů zajišťovala hladké klouzání šlachy kloubem. Při zběžném pohledu se může zdát,

* Blair, Patrick. *Osteographica elephantina*. London: G. Strahan and W. Innys, 1713.

Šlachy a vazy

Šlachy upevňují svaly ke kostem, vazy spojují různé kosti a podílejí se na stavbě kloubů. Jejich základ tvoří vazivové buňky, tzv. fibroblasty. Ty produkují velká množství bílkoviny kolagenu, která je zformována do velmi pevných vláken. Vazy drží kosti v kloubech v těsném kontaktu – i když se prostoru v kloubu mezi kostmi říká kloubní dutina, místa je tam pomálu, obvykle je to jen úzká štěrbina.

Nejsilnějším vazem lidského těla je *ligamentum iliofemorale*, spojující stehenní kost s pánví. Má tvar obráceného písmene Y, obě ramena jsou široká až jeden a půl centimetru a silná až jeden centimetr a vaz vydrží zátěž až 350 kilogramů. Nejsilnější šlachou je „achilovka“, která připojuje lýtkový sval k patní kosti. Při chůzi nese běžně zátěž čtyřnásobku a při běhu až osminásobku hmotnosti pohybujícího se člověka.



že nepravý prst, dlouhý patnáct a široký šest centimetrů, nemá pro chůzi zvířete valný význam, protože nedosahuje až ke styčné ploše nohy se zemí. To ale platí, jen když leží sloní noha na pitevním stole, jinak je tomu u stojícího zvířete. Slon chodí po špičkách a zadní částí nohy došlapuje na pružný polštář z tuku a vaziva, jenž pohlcuje nárazy. Tíhou zvířete se polštář silně zmáčkne, chrupavka šestého prstu je tím zatlačena dolů a slon se o ni opře.

Velmi podobný tlumič snad měli na nohou i druhohorní obří dinosauři z příbuzenstva brontosaurů. Otisky jejich nohou dochované ve zkameněném bahně měří na délku 170 centimetrů a mají rozměry koupelňové vany. Odhaduje se, že tato zvířata vážila přes 50 tun a jejich končetiny čelily nárazům, při kterých by měly praskat kosti. Vědci proto předpokládají, že obří dinosauři došlapovali na pružné polštáře velikosti menší pohovky. Ty se přes propast věků pochopitelně nedochovaly, ve prospěch jejich existence ale svědčí anatomie prstů dinosauřích

končetin, která dokládá, že obří tvorové našlapovali na špičky prstů a patu měli zvednutou podobně jako sloni.

Jako pružiny fungují také klouby na noze korýšů, pavouků či hmyzu. Harmonikové spoje kloubů mezi jednotlivými články se tahem svalů ohnou, a když se svaly uvolní, vrátí se kloub bez vynaložení další námahy do své neutrální polohy. Také velekrab japonský tedy vykonává některé pohyby končetin, aniž by zaměstnával svaly.

ŠESTINOŽÍ CHODCI

Šestinohý hmyz usiluje při chůzi o maximální stabilitu. Pokud jde pomalu, zvedá vždycky jen jednu nohu a ostatními pěti stojí pevně na zemi. Při rychlejší chůzi stojí vždy alespoň na třech. Opírá se o přední a zadní končetinu na jedné straně těla a o prostřední na protější straně. V následném kroku si nohy postavení jen stranově prohodí. Hmyz neupouští od strategie dvou trojnožek, ani když nabere na rychlosti. Například švábi se opírají o zem aspoň třemi končetinami i v případě, že prchají před fatální hrozbou speciálním sprintem, který využívají jen v nejvyšší nouzi. Některé druhy hmyzu ve vyšších rychlostech mění tradiční krok a opírají se o zem najednou třeba i čtyřmi končetinami. Pro nohy téhož páru ale vždy platí, že když je levá zvednutá, pravá stojí na zemi a naopak.

Saharští mravenci *Cataglyphis bombycina* zásady chůze či běhu šestinohého hmyzu nechtí. Přesto, anebo právě proto jsou to ti nejrychlejší mravenci pod sluncem. Po saharském písku a kamení rozpáleném na 60 °C běhají rychlostí kolem tří kilometrů v hodině. Za jedinou sekundu urazí bezmála 90 centimetrů, což je stonásobek délky jejich těla. Ve srovnání s blízce příbuznými mravenci přitom na rekordně rychlé běžce nevypadají. Mají například o pětinu kratší končetiny než příbuzný mravenec *Cataglyphis fortis*. Krátké nožky však dovedou rozkmitat tempem 47 kroků za sekundu, zatímco jejich dlouhonožý příbuzný jich zvládne za stejnou dobu jen 36. Když nabere *Cataglyphis bombycina* rychlost, jdou zásady trojnožkové stability stranou - v některých chvílích se nedotýká země ani jednou nohou a na zlomek sekundy se vznáší ve vzduchu.

Další výjimečný typ kroku můžeme pozorovat u brouků vrubounů *Pachysoma* z písčných dun jihoafrické pouště Namib. Na rozdíl od jiných vrubounů si neválejí kuličku z čerstvého trusu, ale sbírají pro své larvy suchý trus. Chodí opakovaně k hromadě výkalů některého z velkých býložravců a s nákladem se vrací k hnízdu. Často k tomu volí unikátní krok, jaký u jiných druhů hmyzu ještě nikdo nepozoroval. Kousky trusu drží zadními nohama, které vlečou za sebou a pro pohyb je vůbec nepoužívají. Zvedají současně obě přední a následně pak obě prostřední nohy, jedním z párů ale vždy stojí na zemi. Tímto podivným

krokem chodí často i bez nákladu, ačkoli se jím pohybují pomaleji, než když do chůze zapojí i zadní pár končetin a zvolí klasický trojnožkový styl. Důvod, proč se vrubouni *Pachysoma* drží unikátního způsobu i ve chvílích, kdy mají zadní nohy volné, není úplně jasný. Snad to souvisí s jejich opakovanými cestami mezi zdrojem trusu a hnízdem pro larvu. Při trojnožkovém pohybu brouk po písku hodně klouže. Zdánlivě neohrabaný abnormální krok je podstatně stabilnější, vruboun si tak snáze udrží přehled o tom, kolik kroků ušel a jak daleko to má k cíli. Ztráta orientace by pro něj měla v záplavě pouštního písku fatální následky, a tak se snaží toto riziko eliminovat. Možná právě proto nechává zadní pár končetin zahálet i v případě, že putuje s prázdnou.

