

Baldwinov efekt: plyn a brzda evolúcie.

Andrej Lúčný

Ústav informatiky FMFI UK Bratislava a MicroStep-MIS

e-mail: andy@microstep-mis.com

web: <http://www.microstep-mis.sk/~andy>

Abstrakt: Baldwinov efekt, založený na vzájomnom ovplyvňovaní sa evolúcie a učenia, sa spravidla považuje za faktor urýchľujúci evolúciu. V článku sa snažíme poukázať na to, že je tomu tak len za určitých podmienok. Naopak, za iných podmienok, učenie nemá na evolúciu žiaden vplyv, alebo môže dokonca spôsobiť jej spomalenie. Na jednoduchom príklade vysvetľujeme ako efekt vzniká a prebieha. Objavujeme vzťah medzi pravdepodobnosťou výskytu tohto efektu a početnosťou populácie, ktorý dokáže poskytnúť vysvetlenie pre jav tzv. prerušovanej rovnováhy, ktorý je ústredným nesúlalom medzi výsledkami paleontológie a evolučnej biológie. Pre toto vysvetlenie sú pritom princípy neodarwinizmu nielen neporušené ale nevyhnutné. Na záver diskutujeme o význame týchto zistení pre genetické algoritmy vo všeobecnosti.

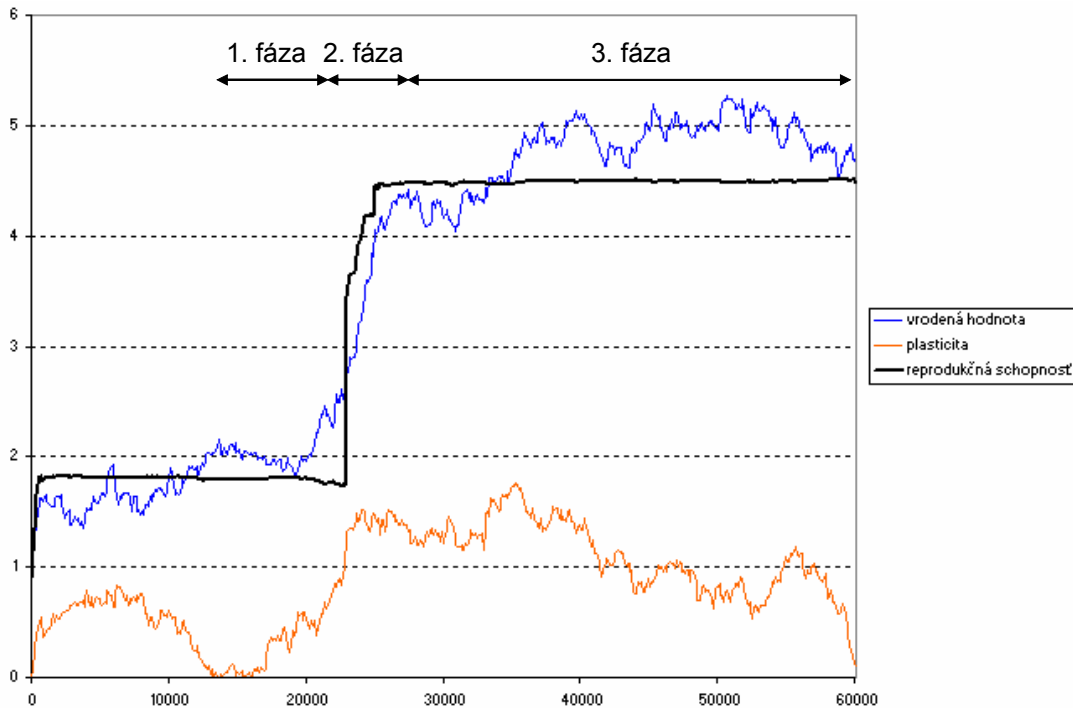
1. Úvod

V roku 1896 publikoval J. M. Baldwin článok „Nový faktor v evolúcii“ v ktorom uviedol spôsob akým sa môžu určité vlastnosti organizmu získané v interakcii s prostredím stať trvalo dedičnými hoci odchýlky u potomkov pritom vznikajú úplne náhodne. Inšpirovaný darwinovským prirodzeným ako aj pohlavným výberom sa zameril na podobnú konkurenciu prebiehajúcu medzi jedincami v rámci druhu (o zdieľané zdroje, a hlavne o účasť na párení). Táto tzv. selekcia organizmov určuje smer ktorým sa uberá vývoj určitého druhu. Baldwin si ďalej uvedomil, že pokiaľ u konkrétneho jedinca uvažujeme určitý fenotypický znak, tento znak je nielen nadimenzovaný jeho genotypom, ale aj ovplyvnený interakciou s prostredím. Pritom vplyv prostredia môže byť schopný ovplyvniť daný znak viac alebo menej a teda určitý znak môže mať geneticky danú nielen svoju vrodenu hodnotu, ale aj rozsah v ktorom sa táto môže pod vplyvom prostredia meniť – tzv. plasticitu. Baldwin objavil, že vplyvom selekcie organizmov sa môžu tieto dva parametre v priebehu evolúcie ovplyvňovať tak, že vrodená hodnota sa v evolučnom merítke vyvíja v rovnakom smere, ako hodnota u konkrétnych jedincov v interakcii s prostredím počas priebehu ich života. Predpokladom je, aby sa plasticita znaku využila počas života jedinca pozitívne, t.j. na takú modifikáciu, ktorá zvýši jeho reprodukčnú schopnosť. Voľnejšie povedané, jedinec sa musí v interakcii s prostredím učiť. Evolúcia potom prebieha v troch fázach:

1. V prvej fáze sa plasticita znaku zvyšuje, a vrodená hodnota sa začne mierne meniť v smere ktorý je výhodný. To trvá až výsledná hodnota znaku dosiahne medzu, za ktorou už má jedinec rapídne vyššiu reprodukčnú schopnosť.
2. V druhej fáze dochádza k fixácii výslednej hodnoty do vrodenej. To trvá až kým vrodená hodnota postupne nadobudne hodnotu, ktorú predkovia nadobúdali až po lopotnom učení počas života.
3. V tretej fáze sa začína plasticita znižovať, na koľko sa už stala zbytočnou.

