

5. BIOLOGICKÉ HODINY A ORIENTACE ŽIVOČICHŮ

5.1. Biologické hodiny

Živé organismy - ať již rostliny či živočichové - se vyznačují smyslem pro čas, což zahrnuje jak schopnost měřit časové intervaly, tak i schopnost orientovat se v místním či univerzálním čase. To předpokládá, že organismus buď umí využívat nějakou vnější časomíru, např. Slunce, nebo přítomnost biologických (endogenních) hodin, lokalizovaných přímo v organismu. Postupně byly nashromážděny doklady o obou těchto schopnostech organismů, které živočichům umožňují, jako výsledek dlouhého vývoje, i orientaci a navigaci v prostoru.

Biologické hodiny jsou pro organismy důležité, protože umožňují jejich optimální reakci na oscilace vnějšího prostředí. Pro rostliny je důležité umět se orientovat, kdy je nejvhodnější doba pro růst či pro květy, obdobně je třeba pro různé bezobratlé poznat nejvhodnější dobu pro různá stadia své metamorfózy. Správnou dobu pro své rozmnožování potřebují znát ryby, ptáci i savci. Také shánění potravy, která je přístupná v určitou dobu dne, vyžaduje schopnost orientovat se v čase. I pro migraci a s tím spojenou nutnost navigace potřebují ptáci mít nejen schopnost využívat vnější hodiny, ale i smysl pro čas; to je však již značně složitý problém, který bude podrobněji rozebrán v dalších částech skript.

Je otázkou, jaká součást organismu funkci endogenních hodin zastává. Aby mohla tuto funkci zastávat, je nutné, aby sama oscilovala, takže může být i součástí systému zpětné kontroly v organismu, tj. jedním ze servomechanismů, které umožňují vyrovnávání se s rytmicky se měnícími externími podmínkami. Tento oscilující systém musí zahrnovat speciální receptory, integrující část a konečně i součást informující organismus.

Nevíme doposud přesně, kde je takový systém lokalizován, můžeme pouze předpokládat, že jeho důležitou součástí jsou endokrinní resp. neuroendokrinní řídicí orgány. Jako z vnějšího prostředí přicházejí informace se uplatňují především světlo a teplota. Již z prvních studií o rytmech se ukázalo, že organismus nemá pouze jeden oscilační systém, že jich může mít a většinou také má více, při čemž jejich frekvence se může lišit v jednotlivých orgánech. Skutečnost, že endogenními hodinami jsou vybaveny organismy o různém stupni a složitosti organizace, znamená, že jejich lokalizace musí být na nějaké základní úrovni, společné od prvoků až po savce. Vývoj a postupující vyšší úroveň integrace organismu znamená pouze, že se zkvalitňuje regulace i biorytmů.

Jednodušším úkolem pro biologické hodiny je měření délky trvání určitého časového úseku. Týká se to např. určení délky dne, resp. délky jeho světelné části. Tento údaj je důležitý jak pro rostliny (doba pro rozkvetnutí), tak živočichy (hnízdění resp. rozmnožování, stejně jako začátek určité fáze metamorfózy). Schema biologické odpovědi na měnící se délku světelné části dne ukazuje obr. č. 48.

Je nutné předpokládat, že organismus má takových "časovačů" více, aby byl schopen případně diferencovat pro různé fáze svých biologických pochodů. Různé systémy je také např. třeba předpokládat pro odlišení jarního a podzimního období, vyznačujícího se stejnou délkou světleného období - pak je nutné postihnout tendenci, zda se toto období dále prodlužuje či naopak zkracuje.

Jiným úkolem je určit čas v průběhu dne. Různí živočichové jsou schopni naučit se přicházet pro potravu v určitou dobu dne, od bezobratlých (včely, švábi atd.) až po vyšší obratlovce (kočky, psi či krávy). Známa je i schopnost vzbouzet se bez pomoci exogenních hodin v určitou dobu dne a to s přesností na minuty.

V době, kdy BÜNNING (1936) předložil svou hypotézu, že rostliny a pravděpodobně i živočichové mají endogenní cirkadiánní rytmy a užívají je ke měření času, se zdála být tato myšlenka natolik bizarní, že byla všeobecně odmítána. Řada dalších pozorování však postupně přidávala další a další

kamínky do mozaiky, která svědčila pro to, že představa BÜNNINGA je v podstatě správná. Původní absurdnost představy o vnitřních hodinách organismů, podávajících mu informaci o čase definitivně narušily objevy týkající se orientace resp. navigace živočichů, zejména FRISCHE u včel (1950) a KRAMERA u ptáků (1953).

PITTENDRIGH dále studoval a zobecňoval KRAMEROVY nálezy o biologických hodinách jako základním kamenu jejich navigace. Vycházel přitom z hypotézy, že vývojovým základem těchto vnitřních hodin jsou cirkadiánní oscilace, které by ovšem, aby mohly plnit svoji funkci, musily být nezávislé na teplotě.

Tuto hypotézu PITTENDRIGH (1954, 1965) na Drosophilách skutečně potvrdil. Jako ukazatel rytmicity použil PITTENDRIGH dobu líhnutí dospělých much ze stadia pupy a tento ukazatel byl stejný, ať byly mušky chovány v 10^o či 25^oC. Tento nálezy byl nesporně velmi důležitý, protože pokud rytmy mají být prostředkem ke měření času, je nezávislost tohoto měření na teplotě nezbytná. Vždyť k jakému užítku by byly organismu takové "hodinky", které by se výrazně zpožďovaly či předcházely podle toho, jaká by zrovna byla teplota?

Dá se tedy udělat závěr, že podkladem vnitřních hodin v organismu jsou cirkadiánní biorytmy probíhající v organismu, které umožňují jak určovat délku určitého časového období, tak i čas v průběhu dne. Sepjetí těchto dvou aspektů určování času není jasné a zdá se být odlišné u různých druhů organismů (SOLLBERGER 1965), největší se zdá být u rostlin, zatímco prakticky chybí u ptáků. Při vzniku a udržování biologických hodin se především dlouhodobě uplatňuje světlo (fotoperiodismus), je však nutné si uvědomit, že i citlivost na tento podnět se aktuálně v průběhu 24 hodin mění, stejně jako na podněty další, např. teplotu, farmaka, bolest a pod.

U živočichů byl smysl pro čas pozorován u řady druhů. Klasické studie byly udělány u včel (BELING 1929, GRABENSBERGER 1934, RENNER 1956 atd.). Když se včely naučí na podání potravy v určitou dobu dne, pak se navrací v tuto dobu každý den. Obdobně, jako kdysi LINNÉ "sestrojil" své květinové hodiny, je možné udělat obdobné ptačí hodiny, podle doby, kdy se jednotlivé druhy ptáků probouzí a začínají se ozývat a kdy naopak končí (CLAUSER 1954).