Styl chůze velmi podobný šestinožnému hmyzu si osvojili i osminožci. Pavouci (*Aranae*) dávají pozor, aby si jejich tělo udržovalo vyrovnanou podporu z obou stran. O podklad se opírají vždy první levou, druhou pravou, třetí levou a čtvrtou pravou, nebo první pravou, druhou levou, třetí pravou a čtvrtou levou končetinou.

Většina titěrných tvorů se obejde bez nohou. Želvušky (*Tardigrada*), dorůstající délky od 0,05 do 1,2 milimetru, jich však mají hned osm. Tyto pozoruhodné živočichy najdeme na dně moří, řek a jezer, ale třeba i na povrchu vlhkých mechů a lišejníků, kde se pohybují „želvím“ tempem. Běžně pochodují rychlostí poloviny délky těla za sekundu, když si přichvátanou, urazí za sekundu asi dvě délky těla. K chůzi používají pouze šest končetin. Čtvrtý pár je vybaven jen chabým svalstvem a slouží k přidržování a manévrování. Při pomalé chůzi zvedají jednu nohu po druhé a pěti zbývajícím nohama zůstávají na zemi. Jak zrychlují, jejich krok se mění. Při útěku mají ve vzduchu vždy dvě končetiny, ale ty nikdy nepatří ke stejnému páru. Při ještě vyšších rychlostech zvedá želvuška najednou tři končetiny, přičemž podobně jako hmyz dodržuje pravidlo trojnožkové stability. Pokud želvušky na příliš měkkých površích s rovnováhou zápasí, uchylují se ke kroku, který připomíná prapodivnou chůzi pouštních vrubounů z rodu *Pachysoma*. Zvedají současně levou i pravou nohu jednoho páru, zatímco drápky zbývajících končetin jsou pevně zaryté do podkladu.

Želvušky a hmyz dělí stovky milionů let samostatného vývoje, přesto sdílejí základní charakteristiky pohybu. Může to znamenat, že základní principy chůze zdědili od společného předka. Neméně fascinující je ale i představa, že je evoluce dovedla nezávisle na sobě k velmi podobným výsledkům.

STONOŽKY A MNOHONOŽKY

Mezi bezobratlými živočichy najdeme tvory, kterým příroda nadělila podstatně větší počet nohou než hmyzu, pavoukům nebo želvuškám. Stonožky (*Chilopoda*) a mnohonožky (*Diplopoda*) jich dostaly do vínku skutečně hodně, často

i několik stovek. Stonožkám vyrůstá na každém článku dlouhého těla jeden pár nohou; dospělci mívají minimálně patnáct párů a ty nejnohatější jsou vybaveny až 191 páry. Počet párů je ale vždy lichý, takže po stonožce s rovnou stovkou končetin bychom pátrali marně.

Mnohonožky nesou na každém článku hned dva páry končetin, běžným standardem těchto tvorů bývají tři stovky nohou. Platí to i pro nejdelší žijící mnohonožku *Archispirostreptus gigas* z Afriky, která dorůstá délky přes 33 centimetrů a má 256 končetin. Vysoký počet nohou mnohonožek vedl některé národy k přesvědčení, že jich mají tito tvorové tisíce (jako „tisícinožky“ jsou označovány například v angličtině, dánštině či islandštině). Do nedávné doby ale rekord držela kalifornská mnohonožka *Illacme plenipes* s „pouhými“ 750 končetinami. První skutečnou tisícinožku se podařilo najít až v roce 2021 hluboko v podzemí australských pouští. Mnohonožce *Eumillipedes persephone* se štíhlým tělem o průměru necelého milimetru a dlouhým deset centimetrů napočítali vědci 1 306 nohou. Chytili ji do pastí nalícené v díře průzkumného geologického vrtu v hloubce 60 metrů. Také bývalý rekordman v počtu nohou *Illacme plenipes* žije v podzemí. Zdá se, že extrémní zúžení a prodloužení těla spolu s enormně vysokým počtem končetin je součástí adaptace mnohonožek na život pod zemským povrchem. Tvora, který by počtem údů stávajícího držitele rekordu překonal, tak vědci nejspíš najdou opět v hlubinách.

V dávné minulosti žily na zemi gigantické mnohonožky. Z období karbonu před 326 miliony let pochází fosilie mnohonožky z rodu *Arthropleura*, která dorůstala délky kolem dvou metrů a 70 centimetrů a mohla vážit asi 50 kilogramů. Rekord australské hlubinné mnohonožky by ale neohrozila. Kompletní tělo pravěkého tvora se skládalo nejspíš z třiceti článků, což při dvou párech nohou na článek odpovídá 120 končetinám.

Zajistit koordinaci pohybu tolika nohou není jednoduché. Stonožky a mnohonožky se s tím popasovaly po svém. Podepsaly se na tom zřejmě jejich odlišné nároky na chůzi. Stonožky jsou poměrně hbití chodci, schopní ulovit i rychle se pohybující živočichy, jako jsou pavouci nebo různé druhy hmyzu. Pár nohou vyrůstající stonožkám z jednoho tělního článku pracuje v opačném režimu: když se pravá noha opírá o podložku, levá je zvednutá a přesouvá se vpřed. Nohy sousedních článků pracují s mírným časovým posunem, takže na každé straně těla můžeme pozorovat pohyb nohou podobný „mexické vlně“. Tento způsob chůze nutí stonožku při chůzi k vlnění ze strany na stranu. Čím víc pospíchá, tím je toto vlnění zřetelnější.

Mnohonožky jsou podstatně pomalejší. Až na pár dravých výjimek, k nimž patřila zřejmě i obří *Arthropleura*, se živí rozkládající se vegetací, a ta jim neuteče. Oproti stonožčímu protichůdnému rytmu se pár končetin vyrůstající z jednoho

článku pohybuje synchronně - když se o zem opírají nohy na levé straně těla, dělají totéž i jejich protějšky. Zjednodušeně si můžeme chůzi stonožek představit, jako kdyby každý z párů jejich končetin plaval kraulem, zatímco u mnohožek každý pár plave motýlkem.

