

EVOLUCIJA

Učbenik za biologijo v programih
gimnazijskega izobraževanja



EVOLUCIJA, BIOTSKA PESTROST IN EKOLOGIJA

EVOLUCIJA

Učbenik za biologijo v programih gimnazijskega izobraževanja

Avtorji dr. Peter Stušek, Mihael Tratnik, dr. Barbara Vilhar, dr. Sonja Škornik

Ilustracije Erika Omerzel Vujić, Milijan Šiško, računalniške risbe Mojca Lampe Kajtna

Fotografije Davorin Tome, Mihael Tratnik, Tilen Praper, Ciril Mlinar, Al Vrezec, Barbara Vilhar,

Wikipedia, arhiv DZS

Strokovni pregled prof. dr. Igor Jerman, mag. Andrea Premik Banič, prof. biol., Erika Jarič, prof. biol.

Jezikovni pregled Jelka Makoter, prof. slov.

Korekture Jasna Berčon

Strokovni svet RS za splošno izobraževanje je na svoji 131. seji dne 15. 4. 2010 na podlagi 25. člena Zakona o organizaciji in financiranju vzgoje in izobraževanja (Uradni list RS, št. 115/03-ZOVFI-UPB3) in 15. člena Pravilnika o potrjevanju učbenikov (Ur. l. RS, št. 57/06) sprejel sklep št. 6130-1/2010/85 o potrditvi učbenika EVOLUCIJA, BIOTSKA PESTROST IN EKOLOGIJA (2 dela) – EVOLUCIJA za poučevanje biologije v 1.–4. letniku gimnazijskih programov izobraževanja.

Urednica Tamara Mušinović Zadravec

Likovno-grafična urednica Meta Škrabar

Oprema Alma Urbanija

Glavna urednica Tanja Železnik

Izvršna direktorica Divizije založništva Ada de Costa Petan

© DZS, založništvo in trgovina d. d., (2010). Vse pravice pridržane.

Brez pisnega dovoljenja Založbe je prepovedano reproduciranje, distribuiranje, dajanje v najem, javna priobčitev, dajanje na voljo javnosti (internet), predelava ali vsaka druga uporaba tega avtorskega dela ali njegovih delov v kakršnemkoli obsegu ali postopku, vključno s fotokopiranjem, tiskanjem ali shranitvijo v elektronski obliki.

Odstranitev tega podatka je kazniva.



znanje uresničuje sanje

DZS, d. d., DIVIZIJA ZALOŽNIŠTEV

IZOBRAŽEVALNO ZALOŽNIŠTVO

<http://www.dzs.si>

e-pošta: info.narocila@dzs.si

tel. št.: 01/306 98 79



<http://vedez.dzs.si>

CIP

VSEBINSKO KAZALO

1	EVOLUCIJA Z NARAVNIM IZBOROM JE TEMELJNA LASTNOST ŽIVEGA	7
1.1	Evolucijska teorija razlaga postopno spreminjanje organizmov v času	8
2	POPULACIJA JE OSNOVNA ENOTA EVOLUCIJE	12
2.1	Organizmi imajo čezmerno potomstvo	13
2.2	Osebkni iste vrste se razlikujejo po mnogih dednih lastnostih	16
2.3	Dedna raznolikost je posledica mutacij in spolnega razmnoževanja	17
2.4	Pogostost alelov v populaciji se lahko spreminja zaradi naravnega izbora	20
2.5	Naravni izbor je izbiranje med fenotipi	23
	Osnova naravnega izbora je različna uspešnost osebkov pri razmnoževanju	23
	Znanstveniki opazujejo naravni izbor v teku	24
	Raznolikost osebkov je prednost v spreminjajočem se okolju	26
	Spolni izbor vodi v evolucijo sekundarnih spolnih znakov, ki osebkom omogočajo prednost pri parjenju	29
	Človek z umetnim izborom izbira organizme s sebi koristnimi lastnostmi	32
2.6	Prilagoditev na okolje je posledica naravnega izbora	34
	Prilagoditve se razvijajo postopoma iz prej obstoječih lastnosti	34
	Divergenca	35
	Konvergenca	37
	Progresivnost in regresivnost razvoja	39
	Nepovratnost evlucijskega razvoja	40
	Koevolucija	40
	Relativna koristnost prilagoditev	41
3	Z EVOLUCIJSKIM RAZVOJEM NASTAJAJO NOVE VRSTE	43
3.1	Vrsto lahko opredelimo na različne načine	44
3.2	Razmnoževanje med vrstami preprečujejo razmnoževalne pregrade	46
	Predploditvene pregrade	47
	Pooploditvene pregrade	47
3.3	Prostorska ločitev populacij iste vrste lahko vodi v nastanek novih vrst	49
3.4	Večje evlucijske spremembe so povezane s prilagoditveno radiacijo in evlucijskimi novostmi	51
3.5	Evolucijsko teorijo podpirajo številni dokazi	53
	Zaporedja fosilov so močan dokaz za evolucijo	53
	Območja razširjenosti vrst lahko razložimo z upoštevanjem evolucije	56
	Primerjava zgradbe organizmov razkriva njihovo evlucijsko sorodnost	59
	Razvoj zarodkov odraža njihovo evlucijsko zgodovino	59
	Evolucijsko bolj sorodni organizmi imajo bolj podobne gene in beljakovine	60
	Evolucijske spremembe lahko opazujemo v laboratorijskih poskusih in v naravi	63
4	EVOLUCIJSKA ZGODOVINA ŽIVLJENJA NA ZEMLJI	64
4.1	Razmere na zgodnji Zemlji so omogočile sintezo organskih snovi in nastanek življenja	65
4.2	Iz skupnih značilnosti vseh današnjih organizmov lahko sklepamo o zgodnjem razvoju življenja	68
4.3	Hipotez o nastanku prvih celic je več	70
4.4	Zgodnji prokarionti so izkoriščali naravne vire na Zemlji in jo s tem spremenili	72
4.5	Eukariotske celice so se razvile iz skupnosti prokariotskih celic	74

4.6	Veščeličnost se je pri evkariontih razvila večkrat	76
4.7	Poselitev kopnega z rastlinami je temelj za evlucijski razvoj kopenskih živali	78
4.8	Vsi danes živeči organizmi imajo enako dolgo evlucijsko zgodovino	81
5	SISTEMATIKA POVEZUJE RAZVRŠČANJE ORGANIZMOV Z EVLUCIJSKO ZGODOVINO	82
5.1	Biološko razvrščanje organizmov v sistem temelji na evlucijski sorodnosti	82
	Organizme lahko razvrstimo v hierarhično urejen sistem	82
	Podobnost organizmov odraža njihovo evlucijsko sorodnost	85
	Pri poimenovanju sistematskih skupin upoštevamo sorodstvene odnose med organizmi	88
	Vrsto lahko določimo z določevalnimi ključi	90
5.2	Drevo življenja ima tri glavne veje: bakterije, arheje in evkarionte	92
5.3	Bakterije in arheje so prokarionti	95
5.4	Protisti so raznolika skupina evkariontov	97
5.5	Rastline so kopenski večceličarji, ki opravljajo fotosintezo	98
5.6	Glive so bolj sorodne živalim kot rastlinam	104
5.7	Živali so večcelični, heterotrofni evkarionti	106
	Spušve	108
	Ožigalkarji	109
	Ploski črvi	111
	Gliste	112
	Mehkužci	113
	Kolobarniki	116
	Členonožci	118
	Iглоkožci	120
	Strunarji	122
5.8	Tudi človek je rezultat evlucije	130
	Človek sodi v evlucijsko vejo prvakov	130
	Človeška veja na evlucijskem drevesu prvakov je stara le nekaj milijonov let	133
	Za rod <i>Homo</i> so značilni veliki možgani	134
	Sodobni človek izvira iz Afrike	136
	Kultura človeku omogoča spreminjanje okolja	140
	Od nastanka življenja do današnjega živega planeta	145
6	DODATEK ZA MATURO	147
6.1	Hardy-Weinbergovo načelo opisuje populacije v genskem ravnovesju	147
	Uporaba Hardy-Weinbergovega načela	150
6.2	Naravni izbor spreminja raznolikost v populaciji na tri načine	152
	Usmerjeni izbor	152
	Ustaltitveni zbor	153
	Cepitveni izbor	153
6.3	Genski sklad populacije spreminjajo tudi mutacije, migracije in naključni genetski premik	154
	Mutacije	154
	Migracije	155
	Naključni genetski premik	155
6.4	Nove vrste lahko nastanejo tudi na istem območju	157
6.5	Možnost nastajanja organskih snovi v kemoevoluciji so preverili s poskusi	160
6.6	Prve predcelice so verjetno delovale na temelju RNA	162
6.7	Pri izdelavi evlucijskih dreves upoštevamo skupne evlucijske novosti skupin organizmov	163
6.8	S pomočjo molekulskih ur lahko sledimo evlucijskemu času	165

RAZISKOVANJE ŽIVLJENJA

R 2.1	Evolucijski poskus v naravi	30
R 3.1	Evolucija »Darwinovih« ščinkavcev	45
R 3.3	Evolucija v laboratoriju	50
R 3.3	Ugotavljanje starosti fosilov	56
R 3.4	Načrtni lov na fosile	61
R 3.5	Darwinove želve pod drobnogledom sodobne biologije	64
R 4.1	Iskanje pradavnih dreves	80
R 5.1	Charles Darwin o podobnosti in sorodnosti živega	88
R 5.2	Čudovita glistica	122
R 5.3	Srečanje evolucijske, razvojne in molekulske biologije	122
R 5.4	Ali so ptice dinosavri?	128
R 5.5	Neandertalec v sodobnem molekulske-biološkem laboratoriju	138
R 5.6	Gen, ki je povezan s sposobnostjo za govor	139
R 5.7	Kultura pri živalih	144



1 Evolucija z naravnim izborom je temeljna lastnost živega

Glavne teme

1.1 Evolucijska teorija razlaga postopno spreminjanje organizmov v času

Ljudje se že dolgo sprašujejo, kako je nastalo življenje in ali se živa bitja skozi čas spreminjajo ali ne. Nekateri starogrški filozofi so na primer menili, da se življenje spreminja, drugi, da se ne. Prvi velik preboj v teh razpravah je prispeval francoski naravoslovec Jean Baptiste Lamarck, ki je leta 1809 objavil svoje revolucionarno dognanje, da lahko zaporedja fosilov različnih organizmov razložimo le s postopnim spreminjanjem organizmov skozi daljša časovna obdobja – vrste torej niso nespremenljive. Vendar pa je ostalo nerazrešeno vprašanje, *na kakšen način* se vrste spreminjajo. Brilljanten odgovor na to vprašanje je leta 1859 objavil britanski naravoslovec Charles Darwin v knjigi *O nastanku vrst z naravnim izborom*. Svojo razlago, ki jo danes imenujemo **evolucijska teorija**, je podprl z velikim številom različnih dokazov. Glavni Darwinovi ugotovitvi sta bili, da so vse oblike življenja nastale iz skupnega prednika na temelju dedovanja lastnosti s postopnim spreminjanjem, in da je mehanizem, ki povzroča to postopno spreminjanje, naravni izbor.

V obdobju od objave te knjige do danes so znanstveniki zbrali ogromno količino dodatnih dokazov o veljavnosti Darwinove razlage in niti enega, ki bi ji nasprotoval. Pri tem mnogi novejši dokazi, ki podpirajo evolucijsko teorijo, temeljijo na primerjavi zaporedij nukleotidov v DNA in zaporedij aminokislin v beljakovinah različnih organizmov, o čemer seveda znanstveniki v Darwinovih časih niso nič vedeli.

Darwinova razlaga je temeljno spremenila razmišljanje biologov o živem. Danes vemo, da je **evolucija z naravnim izborom** pravzaprav tista temeljna **lastnost, ki živo naravo ločuje od nežive**. Evolucija je ključ za razumevanje živega. Kadarkoli se vprašamo, *zakaj* je nekaj v živi naravi takšno, kot je, lahko odgovor najdemo le ob upoštevanju evolucije. Evolucijsko razmišljanje nam je zato lahko v veliko pomoč, da se nam biologije ni treba učiti na pamet, ampak jo lahko *razumemo*.

V tem učbeniku si bomo najprej ogledali, kako evolucija deluje, nato bomo spoznali ključne dogodke v skoraj štiri milijarde let dolgi evolucijski zgodovini življenja na Zemlji, na koncu pa bomo evolucijsko razmišljanje uporabili še za razvrščanje organizmov v sistem.

Zanimivost

O pomenu evolucijske teorije

Britanski evolucijski biolog Richard Dawkins je v knjigi *Sebični gen* o pomenu evolucijske teorije napisal naslednje: »Razumno življenje na planetu odraste šele takrat, ko odkrije vzrok za svoj obstoj. Če bi višje razvita bitja iz vesolja obiskala naš planet, bi bilo prvo vprašanje, ki bi ga zastavila, ko bi ocenjevala razvitost naše civilizacije: Ali so že odkrili evolucijo? Živa bitja so na Zemlji, ne da bi vedela, zakaj, obstajala tri tisoč milijonov let, preden se je enemu od njih končno posvetilo. Ime mu je bilo Charles Darwin.«

1.1 Evolucijska teorija razlaga postopno spreminjanje organizmov v času

Evolucijska teorija je v bistvu zelo preprosta. Razlaga spreminjanje organizmov v času. Za začetek si jo oglejmo na kratko.

Ali se strinjaš s spodnjimi tremi trditvami?

1. Osebkki iste vrste se med seboj razlikujejo.

Seveda se bomo takoj strinjali, da se med seboj razlikujemo ljudje. Kljub temu, da nas je več kot 6 milijard, si niti dva nista enaka! Na enak način se med seboj razlikujejo tudi vse domače mačke, vse pikapolonice, vse marjetice. In velik del lastnosti, po katerih se med seboj razlikujejo, se prenese na potomce – se deduje.

2. Organizmi imajo več potomcev, kot je staršev.

Vsak osebek ima lahko ogromno potomcev. Pomislimo samo na zelo veliko število jajčec in ličink muh, jajčec v žabjem mrestu in paglavcev ter semen v smrekovih storžih ene same smreke.

3. Mnogi osebkki ne preživijo.

Če bi v vsaki generaciji preživeli vsi potomci, bi se kaj kmalu namnožili do ogromne številčnosti. Toda to se ne zgodi. Količina hrane, prostor, ki je na voljo kot skrivališče, in podobni dejavniki, ki jih označujemo z izrazom naravni viri, namreč niso neskončni. Pravimo, da so naravni viri omejeni. Skozi čas se število osebkov neke vrste večinoma ne spreminja preveč. Iz tega lahko sklepamo, da od vseh potomcev določenih staršev v povprečju preživi le toliko potomcev, da nadomestijo svoje starše: dve muhi, dve smreki, dve žabi.

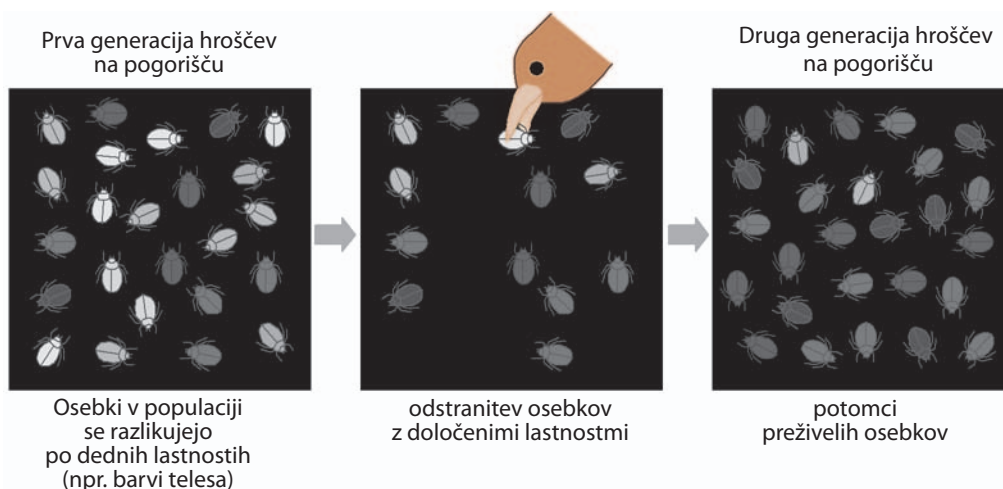
Zgornja opažanja, na katerih je Darwin utemeljil svojo evolucijsko teorijo, brez dvoma držijo. Kaj pa lahko sklepamo iz njih? Preživijo le zelo redki osebkki. Da preživijo, se morajo »bojevati« in tekmovati med seboj za naravne vire. Darwin je to imenoval **boj za obstanek**. Ker se število osebkov iste vrste kljub ogromnemu številu potomcev skozi čas ne spreminja, je jasno, da poteka boj za obstanek med predstavniki iste vrste. Boj za obstanek tako, denimo, ne poteka med plenom in plenilcem, ampak med posameznimi plenilci (na primer levi) ter med posameznimi predstavniki plena (na primer gazelami). Tudi mačka v boju za obstanek ne tekmuje z mišjo; miši tekmujejo med seboj, mačke pa med seboj.

In kaj je glavna nagrada za osebkke, ki so v boju za obstanek uspešni? Razmnoževanje! Zmagovalci lahko svoje lastnosti oziroma gene prenesejo v prihodnost. Kajti vsi osebkki prej ali slej umrejo, njihovi geni pa se lahko prenesejo v naslednje generacije. Boj za obstanek je torej v bistvu boj za **razmnoževanje**.

Iz vsake generacije se za prenos svojih genov v prihodnje rodove potegujejo številni osebkki. Na to, kateri osebkki bodo preživeli dovolj dolgo, da se bodo lahko razmnožili, in kateri od njihovih potomcev bodo preživeli, vplivajo lastnosti osebkov – njihov fenotip. Seveda nekomu lahko pomaga tudi srečno naključje. Toda *praviloma* preživijo tisti, katerih lastnosti bolj ustrezajo trenutnemu okolju. Med paličnjaki, denimo, je rjava barva telesa zagotovo ustrežnejša lastnost od živo pisane. Osebkke, ki so bolj živo obarvani od drugih, ptice lažje opazijo in jih pojedjo skupaj z geni za pisano barvo, ki se tako ne prenesejo v naslednjo generacijo.

Najbrž ne bo odveč, če tu pojasnimo, kaj v biologiji označujemo z izrazom okolje. Okolje je vse tisto, kar nek osebek obdaja. Okolje tako predstavljajo neživi in živi dejavniki okolja. Med nežive dejavnike okolja štejemo na primer podnebne razmere, pH v vodnem okolju, količino mineralnih snovi v prsti. Žive dejavnike okolja nekega osebkka pa predstavljajo drugi organizmi, na primer številčnost in raznovrstnost plenilcev, plena, povzročiteljev bolezni, opraševalcev cvetov. **Okolje se neprestano spreminja**. Lahko se spremenijo podnebne razmere, lahko se v ekosistem, v katerem osebek živi, priselijo novi povzročitelji bolezni, ali pa se spremeni številčnost plenilcev.

V danem okolju so različni **osebkki različno uspešni pri razmnoževanju**. Okolje s svojimi zahtevami »izbira« fenotipe, ki bodo preživeli, se uspešno razmnožili in s tem prenesli svoje gene v naslednji rod. Ta mehanizem, ki je vzrok za postopno spreminjanje vrst, je razložil in podprl s številnimi dokazi Darwin – poimenoval ga je **naravni izbor** ali naravna selekcija (**slika 1.1**).



Slika 1.1: Naravni izbor. Ta namišljena populacija hroščev neke vrste se je naselila na območju, na katerem se je prst nedavno počrnila zaradi požara. Osebki v začetni populaciji se razlikujejo po barvi telesa, od svetlo sive do črne. Ptice, ki plenijo hrošče, najlažje opazijo najsvetlejše. Zato se uspešno razmnoži več temnejših hroščev kot svetlejših in druga generacija hroščev je v povprečju temnejša kot prva.