Smysl pro čas byl studován také u člověka. U jednotlivých osob byla zjištěna tato schopnost v odlišné míře, ať již jde o schopnost určit délku určitého časového intervalu či o určení období v průběhu dne. Mezi jiným byl tento problém studován po déletrvajícím izolaci, trvající několik týdnů (ASCHOFF 1965). V jeho sledování na 26 dobrovolnících - včetně jeho samotného - bylo zjištěno, že za podmínek regulovaného osvětlení bylo u většiny sledovaných osob dosaženo prodloužení původní 24ti hodinové periody, přičemž některé z objektů byly schopny tyto periody měnit. Jak ukázaly některé novější výzkumy, nezdá se však být u člověka samotný cyklus světla resp. tmy nejsilnějším časovačem, vliv tohoto vlivu byl zesilován zvukovými signály (jako sociální kontakty se světem?!) - viz FIGALA 1980.

Je pravděpodobné, že s civilizací, tak jako řadu svých původních schopností, ztratil současný člověk i schopnost přesné reflexe rytmicity externích podmínek. Je to pochopitelné, již z toho důvodu, že místo přírodního časovače se u něj uplatňuje umělý časovač, přesně 24ti hodinový, jak ho reprezentují moderní hodinky. Daleko méně než původně je také člověk závislý na přírodních rytmech osvětlení či teploty, ať již se týkají cirkadiánních či sezónních cyklů.

Když je sledován smysl pro čas resp. biologické hodiny u různých živočichů, jde v naprosté většině případů o cirkadiánní periodicitu, i když pochopitelně nechybí ani doklady o jiných cyklech, jako jsou např. lunární či roční (resp. sezónní), dokladů o těchto periodicitách a jejich měření je však podstatně méně.

5.2. Orientace živočichů v prostoru

S pomocí smyslu pro čas jsou živočichové schopni využívat rytmicitu vnějších vlivů pro orientaci v prostoru, stejně jako užívají chronometru navigátoři (tj. potřebují znát čas, aby mohli interpreto-

vat polohu vzhledem k určitým nebeským tělesům). Živočichové i člověk musí být schopni se navracet na určitá místa, někdy dokonce se "navrátit" na místa, na kterých ve svém životě nikdy nebyli. To je případ mladých ptáků či ryb, kteří se dostanou do místa rozmnožování či zimního (resp. letního) hnízdiště bez pomoci starých jedinců, kteří již tato místa alespoň jednou či opakovaně navštívili (tito starší jedinci však se přemísťují do zimovišť většinou dříve!). Tohoto cíle může být dosaženo trojím způsobem:

- nahodilým pohybem
- taxí
- orientací či navigací

5.2.1. Možnosti vyhledávání správného směru

Postupně si probereme uvedené tři způsoby, první dva pouze orientačně, zatím co třetí (a to odděleně orientaci a navigaci) o něco podrobněji, šířeji pak je tato problematika probrána v další části skript.

5.2.1.1. Nahodilý pohyb

V malém prostoru živočich dříve či později najde správný směr a dostane se tak do vytčeného prostoru (viz experimenty s bludištěm, metoda postupného vyhledávání, vylučovací metoda atd.). Nahodilý pohyb se může zčásti uplatňovat i při orientaci a navigaci a to v začátečních fázích odletu.

5.2.1.2. Taxe.

Může se uplatnit, pokud je cíl pozorovatelný jakýmkoliv smyslem, tj. zrakem, sluchem či čichem. Buď je taxe pozitivní, tj. organismus směřuje za určitým vlivem (např. fototaxe u rostlin atd.) či je negativní, tj. organismus směřuje od tohoto vlivu.

Hlavní druhy taxe jsou:

- fototaxe - viz rostliny ale také třeba hmyz - užívá vzdálenějšího zdroje světla tak, aby stále směřoval ze stejné strany, resp. svíral stejný úhel (jako azimut u kompasu!)
- chemotaxe - uplatňuje se zejména u prvoků a u hmyzu (např. samci můry dokáží lokalizovat samice v neuvěřitelné dálce), u ryb rovněž je možné uplatnění vůně či zápachu ve vodním prostředí
- hmatová taxe - může se uplatnit např. dotykový vliv větru či proudění, zejm. u vodních živočichů a u ptáků (při déletrvajících letech do zimních stanovišť se ale zdá, že se hmatová taxe neuplatňuje)
- geotaxe (gravitační taxe) - může být pozorována u živočichů pohybujících se ve vertikálním směru - např. u vodních či podzemních živočichů (červi, krtek). Vhodně se může doplňovat s fototaxí, která se uplatňuje při pohybu nahoru a geotaxe naopak při pohybu dolů

5.2.1.3 Orientace

Orientaci nazýváme určení polohy a správného směru pro kratší vzdálenosti. Pokud cíl není viditelný, musíme znát směr, kterým se máme pohybovat, dokud cíl či jiné zřetelné označení neuvidíme či jinak nebudeme vnímat. K tomu potřebujeme mít referenční bod. Pak je zapotřebí stanovit úhel mezi směrem k tomuto referenčnímu bodu a mezi cílem. Názorně viz obr. č. 49, kde v levém rohu je stanoviště současné a úhel mezi referenčním bodem na pravé straně obrázku a mezi cílem v dolní části obrázku.

Jako referenční bod pro orientaci může sloužit jakýkoliv terénní útvar, měl by ale být dostatečně daleko. Jako dobrý referenční bod se uplatňuje magnetický pól (užíváme u kompasu), obdobně např. Polárka. Jako referenční bod je také často užíváno Slunce.

Přesto, že je dostatečně daleko, mění se jeho poloha na obloze v průběhu dne a ke korekci tohoto pohybu je třeba znát přesný čas. Je možno zaznamenat polohu Slunce na horizontu a úhel, který svírá se severem (azimut). Polohu Slunce můžeme odečíst buď přímo, či v případě, že není vidi-

telné, z jeho světelného odrazu. Pokud živočich žije ve vodě, musí navíc korigovat pozorovaný směr dopadu slunečního světla na lom světla v rozhraní vzduchu a vodního prostředí. Korekce na pohyb Slunce může být udělána s pomocí časomíry ať již umělé (naše hodinky) či biologických hodin. Je možné také pozorovat několik ukazatelů slunečního pohybu a tím ho korigovat:

- přímo směr, kterým je viditelné slunce
- azimut, tj. horizontální směr ke slunci
- směr slunečního pohybu (odkud - kam!)
- rychlost slunečního pohybu
- změna rychlosti v azimutovém úhlu
- výška slunce
- maximální výška (mění se v průběhu sezóny a se zeměpisnou šířkou)
- změna ve výšce slunce
- polarizace světla (když Slunce není vidět).