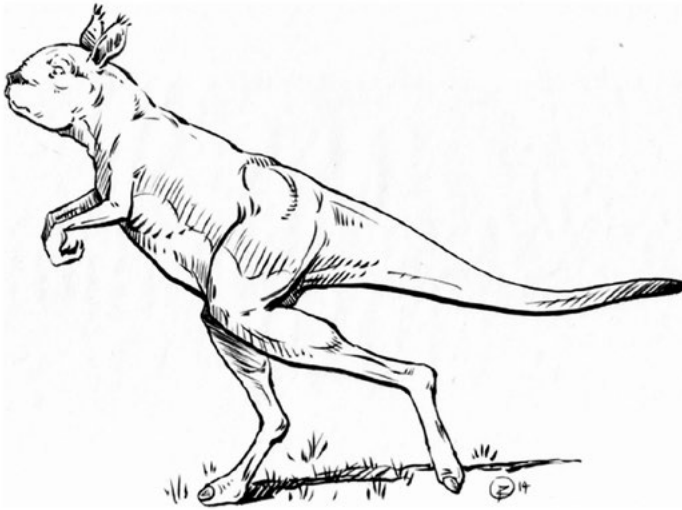
PO DVOU

Speciální případ pohybu představuje chůze po dvou čili bipedalismus. A nejen proto, že se tak pohybujeme my lidé. Při tomto způsobu chůze se živočichové ocitají ve velmi vratkých pozicích, když opakovaně stojí pouze na jedné noze. Ve srovnání s chůzí po čtyřech nároky na koordinaci pohybu a udržování rovnováhy prudce rostou a vysoká je i zátěž končetin. Noha nese při chůzi jeden a půl násobek tělesné hmotnosti, při běhu je to dokonce trojnásobek. Přesto nejsme zdaleka první, kdo tento způsob pohybu použil.

K neznámějším tvorům krácejícím po zadních patří zcela jistě dinosauři teropodi (*Theropoda*). Ti zdědili bipedalismus jako základní způsob chůze po svých plazích předcích. Až později si gigantický růst některých druhohorních ještěřů vynutil přechod zpět k chůzi po čtyřech; tzv. sauropodi (*Sauropoda*) mohli jen těžko nosit desítky tun těžká těla pouze na zadních končetinách. Tvory impozantních tělesných proporcí najdeme ale i mezi dvounohými teropody: dravý *Giganotosaurus* měřil na délku třináct metrů a vážil až osm tun. Jenže co je to proti obroví známému pod jménem *Obruhathkayosaurus*, který chodil po čtyřech a mohl vážit přes 130 tun.

Jak se předci dinosaurů k bipedalismu propracovali? Pomohly jim k tomu mohutné svaly upnuté ke kostře ocasu. Díky nim se mohli postavit na zadní nohy podobně jako někteří současní středoameričtí leguáni (*Ctenosaura*). Běh po dvou se ukázal jako překvapivě rychlý a plazi ho začali upřednostňovat. Zadní končetiny jim mohutněly a přední nohy se naopak zmenšovaly, aby se horní část těla co nejvíce odlehčila. Zkracování předních končetin šlo ruku v ruce se zvětšováním hlavy a zesilováním čelistí. Teropodi mohli i velkou kořist uchopit přímo do tlamy a paže k tomu už nepotřebovali.

Rychlost, jakou dvounozí dinosauři běhali, vědci jen odhadují. Třeba tyranosaurovi připisují někteří z nich rychlost až 40 km/h, a u mladších jedinců dokonce 50 km/h. Jiní paleontologové jsou ale výrazně střízlivější a podle tělesné stavby v něm vidí spíše vytrvalce než sprintera. Nejrychlejší dinosauři bipedalisté vážili řádově stovky kilogramů a běhali zhruba šedesátikilometrovou rychlostí. K nejhbitějším patřil *Struthiomimus*, jehož jméno prozrazuje podobnost tělesné stavby s pštrosy (*Struthio*). Podobně jako tito vynikající ptačí běžci nesl *Struthiomimus* malou hlavu na dlouhém krku. Měl mocně vyvinuté zadní nohy a zakrnělé přední končetiny. Od zobákovitých, bezzubých čelistí po špičku dlouhého ocasu měřil



Pravěký klokan *Sthenurus stirlingi* se nepohyboval skoky typickými pro dnešní klokany, na to byl příliš těžký. Po zadních končetinách kráčel běžnou chůzí.

kolem pěti metrů. Podle některých odhadů vyvinul tento plaz rychlost až 80 kilometrů v hodině.

Poněkud přesnější představu si lze udělat o rychlosti běhajících dinosaurů ze zkamenělých stop. Bohužel se z nich nedá vyčíst, jaký druh dinosaura šlápoty zanechal, protože všichni tito druhohorní plazi měli velmi podobný tvar nohou. Nemůžeme také počítat s tím, že by se nám přes propast věků dochovaly stopy dinosaura pádícího s plným nasazením. Maximální rychlostí tito predátoři běhali, jen když k tomu měli pádný důvod – při pronásledování kořisti nebo na útěku před zdatnějšími lovci. S největší pravděpodobností tedy nacházíme stopy dinosaurů pohybujících se línou chůzí, i ty ale nabízejí svědectví o běžících překračujících rychlost 45 km/h. Řada z nich ovšem asi uměla pelášit o poznání svižněji.

Savci, kteří žili v druhohorní přírodě vedle dinosaurů, by možná také uvítali možnost běhat po zadních. Nebylo jim to dopřáno, protože postrádali mohutné svaly upínající se ke kostře ocasu. Na objev bipedalismu si tak museli ještě nějaký ten milion let počkat. K jedněm z prvních savčích bipedalistů patřili zřejmě tzv. krátkohlaví klokani (*Sthenurinae*), kteří se objevili v Austrálii už před 12 miliony let. O tom, že byli vývojově úspěšní, svědčí fakt, že jejich zástupci žili na nejmenším kontinentu ještě před 30 tisíci let. Pak je vyhubili pravěcí lidé. Krátkohlaví klokani postrádali protáhlý čenich dnešních klokanů a tvarem hlavy připomínali králíka. Někteří dorůstali výšky přes dva metry a hmotnosti přes 200 kilogramů. Z jejich anatomie je zřejmé, že se nemohli pohybovat skoky sounož tak, jak je to typické

pro dnešní klokany – jejich kostra by takovou zátěž neunesla. Detailnější pohled na vnitřní strukturu kostí svědčí ve prospěch zátěže, jaká je typická pro chůzi podobnou té naší.