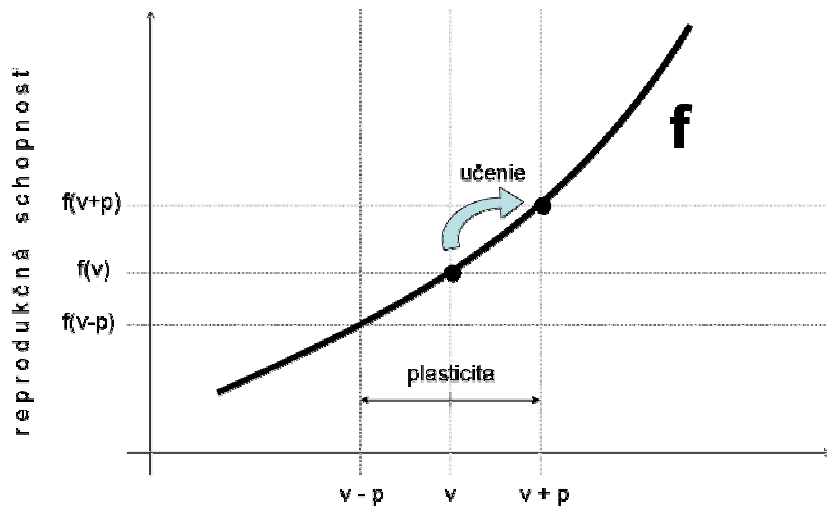
Výsledkom je, že to, čo sa je jedinec schopný na prelome prvej a druhej fázy naučiť, jeho potomkovia na konci druhej fázy majú vrodene. Navyše ich potomkovia na konci tretej fázy môžu mať podstatne zníženú schopnosť učiť sa, alebo o ňu môžu celkom prísť.

Priebeh Baldwinovho efektu si môžeme názorne ukázať na obrázku 1, kde je zobrazená vrodená hodnota, plasticita a reprodukčná schopnosť v závislosti od času (predpokladáme pritom, že čím väčšia je hodnota znaku, tým väčšia je aj reprodukčná schopnosť a že všetko je merané v rovnocenných jednotkách).



Obrázok 1. evolúcia pri Baldwinom efekte v závislosti od času.

Čo stojí za povšimnutie, je veľmi krátke časové obdobie počas ktorého vrodená hodnota rapídne stúpa. Obrazne môžeme povedať, že je ťahaná plasticitou, ktorá jej ohmatala cestu. Vskutku príčinou Baldwinovho efektu je prítomnosť a vlastnosti plasticity. Na úvod ozrejmenia uvažujme vplyv (výslednej) hodnoty nejakého znaku na reprodukčnú schopnosť, nech je to nejaká rastúca funkcia f ako na obrázku 2. Pokiaľ bude plasticita znaku p nulová, bude mať daný jedinec presne takú reprodukčnú schopnosť akú určuje vrodená hodnota v , teda $f(v)$. Naopak pokiaľ sa jedinec dokáže niečo naučiť, dosiahne reprodukčnú schopnosť $f(v+p)$. Učenie (predpokladajme zatiaľ, že je skinerovského typu pokus - odmena) ho totiž nikdy nevedie k zníženiu reprodukčnej schopnosti napríklad na $f(v-p)$. Určitá konkrétna plasticita teda deformuje závislosť reprodukčnej schopnosti na vrodenej hodnote zodpovedajúco k hľadaniu lokálneho maxima f vyjdúc z bodu v a pohybujúc sa v okolí $\langle v-p, v+p \rangle$. Základná vlastnosť plasticity spočíva v tom, že pokiaľ neposkytuje výhodu, tak aspoň zásadne neškodí. Jediná ujma ktorú môže priniesť je energia ktorá sa spotrebuje na samotné učenie: v princípe jedinec ktorý má určitú reprodukčnú schopnosť vrodenu je predsa len o niečo zvýhodnený voči tomu, ktorý sa k nej musí dopracovať učením.



Obrázok 2. Vplyv učenia na reprodukčnú schopnosť

Baldwinov efekt bol publikovaný v čase keď už boli známe výsledky Weismannovej práce (neodarwinizmus) a keďže zaváňal oživovaním lamarckizmu (predstavy, že potomci môžu zdediť vlastnosti, ktoré ich rodičia získali počas života), upadol na 80 rokov do zabudnutia a bol znovu objavený až koncom 80-tych rokov pri pokusoch s genetickými algoritmiami¹. Odvtedy bola táto myšlienka pomerne značne ohýbaná do rôznych podôb a tento proces neskončil dones, čoho dôkazom by chcel byť aj tento článok.

2. Príčina Baldwinovho efektu

Čo sa deje pri Baldwinom efekte si ukážeme na konkrétnom hoci úplne rozprávkovom príklade. Baldwinovi síce išlo v jeho práci v prvom rade o vysvetlenie vzniku tak zložitých inštinktov, ako napríklad ochrnutie medvedíka kutavkou medvedíkovou², alebo stavanie vtáčích hniezd a nami uvažovaný príklad bude smiešne jednoduchý, má však dve výhody:

- vystačíme s tromi rozmermi a teda budeme schopní priebeh graficky znázorniť
- budeme schopní porovnať výsledky získané pri počítačovej simulácii s tým čo predpovieme na základe matematiky.

Uvažujme žirafu a zamerajme sa na nej na jediný znak: na jej výšku. Predstavme si, že by táto výška bola vrodenná. V prostredí, ktoré tieto žirafy obývajú, by boli kríky vysoké do 2 m a potom by tam boli stromy, ktorých bohaté koruny by boli vo výške 4 až 5 m.

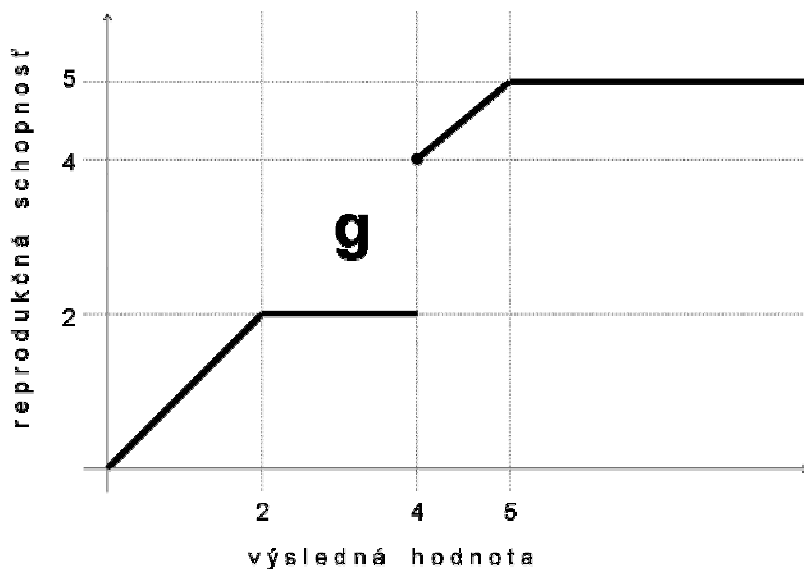
¹ Slovenskej komunite ho svojimi prácami sprostredkoval V. Kvasnička v polovici 90-tych rokov

² Kutavka je hmyz podobný ose, ktorý kladie vajíčka nie na zabítych ale na ochrnutých chrobákov – aby nezhnili prv než ich jej larva počas niekoľko mesačného vývinu zožerie. Pritom každý druh kutavky útočí na špecifický druh chrobáka. Kutavka medvedíková útočí na medvedíka – obľúbenú to návnadu rybárov - a zasahuje ho žihadlom presne na tri miesta v ktorých má najväčšie uzly centrálnej nervovej sústavy. Pritom kutavka dokáže tento inštinkt použiť aj keď je vypestovaná v laboratóriu bez akejkoľvek možnosti vidieť ako to robia iné kutavky. Špeciálne pre tento druh kutavky je paradoxné, že pokiaľ nie je „kotná“, tento inštinkt sa neprejavuje a sama sa môže stať obeťou inak dosť nebezpečného medvedíka.