Většina živočichů je schopna používat k orientaci horizontální směr ke slunci, někteří však navíc i např. výšky slunce a pravděpodobně i polarizace světla.

5.2.1.4 Navigace

Navigace představuje složitější způsob nalézání správného směru, potřebný při větších vzdálenostech. Musí být konstruován koordinátový systém, ve kterém jsou určeny jednak poloha "navigátora", jednak poloha cíle. Tyto koordináty pomáhají stanovit např. směr štělky kompasu, směr pohybu slunce či postavení hvězd.

Stanovení polohy v uvedeném systému vyžaduje pozorování nebeských těles se současným přesným stanovením času. Lidé určovali několik století zeměpisnou polohu z výšky Polárky nad horizontem a z rozdílu místního času (rozdíl postavení hvězd či slunce) od času na Greenwichském poledníku (to vyžaduje přesný chronometr). V současné době se užívají modernější způsoby využívající gyroskopy a elektronické integrátory.

Pokud živočichové překonávají větší vzdálenosti a správně dorazí do cíle, je u nich nutné předpokládat obdobný mechanismy využívající rytmů (zejména cirkadiálních) ke měření času. Této problematice je věnována následující kapitola.

5.2.2. Orientace a navigace u živočichů

Většina živočichů má přesnější orientační smysl, než máme my lidé. Tento smysl může být zděděný či naučený. Někteří ptáci a ryby každý rok migrují od jednoho světadílu k druhému, i když cílový prostor jednotliví živočichové nikdy neviděli. Holubi jsou používáni jako nosiči zpráv vzhledem ke svému vyvinutému smyslu vrátit se do svého domova. Včely se bezpečně vrací do svých úlů a před odletem si dokonce domlouvají směr a vzdálenost letu složitými tanci.

5.2.2.1. Historie výzkumu orientace a navigace u živočichů Dříve, než si podrobněji uvedeme způsoby orientace resp. navigace u bezobratlých resp. u obratlovců, zaslouží si rozsáhlejší popis výsledky dvou autorů, kteří koncem 40-tých let výrazně posunuli naše znalosti dopředu. Jde o FRISCH (1950) a KRAMERA (1953) - viz WARD (1980). Na dvou zcela odlišných modelech - FRISCH u včel a KRAMER u špačků - zcela nezávisle na sobě (o výsledcích se jeden o druhém dozvěděli až z publikací!) prokázali schopnost zvířat orientovat se v prostoru a to s využitím endogenních hodin. Tím také definitivně potvrdili jejich existenci, předpokládaných již od r. 1936 BUNNINGEM a velice pomalu a neochotně přijímaných dalšími badateli.

Nejprve tedy o FRISCHOVI, který studiu života včel věnoval více než 50 let svého života. Mezi jiným také v začátcích své vědecké dráhy přesvědčivě prokázal, že jsou schopny rozlišovat různé barvy i jejich odstíny. Spolu se svojí spolupracovnicí BELINDOVOU analyzoval i stará pozorování ze začátku tohoto století o tom, že včely se dají navyknout na určitou dobu na potravu (FOREL, BUTTEL - REEPEN). BELINDOVÁ v r. 1927 napřed potvrdila, že trénované včely skutečně na-

vštevují pokusná pracoviště v určenou dobu a to i v případě, že potrava připravena není. Navíc však ve spolupráci s FRISCHEM zjistila, že včely se chovají stejně i za konstantního světla, teploty, vlhkosti i náboje ovzduší. Tyto faktory bylo tedy možné vyloučit jako důvody přesného smyslu pro čas, se kterým včely přilétaly pro potravu. WAHL, jiný ze spolupracovníků FRISCHE, navíc vyloučil vliv variací v kosmickém záření (své pokusy dělal v hloubce 183 m v solném dole, viz WAHL 1932).

Bylo tedy otázkou, co je tím faktorem, který napomáhá včelám orientovat se přesně v čase, zodpovědět tuto otázku se však již ve 30tých letech BELINDOVÉ nepodařilo. V jejích pokusech pokračoval FRISCH sám, se svými novými spolupracovníky. Chtěl rozhodnout základní problém, zda jsou včelí "hodiny" skutečně endogenní či zda jsou ovládány nějakým vnějším faktorem. Díky pokusu, který k řešení této otázky posléze provedl (jak uvidíme za chvíli!), však zároveň odpověděl na otázku, jakým způsobem se včely orientují při svých cestách za potravou. Tento badatel tak rozřešil dlouholetý problém, jak včely dokáží létat ke zdroji nektaru a zpátky do úlů.

Dokázal, že včely dodržují své letové linky pomocí orientace podle Slunce, přičemž korigují odchylky dané zdánlivým pohybem Slunce po obloze v průběhu dne. Prokázal přitom rovněž, že včely jsou schopny vzájemné komunikace - včela, která našla vhodnou skupinu květů, to může druhým včelám oznámit pomocí zvláštního tanečku. Na svislé straně uvnitř úlu začne opisovat malý kruh - tento kruh častokrát přerušuje a zavrtí se ve směru průměru kruhu. Úhel průměru kruhu se svislicí udává ostatním včelám, jakým směrem je třeba letět (obr. č. 50).

Svislice je polohou slunečního azimutu, takže průměr kruhu ukazuje úhel, který má svírat dráha letu s polohou slunce. Druhé včely si tedy musí vštípit do paměti geometrii tance. Úhel mezi včelí letovou linkou a směrem ke slunci se pochopitelně mění v průběhu dne a proto tančící včela zmenšuje postupně úhel, když je ráno a zvětšuje, když je odpoledne - a pak mohou i druhé včely letět ve správném směru.

Tak FRISCH objevil sluneční kompasový smysl u včel. FRISCH udělal svůj objev díky pokusu, který se mu dlouho nechtělo dělat a který řadu let odkládal. FRISCH předpokládal, že nějaký vnější faktor - nejspíše nějaké záření - řídí vnitřní hodiny včel. Tuto hypotézu chtěl objasnit originálním pokusem. V Německu nacvičil včely na hledání potravy v určitou dobu dne a pak je spolu se svou diplomantkou naložil na transoceánskou loď, která plula do Ameriky. Proč na loď - šlo o dobu těsně před II. světovou válkou a doprava lodí byla v té době v podstatě jedinou možností cesty z Evropy do Ameriky. Pokus dopadl tragikomicky - studentka dostala brzy po vyplutí z přístavu mořskou nemoc a nebyla schopna vůbec zaznamenávat, zda se včely řídí stále německým časem (což by byla podpora pro samostatnost vnitřních hodin) či zda se postupně přizpůsobují podle časových zón, kterými loď proplouvá (což by byla podpora představy o vnějším vlivu). Pak přišla druhá světová válka a FRISCHŮV projekt byl pochopitelně odložen na řadu let.