PTAČÍ CHODCI

Po dinosaurech zdědili chůzi po zadních končetinách ptáci. Většina z nich sice používá jako hlavní způsob pohybu let, někteří se však k chůzi a běhu vrátili. O žádné jiné skupině opeřenců to neplatí víc než o běžcích (*Palaeognathae*). Let patří k energeticky náročným způsobům pohybu, a pokud se bez něj opeřenci obejdou, znamená to pro ně velkou výhodu. Nese to s sebou ale i značná rizika, protože při pohybu po zemi jsou ptáci vydáni napospas šelmám. S nelétavými ptáky se tak můžeme setkat především na ostrovech, kam nepronikly šelmy a kde je na zemi bezpečno.

Zemí zaslíbenou nelétavých ptáků se stal Nový Zéland, kde před příchodem lidí dominovali opeřencům dnes vyhubení ptáci moa (*Dinornis*). Ti největší, jako byl *Dinornis novaezealandiae*, dorůstali výšky přes tři a půl metru a hmotnosti kolem 250 kilogramů. Ti nejmenší, například *Anomalopteryx didiformis*, byli velcí zhruba jako krocán. Bez letu se ale obejdou i další novozélandští ptáci, jako kiviové (*Apterygiformes*), největší papoušek světa kakapo soví (*Strigops habroptilus*) nebo chřástalům příbuzná slípka novozélandská (*Porphyrio hochstetteri*), známá také jako takahé.

Na konci druhohor zavládly bezpečnější poměry nejen na izolovaných ostrovech, ale také na kontinentech. S dinosaury vyhynula početná armáda predátorů a savci pozemskou faunu nijak zvlášť neohrožovali. Vystoupili sice ze stínu velkých ještěřů, ale teprve si hledali cestu na evoluční výsluní. V této situaci nebyl přechod od letu k běhu nijak riskantním počinem. Předci afrických pštrosů (*Struthioniformes*), jihoamerických nanduů (*Rheiformes*), australských emuů (*Dromaiidae*) a kasuárů (*Casuariidae*) nebo novozélandských kiviů to zkusili a uspěli. Z dnešních běžců si určitou schopnost letu uchovaly jen jihoamerické tinamy (*Tinamiformes*).

Učebnicovou ukázkou ptáka zrozeného k běhu je pštros dvouprstý (*Struthio camelus*) z afrických savan. Na dolních končetinách mu vyrůstají pouze dva prsty. V ptačí říši jde o zcela ojedinělý jev, který napomáhá efektivnímu běhu vysokými rychlostmi. V plném trysku používá pštros pro odraz od země dráp na větším z prstů a jeho noha funguje jako běžecká tretra s hřeby. Krok díky tomu natáhne natolik, že jeho dva došlapy na pevnou zem od sebe dělí pět metrů. V pštrosí noze je maximálnímu odlehčení a efektivní práci podřízeno vše. Svalnaté stehno je nápadně zkrácené a nejdelší je na celé noze více než půlmetrový nárt, který už nenese žádné svaly, ale pouze silné šlachy. Ty se táhnou od

svalu ke svým úponům na kostech hned přes několik kloubů. Noha pak funguje jako kladkostroj, ve kterém lana procházejí hned přes několik kladek. Na lidské noze běží šlachy nejvýše přes dva klouby, u pštrosa až přes pět. To dovo-luje ptačí noze mnohem rychlejší akci. Pštrosovi stačí zapracovat jedním svalem, a pohne hned několika klouby najednou.

Dokonalý systém pružných šlach a vazů vrací pštrosovi při každém došlapu dvakrát víc energie, než kolik jí recykluje noha běžícího člověka. I proto vynakládá pštros ve srovnání s člověkem na stejně rychlý běh pouhou třetinou energie. S rychlostí až 70 km/h je držitelem běžeckého rychlostního rekordu mezi opeřenci. Navíc jakmile se dá do pohybu, není pro něj příliš obtížné udržovat dlouhodobě padesátikilometrové tempo. O úžasné běžecké výkonnosti pštrosa svědčí výmluvně skutečnost, že maraton by zaběhl v čase kolem pětáctyřiceti minut, zatímco nejlepší lidští vytrvalci ho urazí za něco málo přes dvě hodiny.

Pštrosí noha podává úžasné výkony i v naprostém klidu – dovo-luje ptákovi stát „zadarmo“, bez výdeje energie. Člověk dokáže něco podobného, pouze když se postaví s napnutýma nohama a „zablokuje“ si kolena. Pokud bychom měli stát s koleny jen mírně pokrčenými, nevydržíme to déle než pár minut. Pštros a další ptáci ale mohou bez námahy stát i v podřepu; někteří vestoje na pokrčených nohou dokonce spí.

Mezi nelétavými ptáky najdeme i chodce, kteří by s pštrosy rozhodně soutěžit nemohli. Tučňáci (*Sphenisciformes*) vynakládají ve srovnání s jinými obdobně velkými živočichy při chůzi dvakrát víc energie, přesto podnikají dlouhé pochody. Až 120 centimetrů vysokí a 50 kilogramů těžcí antarktičtí tučňáci císařští (*Ap-tenodytes forsteri*) pobývají v létě na plovoucích krách a loví v moři. Jelikož ale kry neskýtají dostatečně stabilní základnu pro zplození potomstva, uchylují se před nástupem zimy na šelfový ledovec. Odpocho-dují po něm 100 až 160 kilo-metrů do vnitrozemí na generacemi ověřená místa, skýtající v mrazivém pekle antarktické zimy aspoň o málo únosnější podmínky. Samice tu snesou jediné vejce, které předají do péče partnerovi. Je na otci, aby vejce udržoval v teplotě 38 °C, i když okolní teploty běžně klesají pod -40 °C a rychlost větru přesahuje 150 km/h. Samice se zatím vrátí k moři, kde se věnují lovu ryb a sépií.