Na začiatku by všetky žirafy mali zhruba 2m a teda by mohli ožierať kríky ale nedočiáhli by na stromy. Kríky by im poskytovali dostatok potravy s výnimkou obdobia sucha počas ktorého by boli jediným zdrojom potravy stromy. Schopnosť ožierať stromy by teda významne zvýšila reprodukčnú schopnosť u toho jedinca, u ktorého by sa objavila. Túto reprodukčnú schopnosť budeme pre jednoduchosť vyjadrovať v metroch, pričom základom jej výpočtu bude funkcia g udávajúca koľko potravy získa žirafa s určitou výškou (obrázok 3):

$$g(v) = \begin{cases} v & ak & v < 2 \\ 2 & ak & v \geq 2 \wedge v < 4 \\ v & ak & v \geq 4 \wedge v < 5 \\ 5 & ak & v \geq 5 \end{cases}$$

Vidíme, že žirafa ožierajúca kríky nezíska viac potravy postupným zvyšovaním výšky z 2m. Oplatí sa jej to až keď dosiahne 4m kedy už dočiahne na stromy.



Obrázok 3. Zlom brániaci postupnému vývoju

Pri výpočte reprodukčnej schopnosti zohľadníme navyše fakt, že aj samotný rast žirafu niečo stojí, ale nie je to až také tragické. Na to použijeme nejakú na sčítanie homomorfnú funkciu e napríklad $e(v) = v / 10$. Závislosť reprodukčnej hodnoty od výšky žirafy v bude potom:

$$f(v) = g(v) - e(v)$$

Tým celý problém vývoja žiráf k väčšej dokonalosti ešte pritvrdíme, lebo žirafa s 3m výškou už bude dokonca v nevýhode voči žirafe s 2m výškou.

Ďalej predpokladajme, že nanešťastie sa výška potomka od výšky jedného z rodičov (toho po ktorom ju zdedí) líši len u 4% prípadov a to nikdy nie viac než o 10 cm. Navyše je táto odchýlka úplne náhodné číslo z intervalu $\langle -0.1, 0.1 \rangle$ a je zaručené,

že keby sme vývoj ponechali len na tieto mutácie, ich výsledné pôsobenie bude zhruba nulové a žiadna jeho výchylka nepresiahne 40 cm (túto výchylku nazveme mutačný tlak a definujeme ako maximálny súčet súvislej podpostupnosti mutácii).

Vývoj takéhoto druhu žiráf si môžeme pomerne ľahko nasimulovať pomocou genetického algoritmu³. Zoberieme populáciu 100 žiráf (zatiaľ prejdime mlčaním fakt, že to číslo je veľmi malé) s veľkosťou krku 2m a prípadne trochu menej. Potom vždy podľa predchádzajúcej populácie vygenerujeme novú tak, že príslušný počet krát vyberieme dvoch rodičov, skrížime ich (zatiaľ len teoreticky - keďže máme len jeden parameter, tak vlastne druhého rodiča nepotrebujeme – ale neskôr keď pribudne plasticita budeme krížiť tak, že od prvého rodiča vezmeme výšku a od druhého plasticitu) a pri 4% z nich ho ešte náhodne zmutujeme. Výber rodičov uskutočňujeme náhodne, ale pravdepodobnosť výberu jedinca s výškou v za rodiča musí zodpovedať relatívnym pomerom medzi ich reprodukčnými schopnosťami, teda je $\frac{f(v)}{\sum_x f(x)}$. To

opakujeme veľký počet krát a zaujíma nás, či sa vyvinú z dvojmetrových žiráf päťmetrové.

Musíme si dať pritom pozor na jeden zásadný detail: na rozdiel od bežného použitia genetických algoritmov, kde sú posvätené akékoľvek prostriedky ak sa dosiahne účel (nájdenie kvalitného riešenia), tu simulujeme biologickú evolúciu. Darmo by sme sa tešili, že sme vyšľachtili 5m žirafy, keby sme do nich pustili mutačný tlak 200m (a to je bežná hodnota pri 100000 generáciách a použití každej tretej hodnoty zo štandardného generátora náhodných čísel). V genetickom algoritme sa vyskytuje niekoľko nezávislých druhov náhody a každú jednu musíme generovať nezávislým generátorom⁴. Navyše špeciálnu pozornosť musíme venovať samotným mutáciám a naladiť príslušný generátor náhody tak, aby mutačný tlak nepresiahol zvolených 40cm. Túto kalibráciu urobíme zbehnutím simulácie s pravdepodobnosťou výberu rodiča pevne 1/100 bez ohľadu na jeho reprodukčnú schopnosť a meraním mutačného tlaku.

Keď máme problémy s generovaním poctivej náhody vybojované, môžeme pristúpiť k simulácii. Opakujeme čo najviac krát a bežíme do 2000000 generácii. Podľa očakávania sa nám päťmetrové žirafy nevyvinú. Vrodenná výška ostane v tesnom okolí dvoch metrov.

Ako by sa teraz situácia zmenila, keby mali žirafy potenciálne nat'ahovací krk? Ku vrodenej hodnote výšky, pribudne ďalší parameter: plasticita výšky. Jej fungovanie

³ Tento pojem považujem za dostatočne známy a iba odkazujem na [8]. Obmedzím sa na kus kódu v jazyku Java:

```
P = new Population(); for (i=0; i<ORG; i++) P.add(P.gener());
for (iter=0; iter <ITER; iter++) {
    G = new Population();
    for (i=0; i<ORG; i++) G.add(P.choose().cross(P.choose()).mutt());
    P = G;
}
```