Když se pak FRISCH ke svému přemístovacímu pokusu vrátil, bylo jeho uspořádání poněkud odlišné. Nejprve začal na jednom místě s trénováním včel, které navykl na krmítka umístěná na západ od úlu. Pak přemístil včely na místo vzdálené asi 5 km, kdy včely nikdy nebyly a 4 krmítka umístil na 4 světových stranách (viz obr. č. 51), u kterých počítali pozorovatelé přilétající včely - mimochodem je hned při tomto počítání také vychytávali, aby tyto včely nemohly naučit správnému směru další včely.

Pokus dopadl jednoznačně - naprostá většina včel letěla správně západním směrem, i když bylo ráno a trénovány byly odpoledne. Znamenalo to tedy, že všechny se řídily podle Slunce a přitom musely korigovat pohyb Slunce po obloze. V dalším pokuse to neúnavný badatel FRISCH včelám ještě výrazně ztížil. Nejdříve učil včely a to pouze 4 hodiny (!) na nalezení krmítka na severozápadě a pak je převezl do zcela odlišné krajiny. Zde umístil krmítka na 4 stranách včetně severozápadní a ještě jim česlo úlu (místo kudy z úlu vylétaly) obrátil o 90°. Pochopitelně opět měly potravu najít ve zcela jinou denní dobu - místo odpoledne ráno. Přesto za takto zásadně změněných podmínek většina včel správné místo našla (viz obr. č. 52). Tím bylo prokázáno, že se včely skutečně

řídí slunečním kompasem a že přitom korigují vliv denní doby resp. vlivu zdánlivého pohybu slunce po obloze.

Stále však nebylo jasné, zda jsou včelí hodiny zcela vnitřní či zda přijímají podněty ze vnějšku. Pečlivými pokusy FRISCH již dříve vyloučil různé vnější podněty, včetně atmosférické elektřiny a kosmických paprsků.

Co však jsou ty vnitřní rytmy, které by mohly být podkladem vnitřních hodin včely? Předně se nabízela možnost, že jde o rytmus hladu, po řadě pokusů byl však tento faktor také vyloučen. Pak se FRISCH opět vrátil k pokusu s přemístěním včel z Německa do Ameriky. Při své nové cestě do USA koncem 40-tých let použil FRISCH letadla. To bylo v této době již běžným a daleko rychlejším dopravním prostředkem než cesta lodí. Nejvýhodnější letecké spojení do Ameriky té doby vedlo z Francie, šlo o linku Paříž - New York, čemuž se celý pokus přizpůsobil. Celý pokus si vzal na starost Max RENNEN, FRISCHŮV spolupracovník a pomoc nabídl jak v Paříži, tak v New Yorku. Nejprve byly vyrobeny dvě identické komory, vyrobené v Německu, které byly skládací, aby mohly být dopraveny jednak do Paříže, jednak do New Yorku. Vybavení těchto komor vidíte na obr. č. 53.

Komora byla poměrně velká - měla cca 4,5 m délky, 2,5 m šířky a 2,75 m výšky. Nejprve začal RENNEN trénovat včely v Paříži. Skupina 40 včel se přitom měla naučit přijímat potravu mezi 8.15 - 10.15 hod. francouzského času. Po několika dnech to včely uměly a RENNEN letěl s nimi do New Yorku. Za méně než 24 hodin byly už včely v identické komoře v New Yorku a byla otázka, kdy vyletí za potravou - zda bez ohledu na přemístění přesně za 24 hodin či zda bude 5ti hodinový posun? Výsledek pokusu byl jasný - přesně za 24 hodin po přijetí potravy v Paříži vylezly první včely z úlu a hrnuly se ke krmítku. Přesně stejně dopadl i pokus obrácený - kdy trénink probíhal v New Yorku a test v Paříži. Tak tedy bylo jednoznačně potvrzeno, že včely dodržovaly svůj rytmus nezávisle na vnějších vlivech, mají tedy své vnitřní hodiny ovládané pouze jejich organismem.

A nyní podrobněji o výsledcích KRAMEROVÝCH. Co o něm víme? Narodil se v r. 1910 a po II. světové válce začal přednášet v Heidelbergu a zde se také začal zabývat otázkou ptačí orientace za letu - postupně vybudoval celou školu pro studium orientace, která sdružovala pracovníky z Evropy i ze Spojených států. Svá pozorování tahu různých ptáků prováděl na březích Severního moře, mezi jiným pozoroval také lety arktických rybáků (mořských vlaštovek). Trasu jejich sezónního putování zachycuje následující obr. č. 54. Ukazuje, že rybáci jsou přímo neuvěřitelnými letci - z letních hnízdišť daleko na severu pouze několik set mil od severního pólu létají přes Kanadu, napříč Atlantikem až na zimní stanoviště v Jižní Africe u Port Elizabeth.

Migrace, jak je KRAMER pozoroval a kontrolovaně zkoušel, jsou tedy zacíleny na přestěhování do zcela určitých, poměrně malých oblastí, vzdálených tisíce kilometrů. Takovýto přesný let už nutně předpokládá určitý naváděcí systém, obdobný např. tomu, jak torpédo hledá svůj cíl. Proto badatelé předpokládají, že živočichové mají podobný servomechanismus, orientující se směrem k žádaným cílům. Takovýto servomechanismus však nemůže fungovat bez trvalého toku informací z vnějšího světa. Zatím ponechme stranou problém, jak dostávají např. tažní ptáci tyto informace a soustředíme se na otázky, jejichž zodpovězení tyto informace mají řešit:

- kde pták je a v jakém směru má odstartovat

- jaký směr má dodržovat za letu, případně jak ho měnit, aby se cíle dosáhlo - jak pozná, že už cíle dosáhl.