Oglejmo si primer, prikazan na **sliki 1.1**. Namišljena skupina hroščev neke vrste se je spomladi, še pred obdobjem razmnoževanja, priselila v okolje, v katerem je prst zaradi nedavnega požara črna. Hrošči se razlikujejo po barvi telesa, od svetlo sive do črne. Svetlejši hrošči lažje opazijo ptice, ki so njihovi plenilci. Zato ptice pojedjo več svetlejših hroščev kot temnejših, in uspešno se razmnožijo hrošči, ki so v povprečju temnejši. Ker njihovi potomci dedujejo njihove lastnosti, je naslednja generacija hroščev *v povprečju* nekoliko temnejša od prejšnje, vendar se tudi v njej osebki nekoliko razlikujejo po odtenku barve. Lahko si tudi predstavljamo, kako bi stvar lahko potekala naprej. Če bi bila prst na pogorišču še naprej zelo črna, bi bila naslednja generacija hroščev zaradi naravnega izbora še temnejša. Toda če bi zaradi spiranja z dežjem prst postajala svetlejša, bi zaradi naravnega izbora naslednje generacije hroščev postopoma postajale svetlejši in s tem težje opazne v spremenjenem okolju. Na ta način se **postopno, skozi mnoge generacije, spreminjajo obstoječe lastnosti**, ki osebkom neke vrste v danem okolju omogočajo prednost v boju za obstanek in uspešno razmnoževanje.

Posledica postopnega spreminjanja z naravnim izborom je **prilagojenost organizma na okolje**. Prilagoditve ali adaptacije so lastnosti organizma, ki povečujejo njegovo uspešnost v danem okolju. Prilagoditve lahko opazimo v zgradbi (na primer hidrodinamična oblika plavajočih živali), v notranjem delovanju (na primer hemoglobin kot učinkovita molekula za prenos kisika po telesu), v vedenju (na primer letenje k obarvanim cvetovom). Prilagoditve so lahko tudi posledica prilagajanja na nežive dejavnike okolja (na primer brezkrile muhe na viharne otokih) ali na žive dejavnike okolja (na primer hitre noge zajca kot posledica odnosa plen-plenilec).

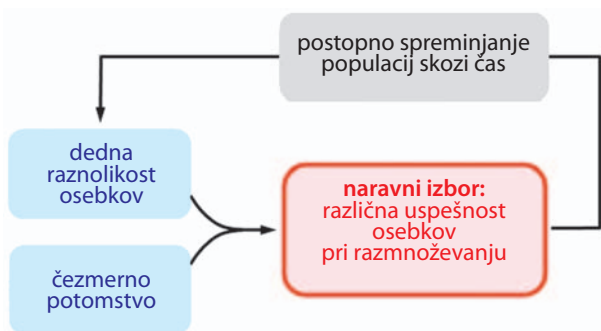
Takoj moramo pojasniti še nekaj pomembnega. Izraz *prilagoditev* ima več pomenov in zato včasih povzroča zmedo. Predstavlja si, da s svetlega sončnega mesta stopiš v temačen prostor. Sprva skoraj nič ne vidiš, nato pa se ti vid »prilagodi« na temnejše okolje in postopno vidiš bolje. V tem primeru se je na spremembo v okolju prilagodil en osebek, torej ti, prilagoditev na spremenjene razmere pa dejansko pomeni spremembo v načinu delovanja tvojega telesa. Zenica se bolj odpre, v očesu pa potečejo še drugi procesi, ki ti omogočajo boljši vid v temnem okolju. Podoben primer je, denimo, tudi gostota dlake pri psu. Če pes pozimi živi v stanovanju, nima bistveno gostejše dlake kot poleti. Toda če tega psa preselimo v pesjak na vrtu, kjer je ves čas izpostavljen mrazu, mu bo hitro zrasla zelo gosta dlaka. Opisana primera predstavljata prilagoditve *enega osebk*a na spremenjene razmere v okolju.

Kadar pa govorimo o prilagoditvah v kontekstu evolucije, mislimo na **postopno spreminjanje predstavnikov iste vrste skozi čas**, skozi mnoge generacije. Dejansko je **osnovna enota evolucije populacija** – skupina osebkov iste vrste, ki živijo v istem času na istem prostoru in se med seboj razmnožujejo. Res je sicer, da naravni izbor deluje na osebke; njihove podedovane lastnosti vplivajo na verjetnost njihovega preživetja in uspeh pri razmnoževanju. Toda evolucijski učinek naravnega izbora postane očiten šele, ko sledimo, kako se populacija – skupina osebkov – spreminja skozi čas. V populaciji hroščev, ki se priselijo na pogorišče, imajo osebki

pač takšno barvo telesa, kot jo imajo, in se jim v življenju zaradi spremenjenega okolja (črne podlage) ne bo spremenila. Toda v naslednji generaciji te populacije bodo hrošči *v povprečju* temnejši. Strokovni izraz za takšno postopno prilagajanje populacije skozi čas zaradi naravnega izbora je **adaptacija**, lahko pa mu rečemo tudi **evolucijska prilagoditev**. V nadaljevanju bomo v tem učbeniku govorili o tovrstnih prilagoditvah.

Če malo razmislimo, ugotovimo, da zaradi naravnega izbora postopno ne nastajajo popolni organizmi, temveč le »dovolj dobro« prilagojeni na dano okolje. Popolne prilagojenosti ni, in vsaka lastnost tudi ni prilagoditev. Vsak organizem svoje lastnosti podeduje, zato ima predvsem lastnosti, ki so njegovim prednikom omogočale dobro prilagojenost na *tedanje* okolje, uspešnost pri boju za obstanek in pri razmnoževanju. Torej so osebkki v današnji populaciji predvsem prilagojeni na razmere v okolju v preteklosti, pri čemer pa se seveda njihove lastnosti preizkušajo v njihovem *sedanjem* okolju, ki je lahko drugačno od okolja njihovih prednikov. Naravni izbor torej populacije organizmov ne more »pripraviti« na prihodnost. Lastnost, ki danes populaciji omogoča uspešnost, jo lahko v prihodnosti vodi v katastrofo.

Glavne Darwinove ugotovitve o tem, na kakšen način se organizmi skozi čas spreminjajo, so prikazane na **sliki 1.2**. V nadaljevanju si bomo te mehanizme evolucije natančneje ogledali.

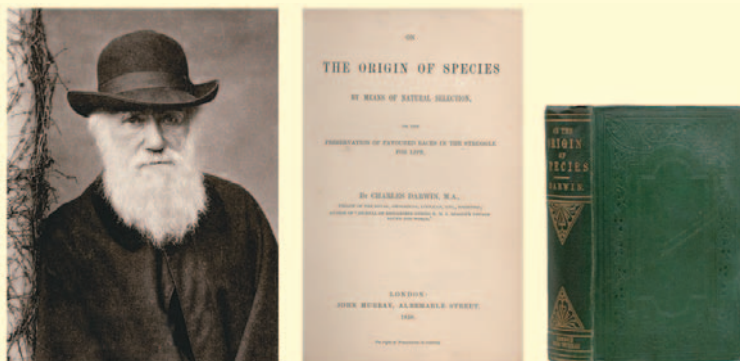


Slika 1.2: Glavni principi Darwinove evolucijske teorije. Darwin je z nekaj preprostimi načeli razložil, na kakšen način se organizmi postopno spreminjajo skozi mnoge generacije in dolga časovna obdobja.

Zanimivost

Knjiga *O nastanku vrst* je uspešnica

Darwinova knjiga *O nastanku vrst* je izšla 24. novembra 1859 (**slika 1.3**). Takoj je bila razprodana; založnik je dobil za knjigo več naročil, kot je natisnil izvodov. Čeprav je bila to znanstvena knjiga, je bila večinoma napisana v lahko razumljivem slogu, njene revolucionarne nove ideje pa so bistveno spremenile dotedanji pogled na svet. Zato so jo poleg naravoslovcev brali tudi drugi. Darwinovi glavni trditvi sta bili, da vse življenje izhaja iz skupnega prednika in da se vrste postopno spreminjajo z naravnim izborom. Ti trditvi je postavil kot preverljivi znanstveni hipotezi, ki ju lahko na temelju rezultatov raziskav potrdimo ali ovržemo. V podporo svojim hipotezam je predstavil mnogo podatkov z različnih področij znanosti in opozoril, da lahko z upoštevanjem teh hipotez razložimo veliko naravnih pojavov, ki so sicer nerazložljivi.



Slika 1.3: Charles Darwin in prva izdaja njegove knjige *O nastanku vrst* (1859)

- ▶ Druga izdaja je izšla že 7. januarja 1860, v času Darwinovega življenja pa so nato izšle še štiri izdaje z več ponatisti. Poleg tega je knjiga še za Darwinovega življenja izšla tudi v ameriški izdaji in bila prevedena v enajst tujih jezikov (danski, francoski, italijanski, madžarski, nemški, nizozemski, poljski, ruski, srbski, španski in švedski).

V 20. stoletju je samo v angleškem jeziku izšlo najmanj 140 izdaj te knjige, prevedena pa je bila v še več jezikov. Prvi prevod v slovenskem jeziku je izšel leta 1954 in drugi leta 2010. Leta 2009 smo ob 150. obletnici izida knjige *O nastanku vrst* praznovali mednarodno Darwinovo leto. Mnogi menijo, da je ta knjiga najbolj vplivna in najbolj brana znanstvena knjiga vseh časov.

Preveri, kaj znaš

1. Razloži temeljne principe evolucije z naravnim izborom.
2. Ali postopne spremembe lastnosti, ki so posledica naravnega izbora, nujno vodijo od preprostejših k bolj kompleksnim oblikam organizmov?
3. Na travniku smo imeli nastavljeno past za hrošče. V dveh tednih se je v past ulovilo 40 odraslih hroščev iste vrste, ki so bili enako stari. Med njimi je bilo 20 samcev in 20 samic. Ujetim živalim smo izmerili dolžino telesa in jih izpustili. Povprečna dolžina telesa je bila 12 mm; najmanjši hrošč je bil dolg 8 mm, največji pa 15 mm.

Kateri podatki v besedilu prikazujejo raznolikost osebkov znotraj vrste?

Na travniku je v času raziskave živelo približno 100 hroščev. Hrošči se razmnožujejo enkrat letno – vsak par ima približno 30 potomcev. Približno koliko odraslih hroščev bi pričakovali 4 leta kasneje, če bi vsi potomci preživeli? Koliko hroščev pa lahko dejansko pričakujemo, če se v štirih letih razmere na travniku ne bodo spremenile?

Povzetek

Evolucija kot spreminjanje organizmov skozi čas je posledica (1) čezmernega potomstva, (2) dedne raznolikosti potomcev, (3) omejenosti naravnih virov, potrebnih za preživetje, (4) izbirnih mehanizmov okolja, ki omogočajo preživetje, in uspešno razmnoževanje organizmov, ki so v trenutnih razmerah v prednosti. Izbirne mehanizme okolja, zaradi katerih so različni osebki različno uspešni pri razmnoževanju, imenujemo naravni izbor. Osnovna enota evolucije je populacija.

selekcija: latinsko *seligere* – izbirati

adaptacija: latinsko *adaptare* – prilagoditi

2 Populacija je osnovna enota evolucije

Glavne teme

- 2.1 Organizmi imajo čezmerno potomstvo
- 2.2 Osebki iste vrste se razlikujejo po mnogih dednih lastnostih
- 2.3 Dedna raznolikost je posledica mutacij in spolnega razmnoževanja
- 2.4 Pogostost alelov v populaciji se lahko spreminja zaradi naravnega izbora
- 2.5 Naravni izbor je izbiranje med fenotipi
- 2.6 Prilagoditev na okolje je posledica naravnega izbora

Ker si bomo v tem poglavju ogledali evolucijo populacij, najprej razložimo, kaj populacija sploh je. **Populacija** je skupina organizmov iste vrste, ki živijo ob istem času v istem prostoru in se med seboj tudi *dejansko* razmnožujejo. **Vrsto** pa lahko opredelimo kot skupino populacij, katere pripadniki se *lahko* medsebojno razmnožujejo in imajo plodne potomce. Populacija in vrsta se torej med seboj razlikujeta po tem, da se osebki iste vrste med seboj potencialno lahko razmnožujejo (in imajo plodne potomce), a se zaradi geografskih ali drugačnih ovir ne morejo vsi. Tiste skupine osebkov, ki naseljujejo ožji skupni prostor in se zaradi tega lahko med seboj tudi dejansko razmnožujejo, pa imenujemo populacije. Nekatere populacije so povsem ločene od drugih populacij iste vrste, na primer populacije na oddaljenih otokih, v ločenih jezerih ali na različnih straneh visokih gorstev. Lisica, ki živi v Franciji, in lisjak iz Anglije tako sicer pripadata isti vrsti, rdeči lisici (*Vulpes vulpes*), a se zaradi Rokavskega preliva ne moreta pariti in zato pripadata dvema različnima populacijama lisic.

Kot smo že omenili, je populacija najmanjša enota, ki se lahko spreminja z evolucijskim razvojem. Obravnavanje populacije kot **osnovne enote evolucije** in upoštevanje načel genetike pri razlagi dedovanja lastnosti organizmov je v prvi polovici 20. stoletja vodilo do nastanka novega področja bioznanosti, ki ga imenujemo **populacijska genetika** in ga bomo spoznali v nadaljevanju.

Zanimivost

Od Darwina do sodobne evolucijske teorije

Darwin je opazil, da osebki mnoge svoje lastnosti podedujejo od staršev, pa tudi to, da se podedovane lastnosti lahko spreminjajo skozi generacije. Toda *mehanizmov* dedovanja ni poznal. Temeljne mehanizme dedovanja je odkril Gregor Mendel (1822–1884) s svojim vztrajnim raziskovanjem dedovanja lastnosti pri grahu. Darwin in Mendel sta bila sicer sodobnika, toda pomena Mendlovega dela skupnost znanstvenikov ni prepoznala do leta

- ▶ 1900. Dejansko so znanstveniki šele sredi 20. stoletja Darwinovo evolucijsko teorijo celovito dopolnili z genetiko – razlago o tem, kako organizmi dedujejo svoje lastnosti. To seveda ne pomeni, da se je Darwin motil; gre le za dodatno razlago o mehanizmih evolucije, ki jih je opisal Darwin. To dopolnitev evolucijske teorije z genetiko v zgodovini biologije označujemo z izrazom moderna evolucijska sinteza, eden njenih ključnih elementov pa je poudarek na biologiji populacij.

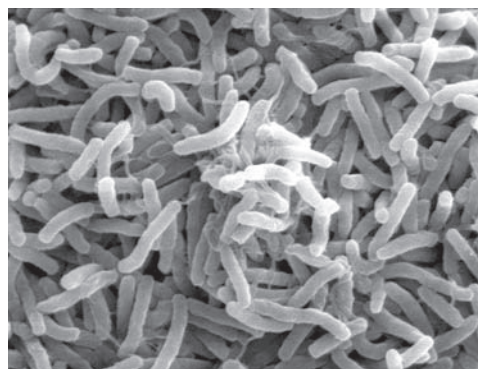
2.1 Organizmi imajo čezmerno potomstvo

Organizmi imajo izjemno sposobnost za razmnoževanje – v vsaki generaciji imajo veliko več potomcev, kot je njih samih. In načeloma tudi veliko več, kot jih lahko preživi. Temu pojavu pravimo **čezmerno potomstvo** ali hiperprodukcija.

Oglejmo si najprej organizme, ki se razmnožujejo najhitreje. Bakterijske celice se v ugodnih razmerah delijo vsakih 20 minut. To pomeni, da iz ene bakterije po 20 minutah (po 1 delitvi) nastaneta 2 bakteriji, v 1 uri (po 3 delitvah) nastane 8 bakterij. Po 24 urah in 72 delitvah pa je potomcev ene same bakterijske celice kar $4,7 \times 10^{21}$ (**slika 2.1**). Tako velika števila si le težko predstavljamo. Vsaka bakterijska celica je zelo majhna in tehta le približno 10^{-21} g. Toda po enem dnevu neomejenih delitev bi bila skupna masa potomcev ene same bakterije kar 4,7 kg. In po enem dnevu in 20 minutah že 9,4 kg, po enem dnevu in 40 minutah pa 18,8 kg.

Vendar se bakterije lahko tako hitro razmnožujejo le v idealnih razmerah, kadar je na voljo dovolj hrane in prostora za vse potomce. A omenili smo že, da v naravi takšnih razmer ni, saj so naravni viri omejeni. Zato se bakterije v naravi tako hitro lahko razmnožujejo le kratek čas, kadar imajo na voljo dovolj hrane.

Čas	Število delitev	Število bakterij
20 minut	1	$2^1 = 2$
1 ura	3	$2^3 = 8$
2 uri	6	$2^6 = 64$
24 ur	72	$2^{72} = 4,7 \times 10^{21}$



Slika 2.1: Bakterije imajo izredno sposobnost za razmnoževanje. V preglednici je prikazano potencialno število potomcev ene bakterijske celice, ki se lahko deli vsakih 20 minut, če bi bile razmere v okolju idealne in zato delitve neomejene. Slika (desno) prikazuje množico bakterij vrste *Vibrio cholerae*.

Podobno kot bakterije imajo čezmerno potomstvo tudi drugi organizmi, čeprav tega pogosto ne opazimo. Seveda vsi osebki ne preživijo do odraslosti – večina jih umre veliko prej. Če se razmere ne spreminjajo, v povprečju **preživi le toliko potomcev, kolikor je bilo staršev**, vsi drugi potomci pa ne dočakajo obdobja, ko bi se lahko razmnoževali.

V vsakem ekosistemu lahko **preživi le določeno število osebkov neke vrste**. To število je odvisno od neživih dejavnikov okolja (na primer podnebnih razmer, količine mineralnih snovi v prsti, rapoložljivega prostora) in živih dejavnikov okolja (na primer količine hrane, števila plenilcev in zajedavcev). Velikost populacije določene vrste se zaradi spreminjanja dejavnikov okolja lahko spreminja. V letih, ko bukev posebno bogato obrodi, na primer preživi več polhov kot sicer. Po milih zimah pa je številčnost komarjev večja kot v letih s hudo zimo. A kljub temu, da se številčnost osebkov v populaciji lahko nekoliko spreminja iz leta v leto, dolgoročno večina ostaja dokaj stalna. V nadaljevanju se bomo posvetili populacijam kot osnovnim enotam evolucije.

Zanimivost

Čezmerno potomstvo živali



Hrast vsako leto obrodi ogromno število želodov (slika 2.2). V vsakem želodu je en potomec. Toda zaradi plenilcev (miši, veveric, polhov itd.) in neugodnih razmer med kalitvijo in rastjo (sence, suše, pomanjkanja prostora) v splošnem preživi le en potomec izmed vseh, ki jih hrast »naredi« v svojem dolgem življenju.

Slika 2.2: Hrast z želodi



Velika podlasica skoti od 6 do 12 mladičev na leto (slika 2.3). Samci lahko samice oplodijo že, ko so stare pet tednov. Podlasice živijo do 7 let, vendar je v naravi njihova pričakovana življenjska doba le eno leto do leto in pol. 60–90 % teh živali umre že v prvem letu.

Slika 2.3: Velika podlasica na preži



Sloni se res razmnožujejo razmeroma počasi (slika 2.4). Prvič se pari, ko imajo približno 14 let; po 22 mesecih se skoti en sam mladič. Samica ponavadi povrže na vsaka štiri leta. Življenjska doba slonov je približno 60 let. Vsaka samica v življenju povrže okrog 8 mladičev. Že to je štirikrat več kot staršev, a v tem času lahko naša slonica dobi tudi vnuke, pravnuke in praprnike!