Když se po dvou měsících z vejce vyklubou mládě, nenabízí mu šelfový ledovec žádnou potravu. Otec, který v té době už čtyři měsíce nic nejedl, ho proto krmí zvláštním sekretem z volete. Čerpá na to poslední tělesné rezervy, zhubne o dvacet kilo a netrpělivě vyhlíží návrat partnerky. Ta přichází od moře s plným žaludkem (v tomto období mají tučňáci utlumené trávení a žaludek jim slouží hlavně jako vak pro přepravu potravy), jehož obsah vyvrhne mláděti do zobáku. Otec, vyčerpaný mnohoměsíčním půstem, odchází k moři, aby se zre-creoval a nabral do žaludku další porci potravy pro potomka. V následujících

měsících se rodiče v zásobování mláďete střídají a průměrným tempem dvou kilometrů v hodině urazí úctyhodné vzdálenosti. Mláďě, které po vylíhnutí vážilo 150–200 gramů, doroste za půl roku hmotnosti patnáct kilogramů. Fyzická náročnost chůze tučňáků se dříve dávala do souvislosti s typickým kolébáním ze strany na stranu. Podrobnější výzkum kroku tučňáků císařských však ukázal, že se jejich tělo chová jako kyvadlo. Pták díky tomu získává při každém kývnutí do strany zpět asi 80 % energie, kterou na toto zhoupnutí vynaložil, což je ve zvířecí říši velmi vysoká návratnost. Modelování odhalilo, že kdyby se tučňák nekýval ze strany na stranu, nadřel by se při chůzi ještě víc.

Energetická náročnost chůze tučňáků je daní za krátké nožky, uzpůsobené přednostně pro plavání a potápění. Když porovnáme tučňáka císařského s podobně těžkým jihoamerickým běžcem nandu pampovým (*Rhea americana*), zjistíme, že se při kroku odrážejí od země zhruba stejnou silou. Krátkonohý tučňák má však na odraz jen polovinu času než nohatý nandu. Zatímco ten při chůzi využívá pomalé vytrvalecké svaly generující energii ve vysoce účinném režimu, polární opeřenec musí spoléhat na rychlé svaly, které nevytvářejí energii pro pohyb tak efektivně. Pochod tučňáků císařských po šelfovém ledovci je při takto nevhodné chůzi o to úctyhodnější.

JAK SE ČLOVĚK STAVĚL NA NOHY

Naši nejbližší příbuzní z řad lidoopů dokážou v omezené míře stát a chodit na zadních končetinách, čehož využívají například při trhání ovoce z větví, na které by v postavení na čtyřech nedosáhli. Člověk však dovedl tento způsob pohybu k dokonalosti. Při chůzi bez problémů udržujeme rovnováhu na jedné noze, zatímco ta druhá se pohybuje vzduchem vpřed. Rychlostí možná za jinými dvojnožci zaostáváme, ale při pohledu na tanečníky a tanečnice v *Labutím jezeru* si můžeme dovolit trochu neskromné pýchy. Tak dokonalý balanc žádný jiný dvojnožec neudrží.

Důvod, proč se naši předkové začali pohybovat po dvou, halí tajemství. Z kosterních nálezů vyplývá, že vzpřímeně chodili už zvířecí předchůdci člověka před šesti, a možná i před sedmi miliony let. Tvorové, jako byl africký *Sahelanthropus tchadensis*, žili převážně v korunách stromů a jejich pohybové schopnosti se tak blížily třeba dnešním gibbonům (*Hylobates*). Tito primáti z pralesů tropické Asie běhají po vodorovných větvích po zadních končetinách a předními se přidržují větví nad sebou. Na zem dobrovolně neslézají. Když už jsou však k tomu donuceni, běhají velmi zdatně po zadních i bez jištění rukama. Běh po zemi je přitom stojí méně námahy než chůze ve větvích.

Důkaz o dlouhé historii naší chůze nabízejí otisky chodidel nalezené v severní Tanzanii v lokalitě Laetoli. Před 3,6 milionu let se tam na krajinu snášel z nebes sopečný popel. Každý, kdo jím procházel, za sebou zanechal stopy, které

později ztvrdly na kámen a dochovaly se až do dneška. Šlápoty v něm zanechali pštrosi, žirafy, hyeny nebo mohutní lichokopytníci z rodu *Chalicotherium*. Prošla tamtudy i trojice australopiteků, kteří patří k evolučním předkům prvních lidí. Stopy jejich chodidel svědčí o chůzi, jež se v mnoha ohledech nelišila od té naší. Otisky z Laetoli vedou vědce k přesvědčení, že se lidská chůze vyvinula velmi rychle už u australopiteků a následujících šest milionů let se jen vylepšovala.

K trvalé proměně chůze po dvou museli mít naši zvířecí předci vážný motiv. Často se uvádí, že je k tomu donutila klimatická změna, po které pralesy ustoupily savanám. Pro pohyb na otevřeném prostranství byla chůze po dvou výhodnější a – jak ukazuje příklad gibbonů – zřejmě i energeticky méně náročná. Porovnání pohybu šimpanzů žijících v hustých pralesích s těmi, kteří obývají savanu s řídké rostoucími stromy a malými lesíky, ale neprokázalo, že by lidoopi v savaně běhali víc po zemi a tíhli k chůzi po dvou. A tak nelze vyloučit, že se naši předci naučili chodit po zadních na větvích stromů.

Charles Darwin (1809–1882) ve svém díle *O původu člověka* připisoval vznik chůze po dvou potřebě uvolnit přední končetiny pro výrobu nástrojů nebo k házení kamenů s velkou přesností na cíl. Odpůrci této teorie ale namítají, že zatím nejstarší nalezené nástroje pocházejí z doby před 3,4 milionu let, přičemž naši živočišní předci běhali po dvou přinejmenším před šesti miliony let. Ze snahy o vyřešení tohoto rozporu se zrodily nové hypotézy. Jedna z nich spojuje vznik bipedalismu s monogamií, což je další rys, kterým se člověk liší od svých nejbližších příbuzných z řad lidoopů. Podle této teorie se naši předkové dostávali po změně klimatu a ústupu pralesů do obtíží při shánění potravy. Zvláště těžké to měly samice pečující o mláďata. Ke kojení potřebovaly zkonsumovat spoustu živin, navíc při dlouhých přesunech savanou mláďata nosily, což je stálo hodně sil. Východisko ze svízelné situace našly v tom, že věnovaly přízeň výhradně jednomu samci. Ten získal jistotu, že je otcem mláďat své družky, a neváhal pro ně ze všech sil shánět potravu, jelikož mu nehrozilo, že by se pachtil pro cizí mládě.