A nyní k tomu, jakými cestami se může pták orientovat, jak si zodpovídá na tyto tři základní otázky. Teoreticky bylo několik možností, které také byly postupně vylučovány:

- podle vlnových délek tepelného záření charakteristicky odlišných (na pólu větší vlnové délky a malá intenzita, na rovníku kratší vlnové délky a velká intenzita) ALE: záření se šířilo přímo a nesleduje zemské zakřivení - ve vzdálenosti pouhých 160 km by mohlo působit až v bodu vysoko nad letovou drahou ptáků, většími krajinými útvary (jako jsou lesy, jezera, pouště ale také velkoměsta) jsou také tepelná záření silně zakřivována - a nakonec - nikomu se nepodařilo prokázat, že by ptáci byli vůbec schopni vnímat rozdíly v tepelném záření

-změny magnetického pole: kdyby pták byl schopen vnímat rozdíly síly magnetického pole, mohl by z toho odvozovat zeměpisnou šířku své polohy ALE: ptáci nevykazují žádnou reakci na magnetické pole i o síle podstatně větší, než je magnetické pole Země

- zemská rotace - projevující se jako rozdíl v působení mechanického tlaku na křídla, směr letu by mohl být vnímán podle toho, jak se mění skutečná rychlost při letu na západ či na východ ALE: husy s přistřiženými křídly šly (!) ve správném směru, kam by vedl jejich migrační let - rovněž ptáci v kleci vnímají dobře směr letu

Nejslibnější se zdál předpoklad, že ptáci jsou primárně závislí na jemném zrakovém analyzátoru. KRAMER použil k analýze toho, jakým způsobem se ptáci orientují, zdánlivě nedůležitého jevu, tzv. tahového neklidu, kdy ptáci v době podzimu opětovaně vyrážejí jedním směrem, směrem tahu. Ke studiu užil špačka obecného a předně si ověřil, že směr tahového neklidu je skutečně správným směrem podzimního (a obdobně jarního) tahu.

KRAMER klece zakrýval postupně do takové výše, že špačci nemohli vidět nic jiné, než nebe. Zkonstruoval kruhové klece s průhledným dnem, kdy směry tahového neklidu mohl badatel pozorovat a zapisovat a za kontrolovaných podmínek se dal měnit směr světla přicházejícího z nebe a to o 90°. Výsledky pokusů u špačků, kteří jsou vysloveně pouze denními letci, ukázaly jednoznačně, že směr migrace ptáků závisel na poloze slunce - pokud byl směr světla otočen zrcadly o 90°, pak o 90° změnili špačkové směr své migrace a letěli tedy špatným směrem. Když zrcadla byla odstraněna, opět dodržovali správný směr migrace.

Obrázek č. 55 nám ukazuje, jak tato kruhová klec vypadala, konstrukce kolem ní umožňovala zakrývání v různých směrech. Dolní část obrázku ukazuje správný směr letu ptáků - severozápadně a změnu při posunutí zrcadla o 90° a tím způsobeném posunu směru letu na jihozápad.

Jako správný vědec však KRAMER o svých výsledcích stále pochyboval a chtěl si je ověřit. Předně si byl vědom toho, že pozoroval ptáky krátkou dobu - pouze asi 1 hodinu - ráno. Proto pokus rozšířil a použil k tomu vtipný způsob, při kterém naučil špačky vyhledávat potravu a tím směřovat vždy určitým směrem. Konkrétně je trénoval ráno a zrní bylo vždy pouze v jednom ze 12 krmítek, které bylo umístěno v kleci na východním směru. Pak byli takto cvičení špačkové vypuštěni ke krmítkům odpoledne. Ráno nalézali potravu východním směrem, tam kde svítilo slunce, byla proto otázka, kde je budou hledat odpoledne - opět tam, kde svítí slunce, tedy na západě? Nikoliv - správně se dali opět východním směrem, i když tentokrát musili nechat slunce za sebou.

KRAMER se ani s tímto pokusem nespokojil a udělal ještě brilantnější pokus - natrénoval špačka, aby bez ohledu na čas hledal potravu na západu klece. Pak dal klec do ochranného stanu, aby vyloučil vliv pohybujícího se skutečného slunce a umělé slunce umístil tak, aby svítilo vždy z jednoho místa na západě. Za těchto podmínek hledal špaček potravu ráno ve východním krmítku, v poledne v severním a večer v západním krmítku. Další obrázek (č. 56) nám ukazuje výsledek pokusu, kdy špaček byl naučen létat v jednom směru v určitém směru každého dne, kdy slunce svítilo ve směru bílé šipky, tento směr pak pták dodržoval i v jiných denních dobách, kdy slunce svítilo např. ve směru šipky černé. Obrázek č. 57 ukazuje uspořádání pokusu s fixním sluncem - část A ukazuje uspořádání klece, část B nácvik špačka na to, že nachází potravu vždy v krmítku na západní straně a pak situace, kdy ráno hledal potravu na východě (C), v poledne na severu (D) a večer na západě (E).

Již začátkem 50tých let - prakticky ve stejné době jako FRISCH výsledky u včel - KRAMER zveřejnil výsledky studia ptačí orientace, které ukázaly, že špačkové dokáží určit dobu dne a řídí se při určení správného směru pomocí Slunce. Tito ptáci jsou přitom schopni korekce podle pohybu Slunce po obloze. Dalo by se říci, že špačci mají sluneční kompas, užívaný jimi úplně stejně jako lidé užívají kompas magnetický. Aby byl ale člověku něco platný kompas, musí mít také mapu, ale co je takovou mapou pro ptáka? KRAMER začal bádát i na tomto problému, ale bohužel při odchytu ptáků spadl ze skály a zabil se.

I když pokud jde o orientaci u ptáků i dalších živočichů byly nashromážděny v dalších letech nové údaje, na otázku, co je "mapou" pro migrující ptáky, doposud nikdo neodpověděl. KRAMEROVY

pokusy přesvědčivě ukázaly, že špačkové se při své navigaci řídí Sluncem.

Jméno manželů SAUEROVÝCH je spojeno s řešením otázky, podle čeho se orientují ty druhy ptáků, které migrují pouze v noci. Týká se to i pěnic, kterým se SAUEROVI řadu let věnovali z hlediska jiné problematiky (zda se učí ptáci zpívat od starších či tuto schopnost mají vrozenou - odpověď byla jasná - mají ji vrozenou).

Ale vraťme se k pokusům s orientací pěnic. Pěnice se na jaře vyskytují v Evropě, vyvádějí zde své mladé a v průběhu měsíce srpna celé populace pěnic táhnou na jih. V období září až října přilétají pěnice ze severních oblastí Evropy, které po několika dnech odlétají dále na jih. Ve dne se pěnice živí a v noci táhnou dále. Drobné pěnice mají zimoviště daleko, letí až do střední a jižní Afriky. Ve svých sledováních SAUEROVI prokázali, že při letu ve dne se pěnice, obdobně jako to prokázal KRAMER pro špačky, řídí podle Slunce (SAUER 1957,58). Při noční cestě do zimovišť se však dokážou orientovat podle hvězd.

Jsou přitom rušeny ve své navigaci jasným měsíčním světlem, podobně jako jasnými meteory. Trochu nejisté ze začátku letu jsou pěnice, když je zataženo - pokud je však viditelná alespoň nejjasnější hvězda, začnou zase směřovat správně. Správně ptáci reagují na zcela zataženou oblohu - chvíli poletují ve vzduchu a pak se snesou na strom a jdou spát. Zcela desorientované byly pěnice, když byly umístěny do uzavřené místnosti s difuzním či polarizovaným světlem.