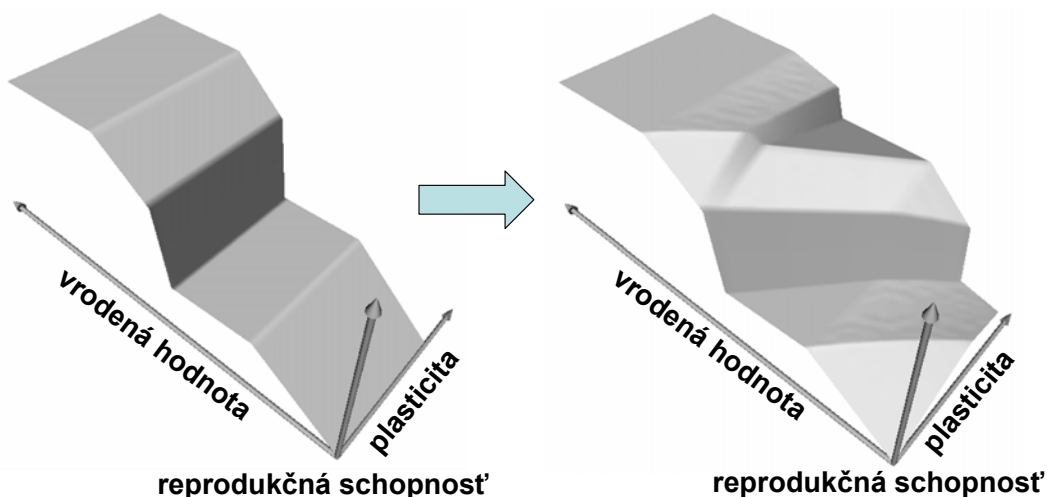
⁴ použiť možno napríklad TT800 od M. Matsumota z <http://www.math.keio.ac.jp/matsumoto>, vid' ACM Transactions on Modelling and Computer Simulation, Vol. 4, No. 3, 1994, pages 254-266.

si môžeme prestaviť tak, že keby dvojmetrová žirafa žila v prostredí kde sú len kríky, krk by nikdy nenatiahla a na plasticite by nezáležalo. Naopak, ak tam budú aj stromy, žirafa sa pokúsi po nich natiahnuť. Ak nedočiahne, už sa ďalej nepokúša. Ale dočiahne, tak bude tento spôsob obživy už trvalo používať. Z logických dôvodov predpokladáme, že plasticita je nezáporná⁵. Definovať závislosť reprodukčnej schopnosti na vrodenej výške a plasticite potom môžeme viacerými spôsobmi. My si teraz vyberieme jeden z beštiálnejších:

$$f(v, p) = g(v + p) - e(v) - e(p)(g(v + p) - g(v))$$

V prvom sčítanci vyjadrujeme, že sa systém učí, v druhom odrátame energiu potrebnú na rast a v treťom energiu za učenie, ale len vtedy keď sa niečo dá naučiť. (Beštiálnosť tretieho činiteľa spočíva v tom, že sa tam násobia jablká s hruškami. V našom konkrétnom prípade sa to premietne do existencie magickej hranice plasticity 1m, ktorá je daná tým, že v oblasti lineárneho rastu g sa v treťom člene vykľuje p^2 .)⁶

V porovnaní s dvojrozmerným analógom $f(v, p) = f(v) - e(v)$ z predošlého pokusu je f plasticitou zdeformovaná do tvaru, ktorý môžeme vidieť na obrázku 4.



Obrázok 4. Deformácia reprodukčnej schopnosti pod vplyvom plasticity

⁵ Máme však vyskúšané, že keby sme dovolili aj zmršťovanie krku, výsledky experimentov sa nijako nezmenia. To aj dosť zrejme, lebo zmršťovanie je číre plytvanie energiou $e(v)$.

⁶ Podobné výsledky – ale nie tak rýchlo a tak často a iba pre populáciu pod 50, ideálne len okolo 20 jedincov - sa dajú dosiahnuť aj pri

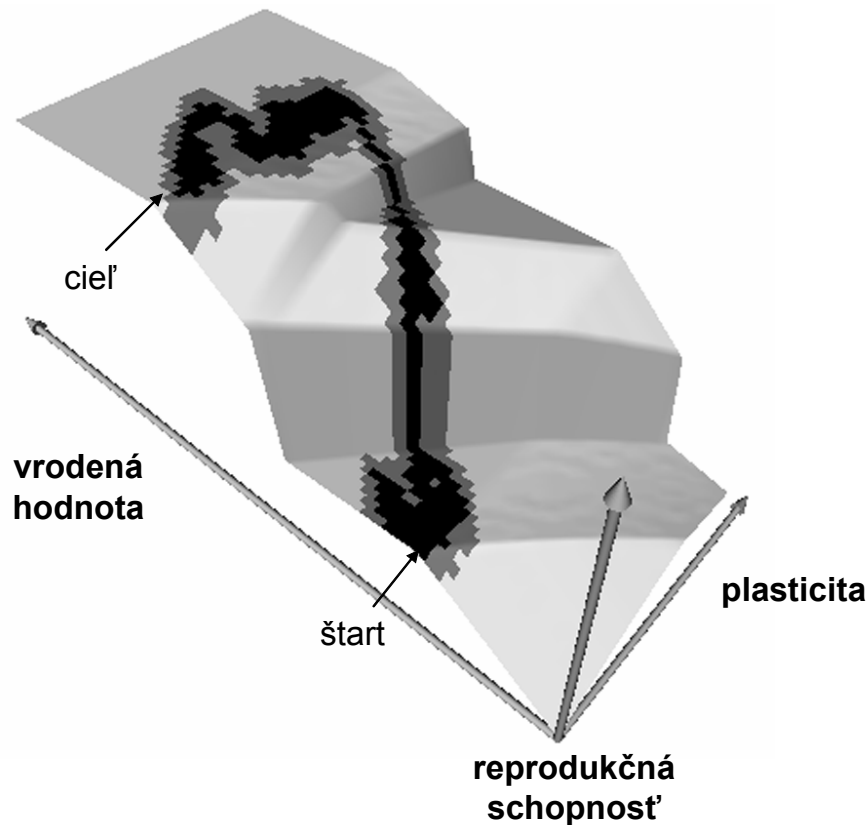
$$f(v, p) = g(v + p) - e(v) - e(p)$$

teda keď má žirafa krk, ktorý na základe natáhovania dorastá. Ale – čuduj sa svete – žiadny beh simulácie porovnateľným počtom jedincov k efektu neprivedla funkcia

$$f(v, p) = g(v + p) - e(v) + \begin{cases} 0 & ak \quad p = 0 \\ \frac{e(p)(g(v + p) - g(v))}{p} & inak \end{cases}$$

čo je plocha na prvý pohľad nerozlišiteľná od o nášho príkladu, akurát o čosi hladšia.

Vidíme, že schod ktorý treba prekonať je aj po deformácii významný. Druhý rozmer je tu však využitý na zošíkmenie tohoto schodu, čo je veľmi významné. Presvedčiť sa o tom môžeme spustením príslušnej simulácie. Uvidíme, že 400000 generácií je v praxi dostatočný počet aby sme z dvojmetrových dostali päťmetrové žirafy a niekedy stačí aj 18000 generácií⁷. Pribeh typického vývoja si môžeme ukázať na obrázku 5.