K nošení potravy potřeboval samec volné přední končetiny. Dokud chodil po čtyřech, moc toho nepřinesl. Šimpanzi, naši nejbližší zvířecí příbuzní, mají přední končetiny uzpůsobené tak, aby se mohli prsty chápat větví při šplhání, unesou v nich ale pouze drobné předměty. Když se naši předci postavili na zadní končetiny, pobrali toho do uvolněných rukou mnohem víc. Je tohle to pravé vysvětlení lidského bipedalismu? To se s jistotou asi nikdy nedozvíme. V této souvislosti je nicméně zajímavé, že když mají šimpanzi přenést z místa na místo potravu, které si vysoko cení, berou ji do rukou a kráčí po zadních.

Díky monogamním svazkům nemusely ženy s muži soupeřit a nemusely jim být v běhu vyrovnanými soupeři. I dnes jsou proto muži – díky vyšší postavě a vyššímu podílu svalů v těle – v běhu o 10 až 12 % rychlejší. Na krátkých tratích

ale ženy za muži tolik nezaostávají. Například při běhu na sto metrů jsou ženy v cíli pomalejší o 14 %, ale na prvních deseti metrech zaostávají jen o 5 %. Ve sprintu rozhoduje, jakou sílu člověk vyvine při odrazu od země, a to v přepočtu na kilogram tělesné hmotnosti. V tomto parametru jsou na tom ženy díky nižší postavě poměrně dobře. Na zdolání určité vzdálenosti sice potřebují víc kroků než muži, ale při každém kroku těží z lepších odrazových poměrů.

Ženy na tom ale nejsou špatně ani v běhu na dlouhých tratích. V závodech na deset kilometrů sice zaostávají za muži asi o 12 %, ale na padesátikilometrové trati už ztrácejí na muže jen 5 % a na ultramaratonských tratích nad sto kilometrů se jim bezmála vyrovnají. Při extrémních bězích, kdy závodníci urazí více než 300 kilometrů, mají možná i maličko navrch, protože ve srovnání s muži efektivněji spalují tuky.

PROČ NEMÁME TŘI NOHY?

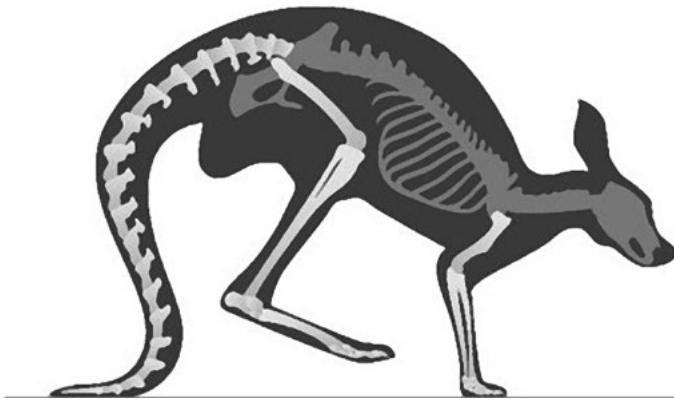
Chůze po dvou má celou řadu výhod. Zdá se, že dovoluje rychlejší akceleraci. To je také důvod, proč se třeba mexický leguán černý (*Ctenosaura similis*) v kritických situacích při útěku zvedá na zadní. Na druhé straně se ale její vyznavači musí poprat s vysokými nároky na udržení rovnováhy. To je zřejmé už malým dětem, pokoušejícím se o první krůčky. Přitom by stačila jediná končetina navíc, a získali bychom stabilitu trojnožky.

Vše nasvědčuje tomu, že si evoluce pozemského života uzavřela cestu k trojici končetin dřív, než se na naší planetě objevili první tvorové s nohama. Živočichové se od začátku vyvíjeli s tělem, kde je levá polovina zrcadlovým obrazem té pravé – k symetrii je všechno připraveno už v neoplozeném vajíčku. S takovou anatomii jsou pozemští tvorové předurčeni k sudému počtu nohou, ti s lichým počtem jsou velmi vzácní. Příkladem jsou mořské hvězdice (*Asteroidea*) s pěticí ramen, i ty ale začínají život jako larvy se zrcadlově symetrickým tělem a v dospělosti tíhnou k pohybu, který v sobě pravolevou symetrii těla nezapře. Když obrátíme pětiramennou hvězdicí hřbetní stranou dolů, vrací se do původní polohy manévrem připomínajícím spáče obracejícího se z boku na bok. Jedním ramenem se opře o podložku, dvěma sousedními pracuje podobně jako my levou a pravou rukou a zbývající dvě ramena se pohybují analogicky k našim dolním končetinám. Když leze pětiramenná hvězdice po mořském dně, pohybuje se podobně, jako kdybychom lezli pozpátku po čtyřech, a páté rameno se „veze“ asi jako náš krk s hlavou. Ramena hvězdice navíc vůbec nejsou končetinami, protože z larvy při proměně v dospělé zůstává pouze hlava, z níž se vyvine organismus typického tvaru. Nohy ani tělo tedy hvězdice nemá.

K trojnožcům měl možná pozemský život nakročeno na sklonku starohor, v tzv. ediakarském období, které začínalo před 635 miliony let a končilo

s nástupem období kambria o 96 milionů let později. Tehdejší živočichové měli často velmi bizarní stavbu těla. Pro skupinu označovanou jako *Trilobozoa* (tedy „trojlaločnatí živočichové“) bylo charakteristické tělo s třemi osami symetrie. Tak trochu připomínali trojcípou hvězdu loga automobilů Mercedes. Žádný z těchto tvorů ale neměl končetiny a ze světa zmizeli dřív, než se jejich následníkům mohly nějaké vyvinout. Ve své době však byli tito adepti trojnohosti překvapivě úspěšní. Vyvinuli se do mnoha forem a vyskytovali se celkem hojně v nejrůznějších prostředích. Další tvorové se symetrií trojcípé hvězdy se však už nikdy na Zemi neobjevili.