SAUEROVI geniálně vyřešili problém, jak experimentálně měnit polohu hvězd, aby tato změna odpovídala jiné zeměpisné šířce či časové zóně: umístili pěnice do planetária a promítali jim různé zóny na nebi a pěnice vždy reagovaly správně. Následující obr. č. 58 ukazuje, jak vypadá přirozená podzimní migrace (silné černé šipky) pěnice pokřovní a jak vypadá při postupně měněném planetáriuém umělém nebi (slabé šipky). Šrafováním je označena oblast zimovišť v centrální Africe.

"Hvězdou" experimentů se stala jedna pěnice pokřovní, která byla vychována z vajíčka v laboratoři a nikdy nebyla mimo klec, ve volné přírodě. Při umístění v planetáriu však suveréně letěla napřed jihovýchodním a pak jižním směrem, tak jak to bylo potřebné k přemístění do zimoviště v Africe.

Jak může pěnice vnímat změnu zeměpisné šířky třeba v simulovaných podmínkách planetária? Dá se předpokládat, že podobně jako člověk, tj. určením úhlové vzdálenosti určité hvězdy, např. Polárky, nad horizontem. Složitější to je pokud jde o určení zeměpisné délky, k tomu je potřebný přesný chronometr. SAUEROVI se domnívali, že k tomu ptáci mohou používat určení rotace souhvězdí kolem Polárky.

Pokusy provedené opět v planetáriu pouze naznačily, že by tomu mohlo být tak, ale zcela jasně to také nepotvrdily. Bohužel nikdo, ani SAUEROVI samotní, v uvedených pokusech doposud nepokračoval, aby tak potvrdil či naopak vyloučil tuto možnost.

5.2.2.2. Další příklady orientace a navigace

Podrobnějším vyličením práce FRISCHE, KRAMERA a SAUEROVÝCH jsme nejen učinili zadosť povinnosti vzdát úctu těm, kdo si ji zaslouží, ale při probírání jejich pokusů jsme zároveň ukázali i hlavní přístupy a problémy při studiu orientace a navigace. Tito autoři ukázali několik hlavních záměrů, které je možno udělat již nyní, dříve než si probereme výsledky dalších autorů na dalších druzích živočichů, ať již bezobratlých či obratlovců.

Jde o následující závěry:

- živočichové mají endogenní měřiče času, zejména nařízené na cirkadiánní periodu - uplatňovat se však mohou i periodicity lunární či cirkanuální
- tento měřič času je nezbytný k tomu, aby někteří živočichové mohli kompenzovat s časem probíhající pohyb nebeských těles a tím se orientovat v prostoru
- v jednodušším případě využívají živočichové pouze úhlu příslušného nebeského tělesa (zejm. Slunce) k horizontu, někteří ale dokáží využívat i jeho výšku nad obzorem či jiné ukazatele - u letů

na velmi dlouhé vzdálenosti (obdobně u plaveb ryb, kytovců či ploutvonožců) musíme předpokládat i složitější způsoby orientace, jejichž mechanismy však prozatím vůbec neznáme

A nyní podrobněji o dalších nálezech, postupně pokud jde o bezobratlé a obratlovce. Z bezobratlých byla kromě včel pozorována schopnost orientace podle Slunce např. u mravenců (BRUN 1958). Orientace jim byla po několik hodin znemožněna umístěním do světelného boxu. Další pokračování cesty se pak lišilo u různých druhů mravenců - zatímco jedinci druhu *Latius niger* nebrali pohyb slunce na vědomí, mravenci druhu *Formica rufa* dodrželi správný směr cesty, což znamená, že pohyb Slunce za uvedenou dobu brali v úvahu. PAPI (1955) studoval jiný druh a to členovce *Arctosa perita*, který žije na březích řek a jezer. Tento živočich, pokud je dán na vodu, směřuje nejkratší cestou zpět ke břehu. Když jej však přeneseme na opačný břeh, směřuje přes vodu k původnímu břehu, jak je dáno úhlem k Slunci. Jiným příkladem je skákající hmyz *Talitrus saltator*, jak ukázali PAPI a spol. (1963, 1968). Tito živočichové žijí na vlhkém písku na pobřeží a pokud jsou přeneseni na suchý písek, chtějí se ihned navrátit na písek u moře. Kolmicí, tj. nejkratší cestou, se navracejí k pobřeží, k čemuž jim pomáhá úhel k pozici Slunce.

Zajímavá sledování byla dělána s jedinci *Talitrus*, přenesenými z Itálie do Argentiny. Jejich směr útěku za podmínek přenesení na suchý písek odpovídal vnitřním hodinám nastaveným v Itálii a po přenesení do jiných podmínek byl proto nesprávný. PAPI rovněž zkoumal, jak je schopnost vnitřních hodin a správné orientace v prostoru vázána u jedinců rodu *Talitrus* na teplotu. Jak se dalo očekávat - minimálně, pouze velmi vysoké teploty mohou způsobit mírné zrychlení, zatímco teploty nízké (4-6°C) neměly žádný vliv.

Zajímavé nálezy byly udělány se sledováním schopnosti změny vybraného směru ve tmě u vodoměrky *Velia currens*. Tyto studie provedené BIRIUKOWEM (1956) - viz obr. č. 59 - nasvědčují tomu, že ve tmě se mění úhel orientace na opačnou stranu než ve světle. Tento výsledek pochopitelně neznamena zásadně změněný způsob měření času u tohoto druhu, ale spíše přítomnost dvou oscilátorů, zapínaných v různých situacích.

Porovnání jedinců druhu *Arctosa cinerea*, žijících původně v Itálii, nebo ve Finsku za podmínek arktického léta ukázalo, jaký význam má dlouhodobé přizpůsobení se ekologickým podmínkám. Zatímco jedinci z Finska se v těchto podmínkách s dlouhým světelným režimem orientovali dobře, jedinci pocházející z Itálie měli s orientací problémy. KALMUS (1956) a LINDAUER (1957) dále analyzovali dědičně dané rozdílnosti mezi druhy včel severní a jižní polokoule ve využívání slunečního kompasu - včely žijící v tropických oblastech jsou schopny velice rychle se přizpůsobit změnám lokálního směru pohybu Slunce. Včely jsou však schopné se relativně brzy přizpůsobit i rozdílu 12ti hodin mezi severní a jižní polokoulí - mladé včely k tomu potřebují pouze 8 dnů.