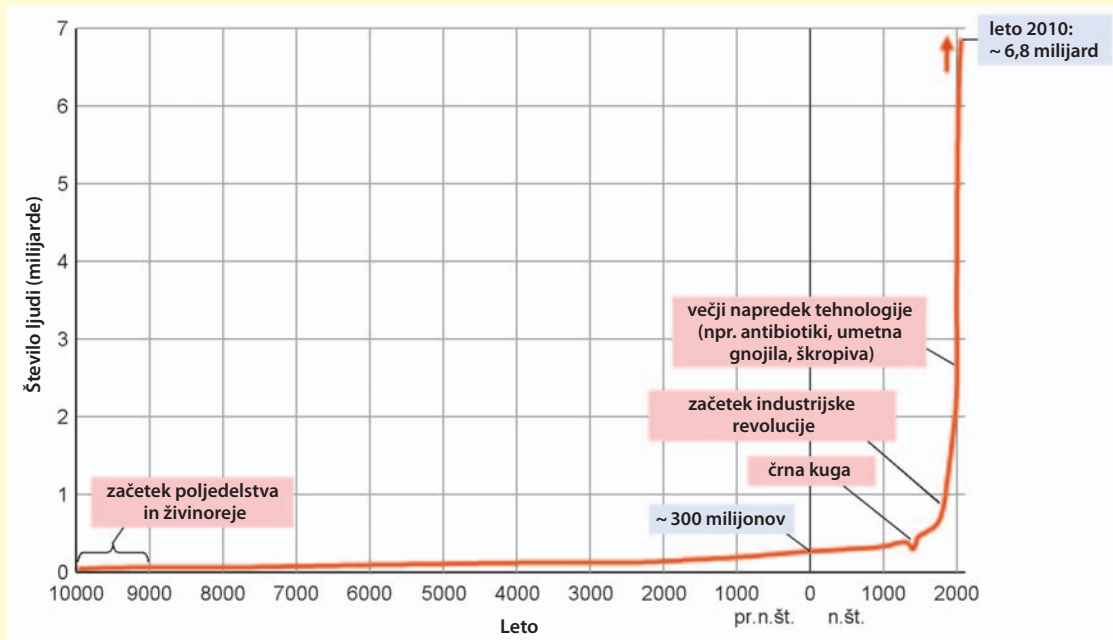
Slika 2.4: Slonja družina

Zanimivost

Naraščanje človeške populacije

Ali to, da preživi le toliko potomcev, kolikor je bilo staršev, velja tudi za človeka? Ali je vrsta *Homo sapiens* glede tega edina znana izjema med tisoči vrst na našem planetu? Javna občila nas neprestano obveščajo, da se število ljudi ves čas povečuje – ne omenijo pa, da se to intenzivno dogaja le v zadnjih 200 letih, kar je razvidno s

- **slika 2.5.** Človeška populacija se izrazito povečuje le v zadnjem obdobju, predvsem zaradi sprememb v proizvodnji hrane (na primer uporabe umetnih gnojil, škropiv in kmetijske mehanizacije), k temu pa prispevajo tudi boljše življenjske razmere, boljša higiena in zdravstvena oskrba. A le koliko časa bo še šlo tako naprej? Tudi za človeka velja, tako kot za vse druge vrste, da so naravni viri na planetu omejeni. Posledica povečevanja populacije človeka je zmanjšanje raznovrstnosti ekosistemov, zmanjšanje številčnosti mnogih drugih vrst in njihovo izumiranje. Ker so se v evolucijskem razvoju izoblikovale mnoge usodne povezave človeka z drugimi organizmi na našem planetu, naše sedanje brezobzirno uničevanje ekosistemov resno ogroža nadaljnjo blaginjo in razvoj človeške družbe.



Slika 2.5: Hitro povečevanje števila ljudi je posledica uporabe dosežkov znanosti, predvsem povečanja kmetijske proizvodnje in izboljšanja zdravstvene oskrbe. Glej tudi sliko 5.55.

Preveri, kaj znaš

1. Kaj je populacija?
2. Razloži, kaj lahko povzroči nihanje številčnosti populacije gozdne miši.

Povzetek

Organizmi imajo sposobnost proizvesti mnogo več potomcev, kot jih lahko preživi v danem okolju. Številčnost populacije neke vrste v danem okolju je odvisna od razmer v okolju in se lahko spreminja.

2.2 Osebki iste vrste se razlikujejo po mnogih dednih lastnostih

Osebki v populacijah so običajno zelo raznoliki. Vsakdo od nas vsakega človeka zlahka prepozna kot predstavnik človeške vrste, vendar se vsi ljudje (osebki) med seboj razlikujemo; zlahka na primer prepoznamo prijatelja v množici ljudi. Težje pa ljudje prepoznavamo osebe nekaterih drugih živali, ki se nam pogosto zdijo vsi enaki. Toda živali nimajo nobenih težav pri prepoznavanju svojih staršev ali mladičev, kljub temu, da lahko živi velikansko število osebkov na majhnem območju, kot na primer v kolonijah tisočev gnezdečih ptic (**slika 2.6**).



Slika 2.6: Kolonija avstralskega strmoglavca na obali Nove Zelandije

Osebki neke populacije se ne razlikujejo le po videzu, ampak tudi po številnih drugih lastnostih. V človeških populacijah so lastnosti na primer tudi zgradba in delovanje posameznih organov, učinkovitost imunskega sistema, vedenje. Vse lastnosti nekega organizma imenujemo **fenotip**. Kot že vemo, potomec podeduje kombinacije alelov (različic posameznih genov) od svojih staršev, in od izražanja teh alelov so odvisne mnoge njegove lastnosti. Spomnimo se, denimo, na dedovanje barve cvetov pri grahu. Fenotip nekega organizma je torej odvisen od celote njegovih dednih informacij – **genotipa**.

Nekatere fenotipske lastnosti genotip zelo natančno določa, na primer krvno skupino pri človeku. Če smo od staršev podedovali alele za krvno skupino A, imamo pač to krvno skupino. V nekaterih primerih pa **na fenotip poleg genotipa vplivajo tudi različni dejavniki okolja**. Tako lahko neka oseba od staršev podeduje takšno kombinacijo alelov, da je barva njene kože precej svetla. Toda če se bo ta oseba sončila, bo njena koža postala temnejše barve. Seveda pa njeni potomci *ne bodo podedovali* tega temnejšega odtenka barve kože, pridobljenega zaradi vplivov okolja (UV-sevanja v sončni svetlobi). Ugotovimo lahko tudi, da se oseba svetle polti lahko sonči kolikor se hoče, pa njena koža ne bo nikoli tako temna kot pri črncih. Geni, ki jih je podedovala, torej določajo **razpon vrednosti** njene fenotipske lastnosti (od zelo svetle do nekoliko temnejše polti), kakšna pa je v nekem trenutku dejanska vrednost njene fenotipske lastnosti, je odvisno tudi od vplivov okolja. Zaradi vplivov okolja se lahko tudi dva genetsko popolnoma enaka osebka, kot sta enojajčna dvojčka, med seboj po fenotipu razlikujeta, na primer po telesni kondiciji in vitkosti postave.

Ugotovili smo, da vsa raznolikost osebkov, ki jo opazimo v neki populaciji, ni dedna, saj poleg genotipa na lastnosti osebka delno vpliva tudi okolje. **Za naravni izbor je pomembna samo dedna komponenta raznolikosti osebkov v populaciji**. Spremembe organizma, ki nastanejo v času življenja osebka zaradi vplivov okolja, se namreč ne prenesejo na potomce.

Preveri, kaj znaš

1. Enojajčna dvojčka, ki sta genetsko sicer povsem enaka, se lahko po nekaterih fenotipskih lastnostih razlikujeta, ker na njun fenotip poleg genotipa vpliva tudi okolje. Naštej nekaj takšnih fenotipskih lastnosti, na katere lahko vpliva okolje.

Povzetek

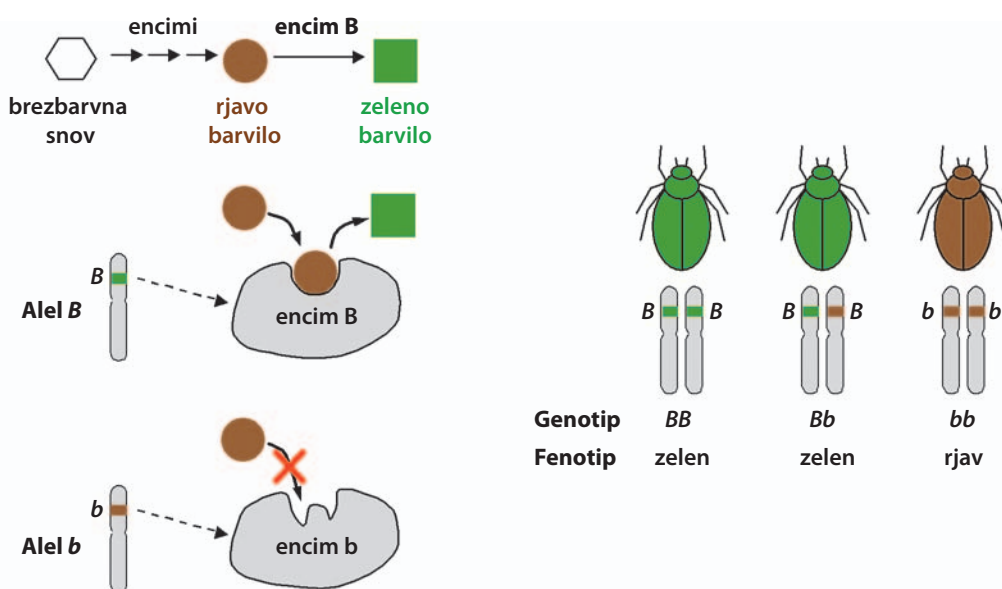
Osebki neke populacije se med seboj razlikujejo po mnogih dednih lastnostih. Sprememb lastnosti, ki nastanejo v času življenja zaradi vplivov okolja, potomci ne podedujejo.

2.3 Dedna raznolikost je posledica mutacij in spolnega razmnoževanja

Dedna ali genetska raznolikost med osebki v populaciji je posledica dveh naključnih procesov: mutacij in kombiniranja alelov med spolnim razmnoževanjem. Najprej si oglejmo mutacije.

Spomnimo se, da so nosilci delovanja celice beljakovine, med katerimi najdemo tudi encime – pospeševalce kemijskih reakcij. Od lastnosti beljakovin, predvsem od njihove prostorske oblike, je odvisno delovanje celic, ki se na koncu odraža tudi kot to, čemur pravimo fenotipske lastnosti ali fenotipski znaki.

Za razlago o evoluciji populacij bomo uporabili namišljeno populacijo zelenih hroščev. Zeleno barvo telesa jim daje zeleno barvilo, ki ga proizvajajo njihove celice iz brezbarvne snovi s pomočjo encimov. Izgradnja zelenega barvila poteka tako, da različni encimi najprej iz brezbarvne snovi izdelajo rjavo barvilo, ki ga nato poseben encim, imenujmo ga encim B (B kot barvilo), pretvori v zeleno barvilo (**slika 2.7**). V tem primeru je torej prisotnost encima B povezana s fenotipsko lastnostjo – zeleno barvo telesa.



Slika 2.7: Barva telesa v namišljeni populaciji hroščev. Zeleno barvilo izdeluje encim B iz rjavega barvila. Alel B kodira delujoč encim B, alel b pa je mutiran in kodira nedelujoč encim b. Alel B je dominanten, alel b pa recesiven.

Načrt za zgradbo encima B, torej za njegovo zaporedje aminokislin, je zapisan v molekuli DNA, pri čemer en trojček nukleotidov v DNA določa eno aminokislino v encimu. Odsek molekule DNA, v katerem je zapisan načrt za eno beljakovino, se imenuje gen.

Predstavljajmo si zdaj gen za encim B, ki v hrošču proizvaja zeleno barvilo. V celicah hrošča je zapis v tem genu takšen, da ima encim B prostorsko zgradbo, ki mu omogoča proizvodnjo zelenega barvila – njegovo aktivno mesto je takšne oblike, da se nanj lahko veže molekula rjavega barvila, ki jo nato encim B pretvori v molekulo zelenega barvila (**slika 2.7**, levo). Toda zapis v genu se lahko tudi spremeni – takšni spremembi rečemo **mutacija**. Lahko se, denimo, en nukleotid v genu zamenja z drugim. Nastala je nova **različica gena** za barvo telesa, ki ji rečemo **alel**. Posledica takšne mutacije je lahko sprememba ene aminokislino v encimu. Zaradi tega se lahko spremeni prostorska zgradba encima na takšen način, da encim ne more več proizvajati zelenega barvila, ker se je na primer spremenila oblika njegovega aktivnega mesta in se nanj ne morejo več vezati molekule rjavega barvila (**slika 2.7**, levo). Encim je »okvarjen« in ne deluje.

Zdaj imamo torej dve različici encima. Delujoč encim smo že poimenovali encim B, nedelujočega pa imenujmo encim b. Različico gena v molekuli DNA, ki ima zapis za encim B, imenujmo alel B, različico zapisa za encim b pa alel b. (V biologiji imena genov pišemo v poševni pisavi, imena beljakovin pa v pokončni pisavi.)

Hrošči so diploidni organizmi – v vsaki celici imajo dva kompleta kromosomov. Enega prejmejo od matere, drugega pa od očeta. Zato imajo seveda na vsakem od dveh homolognih kromosomov gen za barvo telesa, vendar ni nujno, da sta na obeh kromosomih različici gena (alela) za barvo telesa enaki. Oglejmo si možne kombinacije. Osebek ima lahko na obeh kromosomih alel B , ki proizvaja delujoči encim B . Takšen osebek je seveda zelene barve (**slika 2.7**, desno). Druga možnost je, da ima osebek en alel B in en alel b . Alel b sicer proizvaja nedelujoči encim b , toda ker so v celici tudi delujoči encimi B , ki jih proizvaja alel B , se molekule rjavega barvila lahko pretvarjajo v zeleno barvilo in hrošč je zelen. Tretja možnost pa je, da ima osebek dva alela b . Ker oba alela proizvajata nedelujoči encim b , se v celici molekule rjavega barvila ne morejo pretvarjati v zeleno barvilo. Zato je hrošč rjav.

Pri genetiki smo se že učili o načinih dedovanja. Barva telesa hrošča je primer dominantno-recesivnega dedovanja (popolne dominacije), kakršno je na primer tudi dedovanje barve cveta pri rastlinah graha. Alel za zeleno barvo hroščevega telesa (alel B) je dominanten: če ima osebek dva alela B (genotip BB) ali en alel B (genotip Bb), je zelene barve. Alel za rjavo barvo telesa (alel b) pa je recesiven: osebek je rjave barve le, če ima dva alela b (genotip bb). Dominantne alele označujemo z velikimi črkami, recesivne pa z malimi.

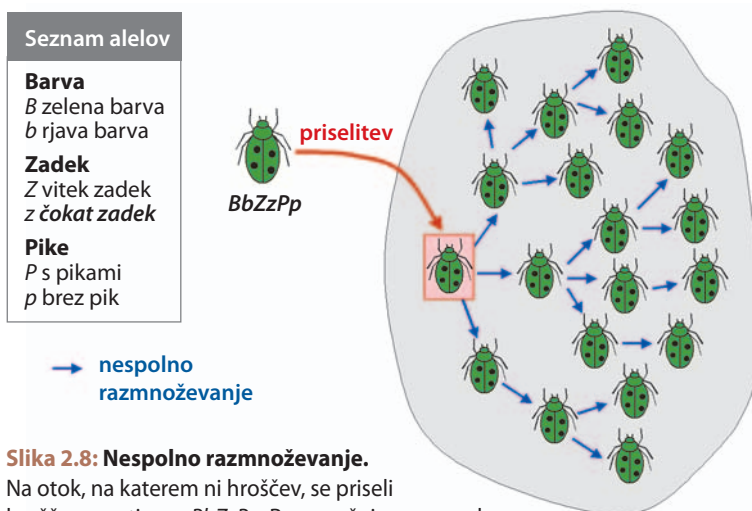
Ugotovili smo torej, da **z mutacijami lahko nastajajo nove različice genov – aleli**. Posledica nastajanja novih alelov z mutacijami pa je **raznolikost organizmov v populaciji**. V našem primeru so lahko hrošči zaradi mutacije, s katero je nastala nova različica gena, zeleni ali rjavi.

Doslej smo govorili le o enem genu, ki ima le dve različici – dva alela. Toda dejansko imajo geni pogosto več kot dva alela. Gen za krvno skupino AB0 pri človeku ima na primer tri alele (I^A, I^B in i). Vsak človek ima dva izvoda gena za to krvno skupino, po enega na vsakem homolognem kromosomu. Med seboj se ljudje razlikujemo po kombinacijah alelov za krvno skupino. Tako ima oseba z aleloma $I^A I^A$ ali $I^A i$ krvno skupino A, oseba z aleloma $I^B I^B$ ali $I^B i$ krvno skupino B, oseba z aleloma $I^A I^B$ krvno skupino AB in oseba z aleloma ii krvno skupino 0.

Poleg tega imajo organizmi zelo veliko genov. Hrošč je žuželka. Znanstveniki so ugotovili, da ima neka druga žuželka, vinska mušica, v enem kompletu kromosomov približno 14 000 genov, človek pa jih ima približno 30 000. Zdaj pa si predstavljajmo: 30 000 genov, in vsak ima dva izvoda, na vsakem homolognem kromosomu enega. Pri človeku ima sicer le tretjina genov več kot en alel; za dve tretjini genov obstaja v celotni človeški populaciji le ena različica gena – en alel. Skoraj vsa raznolikost med ljudmi je torej posledica razlik v tretjini genov. Toda kljub temu je število možnih kombinacij alelov v človekovem genomu ogromno. Kako pa te kombinacije alelov nastajajo?

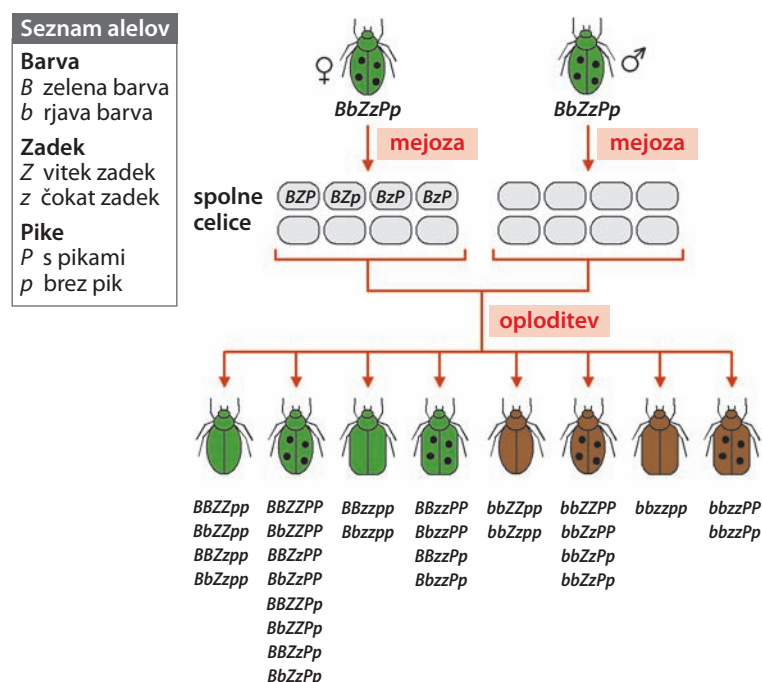
Po odgovor se vrnimo k našim hroščem. Doslej smo se ukvarjali le z enim njihovim genom – genom za barvo telesa. Dodajmo temu genu še dva, ki se oba izražata na dominantno-recesiven način in imata oba po dva alela (**slika 2.8**). Prvi je gen za obliko zadka – imenujmo ga gen Z kot zadek. Dominantni alel Z določa vitko obliko zadka, recesivni alel z pa čokato. Drugi gen pa je gen za pike na krilih – imenujmo ga P kot pike. Dominantni alel P določa pikavost, recesivni alel p pa krila brez pik.