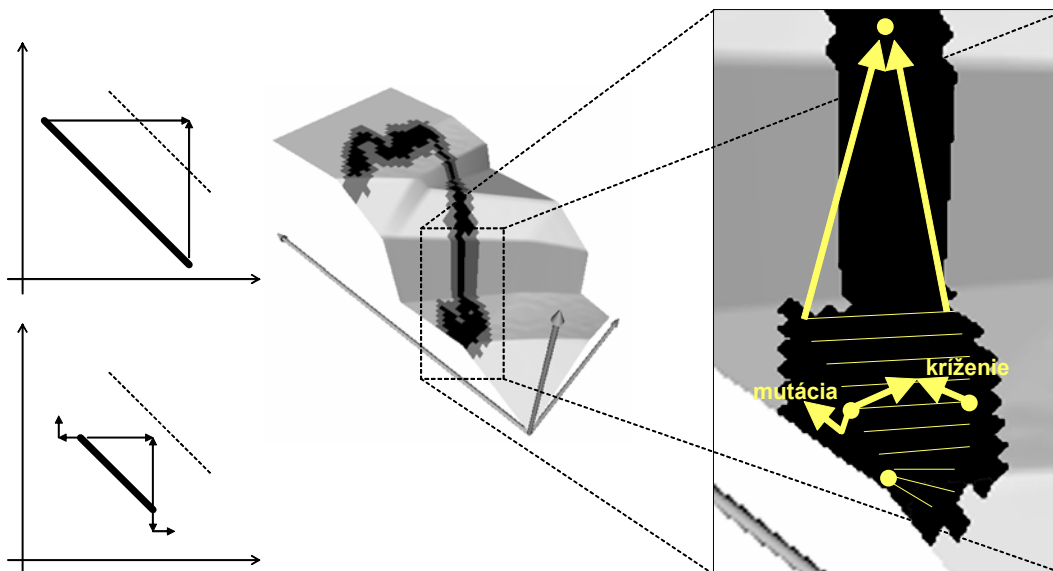


Obrázok 5. Typický vývoj populácie pri Baldwinovom efekte. Stopa populácie je vyznačená šedou a čiernou, čierne sú hodnoty, ktoré boli priemerom niektorej z populácií. Papier tu nedovoľuje zobrazit' priebeh v čase, ale interaktívna podoba obrázku realizovaná prostriedkami virtuálnej reality je k dispozícii na <http://www.microstep-mis.sk/~andy/pub.htm> Predstavu o časovom priebehu je možné získať z obrázku 1.

Prečo Baldwinov efekt nastáva? Za najlepšie vysvetlenie považujem podobenstvo s kosým šikom. Pokiaľ populácia atakuje určitý zlom na ploche reprodukčnej schopnosti v rojnici (rovnobežnej s osou plasticity), krížence útočníkov padajú stále len na túto rojnicu. Ale pokiaľ útočia v kosom šiku, tak krížence padajú za nepriateľskú líniu. Tam sú málo platné pokiaľ sa nedostanú dostatočne do tyla nepriateľa, ale čím širšie sa kosý šík rozvinie, tým sa dostanú ďalej. Preto pri útoku niektoré jedince útočia zvyšovaním vrodenej výšky na úkor plasticity, niektoré zvyšovaním plasticity na úkor vrodenej výšky. To trvá dovtedy, kým sa šík rozťahne natoľko, že sa z dvoch extrémov splodí šťastný kríženec, ktorý sa dostane dostatočne hlboko do tyla nepriateľa. Tu končí

⁷ Samozrejme počet potrebných generácií závisí od pravdepodobnosti výskytu mutácie (merania ukazujú že takmer lineárne), ako aj od veľkosti maximálnej mutácie a mutačného tlaku.

fáza 1. Následne sa tento začne výrazne krížiť s ostatnými – keďže má dramaticky vyššiu reprodukčnú schopnosť a stiahne celú populáciu za sebou. Tým skončí fáza 2. Potom už len ako epilóg celej akcie prebiehajú oscilácie plasticity. Na obrázku 5 sme zachytili priebeh po prvý pokles ako fázu 3 (ničmenej v ďalšom vývoji plasticita opäť rastie a klesá čo je dané povahou zvolenej f). Popísanú taktiku kosého šíku môžeme vidieť na obrázku 6. Treba ešte uviesť, že to či sa útoku sformuje rojnica alebo kosý šík je dané jedine tvarom funkcie reprodukčnosti v závislosti od toho, či je rovný alebo šikmý, vid' obrázok 4.



Obrázok 6. Vysvetlenie Baldwinovho efektu – kosý šík

Žiaľ, hoci kosý šík vysvetľuje prečo Baldwinov efekt môže nastať, nevieme v tejto chvíli povedať za akých podmienok nastane (respektíve s akou pravdepodobnosťou) a za akých nie. Kosý šík nefunguje vždy (vid' poznámku pod čiarou 6 a ďalší rozbor nižšie) a netušim zatiaľ prečo.

3. Prerušovaná rovnováha

Je veľmi zaujímavý fakt, že za rozširovanie kosého šíku sú zodpovedné práve negatívne mutácie. Tie spôsobujú, že útočníci pred zlomom aj cúvajú a potom keď postupujú zase vpred, vyberú si inú cestu. Tento fakt je pravda triviálny, ale zaujímavý je z hľadiska rozdielu medzi tým čo pozorujeme v makroskopickom a mikroskopickom merítke. Keď sa budeme dívať na priemernú výšku populácie žiráf, budeme do konca prvej fázy vidieť dvojmetrové žirafy a potom rýchly a prudký nárast vrodenej výšky na minimálne štvormetrové žirafy. Zdá sa teda, že dlho k žiadnej zmene nedochádza a potom prudko nastane. A to na prvý pohľad odporuje darwinovskej predstave o malých odchýlkach. Baldwinov efekt ukazuje, že môžeme nielen prudkú zmenu pozorovať a neporušiť pritom postuláty neodarwinizmu, ale že sú tieto dokonca nevyhnutné aby taká zmena nastala. O tom sa ľahko môžeme presvedčiť ak dovoľíme pri simulácii iba také mutácie