Pokusy JANDERA (1957) prokázaly, že mravenci mohou využívat slunečního kompasu k orientaci v určitou roční dobu, zatímco v jinou nikoliv. V létě a na podzim jedinci druhu *Formica rufa* byli schopni po déletrvajícím přerušení pokračovat ve správném směru, zatímco na jaře toho schopni nebyli. Stejně sezónní rozdíly byly nalezeny u brouka *Pedaerus rubrothoracicus* (ERCOLINI a BADINO 1961). Bezobratlí se nemusí orientovat pouze podle Slunce, ale jak ukazují některé pokusy PAPIHO a jeho spolupracovníků (PAPI a PARDI 1963, PARDI a ERCOLINI 1965), i podle Měsíce. Studovaným druhem byl již dříve zmíněný *Talitrus saltator*, který přesně dokázal při určení správného směru kompenzovat pohyb Měsíce po obloze. Tím bylo také prokázáno, že někteří bezobratlí živočichové dokáží využít jako biologické hodiny jiné než Sluncem dané cirkadiální rytmy.

U obratlovců byla prokázána schopnost využívat Slunce jako kompas u řady živočichů, od ryb přes obojživelníky až k ptákům (např. BRAEMER a SCHWASSMANN 1963 u ryb, BIRJUKOW a sp. 1963 u ještěrek). U ještěrky *Lacerta viridis* byla provedeny pokusy s natrénováním těchto živočichů na určitý úhel vzhledem k umělému slunci. Ve stejnou dobu dne pak byly ještěrky schopné tento směr ke Slunci udržet a směřovat tak určitým směrem. Stejný směr však dodržovaly i v jinou dobu v průběhu dne. Správně si vybrat potřebný úhel byly ještěrky schopné pouze za předpokladu, že byly nacvičovány na různé úhly vzhledem ke Slunci (FISCHER a BIRJUKOW

1960).

Podobně byly schopné využívat i umělé slunce jako kompas i některé ryby a to správně i v různých obdobích dne (BRAEMER 1960). U ještěrek byla pozorována schopnost využívat nejen úhlu ke Slunci, ale také rychlosti změny tohoto úhlu v závislosti na délce dne a sezóně roku (FISCHER 1961). Ještěrky byly schopné se v laboratorních podmínkách adaptovat na výšku umělého slunce nad obzorem, jaká je při obdobích s dlouhým dnem.

Hodně pokusů bylo provedeno pokud jde o orientaci a navigaci ptáků. Tak HOFFMANN (1954) trénoval špačky na posun směrem ke slunečnímu kompasu o 6 hodin. Natrénování mohli být např. na jihovýchodní směr umístění potravy. Výsledky HOFFMANNOVA pokusu ukazuje obr. č. 60. Horní dvě části obrázku - a či b - ukazují, jak si špaček nachází potravu ve správném směru v různých obdobích dne (a to i po 28 dnech neustálého světla), dolní dva posun do nesprávného směru umělým sluncem.

Zajímavé jsou rovněž další pokusy stejného autora, tj. HOFFMANN (1953), opět u špačků. Dva špačci byli nacvičeni na určitý směr ke Slunci nabídkou potravy v tomto směru. Na obr. č. 61 je tento směr označen černou šipkou a jednotlivé body ukazují v části obrázku označené a u dvou špačků (G a R), jak úspěšně tento směr nalézají. Část obrázku označená b ukazuje totéž při posunu vnitřních hodin o 6 hodin - bílá šipka označuje předpokládaný správný směr. Řada prací s ptačí orientací byla udělána také na holubech, jejichž schopnost navracet se i z velkých vzdáleností domů k podobným studiím přímo vybízí (viz zejména SCHMIDT - KOENIG 1958, 1960, 1970). Prokázalo se, že se skutečně řídí slunečním kompasem, problém jejich orientace je však stále v řadě otázek nejasný (viz i GALLER a sp. 1972). Je však nutné si uvědomit, že návrat domů z větších vzdáleností představuje daleko obtížnější úkol, je nutné předpokládat přesnost vnitřních hodin 2 minuty za den (to ale souhlasí se zjištěnými minimálními deviacemi cirkadiálních rytmů!).

Poněkud překvapivě se ze všech skupin živočichů ví nejméně o schopnosti orientace u savců. Snad můžeme vzít v úvahu pozorování, že lepší schopnost orientace než civilizovaný člověk má divoch, dosud žijící v úzkém kontaktu s přírodou (tato schopnost se dá pochopitelně naučit i u civilizovaného člověka, různá turistická či skautská hnutí jsou toho jasným dokladem).

I když snad doposud chybí vědecky podložené experimenty, je ze zkušenosti známo, že např. psi, ale i kočky, se dokáží po odvezení z domova vrátit na původní místo vzdálené i desítky kilometrů. Podobnou schopnost orientace musíme předpokládat ale třeba i u divokých prasat, která dokážou většinou v noci (orientace podle Měsíce či hvězd?!) uběhnout desítky kilometrů a vrátit se opět přesně do místa se svými oblíbenými baheništi.

Můžeme tedy uzavřít, že všichni živočichové dokáží využívat k orientaci různých nebeských těles, zejména Slunce a zároveň také svých endogenních hodin. Někteří z nich navíc dokážou využívat i jiných ukazatelů, než úhlu, co svírá jejich referenční bod s horizontem. Dlouhé cesty řady ryb a ptáků do míst rozmnožování či do zimovišť však předpokládají i další, dosud nejasné mechanismy.

5.2.3. Orientace v prostoru pomocí sluchu

Závěrem části, pojednávající o orientaci a navigaci živočichů, bychom si měli říci o orientaci pomocí sluchového ústrojí - tato část nemá sice přímo co dělat s biorytmy, ale pro kompletaci informací o orientaci u zvířat je důležitá. S rytmickými ději má to společného, že základem orientace jsou rytmické zvuky živočichy vydávané. Sluch je u zvířat vývojově mnohem mladším orgánem, než jsou zrakové receptory nebo orgán rovnováhy. Postupně však dostal tento analyzátor i další funkci a to využití při orientaci v prostoru (echolokace).

Tak např. tropické vlašťovky - salangany. Jejich hnízda se stala jednou z největších pochoutek pro asijské labužníky. Proto salangany ustupují před lidmi stále hlouběji do jeskyň a pro orientaci v jejich tmavých prostorách se u nich vyvinula schopnost echolokace. Když se cejlonské salangany vracejí pod klenby podzemních prostorů, začínají vydávat sérii 5-10 cvakových zvuků za sekundu.

Cvaknutí jsou krátká, trvají 2-6 mikrosekund, a člověk je dobře vnímá, protože jsou v pásmu 4-5 kHz. Jávké salangany vydávají lokační cvakot o stejné frekvenci, 5-10 zvuků /sec. ale o menší intenzitě, a používají k tomu nízkofrekvenčních zvuků - do 1,5 kHz.