Predstavljajmo si, da se na nek oddaljeni otok, na katerem ni hroščev, priseli hrošč z genotipom $BbZzPp$ (**slika 2.8**). Osebek je zelen, ima vitek zadek in pike na krilih. Predstavljajmo si še to, da se ta osebek na otoku začne nespolno razmnoževati, češar sicer pri hroščih ne zasledimo. Za nespolno razmnoževanje je značilno, da so potomci genetsko enaki staršem – gre za kloniranje. Zato imajo vsi potomci našega prišleka njemu enak genotip in fenotip. V novi populaciji na otoku ni raznolikosti med osebki (razen, če pri katerem osebkju nastane mutacija, ki se prenese na njegove potomce).



Slika 2.8: Nespolno razmnoževanje. Na otok, na katerem ni hroščev, se priseli hrošč z genotipom $BbZzPp$. Razmnožuje se nespolno (česar sicer hrošči ne počno) – vsi njegovi potomci imajo enak fenotip in genotip. V populaciji hroščev ni raznolikosti osebkov.

Pa si predstavljajmo še drug primer. Na s hrošči neposeljeni otok se priselita dva hrošča, samec in samica, oba z enakim genotipom kot prišlek v prejšnjem primeru, torej $BbZzPp$ (slika 2.9). Samec in samica se spolno razmnožujeta. Pri **spolnem razmnoževanju** najprej z mejozo nastanejo različne spolne celice, nato pa se med oploditvijo združita ženska in moška spolna celica in nastane nov osebek. Ker pri mejozi in oploditvi nastajajo nove kombinacije alelov, se **potomci med seboj razlikujejo po genotipu in fenotipu**. V novi populaciji obstaja velika raznolikost osebkov. Pri populaciji hroščev z nespolnim razmnoževanjem je obstajal le en genotip in en fenotip (slika 2.8). Pri spolnem razmnoževanju pa lahko nastanejo potomci z 8 različnimi fenotipi in 27 različnimi genotipi (slika 2.9).



Slika 2.9: Spolno razmnoževanje. Na otok, na katerem ni hroščev, se priselita dva hrošča, samec in samica, z enakim genotipom $BbZzPp$. Pri spolnem razmnoževanju nastajajo nove kombinacije alelov. Osebki v naslednji generaciji so zelo raznoliki.

S poenostavljenim primerom hroščev smo ponazorili, da so vir dedne raznolikosti med osebki mutacije in spolno razmnoževanje. Mutacije nastajajo *naključno*. To pomeni, da se zaradi različnih vzrokov, najpogosteje zaradi napak pri podvojevanju molekule DNA pred celično delitvijo, pojavijo napake v zaporedju nukleotidov. Mesto takšne napake in vrsta napake (na primer zamenjava enega nukleotida z drugim) ni vnaprej določeno – gre torej za naključno napako, ki se lahko pojavi kjerkoli v molekuli DNA. Tudi pri spolnem razmnoževanju nove kombinacije alelov nastajajo *naključno* – ni vnaprej določeno, kateri aleli se bodo znašli skupaj v spolni celici, pa tudi pri oploditvi ni vnaprej določeno, s katerim od mnogih spermijev se bo združila jajčna celica.

V nasprotju z naključnim nastajanjem raznolikosti osebkov pa odbiranje teh osebkov z naravnim izborom ni naključno, temveč je na nek način »usmerjeno«. To seveda ne pomeni, da ima naravni izbor kakšen poseben dolgoročen namen ali cilj, na primer izdelati čim bolj kompleksen organizem. Nenaključnost naravnega izbora se kaže s tem, da imajo **osebki z različnimi lastnostmi različno verjetnost preživetja glede na trenutne razmere v okolju**. Če bi bil naravni izbor naključen, bi bila verjetnost za preživetje in razmnoževanje pri vseh osebkih enaka. V primeru na sliki 1.1 imajo, denimo, na pogorišču, kjer je podlaga črna, večjo verjetnost za preživetje temni osebki kot svetli osebki. Če se razmere spremenijo, se seveda spremeni tudi verjetnost preživetja različnih osebkov. Torej naravni izbor ni dolgoročno usmerjen v nek cilj, temveč nenaključno odbira osebke glede na trenutne razmere v okolju.

Na tem mestu še enkrat poudarimo, da **naravni izbor deluje na fenotip**, torej na izražene lastnosti organizma, in ne na njegov genotip. Seveda je fenotip povezan z genotipom. Toda za naravni izbor je pomembno, ali je hrošč zelen ali rjav, ni pa pomembno, ali ima zelen hrošč dva enaka ali dva različna alela za barvo telesa.

Preveri, kaj znaš

1. Na primeru razloži povezavo med genom, alelom, belajkovino in fenotipsko lastnostjo.
2. Razloži, na kakšen način mutacije in spolno razmnoževanje prispevajo k raznolikosti osebkov v populaciji.

Povzetek

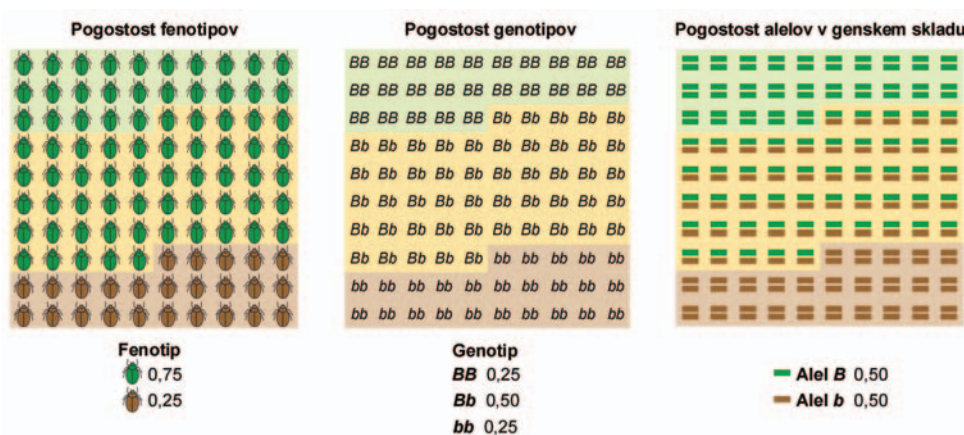
Dedna raznolikost med osebki v populaciji je posledica dveh naključnih procesov: mutacij in kombiniranja alelov med spolnim razmnoževanjem. Naravni izbor deluje na fenotip osebkov in ne na njegov genotip. Nenaključnost naravnega izbora se kaže v tem, da imajo osebki z različnimi lastnostmi različno verjetnost preživetja glede na trenutne razmere v okolju.

2.4 Pogostost alelov v populaciji se lahko spreminja zaradi naravnega izbora

Vsak osebek ima svoj genotip – nabor alelov. Ker se osebki praviloma razmnožujejo le znotraj populacije, ima tudi vsaka populacija svoj nabor alelov, poimenovan **genski sklad populacije**. Genski sklad torej predstavlja **vsile alele neke populacije v danem trenutku**. Pri namišljeni populaciji hroščev so v genskem skladu vsi aleli za barvo telesa, vsi aleli za obliko zadka in vsi aleli za pikavost, poleg teh pa še vsi aleli vseh drugih genov, ki jih hrošči tudi imajo, pa jih nismo omenjali.

Genski skladi različnih populacij iste vrste se lahko razlikujejo po številu različnih alelov in po njihovi pogostosti, skozi čas pa se oboje večinoma tudi spreminja. **Iz genskega sklada prejme svoje gene naslednja generacija**. Pojave, povezane z genskimi skladi populacij, preučuje **populacijska genetika**.

Spomnimo se naših hroščev. Predstavljajmo si, da je v populaciji 100 hroščev – 75 zelenih in 25 rjavih. Vsak od njih nosi dva izvoda gena za barvo telesa – skupaj je v genskem skladu populacije 200 alelov. Poskušajmo ugotoviti, kolikšna je pogostost alela *B* in alela *b* v genskem skladu populacije. **Pogostost alela je njegov delež med vsemi aleli določenega gena v populaciji**. Za rjave hrošče vemo, da imajo dva alela *b* (genotip *bb*). Torej 25 rjavih hroščev v genski sklad populacije prispeva $2 \times 25 = 50$ alelov *b*. Kaj pa zeleni, ki imajo lahko dva alela *B* (genotip *BB*) ali en alel *B* in en alel *b* (genotip *Bb*)? Za našo namišljeno populacijo hroščev vemo, katere alele ima vsak od osebkov, zato lahko ugotovimo pogostost alelov v populaciji (**slika 2.10**). V naši populaciji je 25 zelenih hroščev z genotipom *BB* in 50 zelenih hroščev z genotipom *Bb*. Pogostost alela *B* je 0,5 ali 50 % – med 200 aleli za barvo telesa v populaciji hroščev je polovica (100) alelov *B*. Tudi pogostost alela *b* je 0,5 (**slika 2.10**, desno).

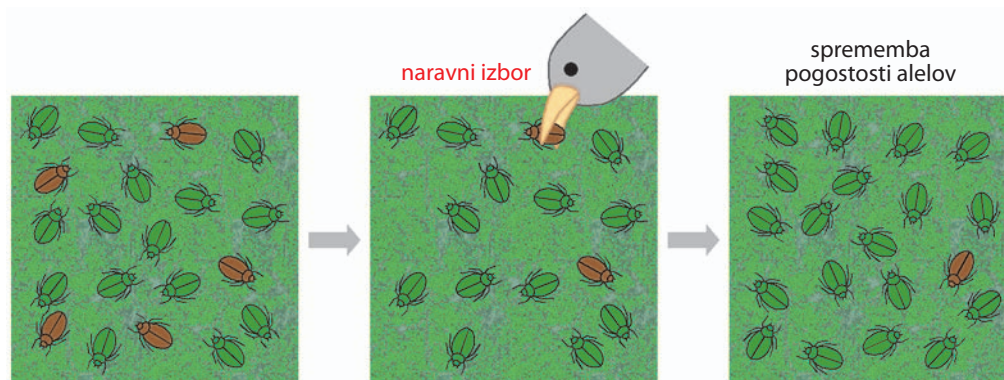


Slika 2.10: Pogostost fenotipov, genotipov in alelov za barvo telesa v namišljeni populaciji hroščev, ki ima 100 osebkov. Vsak osebek prispeva v genski sklad populacije dva alela za barvo telesa, saj ima na vsakem od dveh homolognih kromosomov gen za barvo telesa. Glej tudi sliko 2.7.

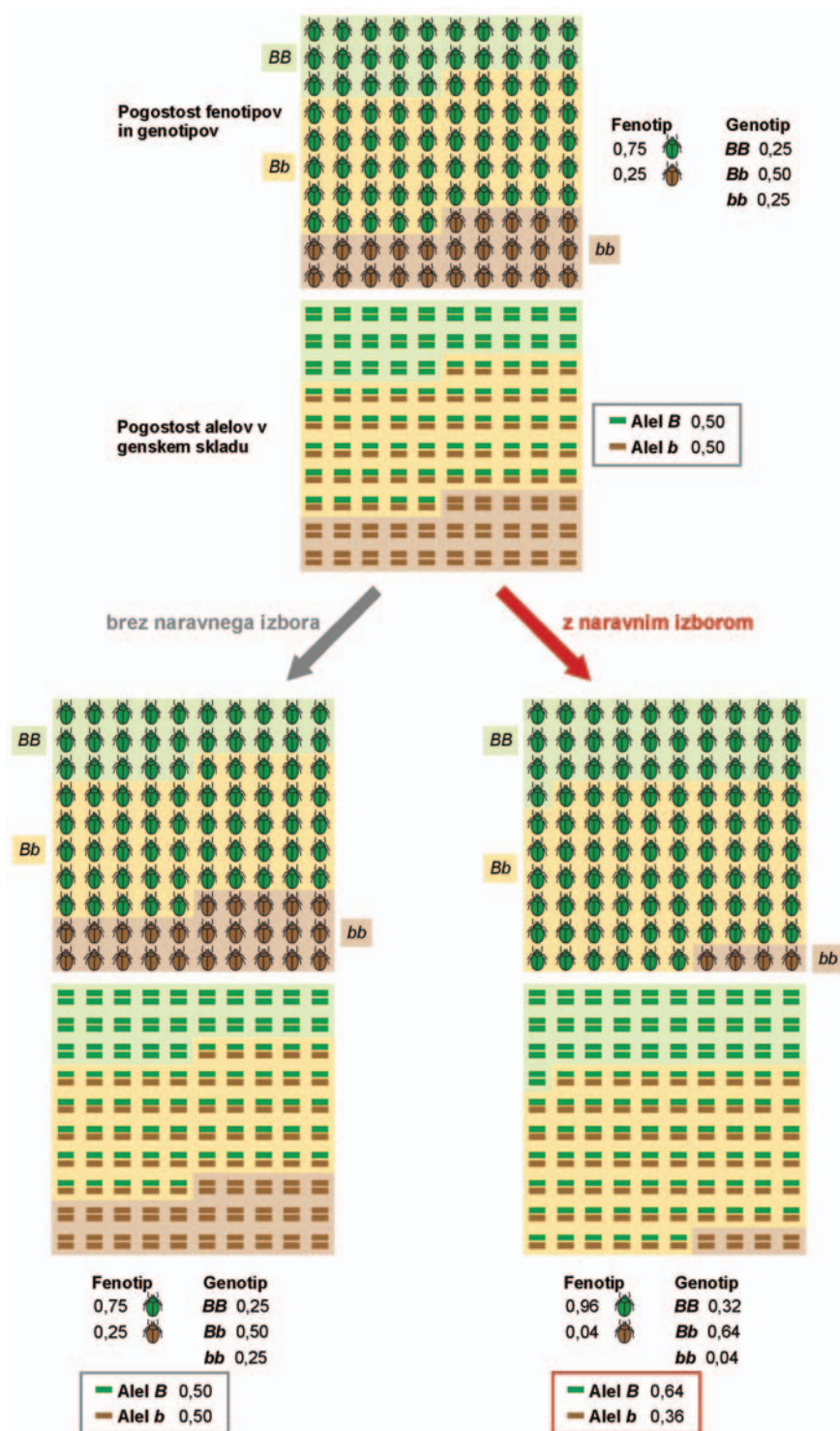
Genskih skladov smo se lotili, ker bi radi ugotovili, kako deluje evolucija. Kako lahko torej vemo, ali se populacija evoliucijsko razvija ali ne? **Pri populaciji, ki se evoliucijsko razvija, se spreminja pogostost alelov v genskem skladu.** Torej na evolucijo lahko gledamo kot na spreminjanje genske sestave populacije skozi čas. Toda kako lahko ugotovimo, ali se pogostost alelov v neki populaciji spreminja ali ne? Najprej razmislimo, kaj lahko pričakujemo, če se populacija evoliucijsko *ne* razvija. Tedaj je populacija v **genskem ravnovesju** – sestava njenega genskega sklada se skozi čas ne spreminja. To ravnovesje imenujemo tudi Hardy-Weinbergovo ravnovesje. Leta 1908 sta namreč angleški matematik Godfrey Harold Hardy in nemški zdravnik Wilhelm Weinberg neodvisno drug od drugega ugotovila, da se pogostost alelov in genotipov v veliki populaciji, ki je v genskem ravnovesju, iz generacije v generacijo ne spreminja. Torej so pogostosti alelov v populaciji stalne in populacija se evoliucijsko ne razvija, razen kadar se zgodi kaj, kar populacijo potisne iz genskega ravnovesja in povzroči spremembe pogostosti alelov. Toda kaj bi to lahko bilo?

Pomislimo najprej na spolno razmnoževanje. Povedali smo, da s spolnim razmnoževanjem nastajajo raznoliki osebki. Toda če v neki populaciji poteka spolno razmnoževanje, ali to že pomeni, da se v njej spreminja pogostost alelov – da se populacija evoliucijsko razvija? Izkaže se, da spolno razmnoževanje ne spreminja pogostosti alelov v populaciji. Čeprav pri spolnem razmnoževanju nastajajo zelo raznoliki osebki, ki se spet spolno razmnožujejo med seboj, ostajajo pogostosti alelov skozi generacije enake. Spolno razmnoževanje ne more spremeniti genskega sklada velike populacije. Lahko pa ga spremeni **naravni izbor**.

Predstavljajmo si, da populacija hroščev, kakršna je prikazana na **sliki 2.10**, živi na otoku, na katerem ni nobenih plenilcev in je dovolj hrane. Otok je zelo preraščen z rastlinstvom, zato je podlaga, na kateri se hrošči zadržujejo, pretežno zelena. Hrošči se med seboj spolno razmnožujejo. Privzemimo, da je ta velika populacija v genskem ravnovesju – evoliucijsko se ne razvija. Verjetnost vsakega osebka za preživetje je enaka. Nato pa se na otok priselijo ptice, ki se hranijo s hrošči. Ker so na zeleni podlagi rjavi hrošči bolj vidni kot zeleni, imajo zdaj rjavi hrošči manjšo verjetnost za preživetje in razmnoževanje kot zeleni. Delovati je začel **naravni izbor**, zato se bo pogostost alelov v populaciji hroščev začela spreminjati: postopno skozi generacije bo alelov *b* za rjavo barvo manj, alelov *B* za zeleno barvo pa več kot prej (**sliki 2.11** in **2.12**). Kadar deluje naravni izbor, se pogostost alelov v genskem skladu spreminja in populacija se evoliucijsko razvija.



Slika 2.11: Naravni izbor lahko spremeni pogostost alelov v populaciji. Na otoku živi populacija hroščev, kakršna je prikazana na sliki 2.10. Populacija je v genskem ravnovesju in se evoliucijsko ne razvija. Po priselitvi plenilskih ptic na otok imajo rjavi hrošči manjšo verjetnost za preživetje kot zeleni, zato se skozi generacije v genskem skladu hroščev pogostost alela za rjavo barvo manjša, pogostost alela za zeleno pa večja. Populacija hroščev se evoliucijsko razvija.



Slika 2.12: Sprememba pogostosti alelov v populaciji zaradi naravnega izbora. Če naravnega izbora ni, se pogostost alelov v genskem skladu populacije skozi generacije ne spreminja (levo). Če pa naravni izbor deluje, se pogostost alelov v genskem skladu populacije skozi generacije spreminja (desno). Glej tudi sliko 2.11.

Kot smo videli, lahko evolucijo opredelimo kot spreminjanje pogostosti alelov v genskem skladu populacije skozi čas. Pogostosti alelov in genotipov v populaciji poleg naravnega izbora spreminjajo tudi nekateri drugi dejavniki (mutacije, priseljevanje in odseljevanje osebkov iz populacije in naključni genetski premik). Zaradi vseh teh vplivov na pogostost alelov v genskem skladu populacije v naravi praviloma niso v genskem ravnovesju in se torej ves čas evolucijsko spreminjajo. Vendar pa evolucija v nekaterih populacijah poteka hitro, v drugih pa zelo počasi, odvisno od skupnih učinkov omenjenih dejavnikov.

Dodatek za maturo

Glej poglavje 6.1 Hardy-Weinbergovo načelo opisuje populacije v genskem ravnovesju.

Preveri, kaj znaš

1. Kaj je genski sklad populacije?
2. Na primeru razloži, kaj se dogaja z genskim skladom populacije, kadar deluje naravni izbor.

Povzetek

Vsi aleli neke populacije v danem trenutku sestavljajo genski sklad populacije. Pri populaciji, ki se evolucijsko spreminja, se spreminja pogostost alelov v populaciji. Naravni izbor je eden od dejavnikov, ki spreminja pogostost alelov v genskem skladu populacije in s tem povzroča njen evolucijski razvoj.

2.5 Naravni izbor je izbiranje med fenotipi

Od vseh dejavnikov, ki lahko populacijo potiskajo iz genskega ravnovesja in s tem povzročajo njeno evolucijsko spreminjanje, je najpomembnejši naravni izbor. Med vsemi dejavniki namreč edino **naravni izbor vodi v postopno prilagajanje organizmov** na okolje. Ta temeljni mehanizem evolucije je opisal Darwin še v obdobju pred populacijsko genetiko. Zato si najprej oglejmo Darwinove ugotovitve.