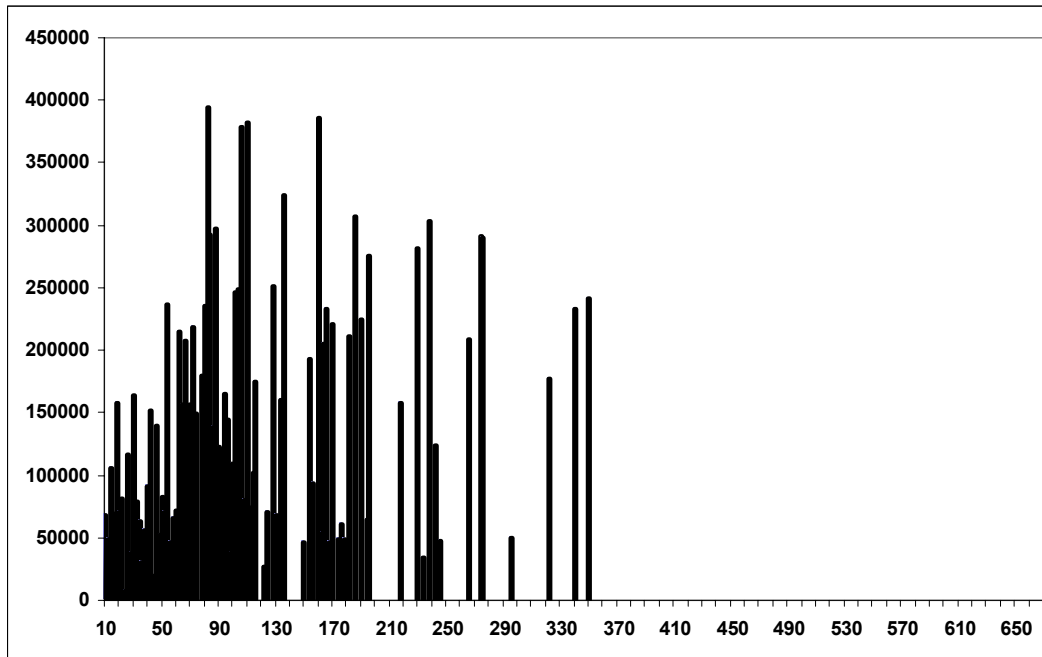
ktoré zlepšujú reprodukčnú schopnosť (v opačnom prípade sa nevykonajú): po 10000 generáciách vývoj ustrnie v lokálnom optime trochu pod 2m s malou štipkou plasticity. Iba úplne náhodné – hoci malé – mutácie dokážu priviesť populáciu k Baldwinovmu efektu. Eugenika sa tu ukazuje nielen neprirodená ale doslova bránica vývoju druhu v dlhodobom meradle. Aby sme dostali výnimočne kvalitného jedinca musíme páriť jedincov, ktorí vynikajú v jednotlivých vlastnostiach. Tých dostaneme len tak, že pripustíme do párenia i jedincov s veľmi slabými vlastnosťami, lebo táto všeobecná slabosť býva niekedy kompenzovaná vyníkaním v určitej jednotlivosti. Nevyhnutným dôsledkom takéhoto párenia však budú samozrejme aj úplne slabí jedinci.

Pre svoj prudký priebeh a darwinistickú povahu je Baldwinov efekt často odporúčaný za kandidáta na vysvetlenie tzv. prerušovanej rovnováhy. Tento pojem zaviedol S. J. Gould v sedemdesiatych rokoch na základe skúmania paleontologických zbierok. Podľa Goulda je tradičná darwinistická predstava, že evolúcia prebieha plynulým tempom a na fosílnych zbierkach to nevidno len pre ich neúplnosť, neudržateľná. Ponúka vlastné vysvetlenie, ktoré by v našom príklade zodpovedalo predstave, že aj dvojmetrová žirafa môže splodiť štvormetrovú, len s veľmi malou pravdepodobnosťou. Dvojmetrové žirafy bežne porodí žirafy 210 cm alebo až 240 cm, tie ale nemajú žiadnu výhodu, takže v rámci druhu dominujú stále dvojmetrové. Až keď šťastná náhoda siahne po štvormetrovej žirafe, táto sa búrlivo skríži a onedlho už sú v populácii iba štvormetrové. Preto vo fosíliách môžeme objaviť len dvojmetrové a potom štvormetrové žirafy, ale nikdy nemáme šancu nájsť trojmetrové žirafy, leda že by sme natrafili práve na niektorého s neúspešných mutantov.

Vidíme, že Gouldova teória je založená na podobnom princípe ako Baldwinov efekt: máme nejaký zlom brániaci v postupe, jednému šťastlivcovi sa podarí vyštverat' hore a potom sa k nemu ostatní presťahujú. Tieto teórie sa teda zhodujú vo fáze 2. Rozdiel spočíva vo fáze 1. Gould neuvažuje učenie a spolieha na náhodu, na ktorú by sme možno museli čakať do konca vesmíru. Baldwinov efekt potrebuje oveľa menej času a stačia mu malé odchýlky. Vskutku, keby dvojmetrová žirafa rodila štvormetrovú (hoci ešte nevyrastenú), bol by to iste ťažký pôrod.

Nie je inak nijakou novou myšlienkou, že Baldwinov efekt by mohol byť zodpovedný za prerušovanú rovnováhu. Avšak pri našich experimentoch sme narazili na ďalší fakt, doteraz možno aj neznámy, ktorý prerušovanú rovnováhu ešte umocňuje. Pri skúmaní závislosti pravdepodobnosti a rýchlosti výskytu Baldwinovho efektu sa ukazuje, že **čím menšia populácia, tým rýchlejšie a pravdepodobnejšie Baldwinov efekt nastáva**. Pri funkcii $f(v, p) = g(v + p) - e(v) - e(p)(g(v + p) - g(v))$ mi nikdy nenastal počas 450 tisíc generácií v populácii nad 350 jedincov (obrázok 7). A to bola táto funkcia v tomto smere najúspešnejšia⁸, funkcia $f(v, p) = g(v + p) - e(v) - e(p)$ to napríklad nezvládla už nad 50 jedincov. Túto závislosť neviem zatiaľ matematicky vysvetliť ani presnejšie odmerať (obrázok 7 sa na PC počítal 8 dní), ale rozhodne nie je nejakou chybou merania. Jej význam spočíva v tom, že zoberúc do úvahy, že veľkosť populácie sa v priebehu vývoja druhu mení, poskytuje nám fascinujúcu predstavu o tom ako sa vie druh udržať pri živote pri zmene jeho životných podmienok.