V laboratoři se vědci přesvědčili, že cvakot je skutečně lokační signál. Na světlo (tento druh je aktivní ve dne) jej salangany nepotřebují - mají dostatečně ostrý zrak. Jsou-li dočasně zbaveny zraku a sluchu zároveň, jsou salangany naprosto bezradné. Echolokace salangan není zvlášť kvalitní. Létají-li tyto ptáci v místnosti přehrazené trubičkami z plastických hmot o síle 8 milimetrů (nebo kovovými pruty poněkud menšího průměru), narážejí často na překážky. Echolokace je u salangan vrozená schopnost, projevuje se však jen u dospělých jedinců. Dokud jsou ptáčata malá, nejsou schopna cvakot vydávat.

Schopností echolokace disponují i jiní ptáci, například kolihy. Když musí letět v mlze, vydávají zvláštní zvuky, které v jiných situacích nikdy neužívají. Předpokládá se, že se rovněž orientují ozvěnou, jež při tom vzniká.

A jak je vyvinuta echolokace u savců? Také suchozemští savci se v procesu evoluce postupně zdokonalovali v echolokaci. Největších úspěchů v tom dosáhli netopýři. Echolokátor jim umožňuje výtečně se orientovat v noční tmě, rychle létat bez srážek s překážkami, zjišťovat i drobný hmyz a lapat ho přímo v letu. Dobře jsou echolokací vybaveni savci žijící ve vodě, např. delfini.

Těžko říci, koho poprvé napadlo, že delfini jsou schopni echolokace. Jednou řídil Mc Brand odchyt delfínů v úzké mořské zátocy, kam tato zvířata často vplouvala. Jakmile delfini vepluli dovnitř zátoky, přehradili lovci ústí zátoky pastí zhotovenou z pevných sítí. Manévr se jim však nevydařil – zahnat zvířata k sítím blíže než na 30 metrů se jim nepodařilo. Toto počínání delfínů právě Mc Branda přivedlo na myšlenku, že jsou schopni echolokace. Udělal proto past ze sítí s většími oky, takže ozvěna byla slabší. Delfini si jí nevšimli a byli konečně odchyceni.

Mc Brandovy deníky o pozorování delfínů byly vydány až po jeho smrti, takže jako první experimentálně potvrdili, že kytovci jsou schopni echolokace, Schewill a Kellog.

Schewill se svou ženou Lawrencovou získali pro své pokusy staršího jedince z delfinária, dobře vycvičeného ale přece jen již starého na kousky, které zvířata v delfináriu prováděla.

Pokusnou nádrž zřídili přímo na břehu moře, voda v ní byla kalná. Když do nádrže házeli ryby, delfin prakticky nemohl užívat oči a měl uhádnout, ze které strany mu je hozena ryba. Tento úkol plnil bezchybně díky echolokaci (při hledání ryby vydával skřípavé zvuky!).

Podobná situace jako u delfínů je u ploutvonožců. Výborné přizpůsobení na vodu dovoluje ploutvonožcům absolvovat každoročně dlouhé cesty v průběhu roku. Na příklad lachtani medvědí se na jaře objevují u Komandorských ostrovů a na Kurilách a na zimu odplouvají do teplejších vod kolem ostrova Honšú. Hlavním motivem tohoto dlouhého putování je návrat do rodných míst, odedávna sloužících k rozmnožování.

Z hlediska echolokace jsou nejlépe prostudováni tradiční chovanci cirkusů a zooparků - lachtani kalifornští (*Lalophus californianus*). Mezi ploutvonožci se těší stejné pozornosti badatelů jako delfini skákaví mezi delfíny. Již Polter se přesvědčil, že tyto lachtani aktivně používají echolokace k orientaci ve vodě. Lachtanům byly v noci házeny stejně velké kousky rybího a koňského masa (většina ploutvonožců odmítá maso, které nepochází z ryb!). Kousky ryb našli lachtani ve chvílce, koňského masa se ani nedotkli. Při hledání ryb vydávali lachtani cvakavé zvuky. Echolokace u lachtanů je horší, než u delfínů, což vědci vysvětlují tím, že ploutvonožci trvale zdržují v čisté a průhledné vodě, takže echolokace užívají relativně málo.

A nakonec, jaká je situace u ryb? Lidé se dlouho domnívali, že ryby nemají čím slyšet, protože mají jen vnitřní ucho, zatímco boltce a střední ucho (s bubínkem) postrádají. Nepřítomnost těchto složek sluchového ústrojí vedla k názoru, že sluch se u ryb nevyvinul a že zvuky pro ně nemají biologický význam. Teprve experimenty, uspořádané v první polovině minulého století, rehabi-

litovaly rybí sluch. Bylo zjištěno, že ryby výborně slyší nízké zvuky od 50 do 2000-5000Hz, a pokud jde o citlivost vůči zvukům v rozmezí 500-1000 Hz, nezůstává jejich sluch pozadu za sluchem savců.

Kromě vnitřního ucha mají ryby ještě další orgány registrující výkyvy tlaku a pohyby vody. Jde o takzvanou postranní čáru. Takovými mechanickými receptory jsou vybaveni i jiní typicky vodní živočichové - mihule a také nejprimitivnější obojživelníci. Původní vodní živočichové měli smyslové buňky postranní čáry zřejmě uspořádány v podélných řadách přímo na povrchu těla (dodnes se taková postranní čára zachovala u mihulí a koljušek).

V procesu evoluce se orgány postranní čáry zdokonalovaly. U chimér a primitivnějších žraloků jsou obrvené smyslové buňky uloženy ve žlábků, zatím co u převážné většiny ryb jsou dnes sdruženy do shluků a ukryty v kanálcích, spojených s okolním prostředím krátkými miniaturními průchody. Kanálky jsou vyplněny slizem. Těla smyslových buněk jsou uložena ve stěnách kanálku, do kterého vyčnívá pouze vlákno. Dva hlavní kanálky se táhnou po povrchu boků těla (odkud také název postranní čára) a na hlavě se větví v kanálky vedoucí nad a pod očima a v kanálky spodní čelisti a skřelí. Biologové pochopili funkční význam orgánů postranní čáry až na počátku našeho století. Ukázalo se, že obrvené buňky reagují na tlak vody. Proudící voda přemísťuje v kanálcích sliz nebo působí přímo na vlákna.

Orgány postranní čáry jsou receptory tak zvaného distančního hmatu. Pomáhají rybám orientovat se v povaze proudů a zjišťovat pohyblivé předměty. Každý tvor, který se pohybuje poblíž ryby, uvádí - i když třeba jen v nepatrné míře - vodu do pohybu a tím dává o sobě informaci.

Často se stává, že rybáři uloví zcela slepé dravé ryby, kupodivu byly však přítomně dobře živé. Pozorování slepých štik v akváriu ukázalo, že tito dravci velmi dobře vycitíují blízkost se rybkou a takřka neomylně se jich zmocňují, zatím co mrtvých ryb si vůbec nevšímají.