Osnova naravnega izbora je različna uspešnost osebkov pri razmnoževanju

Darwin je svojo razlago utemeljil na dejstvih, da imajo vse vrste *čezmerno potomstvo* in da *so naravni viri* v vsakem okolju *omejeni*. Sklepal je, da proizvajanje več potomcev, kot jih lahko preživi v okolju z omejenimi viri, vodi v »*boj za obstanek*« med osebki iste vrste, zaradi katerega le redki osebki preživijo dovolj dolgo, da se lahko *razmnožijo* in s tem proizvedejo svoje lastne potomce. Vsi drugi osebki so požrti, umrejo zaradi stradanja in bolezni, ne uspejo najti partnerja za razmnoževanje ali se ne razmnožijo iz drugih razlogov. Poleg posledic čezmernega potomstva v okolju z omejenimi viri sta bili pomembni še dve Darwinovi opažanji. Ugotovil je, da *so osebki* v populaciji zelo *raznoliki* in da se del te raznolikosti *deduje* – torej se prenese v naslednjo generacijo.

Vsa ta opažanja je Darwin povezal skupaj: preživetje vsakega osebka v okolju z omejenimi naravnimi viri je delno odvisno od lastnosti, ki jih je osebek podedoval od svojih staršev. Sklepal je, da imajo v vsakem okolju največjo verjetnost za preživetje in razmnoževanje tisti osebki, ki so najbolj prilagojeni na to okolje. Ti najbolj prilagojeni osebki zato v povprečju proizvedejo več potomcev kot manj prilagojeni osebki. Torej je *razmnoževanje* ključnega pomena za proces, ki ga je Darwin dojemal kot osnovni mehanizem evolucije – **naravni izbor**. Darwin je odkril, da je temelj naravnega izbora **različna uspešnost različnih osebkov pri razmnoževanju** (glej sliko 1.1).

Ta Darwinov uvid je bil hkrati zelo preprost in zelo pronicljiv. Razmnoževanje ni enakovredno – tisti osebki, ki so na dano okolje najbolj prilagojeni, v povprečju proizvedejo največ potomcev. Drugače povedano, neenaka uspešnost pri razmnoževanju (naravni izbor) je mehanizem, s katerim dano okolje »izbira« med raznolikimi osebki, tako da imajo nekateri prednost pred drugimi. Darwin je logično sklepal, da zaradi tega tiste dedne lastnosti, ki dajejo osebkom prednost pred drugimi, skozi generacije postajajo v populaciji bolj pogoste, tiste lastnosti, ki so za osebke »škodljive« v boju za obstanek in razmnoževanje, pa postajajo manj pogoste.

Zanimivost

Naravni izbor v človeških populacijah

Primer naravnega izbora v človeških populacijah so bolezni, ki povzročajo visoko smrtnost med otroki in mladimi, torej med osebami, ki se bi lahko še razmnoževale in prenesle svoje gene v generacijo potomcev. Primer takšne bolezni je črna kuga, ki je v srednjem veku v Evropi močno vplivala na človeško populacijo. V epidemiji leta 1348 je zbolelo skoraj 70 % ljudi in skoraj vsi so umrli. Približno 10 let pozneje, leta 1361, se je epidemija ponovila. Zbolelo je 50 % ljudi in skoraj vsi so umrli. Potem se je epidemija pojavila spet čez 10 let, leta 1371, in takrat je zbolelo le 10 % ljudi, številni izmed teh so preživel. V zadnji epidemiji je bilo prizadetih le 5 % Evropejcev in skoraj vsi oboleli so preživel. Možno je, da je bila manjša smrtnost ob ponovnih epidemijah povezana s povečanjem pogostosti določenega alela ali alelov v človeški populaciji zaradi naravnega izbora v prvih epidemijah. Vendar pa razlogi za zmanjšanje smrtnosti še niso znanstveno pojasnjeni.

Znanstveniki opazujejo naravni izbor v teku

Darwin je sicer briljantno povezal različna opazovanja v svojo razlago, toda vprašamo se lahko, ali se to dejansko tudi dogaja. Ali so znanstveniki že kdaj videli evolucijo z naravnim izborom v teku? Primerov znanstveno dokumentiranih evlucijskih sprememb v populacijah je veliko, od laboratorijskih poskusov z bakterijami in vinskimi mušicami do opazovanj in zbiranja podatkov v naravnih populacijah.

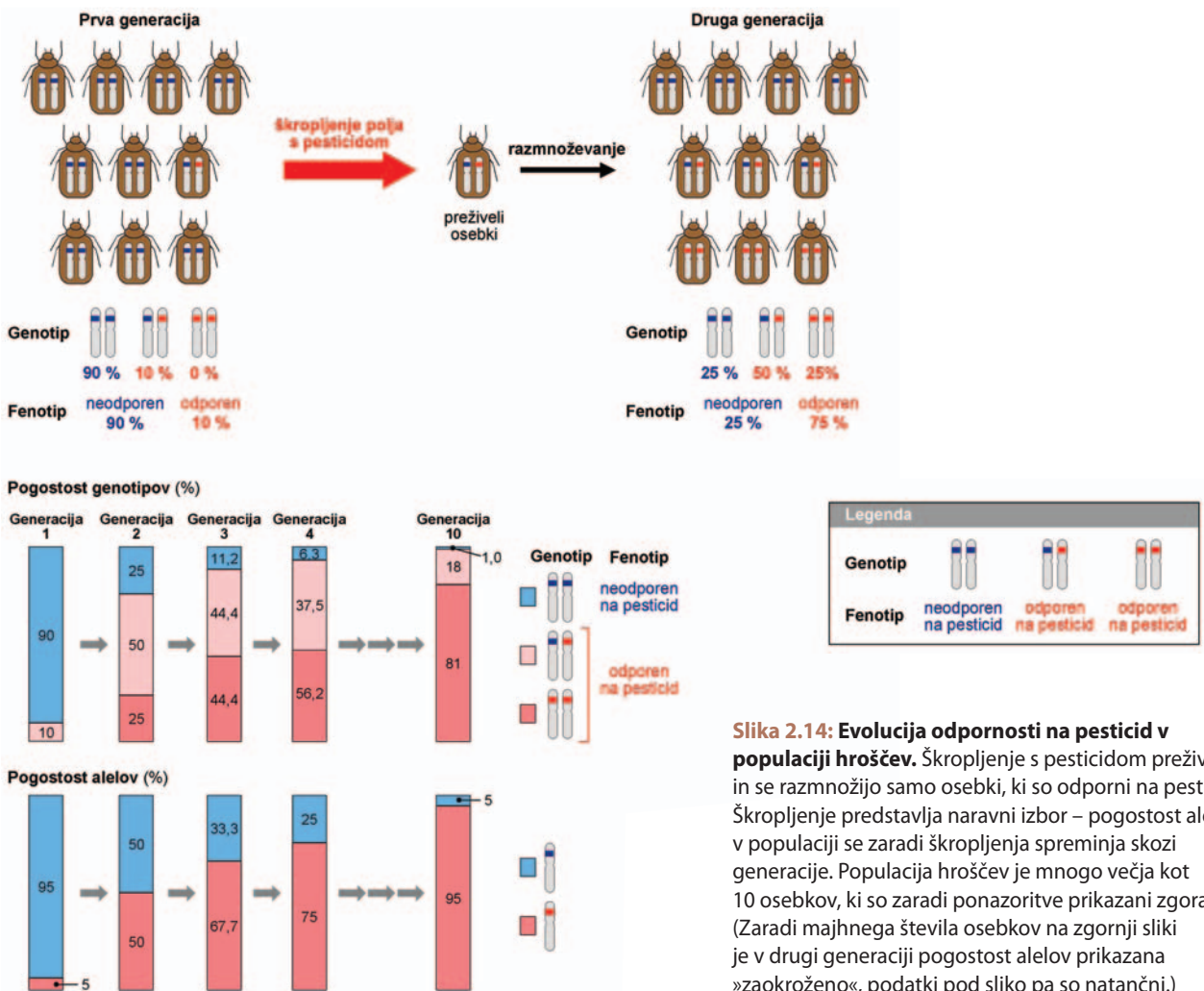
Lep primer naravnega izbora, ki je v kratkem času povzročil spremembo pogostosti lastnosti v populaciji, so opazovali pri metulju brezovem pedicu (*Biston betularia*). Brezov pedic je nočni metulj, ki podnevi z razširjenimi krili počiva na z lišaji poraščenih deblih in skalah. Takrat je lahek plen žužkojedih ptic in osebki z varovalno barvo imajo veliko prednost. To se odraža tudi na pogostosti fenotipov. Na začetku 19. stoletja je bila varovalna barva brezovega pedica svetla lisasta, saj so tudi z lišaji poraščene površine svetle. Leta 1848 pa so v Manchestru našli prvega temnega predstavnika te vrste; pozneje so ugotovili, da je temna obarvanost posledica mutacije v enem genu (**slika 2.13**). Zaradi industrijske revolucije se je tedaj mesto hitro širilo; tovarne in prebivalci so pokurili velike količine premoga, zaradi česar so se v ozračje sproščale velike količine sajastega dima in strupenih plinov. Zaradi posledic onesnaževanja zraka so občutljivi lišaji propadli, na površine pa so sedale tudi saje. Počivališča metuljev so v kratkem času postala temna; ptice so zdaj svetle metulje lažje opazile in vršile močan selekcijski pritisk. Že okoli leta 1900 so temni metulji v okolici mest predstavljali več kot 90 % populacije. Zaradi nameščanja čistilnih naprav, ki ji je sledila vnovična naselitev lišajev na teh območjih, so od začetka sedemdesetih let 20. stoletja v prednosti spet svetlo obarvani pedici, ki zdaj ponovno prevladujejo. Ta primer kaže, da je prilagoditev relativna, odvisna od trenutnih razmer v okolju – včasih je bolje biti svetel, včasih pa temen. Kot vrsta pa je vsekakor najbolje kljub selekcijskim pritiskom ohraniti raznolikost genskega sklada in biti zato prilagodljiv. Podobno spreminjanje obarvanosti zaradi onesnaževanja so opazili pri približno 70 vrstah metuljev v Angliji, pa tudi v drugih delih Evrope in v Severni Ameriki.



Slika 2.13: Varovalna barva zagotavlja brezovemu pedicu (*Biston betularia*) podnevno varnost.

Zelo znan je tudi primer evolucijskega spreminjanja kljunov »Darwinovih« ščinkavcev na Galapaških otokih, ki sta ga v naravnih populacijah ščinkavcev skoraj trideset let preučevala Peter in Rosemary Grant. Med drugim sta merila velikost kljuna v populaciji ene od vrst talnih ščinkavcev (*Geospiza fortis*; glej sliko 3.5), ki se hranijo s semeni. Ugotovila sta, da je v sušnih letih pomanjkanje majhnih semen, zato se morajo ptice prehranjevati z večjimi semeni. V takšnih razmerah imajo ptice z večjimi, močnejšimi kljuni prednost pri prehranjevanju, zato jih več preživi in se tudi uspešneje razmnožujejo kot ptice z manjšimi, šibkejšimi kljuni. V naslednji generaciji imajo ptice v povprečju večje kljune. V vlažnih letih pa je na voljo obilica majhnih semen, zato so v prednosti ptice z manjšimi kljuni, ki se spretneje prehranjujejo. V naslednji generaciji je velikost kljuna v povprečju manjša.

Primer naravnega izbora v teku je tudi evolucija odpornosti na pesticide pri stotinah vrst žuželk. Pesticidi so strupi za »škodljivce«, ki jih človek uporablja v velikih količinah in v različne namene. Oglejmo si primer škropljenja polja s pesticidom. Zakaj strup na začetku učinkovito pobije nezaželene žuželke, kmalu pa je na polju vse polno žuželk, ki so na ta strup neobčutljive? Znanstveniki so podrobno raziskali več primerov evolucije odpornosti na pesticide. Temeljni mehanizmi tega procesa so vedno zelo podobni. Predstavljajmo si populacijo hroščev, ki živi na polju koruze. Ker imajo hrošči veliko hrane, se uspešno razmnožujejo in na polju jih je vse polno. Zato kmet polje poškropi z novim pesticidom, ki ga prej še ni uporabil. Pesticid pobije veliko večino hroščev, toda nekateri redki osebki preživijo (**slika 2.14**). Preživeli osebki so odporni na pesticid, ker imajo v svojem genotipu alele, ki so jim nekako omogočili preživetje. Lahko gre, denimo, za nekoliko drugačno različico enega od encimov, ki ima zaradi svoje nekoliko drugačne zgradbe sposobnost, da razgradi molekule pesticida, zaradi česar pesticid za te osebke ni strupen. Ker preživijo le odporni osebki, se ti med seboj razmnožujejo, in v naslednjih generacijah se povečuje pogostost odpornih fenotipov ter seveda tudi pogostost alela za odpornost na pesticid (**slika 2.14**). Škropljenje s pesticidom predstavlja naravni izbor; med drugim spreminja pogostost alelov v populaciji in s tem poganja evolucijski razvoj populacije.



Slika 2.14: Evolucija odpornosti na pesticid v populaciji hroščev. Škropljenje s pesticidom preživijo in se razmnožijo samo osebki, ki so odporni na pesticid. Škropljenje predstavlja naravni izbor – pogostost alelov v populaciji se zaradi škropljenja spreminja skozi generacije. Populacija hroščev je mnogo večja kot 10 osebkov, ki so zaradi ponazoritve prikazani zgoraj. (Zaradi majhnega števila osebkov na zgornji sliki je v drugi generaciji pogostost alelov prikazana »zaokroženo«, podatki pod sliko pa so natančni.)

Na podoben način tudi pleveli na polju z evolucijo pridobijo odpornost na škropiva – takšne pleveli imenujemo »superpleveli«. Tudi odporni pleveli podobno kot odporne žuželke povzročajo veliko gospodarsko škodo. In končno je primer hitrega evlucijskega razvoja tudi pojav odpornosti na antibiotike v populacijah bakterij. Mnogo tovrstnih primerov so znanstveniki natančno raziskali in dokumentirali in predstavljajo dokaze za to, da naravni izbor dejansko deluje na način, kot ga je opisal Darwin.

Zanimivost

Poskusi z brezovimi pedici v naravnem okolju

Britanski zdravnik Bernard Kettlewell (1907–1979) je v petdesetih letih 20. stoletja opravil raziskavo, s katero je želel dokazati hipotezo, da so plenilske ptice dejavnik naravnega izbora, ki je povzročil evlucijsko spremembo varovalne barve pri brezovem pedicu (glej glavno besedilo in sliko 2.13). Na območju močno onesnaženega industrijskega mesta Birmingham, kjer je bilo tedaj 85 % brezovih pedicev temne barve, je Kettlewell ponoči v svetlobno past ulovil mnogo pedicev in jih označil. V onesnaženem gozdu, ki je bil rezervat za ptice, je nato spustil veliko število označenih pedicev – polovica označenih pedicev je bila svetlih, polovica pa temnih. Pozneje je v gozdu ulovil veliko pedicev in preštel ulovljene označene osebkke. Ugotovil je, da sta bili dve tretjini označenih osebkov temni, ena tretjina pa svetla. To je bil dokaz, da so imeli v onesnaženem gozdu svetli pedici manj možnosti za preživetje kot temni. Raziskavo je izvedel dvakrat, leta 1953 in 1955, in obakrat dobil podobne rezultate.

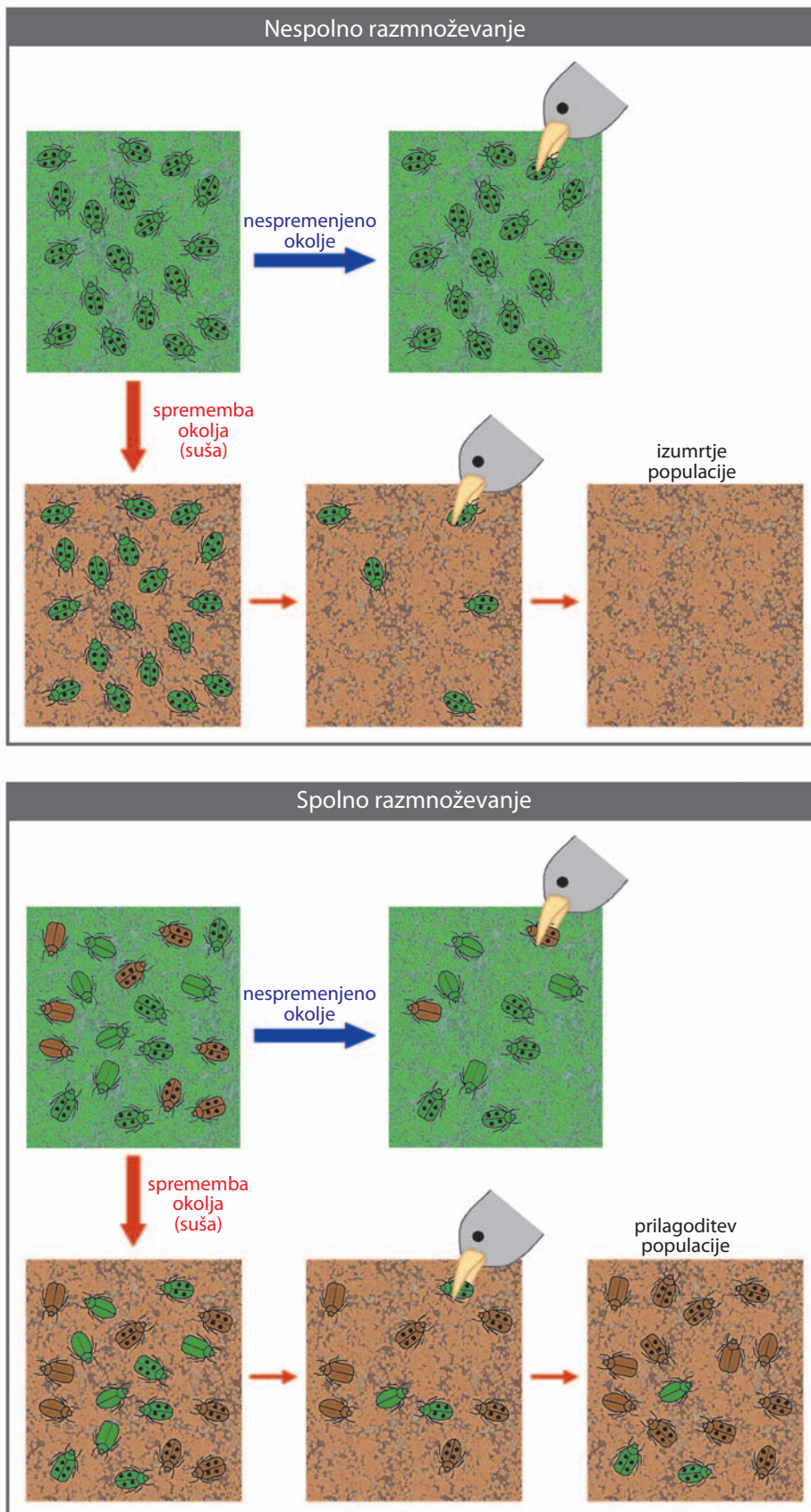
Raziskavo s spuščanjem in ponovnim ulovom označenih brezovih pedicev je Kettlewell izvedel tudi v neonesnaženem gozdu v Dorsetu, kjer je bilo 95 % pedicev svetle barve. Spet je bila polovica izpuščenih označenih pedicev svetlih, polovica pa temnih. Med ponovno ujetimi pedici pa sta bili tokrat dve tretjini osebkov svetli in ena tretjina temna. Tudi v tem primeru so ptice pojedle več slabo prikritih osebkov – temnih pedicev, ki so bili na z lišaji poraščenih deblih in vejah v neonesnaženem gozdu lažje opazni.

Raznolikost osebkov je prednost v spreminjajočem se okolju

Ugotovili smo že, da spolno razmnoževanje prispeva k raznolikosti osebkov v populaciji. Toda osebki vsake vrste, ki v nekem okolju živijo in preživijo, so na svoje okolje dokaj dobro prilagojeni. Ali ne bi bilo potem najbolje, da bi bila naslednja generacija čim bolj podobna njim samim – da bi se razmnoževali izključno nespolno? Zakaj je spolno razmnoževanje tako razširjen pojav?