⁸ Keby sa niekto hral s mojím programom, ktorý je umiestnený na <http://www.microstep-mis.sk/~andy/pub.htm> a vynašiel by lepšiu, prosím aby mi to oznámil na andy@microstep-mis.sk



Obrázok 7. závislosť výskytu od Baldwinovho efektu od veľkosti populácie. Stĺpce predstavujú vývoj populácie po koniec fázy 2 pri jednotlivých náhodných simuláciách. Vidno tie behy pri ktorých sa efekt dostavil a to ako stĺpec označujúci kedy sa ukončila druhá fáza. Pre každú populáciu s početnosťou deliteľnou desiatimi od 10 do 670 je zobrazených 5 behov. Jednotlivé sondáže s populáciami nad 1000 jedincov dopadli rovnako negatívne ako všetky behy pre početnosť väčšiu než 350 jedincov

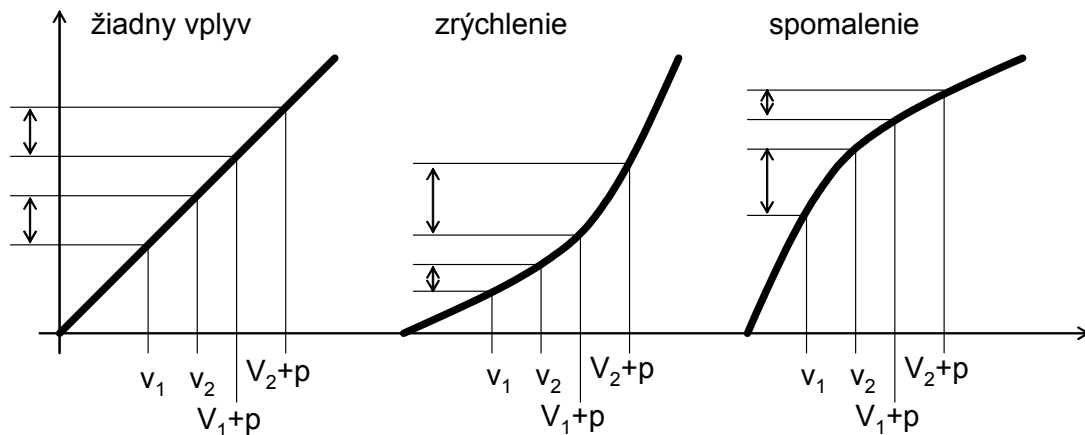
Vychádza nám, že **pokiaľ určitý druh žije v rozsiahlej populácii (v rámci ktorej nie sú žiadne bariéry na vzájomné kríženie), po istom čase dosiahne z hľadiska reprodukčnej schopnosti určité optimum. Napriek drobným osciláciám sa populácia nedokáže presunúť do iného hoci výhodnejšieho optima. Pravdepodobnosť takého presunu na základe náhody je veľmi nízka a Baldwinov efekt v tak rozsiahlej populácii nemôže vzniknúť. Po dlhom období počas ktorého bol druh na výslni, sa podmienky príčinou nejakého vonkajšieho faktora začnú zhoršovať, ale prechod do výhodnejšieho optima ostáva zablokovaný proporcionálne rovnakými dôvodmi. Populácia začne vymierať a rozpadne sa na väčší počet malých izolovaných skupín. V nich začne paralelne prebiehať snaha o presun do výhodnejšieho optima na základe Baldwinovho efektu. Väčšina z nich to nestihne a vymrie, ale niekoľko málo skupinám sa to podarí a pomerne rýchlo sa z nich vyvinú nové rozdielne druhy.**

Fascinujúce na tom je, že druh vynájde riešenie na základe toho, že niečo potrebuje naozaj riešiť. A nič radikálne nevymýšľa, pokiaľ sa mu vodí dobre.

Dôležité si je taktiež všimnúť na prípade $f(v, p) = g(v + p) - e(v) - e(p)$ ktorá je symetrická a kde k efektu dochádzalo dostatočne často v populáciách pod 50 jedincov, že Baldwinov efekt nemusí byť nevyhnutne spojený s učením či plasticitou. V princípe stačí určitá korelácia medzi dvomi rovnocennými parametrami. Avšak pri nesymetrickej funkcii, ktorú si môžeme dovoliť ak má ten druhý parameter inú povahu – ako napríklad plasticita - to funguje výraznejšie: častejšie, rýchlejšie a vo väčších populáciách.

4. Nielen zrýchlenie, ale aj spomalenie

Predošlé úvahy by však boli málo plodné, keby sa uvažovaný tvar reprodukčnej schopnosti založený na zlomenej funkcii. Ako by to vyzeralo keby na g žiadny zlom nebol? Akú úlohu by tu zohrala plasticita? Nemusíme ani pristúpiť k simulácii aby bolo jasné, že **často sa vyskytujúca fráza, že „učenie urýchľuje evolúciu“ je len polopravda. Záleží to na tvare funkcie reprodukčnej schopnosti. Pokiaľ bude lineárna, nebude mať učenie na evolúciu žiadny vplyv. Pokiaľ bude konvexná, učenie bude evolúciu urýchľovať. A pokiaľ bude konkávna, evolúcia bude spomalená.** Príčinou je vplyv učenia na zmenu rozdielu pravdepodobnosti s akou sa bude na kríženie vyberať lepší a horší jedinec. Učenie sťaby posunie pozíciu oboch jedincov o rovnaký úsek na funkcii reprodukčnosti. Tento posun môže zvýšiť alebo znížiť vyhliadky horšieho jedinca v závislosti od konvexnosti respektíve konkávnosti reprodukčnosti ako ukazuje obázok 8.



Obrázok 8. Vplyv plasticity na evolúciu mimo zlomov

Túto predstavu si ľahko môžeme preveriť simuláciou. Začneme s polmetrovými žirafami a g nahradíme postupne za lineárnu, exponenciálnu a logaritmickú funkciu (presnejšie $\ln(1+x)$). Položíme $e(x)=0$ a maximálnu mutáciu znížime na pol centimetra aby nám nedorastali príliš gigantické žirafy. Simuláciu pustíme vždy s učením a bez neho a potom vyhodnotíme priemerný rozdiel medzi vrodennými výškami dosiahnutými po istom počte generácii v týchto dvoch prípadoch. Musíme skutočne porovnávať dosiahnuté vrodené výšky žirafy a nie obzierateľnú výšku stromov. V takom prípade by totiž naťahovacie žirafy profitovali z toho, že sa vedľa naťahovať, čo by skreslilo predstavu kam sa evolúcia dostala. Aby bolo porovnanie fér, musíme im pred porovnaním naťahovanie zase odobrať a až potom uvidíme, ako im pomohlo v evolučnom meradle. Ďalej musíme dbať na to, že aj keď robíme simuláciu bez učenia, musíme mať plasticitu prítomnú ako zbytočný parameter. Iba vtedy sa totiž vrodenej výške ujde v oboch prípadoch rovnako veľa mutácií.