Představme si, že by *Trilobozoa* přežila a dala vzniknout trojnožcům. Jaké by byly jejich šance v konkurenci tvorů se sudým počtem končetin? V klidu nabízí tři nohy podstatně vyšší stabilitu, což jasně dokládají četné příklady savců, kteří se při stavění na zadní opírají o zem ocasem. Surikaty (*Suricata*) v tomto postoji obhlíží terén, aby je nezaskočil nějaký predátor. Mravenečníci se k němu uchylují, když jsou zahrnání do úzkých a rozhodnou se bránit dlouhými, ostrými drápy na předních končetinách. Samci pásovců využívají trojnožky k udržení rovnováhy při vzájemných soubojích. Stabilita se sice vytratí, jakmile trojnožec vykročí, dvounozí tvorové jsou na tom ale ještě hůř, a dokonce i čtvernožci se při běhu dostávají do krajně vratkých poloh, když se nedotýkají země ani jednou končetinou. Pohyb po třech by tedy neměl živočichy z tohoto hlediska handicapovat. Třínohý tvor by zřejmě nezaostával za zvířaty se sudým počtem končetin ani při rychlých startech, změnách směru nebo brzdění a zastavení. Zdá se, že vývoji trojnožců nezabránilo nic jiného než evolučně záhy určená zrcadlová symetrie těla. Nezanedbatelný evoluční potenciál chůze po třech tak zůstal na naší planetě ležet ladem.



I když klokan většinu času skáče po dvou, nastávají i situace, kdy se pohybuje, jako kdyby měl pět končetin. Opírá se o ocas, který nese i třetinu hmotnosti jeho těla.

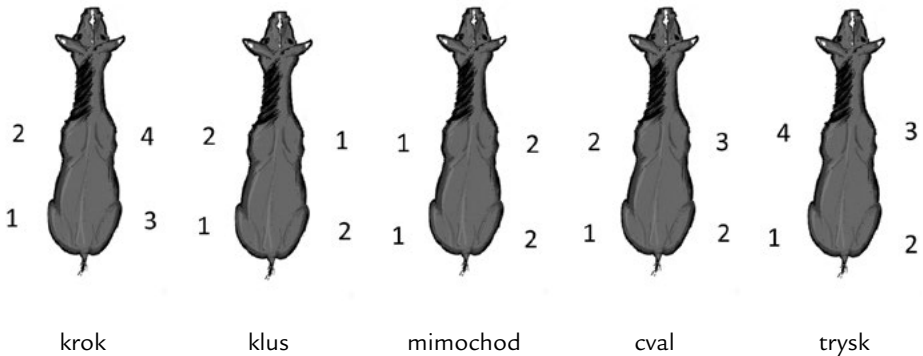
Trojnohé živočichy v přírodě sice nepotkáme, ale pohyb po třech končetinách není nic neobvyklého. Šimpanzi a bonobové běžně běhají po třech ve chvíli, kdy v přední končetině něco nesou. Giboni běhají po zadních nohách, ale do kroků opakovaně vkládají jisticí odraz jedné nebo druhé přední končetiny. Ptáci mohou dosáhnout chůze po třech hned dvěma způsoby. Někteří si při šplhání po stromech pomáhají zobákem, a nejde přitom o pouhé přidržování – měření provedená na šplhajících agapornisech růžovohrdlých (*Agapornis roseicollis*) odhalila, že se tito papoušci z jihozápadní Afriky přitahují zobákem k větším podobnou silou, s jakou se od větvi odrážejí nohama. Jiní ptáci využívají k pohybu jako třetí nohu ocasní pera, kterými se opírají o větve nebo kmen stromů. Papoušci zvládají oba typy trojnohé chůze – pomáhají si jak zobákem, tak ocasem, a někdy je dokonce využívají současně. Protože je opora ocasních per výrazně slabší než síla, s jakou ptáci zapojují do pohybu zobák, můžeme papoušky považovat za čtvernožce se silným sklonem k pohybu po třech.

V přírodě najdeme i zvířata, která se pohybují pomocí pěti končetin. Mohutný svalnatý ocas klokanů vědci dlouho vnímali jako pouhou opěru a kormidlo vyvažující tělo při skocích. Nejnovější výzkumy ale odhalily, že klokan používá ocas jako plnohodnotnou končetinu. Při chůzi nebo při pastvě se opírá jak o zadní, tak o přední končetiny. Mohlo by se zdát, že hlavní roli sehrávají zadní nohy, protože při přesunu se klokan vzepře o zem předními nohama a ocasem a následně poskočí na zadních vpřed. Když ale vědci měřili, jakou silou se na tomto pohybu podílí ocas, s překvapením zjistili, že nese kolem 35 % váhy těla a jeho zátěž je plně srovnatelná se zátěží zbylých končetin. Ocas klokanů tedy funguje jako velmi zdatná pátá noha.

RYCHLEJI A RYCHLEJI

Většina savců klade při chůzi nohy na zem v pořadí levá zadní, levá přední, pravá zadní a pravá přední. Chůze, při které po levé zadní přichází došlap pravou přední, následně pravou zadní a nakonec levou přední, není tak obvyklá a můžeme ji pozorovat třeba u primátů. Daný sled kroků si vynutily fyzikální zákony, které zajišťují zvířeti při chůzi co nejvyšší stabilitu. Savci se opírají o zem při chůzi buď dvěma, nebo třemi končetinami. Zajistí si tak dobrou rovnováhu a maximální přenos síly z nohy na zem. Při zvýšené námaze, například když kůň táhne těžký vůz, se pořadí došlapu nohou na zem nemění, kroky jsou ale kratší a pomalejší.

Zajímavé je, že ačkoliv už dnes máme o pořadí došlapu zvířat jasnou představu, při jejich zobrazování stále chybujeme. Elementární zákonitosti chůze čtyřnožců teoreticky popsal už Aristoteles (384–322 př. n. l.) ve svém spisku *O vývoji zvířat*, i když jako první je přesvědčivě doložil teprve anglický fotograf Eadward Muybridge (1830–1904) v 80. letech 19. století. Ani odborníci



Když jde zvíře krokem, došlapuje nohama v pořadí levá zadní, levá přední, pravá zadní a pravá přední. Každá noha došlapuje zvlášť a krok tak probíhá na čtyři doby.