Pri iskanju odgovora se bomo spet oprli na naš poenostavljeni model populacije – na hrošče. Predstavljajmo si, da na otoku živi populacija zelenih pikastih hroščev, ki se nespolno razmnožuje. Vsi so potomci enega priseljence, ki se je nespolno razmnoževal, zato imajo vsi enak genotip in fenotip (glej sliko 2.8). Na otoku je vlažno podnebje, zato se hrošči pretežno zadržujejo na zeleni podlagi. Zeleni hrošči na zeleni podlagi so slabo opazni za plenilske ptice, ki se prehranjujejo z njimi, zato te najdejo in pojedjo le malo hroščev (**slika 2.15**). Hrošči so torej dobro prilagojeni na svoje trenutno okolje. Toda nato se podnebje spremeni in postane bolj sušno. Podlaga, na kateri se hrošči zadržujejo, je zdaj pretežno rjave barve. Zeleni hrošči so zdaj slabo prilagojeni na spremenjeno okolje, in ker so vsi enaki po genih in izgledu, so tudi vsi zelo lahek plen za ptice. Ptice požrejo vse hrošče na otoku in populacija hroščev izumre.

Zdaj pa razmislimo, kaj se zgodi, če na otoku namesto hroščev, ki se razmnožujejo nespolno, živijo hrošči, ki se razmnožujejo spolno. Zaradi mešanja alelov med spolnim razmnoževanjem so ti hrošči zelo raznoliki (**slika 2.15**; glej tudi sliko 2.9). Med njimi so nekateri bolj, nekateri pa slabše prilagojeni na svoje trenutno okolje, v katerem je podlaga pretežno zelena. Ptice opazijo in pojedjo precej hroščev, zlasti tiste, ki so rjave barve. Zato v vsaki generaciji preživijo in se razmnožujejo predvsem zeleni hrošči, toda ker so nekateri med njimi nosilci recesivnega alela za rjavo barvo telesa (genotip *Bb*), se ta recesivni alel v populaciji ohranja in v naslednji generaciji je nekaj hroščev spet rjave barve. Ugotovimo lahko, da bi bili na vlažnem otoku »nespolni« hrošči v prednosti pred »spolnimi«. Spolno razmnoževanje se v nespremenljivem, stabilnem okolju ne »splača«.



Slika 2.15: Nespolno in spolno razmnoževanje. Pri nespolnem razmnoževanju (**zgoraj**) so vsi potomci enaki in dokaj dobro prilagojeni na okolje. Toda ob spremembi okolja lahko celotna populacija izumre. Pri spolnem razmnoževanju (**spodaj**) nastajajo raznoliki potomci – mnogi med njimi niso dobro prilagojeni na dano okolje in le redki preživijo. Toda ob spremembi okolja imajo vsaj nekateri osebki možnost, da preživijo. Pogostost alelov v genskem skladu se postopoma, skozi generacije, spreminja – populacija se evolucijsko prilagodi na novo okolje. Glej tudi sliki 2.8 in 2.9.

Kaj pa se zgodi s populacijo »spolnih« hroščev, ko postane podnebje bolj suho – bo tudi ta izumrla tako kot »nespolni« hrošči? Ob spremembi okolja je populacija, ki ima bolj raznolike osebke (zaradi spolnega razmnoževanja) v prednosti. Na rjavi podlagi so zdaj sicer zeleni hrošči dobro opazni za ptice. Toda ker so osebki zelo raznoliki, obstaja možnost, da bodo vsaj nekateri preživeli – da so nekateri dobro prilagojeni na spremenjeno okolje. V našem primeru imajo v suhem podnebnju večjo verjetnost za preživetje in razmnoževanje rjavi hrošči, ki so bili v vlažnem okolju na slabšem kot zeleni. Potomci v novi generaciji bodo večinoma rjave barve (**slika 2.15**). Pogostost alelov v populaciji se bo spremenila – populacija se bo postopno evolucijsko prilagodila na nove razmere v okolju.

Ugotovili smo, da se spolno razmnoževanje ne spleča, če se okolje ne spreminja. Toda okolje v naravnih ekosistemih se ves čas spreminja, včasih hitreje, včasih počasneje. Pri tem ne gre le za spremembe neživih dejavnikov okolja (na primer podnebne razmere), temveč predvsem za spremembe živih dejavnikov (na primer priselitev novega plenilca ali novega povzročitelja bolezni). In ker se okolje stalno spreminja, se spolno razmnoževanje vendarle spleča, saj raznolikost osebkov zagotavlja večjo verjetnost za dolgoročno preživetje populacije. Zato je spolno razmnoževanje splošno razširjeno. Povedano drugače: vrste, ki se razmnožujejo samo nespolno, so v večji nevarnosti za izumrtje, zato skozi dolga obdobja, skozi mnoge generacije, preživi več vrst s spolnim razmnoževanjem.

Vendar v naravi obstajajo tudi vrste, ki se razmnožujejo nespolno, predvsem takšne, ki imajo poleg spolnega razmnoževanja tudi nespolno. Med živalmi je primer takšne vrste zeleni trdoživ, med rastlinami pa navadni jagodnjak (bolj znan pod imenom »divja jagoda«). Ali to pomeni, da ima nespolno razmnoževanje tudi kakšne prednosti?

Nespolno razmnoževanje omogoča pritrjenim organizmom in osebkom, ki živijo v izolaciji (daleč od drugih osebkov svoje vrste), da se razmnožijo, tudi če nimajo spolnega partnerja. Poleg tega lahko z nespolnim razmnoževanjem dokaj hitro nastane veliko osebkov, brez trošenja snovi in energije za potratno proizvajanje spolnih celic in parjenje. Hitro proizvajanje genetsko enakih novih osebkov, ki so vsi dobro prilagojeni na trenutno okolje, lahko na primer neki živalski vrsti omogoči, da se njene populacije v ugodnih razmerah hitro povečujejo in izkoristijo naravne vire, ki so na voljo.

Kot smo že omenili, ima spolno razmnoževanje prednosti zaradi spreminjajočega se okolja. Vendar ima tudi slabosti. Že samo razmnoževanje je dokaj potratno s snovjo in energijo (proizvajanje spolnih celic, parjenje). Poleg tega pa je večina raznolikih potomcev slabše prilagojena na okolje kot njihovi starši, zato imajo dokaj majhne možnosti za preživetje in razmnoževanje.

Pri opisovanju naravnega izbora pogosto uporabljamo izraze »boj za obstanek« in »preživetje najuspešnejših« ali celo »preživetje najmočnejših«. Ti izrazi so lahko zavajajoči, če si predstavljamo, da osebki neposredno tekmujejo med seboj. Pri nekaterih vrstah se to sicer dejansko dogaja; samci nekaterih vrst se na primer med seboj bojujejo za pravico do parjenja. A večinoma »boj« oziroma zagotavljanje uspešnosti pri razmnoževanju poteka bolj prikrito in pasivno. Uspešnost osebka je odvisna od več dejavnikov, ne le od uspešnosti v bitkah s sovrstniki. Pomembno je na primer, da zbereš večje zaloge hrane kot drugi in zato lahko izležeš večje število jajc. Važno je, da se tvoja varovalna barva bolje ujema z barvo okolja in tako uspeš preživeti dlje od drugih osebkov, zato lahko zaplodiš več potomcev. Koristno je, da se znaš bolj neopazno prikrasti v bližino plena in ga uspešno uloviti ter s tem zagotoviti, da so tvoji mladiči nahranjeni in zdravi. Ali da znaš povzročiti, da gostitelj, ki ga pravkar zajedaš, spreminja barvo in se ne skriva pred pticami, ki so tvoj drugi gostitelj – tako prej prideš v drugega gostitelja in proizvedeš več potomcev.

Naravni izbor torej izbira med fenotipi, ki jih določajo genotipi, in na ta način prihaja do sprememb pogostosti genotipov in alelov v populaciji. Zavedati pa se moramo, da naravni izbor ne deluje na posamezne gene, ampak na osebek kot celoto. Osebek je tisti, ki preživi ali pa ne. Geni, ki trenutno sestavljajo genotip nekega osebka, morajo med sabo uspešno sodelovati, podobno kot športna ekipa. Tako rastlinojedcu z dolgim črevesom s simbiotskimi mikroorganizmi odlično zversko zobovje ne bo koristilo, prej nasprotno.

Zanimivost**Spolno razmnoževanje dvospolnikov**

Prednost spolnega razmnoževanja je nedvomna. Spolsta pri večini živali in pri številnih rastlinah fizično ločena in osebki se ne more pariti sam s seboj. Tako se zelo poveča raznolikost osebkov v populaciji. Kaj pa dvospolniki? Tudi ti se večinoma ne parijo sami s seboj. Dvospolnik je na primer veliki vrtni polž. Med spolnim razmnoževanjem si dva osebka izmenjata spolne celice (slika 2.16). Enako velja tudi za deževnike.



Slika 2.16: Velika vrtna polža med parjenjem

Zanimivost**Križanje čistokrvnih živali**

A tudi pri spolnem razmnoževanju so lahko vsi potomci zelo podobni staršem in so si vsi enaki med seboj; take primere poznamo pri križanju čistokrvnih domačih živali. Če se namreč med sabo parijo homozigotni osebki, torej osebki z dvema enakima zapisoma za neko lastnost, bodo njihovi potomci v tej lastnosti enaki; skupino takih genetsko enakih potomcev imenujemo čista linija. Pri psih mešancih ne moremo predvideti, kakšni bodo njihovi mladički, pri mladičih čistokrvnih pasemskih psov, ki so za večino lastnosti homozigotni, pa presenečenj ne more biti.

▼ Dodatek za maturo ▼

Glej poglavje 6.2 Naravni izbor spreminja raznolikost v populaciji na tri načine.

Spolni izbor vodi v evolucijo sekundarnih spolnih znakov, ki osebkom omogočajo prednost pri parjenju

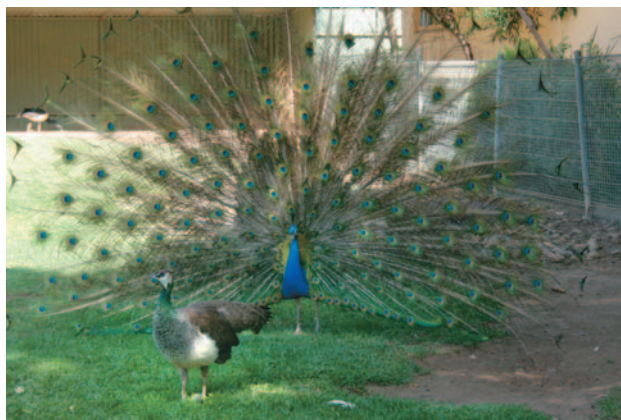
Doslej smo govorili o izboru lastnosti, ki osebkom povečajo verjetnost preživetja. Kaj pa lastnosti, ki živalim na prvi pogled škodijo? Pav ima na primer dolg in košat rep, zaradi katerega težko leti; samica pava pa ima rep, s katerim gotovo bolje leta od samca (slika 2.17). Race mlakarice so rjave ali sive, njihovi samčki pa so živo pisani (slika 2.18). Kako to, da naravni izbor ne »kaznuje« lastnikov dolgih repov in pisanega perja, saj jih plenilci gotovo prej opazijo in lažje ulovijo?

Veliko razliko v videzu med samci in samicami imenujemo **spolna dvoličnost**. Razlog za nastajanje in ohranjanje takšnih lastnosti, ki jim pravimo sekundarni spolni znaki, je **spolni izbor** – posebna oblika naravnega izbora.

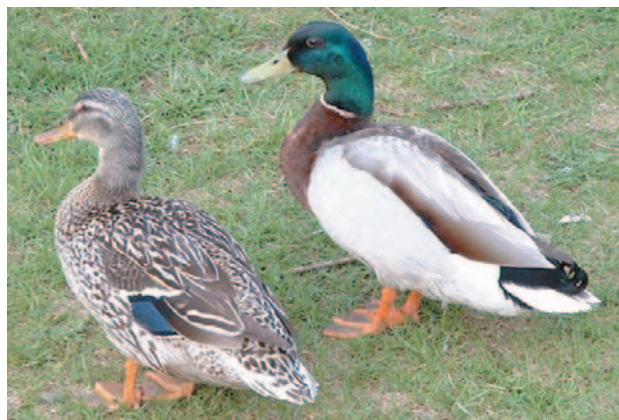
Določene lastnosti so na primer lahko »všeč« samicam in po njih izbirajo svoje spolne partnerje. Če samice izbirajo svoje partnerje po videzu, potem nepriljubljenemu samcu prav nič ne koristi, da mu je uspelo pobegniti pred plenilci in preživeti. Če ga samica ne bo izbrala za parjenje, se pač ne bo mogel razmnožiti in prenesti svojih genov v naslednji rod.

Takšne nenavadne lastnosti, kot je velik, živo obarvan pavji rep, gotovo niso koristne za preživetje. Toda če samice izbirajo za parjenje tiste samce, ki imajo takšne znake zelo poudarjene, potem s tem povečujejo njihov uspeh pri razmnoževanju. Skozi generacije postajajo tovrstni znaki vse bolj izraziti in v genskem skladu populacije se povečuje pogostost alelov, ki te znake določajo (glej rubriko *Raziskovanje življenja R 2.1: Evolucijski poskus v naravi*).

S spolnim izborom evolucijsko nastajajo tudi različne oblike vedenja ob dvorjenju med nasprotnima spoloma in borilno vedenje med samci ob parjenju, pa tudi njihovi rogovi in podobni dodatki, ki služijo postavljanju ali celo dejanskemu boju med samci za samice.



Slika 2.17: Pavji samec s samico. Pri pavih je izrazito izražena spolna dvoličnost.

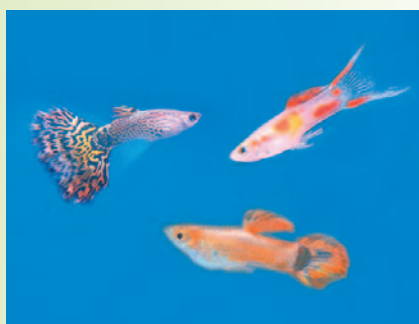


Slika 2.18: Raca mlakarica. Tudi pri raci mlakarici lahko že na prvi pogled ločimo samca od samice.

Raziskovanje življenja

R 2.1 Evolucijski poskus v naravi

V sedemdesetih letih 20. stoletja je John Endler, evolucijski biolog z Univerze v Princetonu v ZDA, več let preučeval naravne populacije majhnih rib gupijev (*Poecilia reticulata*; **slika 2.19**) v porečju reke Aripo na karibskem otoku Trinidad.



Slika 2.19: Gupiji (*Poecilia reticulata*) so zaradi raznolike obarvanosti priljubljena akvarijska ribica. Vzorce obarvanosti določa več genov.

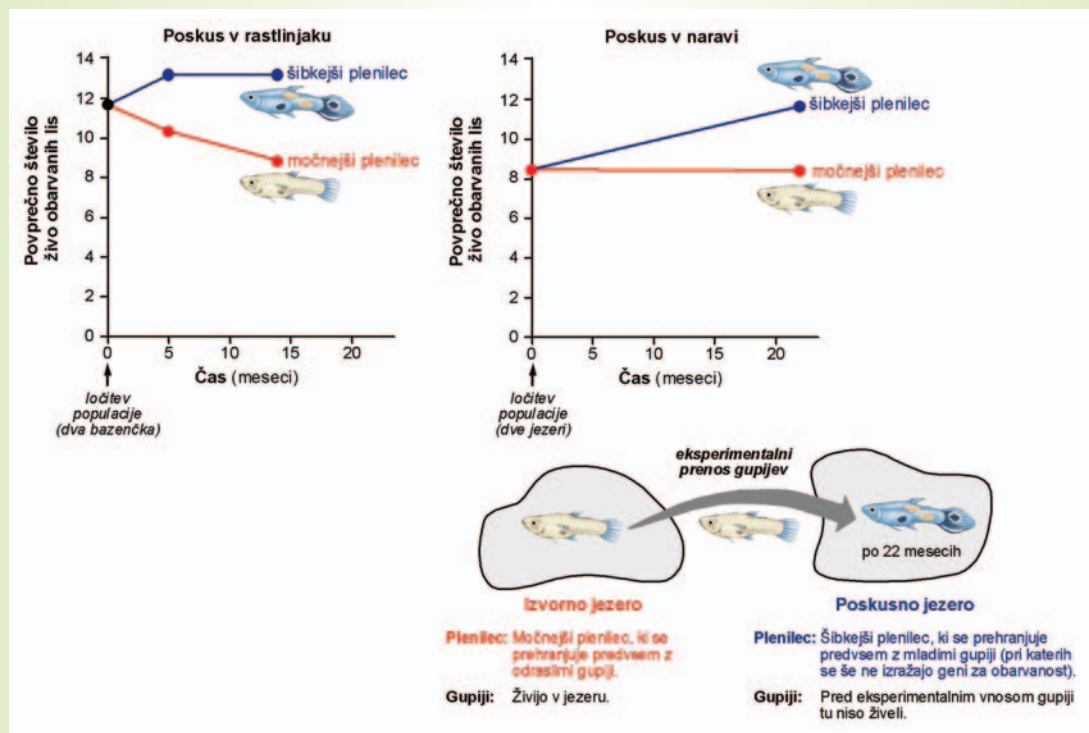
V porečju je veliko sladkovodnih jezerc in tolmunov, ki so med seboj ločeni z visokimi slapovi. Endler je ugotovil, da so odrasli samci gupijev v ločenih jezerih zelo različno obarvani. Lahko so bolj nevpadljivih barv ali pa imajo po telesu živobarvne lise. Živa obarvanost se izrazi samo pri odraslih samcih – mladi samci, mlade samice in odrasle samice so nevpadljivo obarvani. Odrasle samice živo obarvane samce pogosteje izberejo za partnerje pri spolnem razmnoževanju kot nevpadljivo obarvane samce.

Endler je ugotovil, da v različnih ločenih jezerih živijo različne združbe ribjih vrst. V nekaterih jezerih živijo gupiji skupaj z več vrstami svojih plenilcev, v nekaterih jezerih živijo gupiji skupaj s samo enim plenilcem, v nekaterih jezerih pa gupijev sploh ni. Opazil je, da so v jezerih s šibkejšimi plenilci gupiji bolj živo obarvani kot v jezerih z močnejšimi plenilci.

Na temelju tega opažanja je Endler postavil hipotezo, da je različna obarvanost samcev gupijev posledica naravnega izbora – vpliva selekcijskega pritiska plenilcev in spolnega izbora. V jezerih s hudimi plenilci, ki se prehranjujejo tudi z odraslimi gupiji, imajo živo obarvani samci majhno verjetnost za preživetje do obdobja razmnoževanja, ker so za plenilce zelo opazni. Zato imajo v prisotnosti močnejših plenilcev prednost pri preživetju in razmnoževanju manj obarvani samci – v teh jezerih je najpomembnejši selekcijski dejavnik *plenilstvo*. Če pa so v jezeru šibkejši plenilci, ki se hranijo predvsem z mladimi gupiji, pri katerih živa obarvanost še ni izražena, pa je najpomembnejši selekcijski dejavnik *spolni izbor* – prednost pri razmnoževanju imajo živo obarvani samci, ki jih samice raje izbirajo za partnerje pri parjenju kot nevpadljive samce.

Endler je veljavnost svoje hipoteze najprej preizkusil v laboratorijskih razmerah. V rastlinjaku je zgradil bazenčke, podobne jezerom na Trinidadu. Populacijo gupijev s srednje živo obarvanimi samci je razdelil v dva bazenčka. V prvi bazenček je dodal nekaj močnejših plenilcev gupijev – ščukastih ostržnikov (*Crenicichla alta*), ki se prehranjujejo predvsem z odraslimi gupiji. V drugi bazenček pa je dodal nekaj šibkejših plenilcev gupijev – Hartovih rivulusov (*Rivulus hartii*), ki so vsejedi, so manjši od ščukastih ostržnikov in se prehranjujejo predvsem z mladimi gupiji, pri katerih se še ne izrazi živa obarvanost.