Výsledky tejto simulácie potvrdili zrýchlenie u exponenciálnej a spomalenie u logaritmickú funkciu, ale v prípade lineárnej funkcie sa vplyv vôbec nedá seriózne

zmerať pre veľký rozptyl výsledkov. Príčinou tohto rozptylu je, že sme síce dbali o maximálny mutačný tlak ale nevenovali sme pozornosť priemernému mutačnému tlaku (čo by bola suma pozitívnych mutácií vydelená počtom všetkých mutácií): starali sme sa aby suma pozitívnych a negatívnych mutácií bola rovnaká, ale nedbali sme či hodnota týchto dvoch súm pripadajúcich na určitý počet mutácií je v každom experimente rovnaká. Preto pýtať sa aký vplyv má učenie na nejaký konkrétny beh s lineárnou funkciou nemá význam, tak či onak sa to správa - za nami stanovených podmienok - dosť nevyspytateľne.

Vnášajú tieto úvahy nejaké svetlo do diskusie o tvare funkcie reprodukčnosti? Má pravdu Gould, že je na nej množstvo zlomov podobných nášmu príkladu alebo jeho odporca R. Dawkins, ktorý očakáva, že ak tam aj sú evolúcia ich vždy obide po hladších úbočiach (hoci aj nie celkom pravidelným tempom) ? Vskutku, keby sme sa pýtali ako vznikli päťmetrové žirafy, oveľa logickejšia by bola rozprávka o tom, že pôvodne dvojmetrové žirafy mohli ožierať všetko od zeme až do piatich metrov a tak sa pozvoľna zväčšovala ich výška na túto hodnotu. Ale pokiaľ by sme nachádzali veľa kostí dvojmetrových a päťmetrových žiráf a žiadne trojmetrové, bola by táto predstava neudržateľná.

My môžeme konštatovať, že plasticita má vplyv aj mimo zlomov, presnejšie mimo oblastí klesajúcej či stagnujúcej reprodukčnosti, ktoré môžu byť preskočené pomocou Baldwinovho efektu. V oblasti konvexne rastúcej reprodukčnosti urýchli evolúciu a v oblasti konkávne rastúcej reprodukčnosti ju naopak spomalí. S výnimkou lineárneho priebehu reprodukčnosti teda každý druh buď rýchlo vyštvára do lokálneho optima alebo sa jeho vývoj spomaľuje. Z hľadiska vonkajšieho pozorovateľa to opäť spôsobuje že pozorované druhy sú stabilnejšie a teda to ešte umocňuje dojem prerušovanej rovnováhy.

5. Význam pre genetické algoritmy

Dal by sa Baldwinov efekt nejako využiť? Teda, že by nebol len ďalším doplnkom k rozprávke o evolúcii ale technicky by nám nejako poslužil? Na túto otázku sa pomerne ťažko odpovedá, lebo nám dosiaľ chýba matematická analýza činnosti genetického algoritmu. Ale stálo by za to vyskúšať, či by pri nejakom konkrétnom probléme pomohlo, keby genetický algoritmus:

1. pracoval s populáciou rôznej veľkosti
2. umožnil izoláciu určitých skupín jedincov
3. vzal do úvahy, že priveľká populácia nemusí byť výhodou
4. pre každý parameter mohol uvažovať jeho plasticitu (toto je lákavé hlavne v prípade, že genetickým algoritmom hľadáme váhy neurónovej siete, kde sa dá definovať globálna plasticita, vid' [7])
5. radšej nepoužíval eugenické pravidlá typu „vezmi 20% najlepších jedincov a kríž iba ostaných“

Problémom použitia je samozrejme fakt, že plasticita dokáže evolúciu aj brzdiť. Preto by možno bolo treba nejako zabezpečiť aby sme mali v populácii aj časť jedincov bez plasticity.

6. Záver

Vo svojom príspevku sme načrtli trochu iný obraz biologickej evolúcie než je obvyklé, založený na Baldwinovom efekte. Je plne v súlade s princípmi neodarwinizmu a vysvetľuje zároveň problém prerušovanej rovnováhy. Nakoľko je biologicky relevantný nedokážeme určiť. Pokiaľ je však prerušovaná rovnováha seriózne pozorované založené na fosílnych zbierkach, musí za ňou stáť minimálne nejaký podobný princíp ako tu uvádzame. Musí to byť princíp, za ktorý sú zodpovedné plne náhodné a pravidelne sa vyskytujúce odchýlky vzhľadom na jedincov, ale ktorý v globálnom pohľade z hľadiska druhu vyzerá ako prerušovaná rovnováha. Za kľúčovú vlastnosť takéhoto princípu považujeme závislosť vzniku zlomového efektu od veľkosti populácie. Že je taký princíp logicky možný sme jednoznačne preukázali. To či sa skutočne vyskytuje v prírode je samozrejme ťažká a v tomto príspevku nezodpovedaná otázka.

Na záver by som si dovoľil trochu zažartovať o našom vlastnom druhu *homo sapiens*. Už Baldwin si totiž všimol, že hľadiska jeho teórie sme druh s obľudnou plasticitou. Dokonca definoval ľudskú inteligenciu ako plasticitu nášho správania. Znamená to vari, že sme práve v prvej fáze Baldwinovho efektu? Vskutku, príliš fyzicky zdatní ľudia sú poväčšine málo inteligentní a príliš inteligentní ľudia málo fyzicky zdatní, čo pripomína náš kosý šík. Vari sa raz naši potomkovia výrazne fyzicky zdokonalia a potom prípadne inteligenciu stratia? Nuž, k tomu by som vedel povedať len toľko, že pokiaľ nás bude také množstvo a pokiaľ sa budeme tak voľne krížiť ako teraz, tak to zo strany Baldwinovho efektu nehrozí. A s týmto optimistickým konštatovaním by som svoj príspevok ukončil.

Literatúra

- [1] Arita T., Suzuki R.: Interactions between Learning and Evolution: The Outstanding Strategy Generated by the Baldwin Effect.
<ftp://math.chtf.stuba.sk/pub/vlado>
- [2] Baldwin J. M.: A New Factor in Evolution. *The American Naturalist* 30, June 1896, 441-451, 536-553.
<http://www.santafe.edu/sfi/publications/Bookinfoev/baldwin.html>
- [3] Dawkins R.: *Rieka z raja*, Archa, Bratislava, 1996.
- [4] Dawkins R.: *Slepý hodinár*, Paseka, Praha, 2002.
- [5] Heylighen F.: Punctuated Equilibrium. *Principia Cybernetica Web*.
<http://pespmc1.vub.ac.be/PUNCTUEQ.html>
- [6] Leakey R. E.: *Darwinov pôvod druhov v ilustráciách*. Panorama, Praha, 1989.
- [7] Kvasnička V.: *Ovplyvňuje učenie evolúciu?* Vesmír, 1994.
<ftp://math.chtf.stuba.sk/pub/vlado>
- [8] Kvasnička V., Pospíchal J., Tiňo P.: *Evolučné algoritmy*. CHTF STU, Bratislava, 2000.
- [9] Kvasnička V.: *Umelá evolúcia*. Kognitívne vedy III, CHTF STU, Bratislava, 2000.