V klusu došlapuje zvíře současně levou zadní a pravou přední a následně pravou zadní a levou přední. Dvě končetiny došlapují najednou a klus tak probíhá na dvě doby.

Zvířata, která se pohybují tzv. mimochodem, došlapují najednou vždy končetinami na stejné straně těla, tedy najednou levou zadní a levou přední a pak zároveň pravou zadní a pravou přední. Podobně jako klus je tak i mimochod krokem na dvě doby.

Když zvíře běží cvalem, odrazí se zadní nohou, pak došlápne současně druhou zadní a úhlopříčně postavenou přední nohou a nakonec druhou přední končetinou. Cval je tedy krokem na tři doby.

V trysku se zvíře nejprve odrazí zadní končetinou, následuje druhá zadní, pak přední noha na stejné straně těla a nakonec druhá přední. Každá noha došlapuje zvlášť a cval tak probíhá na čtyři doby.

ale Aristotelem odhalené a Muybridgem zdokumentované zákonitosti kroku čtyřnožců ne vždy respektují. V přírodovědných muzeích přesahuje podíl exponátů s chybně zachycenou chůzí 40 % a podobně jsou na tom i katalogy vydávané preparátory zvířat. V anatomických knihách šplhá tento podíl dokonce až ke dvěma třetinám. Také polovina hraček či obrázků v dětských knížkách zachycuje chůzi živočichů špatně. Naproti tomu pravěcí lidé zachytili v jeskyních malbách a rytinách zvířata při chůzi v drtivé většině správně.

Přechod z chůze do běhu není jen záležitostí zvýšené frekvence kroků. Při běhu nabývá odraz nohy na síle a živočich se aspoň na okamžik nedotýká země. Toho jsou si dobře vědomi závodní chodci, kteří směřjí zrychlovat právě jen zvýšenou frekvencí kroků, ale stále musí zůstat v kontaktu se zemí. Pokud se, byť jen na okamžik, vznesou do vzduchu, je to hodnoceno jako nedovolené popoběhnutí, za něž hrozí diskvalifikace. Čím ostřejším tempem jdeme, tím je pro nás chůze energeticky náročnější. Při rychlosti nad sedm kilometrů v hodině



Asijský osel kulan nepodniká pravidelné dlouhé tahy, přesto ale patří k savcům, kteří za rok urazí největší vzdálenosti. V mongolských stepích nachodí a naběhá až 6 000 kilometrů.



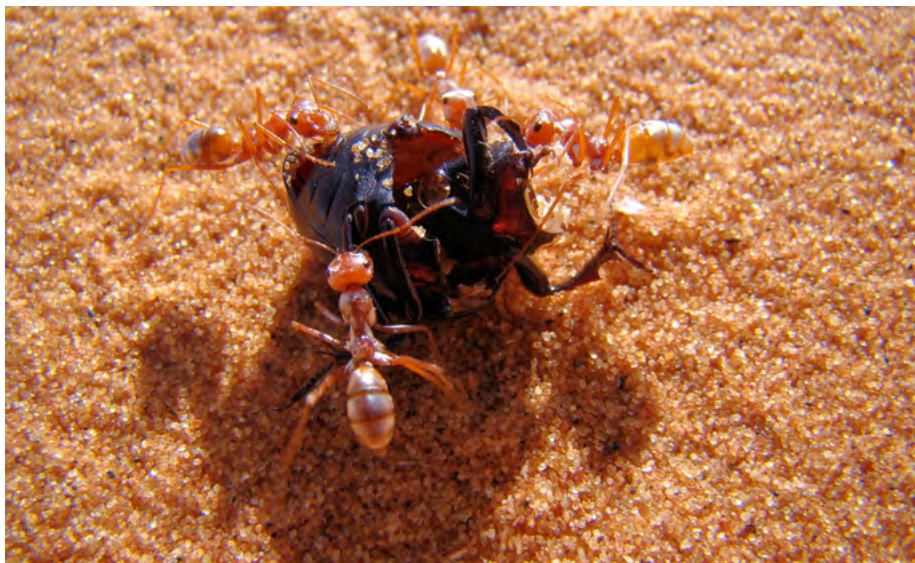
Rekordmany v množství nachozených a naběhaných kilometrů jsou mongolští vlci sledující stáda kulanů. Za rok urazí 7 000 kilometrů.



Při nedostatku vody dýchá bahník australský pomocí plynového měchýře, ve vodě spoléhá na žábry. Jeho afričtí příbuzní už o žábry evolucí přišli a dýchají jen plynovým měchýřem.



Mezi bezobratlými živočichy má velekrab japonský jedny z nejdelších končetin.



Dělnice mravence *Cataglyphis bombycina* vlečou kořist. Bez nákladu urazí za jedinou sekundu bezmála 90 centimetrů, což je stonásobek délky jejich těla.



Mezi ptáky vyniká v běhu africký pštros dvouprstý. Jeho dlouhé, štíhlé nohy ukrývají pod kůží jen kosti, klouby, vazy a složitý systém šlach, pohánějící končetinu jako perfektní kladkostroj.



Chřástalům příbuzná slípka novozélandská, známá také jako takahē, neměla ve své domovině nepřátele. Nepotřebovala létat, a tak jí zakrněla křídla.



Tučnáci magellanští vypadají při chůzi velmi neohrabaně. Kýváním ze strany na stranu si však pohyb nekomplikují, ale naopak ulehčují.



Giboni jsou mistry v pohybu korunami stromů, zdatně si ale vedou i na zemi, kde se pohybují chůzí po dvou.



Gepard drží absolutní rychlostní rekord mezi savci. Pokud bychom ale měřili rychlost běhu objektivněji, tedy například délkami těla zdolanými za jednu sekundu, musel by vyklidit pozici mnoha menším živočichům.



V 19. století zuřil spor o to, zda se koně v plném trysku neustále dotýkají aspoň jednou nohou země, nebo zda se na okamžik ocitnou zcela ve vzduchu.



Svižník *Cicindela hirticollis* běhá velmi rychle. Za sekundu zdolá vzdálenost rovnou více než stonásobku délky svého těla. Musí ale brzdit, protože jeho oči nestačí zpracovávat rychlý přísun nových zrakových podnětů.