Gupiji so se v bazenčkih razmnoževali. Po času več generacij je Endler gupije ulovil ter pri samcih preštel lise različnih barv in izmeril njihovo površino. Po meritvi je samce vrnil v bazen. Ugotovil je, da so v bazenčku s šibkejšimi plenilci, ki so lovili samo mlade gupije, samci gupijev postopno postajali še bolj živo pisani, saj so takšne samce samice raje izbirale za parjenje. V bazenčkih z močnejšimi plenilci, ki so se prehranjevali tudi z odraslimi gupiji, pa so samci postopno postajali bolj nevpadljivo obarvani (**slika 2.20**). Ti rezultati podpirajo hipotezo o naravnem izboru vzorca obarvanosti.



Slika 2.20: Endlerjev poskus. Tako v laboratorijskih razmerah kot v naravi se zaradi naravnega izbora skozi generacije spreminja obarvanost samcev gupijev.

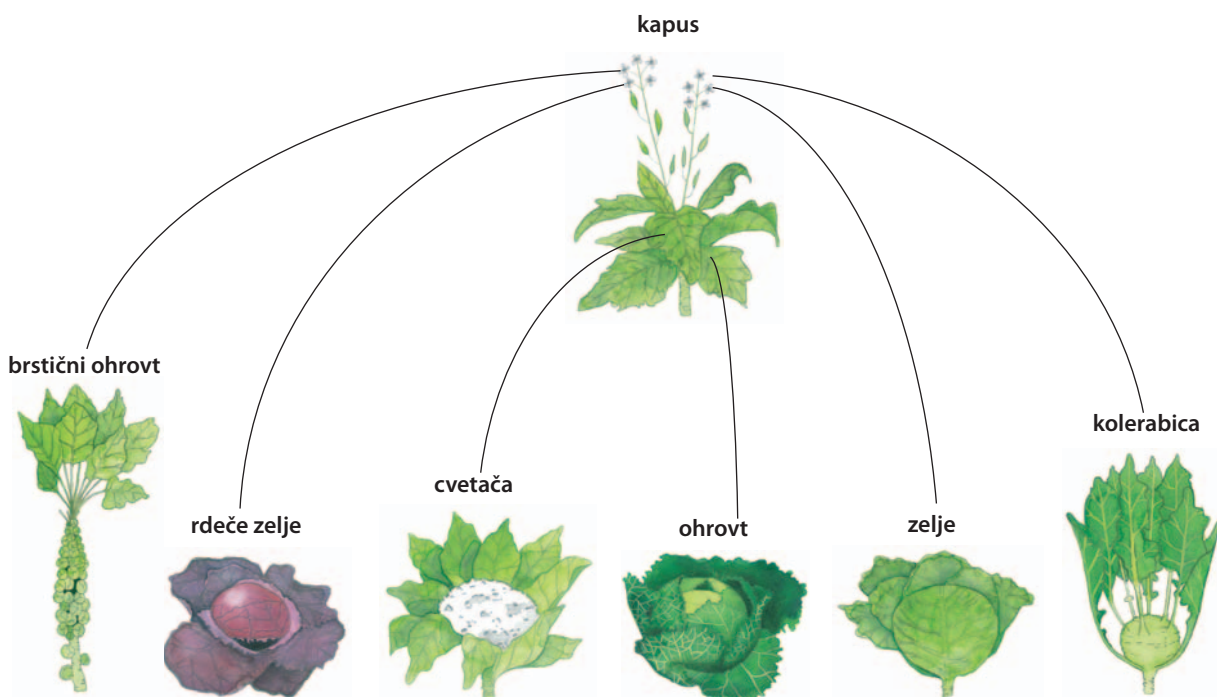
Endler je podoben poskus izvedel tudi v naravi. Julija leta 1976 je 200 gupijev (samcev in samic) prenesel iz jezera, v katerem so skupaj živeli gupiji in močnejši plenilci, v jezero, v katerem so živeli samo šibkejši plenilci, gupiji pa ne (**slika 2.20**). 22 mesecev kasneje, maja leta 1978, je iz jezer izlovil določeno število odraslih samcev gupijev ter preštel število živo obarvanih lis in izmeril njihovo površino. Ugotovil je, da so v obdobju 22 mesecev, kar ustreza približno 15 generacijam gupijev, samci po prenosu iz jezera z močnejšimi plenilci v jezero s šibkejšimi plenilci postali bolj živo obarvani. To je bil dodaten dokaz za veljavnost njegove hipoteze, da je vzorec obarvanosti samcev posledica naravnega izbora – soigre selekcijskega pritiska plenilcev in spolnega izbora zaradi prednostnega izbiranja živo obarvanih samcev za parjenje.

Človek z umetnim izborom izbira organizme s sebi koristnimi lastnostmi

Na enak način kot naravni poteka tudi **umetni izbor** ali umetna selekcija. Drugače je le to, da o preživetju in razmnoževanju osebkov ne odloča okolje, ampak človek, ki je pri svojih izbirah veliko doslednejši. Zato je umetni izbor v večini primerov občutno hitrejši od naravnega.

Vse pasme psov je na primer človek vzgojil iz skupnega prednika volka v le nekaj tisoč letih. Pri vsaki generaciji je človek odbiral mladiče z najbolj všečnimi lastnostmi. Človeku je uspelo vzrediti psa pasme čivava iz volčjega prednika v deset tisočkrat krajšem času, kot je z naravnim izborom potekal razvoj volka iz žužkojede ga prednika čivavine velikosti, ki je živel v času izumrtja dinosavrov.

Podobno je potekal razvoj kulturnih rastlin, ki smo jim z umetnim izborom v nekaj tisoč letih povečali semena, plodove, liste ali druge uporabne dele, odstranili iz njih neželene spojine, povečali njihovo hranilno vrednost itd. (**slika 2.21**).



Slika 2.21: Umetni izbor. Vse prikazane oblike zelenjave so naši predniki vzgojili z umetnim izborom iz enega samega prednika, kapusa (*Brassica oleracea*). Pri različnih sortah jemo različne dele rastline: liste, brste, cvetove, gomolje.

Dodatek za maturo

Glej poglavje 6.3 *Genski sklad populacije spreminjajo tudi mutacije, migracije in naključni genetski premik.*

Preveri, kaj znaš

1. Nekatere lastnosti se v evoluciji lahko spremenijo hitro (na primer obarvanost brezovega pedica), nekatere pa se spreminjajo zelo počasi (na primer oblika lista ginka – glej sliko 5.17). Kaj je lahko vzrok za različno hitrost evolucije?
2. Navedi in razloži nekaj primerov spreminjanja populacij zaradi naravnega izbora, ki so jih opazovali, raziskali in dokumentirali znanstveniki.
3. Razloži, zakaj različni pesticidi sprva uspešno pobijejo večino »škodljivcev«, nato pa postajajo vse manj učinkoviti.
4. Razloži, kakšne so prednosti in slabosti nespolnega in spolnega razmnoževanja.
5. Morski pes zasleduje jato cipljev. Med begom cipelj z najkrajšo repno plavutjo obnemore; morski pes ga dohiti in požre.
Kateri organizmi v tej zgodbi vršijo naravni izbor?
Med katerimi organizmi poteka boj za obstanek?
Navkljub morskim psom se število cipljev v morju skozi desetletja ne zmanjša. Razloži, zakaj.
Morski psi dolgoročno vplivajo na spreminjanje nekaterih lastnosti cipljev. Katera lastnost je lahko takšna glede na skope podatke v zgodbi?
6. Razloži, kako v evolucijskem razvoju nastajajo in se ohranjajo lastnosti živali, ki zmanjšujejo njihovo verjetnost za preživetje, kakršen je pavji rep ali živa obarvanost perja pri različnih vrstah ptic.
7. Razloži, zakaj je umetni izbor mnogo hitrejši od naravnega.

Povzetek

Genski sklad predstavljajo vsi aleli neke populacije v danem trenutku. Genski skladi različnih populacij iste vrste se lahko razlikujejo po številu različnih alelov in po njihovi pogostosti, skozi čas pa se pogostost alelov v populaciji večinoma tudi spreminja. Iz genskega sklada prejme svoje gene naslednja generacija. Pri populaciji, ki se evolucijsko razvija, se spreminja pogostost alelov v genskem skladu. Naravni izbor lahko povzroči spremembo pogostosti alelov v genskem skladu populacije in s tem evolucijski razvoj populacije.

Osnova naravnega izbora je različna uspešnost osebkov pri razmnoževanju. Znanstveniki so že velikokrat opazovali, raziskali in dokumentirali naravni izbor v teku, na primer med evolucijskim razvojem odpornosti na pesticide pri žuželkah.

Nespolno razmnoževanje, pri katerem nastajajo osebki z enakim genotipom in fenotipom, kot ga imajo starši, ima prednost v stabilnem okolju. Spolno razmnoževanje, pri katerem nastajajo osebki z različnimi genotipi in fenotipi, pa ima prednost v spreminjajočem se okolju. Ker se okolje stalno spreminja, so vrste, ki se razmnožujejo samo nespolno, v večji nevarnosti za izumrtje. Raznolikost osebkov, ki nastaja med spolnim razmnoževanjem, zagotavlja večjo verjetnost za dolgoročno preživetje populacije v spreminjajočem se okolju.

Spolni izbor pri živalih vodi v evolucijo sekundarnih spolnih znakov in posebnih vzorcev vedenja, ki osebkom omogočajo prednost pri parjenju

Človek z umetnim izborom izbira organizme s sebi koristnimi lastnostmi. Umetni izbor deluje na enak način kot naravni, a je zaradi doslednosti človeka pri izbiranju praviloma mnogo hitrejši.

2.6 Prilagoditev na okolje je posledica naravnega izbora

Naravni izbor je edini od dejavnikov, ki povzročajo spreminjanje genskega sklada populacij in s tem njihov evolucijski razvoj, ki vodi v postopno nastajanje prilagoditev ali adaptacij.

Prilagoditev je vsaka lastnost, ki poveča verjetnost organizma za preživetje in razmnoževanje v danem okolju. Ta lastnost je lahko oblika ali barva telesa, potek procesa v celici ali način vedenja; vse to lahko vpliva na uspešnost preživetja. Prilagoditve se razvijajo postopoma, z mutacijami in prek delovanja naravnega izbora, ki veča pogostost koristnih alelov v populaciji. Organizmi se vse bolj prilagajajo svojemu okolju, a okolje se spreminja. Tako je popolna prilagojenost osebkov »cilj«, ki se populacijam ves čas odmika, saj se okolje nenehno spreminja, evolucija pa je dinamičen proces brez konca.

Zanimivost

Vsi organizmi se evolucijsko prilagajajo

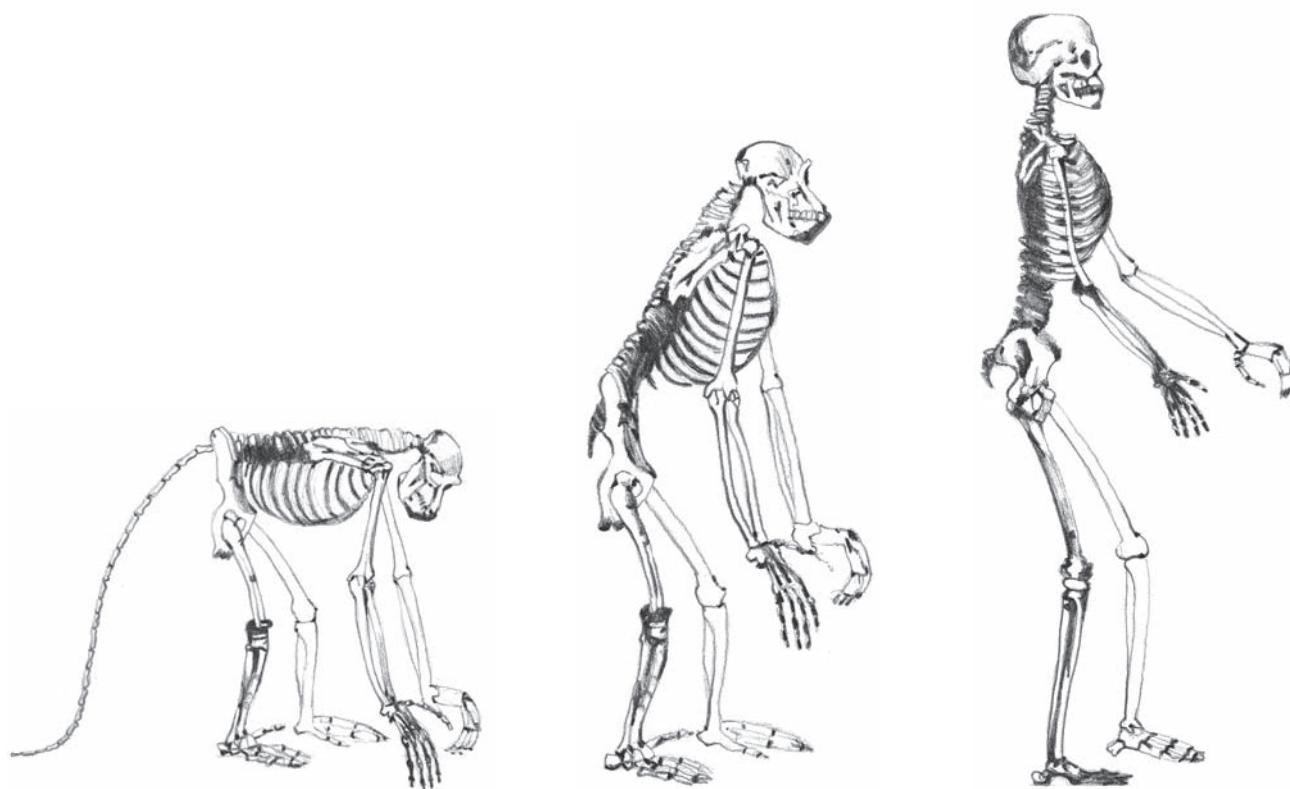
Vsi danes živeči organizmi smo se evolucijsko razvijali enako dolgo – od skupnega prednika pa do danes. Zato je izjava, da je nek organizem bolj razvit od drugega, vprašljiva; različne vrste smo se le prilagodile različnim okoljem in načinom življenja. Tako ljudje sicer lahko rešujemo kompleksne probleme, ne moremo pa opravljati fotosinteze kot marjetica ali preživeti v nekaj kapljah vode kot paramecij. Vsi danes živeči organizmi imamo neprekinjeno verigo prednikov, od skupnega prednika pa do danes, in vsi ti predniki so se uspešno razmnožili. Zato lahko ugotovimo, da so se predniki vseh danes živečih populacij oziroma vrst ves čas evolucijske zgodovine uspešno prilagajali – tako v evolucijski liniji človeka kot paramecija.

Prilagoditve se razvijajo postopoma iz prej obstoječih lastnosti

Organizmi kljub nenehnemu spreminjanju svojih lastnosti zaradi evolucijskega prilagajanja na okolje niso popolni. Razlogov za to je več.

Evolucija ne oblikuje lastnosti od začetka, ampak spreminja obstoječe. Tako bi tehnik, ki bi načrtoval dvonožnega robota, za osnovo ogrodja verjetno uporabil ravno strukturo in ne dvakrat zavite, kakršna je naša hrbtenica. A evolucija je bila omejena s preteklostjo; naši štirinožni predniki so imeli usločeno hrbtenico, na pol vzravnanu prvaki (primati) so imeli dodaten zavoj nazaj, nam pa je evolucija dodala še zavoj naprej (**slika 2.22**). Če pomislimo na išias in podobne težave, ugotovimo, da proizvod evolucije – današnja človekova hrbtenica v obliki dvojnega S – očitno ni idealen, a je dovolj dober za preživetje in uspešno razmnoževanje.

Poleg tega je evolucija pogosto prisiljena v kompromise. Ljudje imamo spretne sprednje oprijemalne okončine, posledica te spretnosti pa so tudi pogosti zvini, natrgane vezi in izpahi. Evolucija je med čvrstostjo in gibčnostjo »izbrala« drugo.



Slika 2.22: Evolucijski razvoj hrbtenice. Naši štirinožni predniki so imeli usločeno hrbtenico, na pol vzravnani primati imajo dodaten zavoj nazaj, nam pa je evolucija dodala še zavoj naprej.

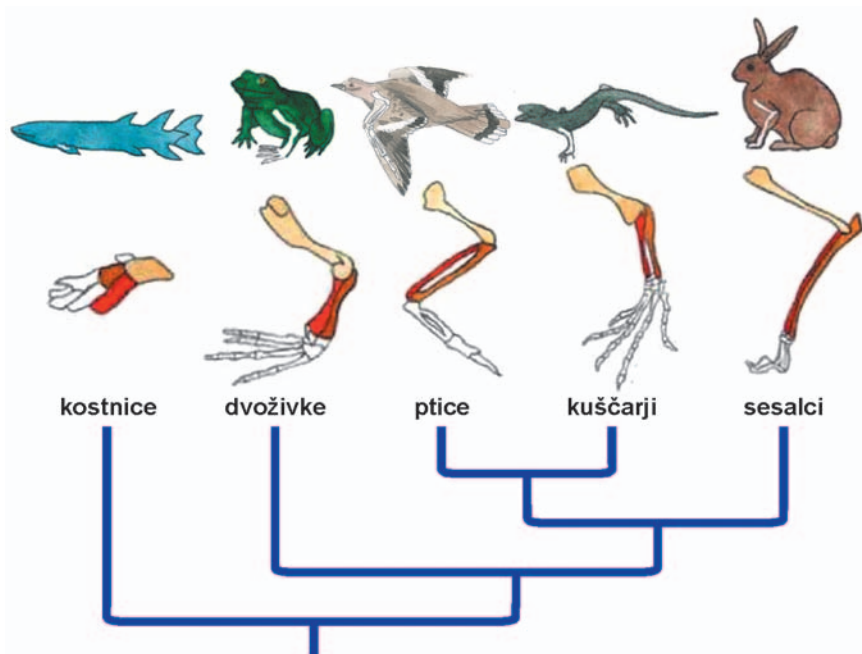
Divergenca

V procesu evolucije so se iz skupnega prednika postopno razvijale različne vrste – drevo življenja se je postopno cepilo na nove in nove veje. Nove vrste so podedovale in ohranile nekatere lastnosti prednikov, zaradi postopnega evolucijskega prilagajanja na različna okolja pa so postopno pridobile tudi nove lastnosti. Pri tem so nove lastnosti nastajale s postopnim spreminjanjem obstoječih. Evolucijsko bolj sorodne vrste – vrste, ki imajo nedavnega skupnega prednika – so si med seboj večinoma tudi po videzu in drugih lastnostih bolj podobne. Podobnost zaradi skupnega izvora imenujemo **homologija**.

Istoizvorni ali homologni organi so lahko pri različnih vrstah zelo podobni, lahko pa se zaradi postopnih prilagoditev različnemu okolju tudi razlikujejo. Razvoj, pri katerem se iz homolognih organov razvijejo strukture, ki se med seboj razlikujejo, imenujemo divergenca ali **divergentni razvoj**. Lep primer so listi semenovk: vsi so homologni. Pa naj gre za list hrasta, zvončka, rosike ali ciprese (**slika 2.23**). Tudi okončine vretenčarjev so homologni organi, nastali z divergentnim razvojem (**slika 2.24**).



Slika 2.23: Homolognost listov. Listi semenk (na slikah hrast, zvonček, rosika in cipresa) so različnih oblik, vendar so vsi homologni. Razlike med njimi so posledica divergentnega razvoja.



Slika 2.24: Divergentni razvoj okončin vretenčarjev. Okončine vseh vretenčarjev imajo skupen izvor, a so se razvijale divergentno. Prikazane so prednje okončine. Istoizvorne kosti so označene z isto barvo.

Homologi pa niso le organi, ampak so take lahko tudi molekule. Tako je imel na primer hemoglobin, ki ga najdemo pri vseh sesalcih, že zadnji skupni prednik vseh sesalcev. Hemoglobin je torej homologna lastnost. Zaporedje aminokislin v β -verigi hemoglobina je pri različnih vrstah sesalcev podobno, vendar obstajajo tudi razlike (**slika 2.25**). Prej kot so se vrste v evolucijski zgodovini ločile druga od druge, večje so razlike v zaporedju aminokislin, saj so se v vsaki evolucijski liniji postopno kopičile naključne mutacije v genu za β -verigo hemoglobina, posledice katerih so tudi zamenjave aminokislin. Seveda velja tudi obratno: bolj kot sta si dve vrsti sorodni – bliže v preteklosti ko je živel njun zadnji skupni prednik – manjše so razlike v zaporedju aminokislin. Tovrstne primerjave zaporedij aminokislin v beljakovinah in nukleotidov v DNA znanstveniki uporabljajo za ugotavljanje stopnje sorodnosti med vrstami (glej sliki 6.13 in 6.14).

		Število razlik
Človek	VHLTPEEKSAVTALWGKVVNDEVGGEALGRLLVVYPWTQRRFFESFGDLSTPDAVM...	
Šimpanz	VHLTPEEKSAVTALWGKVVNDEVGGEALGRLLVVYPWTQRRFFESFGDLSTPDAVM...	0
Rezus	VHLTPEEKNAVTTLWGKVVNDEVGGEALGRLLVVYPWTQRRFFESFGDLSSPDAVM...	3
Lemur	TFLTPEENGHVTSLWGKVVNEKVGGEALGRLLVVYPWTQRRFFESFGDLSSPDAIM...	10
Podgana	VHLTDAEKATVSGLWGKVVADNVGAEALGRLLVVYPWTQRYFSKFGDLSSASAIM...	16

Slika 2.25: Del zaporedja aminokislin v β -verigi hemoglobina pri petih vrstah sesalcev. Prikazanih je prvih 55 aminokislin. Šimpanz je najbližji sorodnik človeka, rezus je opica, lemur pa človeku še manj soroden prvak. Zaporedje aminokislin je sicer podobno, a obstajajo tudi razlike med vrstami. Aminokislina, po katerih se β -veriga hemoglobina drugih vrst razlikuje od človeške, so obarvani rdeče. Na desni strani je zapisano število aminokislin, po katerih se β -veriga hemoglobina drugih vrst razlikuje od človeške. Čim bolj nedaven je zadnji skupni prednik človeka in druge vrste, manjše so razlike v zaporedju aminokislin. Človek in šimpanz imata povsem enako zaporedje aminokislin v β -verigi hemoglobina. Glej tudi sliki 6.13 in 6.14.

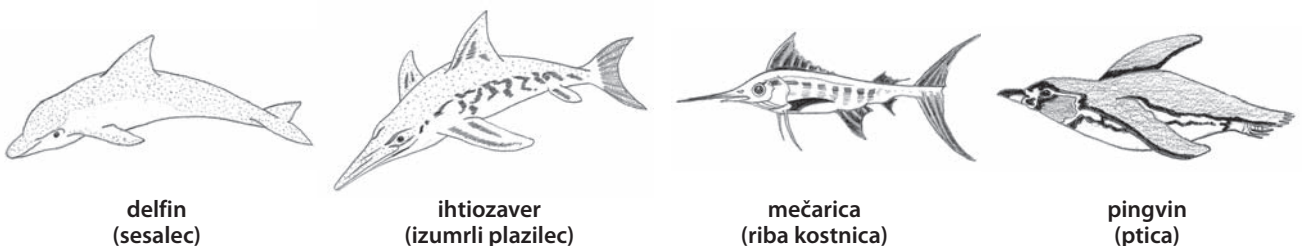
Oznake aminokislin (po mednarodnem dogovoru): A – alanin, C – cistein, D – aspartat, E – glutamat, F – fenilalanin, G – glicin, H – histidin, I – izolevcin, K – lizin, L – levцин, M – metionin, N – asparagin, P – prolin, Q – glutamin, R – arginin, S – serin, T – treonin, V – valin, W – triptofan, Y – tirozin

Zanimivost**Gen, ki usmerja razvoj očesa**

Nekaj mesecev pred tvojim rojstvom se je aktiviral gen z imenom *Pax-6* in sodeloval pri razvoju tvojega očesa. A tega gena ne najdemo samo pri ljudeh; isti gen opravlja enako nalogo tudi pri drugih sesalcih, pticah, ribah in celo žuželkah. Kopija človeškega gena *Pax-6*, ki so jo vstavili v muho, je sprožila graditev žuželčjega očesa.

Konvergenca

Evolucijsko bolj sorodni organizmi so si tudi bolj podobni po videzu in številnih drugih lastnostih. Vendar pa včasih najdemo *nekatere* podobne lastnosti tudi pri vrstah, ki evolucijsko niso preveč sorodne, živijo pa v podobnem okolju. Temu pojavu pravimo **konvergentni razvoj**. Možne lastnosti, ki se lahko razvijejo kot rešitev določenega problema v določenem okolju, namreč omejujejo fizikalni in kemijski zakoni. Tako imajo, denimo, v vodnem okolju organizmi, ki se hitro gibajo, hidrodinamično obliko (**slika 2.26**).



Slika 2.26: Hidrodinamično oblikovano telo omogoča hitro plavanje. Živali na sliki si po obliki telesa niso podobne zaradi evolucijske sorodnosti, ampak zaradi evolucijske prilagoditve podobnemu načinu življenja.

V procesu konvergentnega razvoja si strukture, ki nimajo skupnega izvora, zaradi prilagajanja na podobne zahteve okolja postajajo vse bolj podobne. Lastnosti, nastale v konvergentnem razvoju, so **analogne lastnosti**.

Primer analognih ali raznoizvornih struktur so tudi bodice pri našem ježu in madagaskarskem malem ježastem tenreku (**slika 2.27**). Vrsti nista v bližnjem sorodstvu, obe pa imata bližnje nebodice sorodnike. Torej so se v evolucijski liniji ježa in v evolucijski liniji ježastega tenreka bodice kot prilagoditev na okolje razvile dvakrat neodvisno.



Slika 2.27: Primer konvergence. Podobenost malega ježastega tenreka (*Echinops telfairi*; levo) in beloprsega ježa (*Erinaceus concolor*; desno) je posledica konvergentnega razvoja.

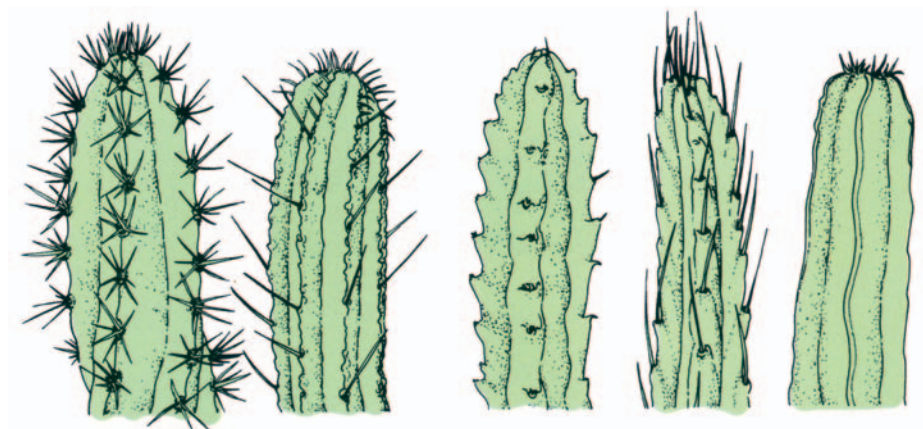
Klešče potočnega raka so analogne kleščam škorpiona, saj so rakove klešče nastale iz prvega para nog, škorpionove pa iz drugega para pipalk. Vitice graha so analogne viticam vinske trte, ker so se pri trti razvile iz stebela, pri grahu pa iz lista. Analogne so tudi škrge rib, ki so nastale kot izrastki sprednjega dela črevesa, in škrge rakov, ki so se razvile kot izrastki okončin. Pri vseh teh primerih gre za iste naloge, a različno zgradbo in različni izvor.

Vse prilagoditve, potrebne za kopanje, so se pri dveh vrstah živali na **sliki 2.28** razvile neodvisno. A naš krt je placentalni sesalec in bolj soroden človeku kot pa avstralskemu krtu vrečaju. Očitno gre za analogijo.



Slika 2.28: Primer konvergence. Navadni krt (*Talpa europea*; **levo**) in avstralski krt vrečar (*Notoryctes typhlops*; **desno**). Vrsti sta si v zelo daljnem sorodstvu, saj je krt vrečar sorodnejši kenguruju kot pa evropskemu krtu. Podobnost je posledica prilagoditvam na podoben način življenja.

Podobno je z bodečimi rastlinskimi predstavniki, ki jih pogosto vseprek imenujemo kaktusi. A se pod tem nepravilnim poimenovanjem skrivajo nesorodni predstavniki, ki so se z mesnatimi stebli, v trne preobraženimi listi in debelo kutikulo prilagodili na življenje v sušnih razmerah (**slika 2.29**). Tudi tu gre za posledico konvergentnega razvoja.



Slika 2.29: Primer konvergence. Sočnice ali sukulenti so rastline, odporne na sušo. Vzrok za podobnost med njimi ni sorodnost, ampak je posledica prilagoditev na podobno okolje. Od leve proti desni si sledijo *Cereus* iz družine kaktusovk, *Euphorbia* iz družine mlečkovk, *Huernia* iz družine svilnovk, *Kleinia* iz družine nebinovk in *Cissus* iz družine vinikovk.

Zanimivost**Naravni izbor kot slepi urar**

Britanski evoliucijski biolog Richard Dawkins je v knjigi *Slepi urar* (1986) napisal naslednje o naravnem izboru: »Naravni izbor je slepi urar. Slepi zato, ker ne vidi predse; ne načrtuje posledic, nima nobenega cilja. A vseeno nam dajejo živi rezultati naravnega izbora vtis o obstoju zavestnega načrta urarskega mojstra. To, da je osnova kompleksnosti žive narave zavesten načrt, je pa le iluzija.«

Progresivnost in regresivnost razvoja

Razvoj organizmov poteka praviloma progresivno, torej od bolj preprostih do bolj kompleksnih oblik. Prve celice, ki so nastale na našem planetu, so bile relativno preproste. V nadaljnjih evoliucijskih spremembah, ki jih bomo še spoznali (glej poglavje 4. *Evolucijska zgodovina življenja na Zemlji*), so organizmi postopno pridobivali kompleksnejšo zgradbo in s tem bolj učinkovito delovanje. A evoliucijski razvoj lahko poteka tudi regresivno – to pomeni, da postajajo kompleksno zgrajeni organizmi v evoliucijskem razvoju preprosteje zgrajeni. To se na primer dogaja, kadar prej prostoživeči organizmi postopno spremenijo način življenja in postanejo na primer notranji zajedavci ali pritrjeni organizmi (sliki 2.30 in 2.31; glej tudi sliko 3.13).

Zajedavcem, ki živijo v notranjosti svojih gostiteljev, nekateri organski sistemi, ki so se njihovim prednikom v prejšnjem načinu življenja dobro razvili, več ne koristijo. Mutacije, zaradi katerih se ti organski sistemi ne razvijejo popolnoma, organizmom zaradi drugačnih zahtev okolja ne škodijo in se zato ohranijo in kopičijo. Pri notranjih zajedavcih in pritrjenih živalih se poenostavita tako mišičje kot živčevje. Prednost v evoliuciji imajo tisti organizmi, ki snov in energijo, privarčevano pri graditvi teh organskih sistemov, porabijo na primer za številčnejše potomstvo. Seveda pa se ne poenostavijo vsi deli organizma.



Slika 2.30: Primer regresivnega razvoja. Pri notranjih zajedavcih, kot na primer pri trakulji na sliki, se je telesna zgradba poenostavila. Predniki trakulj so imeli prebavila, sedaj živeče trakulje pa prebavil nimajo. Po drugi strani pa imajo bolj zapleten način razmnoževanja kot njihovi predniki.



Slika 2.31: Primer regresivnega razvoja. Tudi dvoživka človeška ribica (*Proteus anguinus*) se je s prilagoditvami na življenje v podzemlju telesno poenostavila: zakrnele so ji oči, njen osebni razvoj pa se je ustavil na stopnji ličinke.

Nepovratnost evlucijskega razvoja

»Izumrtje je za zmeraj,« se glasi slogan gibanja za varovanje ogroženih vrst. In kljub temu, da se tega preproste- ga dejstva ne zavedamo popolnoma, je resnično: če ena vrsta izumre, se ne bo nikoli več pojavila, nikoli več ponovila. Čez veliko časa bo njeno vlogo v ekosistemu morda prevzela druga vrsta, ki ji bo mogoče tudi podob- na, a to ne bo ista vrsta.

Enako velja za organe, ki so jih organizmi v preteklosti zaradi selekcijskih pritiskov izgubili – kljub temu, da bi jih pozneje morebiti spet potrebovali, se ne morejo spet pojaviti v enaki obliki. Očitno bi bilo delfinom, pingvi- nom in tjulnom laže dihati s škrgami, ki so jih imeli njihovi daljni predniki, a vmesno obdobje, ki so ga milijoni njihovih prejšnjih generacij preživeli na kopnem, je prineslo svoje. In škrg današnje »vnovič vodne« živali ne morejo dobiti nazaj.

Koevolucija

Koevolucija je medsebojno prilagajanje različnih vrst, pri čemer evlucijska sprememba ene vrste vpliva na evlucijo druge vrste. Vsaka vrsta ima selekcijski vpliv na druge vrste, s katerimi živi v ekosistemu, in se tudi sama razvija glede na pritiske drugih vrst nase. Najlepše primere koevolucije lahko opazujemo pri prilagodi- tvah na odnos med zajedavcem in gostiteljem, med plenom in plenilcem ter med vrstami, ki živijo v sožitju (sliki 2.32 in 2.33). Koevolucija je pomembno gonilo evlucijskega razvoja.

Vrsti si v koevoluciji lahko nasprotujeta. Če se na primer zaradi spremembe zajedavca poveča njegova sposob- nost vstopa v gostitelja, bo to selekcijski pritisk na razvoj gostitelja, ki bo sčasoma razvil nov način obrambe. Ali pa bo, če se gostitelj ne bo uspel prilagoditi, vrsta lahko celo propadla. »Interes« zajedavca pa ni, da bi svo- jemu gostitelju škodil, nasprotno – čim manj mu škodi, dlje časa gostitelj živi in gosti zajedavca, ta pa ima lahko zato več potomcev. Zajedavec torej »želi« svojemu gostitelju dolgo in uspešno življenje. Koevolucija zajedavca in gostitelja zato velikokrat vodi v sožitje.



Slika 2.32: Šiške kot primer koevolucije. Šiške, s katerimi rastline obdajo zajedavca, na primer jajčeca oziroma ličinke žuželk, so se razvile s koevolucijo. Ličinka znotraj šiške dobiva hrano in je varnejša, rastlina pa s šiško zajedavcu prepreči, da bi prodiral globlje v njena tkiva.



Slika 2.33: Koevolucija kritosemenk in žuželk. Zaradi koevolucije z žuželkami so se pri žužkocvetnih kritosemenkah razvili lepo obarvani in dišeči cvetovi z medicino, pri čebelah pa so se zaradi koevolucije z žužkocvetnimi kritosemenkami razvile naprave za učinkovitejši prenos peloda. Glej tudi sliko 5.19.

Relativna koristnost prilagoditev

Iz vsega napisanega nam je jasno, da evlucijski razvoj ni nek »načrten« proces, ampak le izbiranje med obstoječimi razlikami; koristne lastnosti se v večji meri prenesejo na potomce. Izbira, ki je bila nekoč najboljša, se kot taka ne izkaže nujno tudi v spremenjenem okolju. O tem smo že govorili (glej sliki 2.13 in 2.15).

Ko se ponoči mlade morske želvice izležejo na peščenih plažah, morajo čim hitreje doseči zavetje morja. Kako vedo, v kateri smeri je morje? Dedni zapis jim narekuje: »Usmeri se proti najsvetlejšemu delu obzorja.« Tega v nočni temi ustvarja odsev zvezd in lune na morju. In tak način orientacije je uspešno deloval dolga obdobja. Dokler se ni pojavila sprememba v okolju: človek ponoči umetno razsvetljuje restavracije in ta svetloba je močnejša od tiste, ki jo na morju ustvarjajo nebesna telesa. In ker so restavracije na drugi strani izleženih želv kot morje, te hitijo v napačno smer.

Podobna je zgodba o žuželkah, ki se ponoči usmerjajo k lučem in svečam. Če hočejo leteti v isti smeri, si izberejo svetlo točko (v preteklosti so bila na voljo le nebesna telesa) in vzdržujejo stalen kot med smerjo leta in to točko, na primer 90° . Ker je nebesno telo za orientacijske potrebe žuželk praktično neskončno daleč, se kot med luno in smerjo žuželkinega leta z opravljeno potjo ne spreminja. Drugače je, če si žuželka za svetlo točko izbere svečo ali električno luč. Ker je ta neprimerno bliže, se ob letu naravnost kot med smerjo leta in lučko ves čas spreminja. Žuželka, ki hoče ohraniti kot vseskozi enak, zato zavija proti viru svetlobe.

SLOVARČEK

progresiven razvoj – napreden razvoj; razvoj, pri katerem se iz bolj preprostih razvijejo kompleksnejše strukture

regresiven razvoj – nazadnjaški razvoj; razvoj, pri katerem se kompleksnejše strukture poenostavijo

analogne strukture – podobne strukture različnega nastanka in zgradbe; nastajajo s konvergentnim razvojem

homologne strukture – strukture s skupnim izvorom, ki se zaradi različnih nalog in divergentnega razvoja med seboj razlikujejo

divergenten razvoj – razvoj, pri katerem istoizvorne strukture postajajo vedno bolj različne

konvergenten razvoj – razvoj, pri katerem strukture različnega izvora postajajo vedno bolj podobne

Preveri, kaj znaš

1. Pingvini, delfini in morski psi imajo podobno obliko telesa, čeprav evlucijsko niso zelo sorodni. Razloži, zakaj.
2. Regresiven razvoj je običajno posledica evlucijske prilagoditve na določene načine življenja. Na katere? Za vsak način navedi primer.
3. Ali se lahko homologni (istoizvorni) organi v delovanju razlikujejo? Razloži in navedi primer.
4. Kaj je koevolucija? Navedi in razloži nekaj primerov koevolucije.

Povzetek

Naravni izbor je edini od dejavnikov, ki povzročajo spreminjanje genskega sklada populacij in s tem njihov evlucijski razvoj, ki vodi v postopno nastajanje prilagoditev. Prilagoditve so lastnosti, ki osebkcu povečajo sposobnost preživetja in razmnoževanja v danem okolju. Razvijajo se postopoma prek naravnega izbora, s spreminjanjem zgradbe in delovanja prej obstoječih struktur.

Evolucijsko bolj sorodne vrste – vrste, ki imajo nedavnega skupnega prednika – so si med seboj večinoma tudi po videzu in drugih lastnostih bolj podobne. Istoizvorni organi so lahko pri različnih vrstah zelo podobni, lahko pa se zaradi postopnih prilagoditev različnemu okolju tudi razlikujejo. V nekaterih primerih imajo nekaj podobnih lastnosti tudi vrste, ki evlucijsko niso zelo sorodne, živijo pa v podobnem okolju in imajo podoben način življenja. Evlucijski razvoj organizmov praviloma poteka od bolj preprostih oblik k bolj kompleksnim, toda ob spremembi načina življenja se lahko lastnosti v evlucijskem razvoju tudi poenostavljajo.

Tako enotnost kot raznolikost organizmov je posledica evlucije: enotnost je posledica skupnega izvora, raznolikost pa postopnega evlucijskega spreminjanja ob prilagajanju na različna okolja in načine življenja.