

## **5. JAKIE SĄ PRAWIDŁOWOŚCI I DROGI PRZEBIEGU EWOLUCJI ORGANIZMÓW ŻYWYCH?**

### **5.1. Celowość osobników żywych**

Kiedy zaczynamy rozważać kwestię celowości osobników żywych lub jej braku, warto jest rozróżnić celowość „zewnątrzną” i „wewnętrzną”. Z zewnętrznego punktu widzenia fizyki fenomen życia nie ma żadnego celu ani sensu – jest takim samym zjawiskiem fizycznym jak spadanie kamieni w polu grawitacyjnym lub kwiaty malowane przez mróz na szybach. A zatem „zewnątrzną” celowość osobników żywych nie istnieje, a wręcz pojęcie to pozbawione jest sensu. Jednakże, z wewnętrznego punktu widzenia biologii cechy osobników żywych są zdecydowanie celowe – służą przetrwaniu i reprodukcji tych osobników. A zatem, osobniki biologiczne posiadają niezaprzeczną, dobrze określoną i silnie wyrażoną celowość „wewnętrzną”.

Nie ma sensu pytać po co Słońce świeci, po co Ziemia krąży wokół Słońca, po co atmosfera ziemska ma taką a nie inną przepuszczalność dla promieni elektromagnetycznych o różnych długościach fali, po co woda ma taką a nie inną stałą dielektryczną, w jakim celu dana reakcja chemiczna charakteryzuje się określoną stałą równowagi ... . Jest sens pytać, po co zwierzętom tak a nie inaczej ukształtowane oczy, po co roślinom liście i barwniki fotosyntetyczne, po co rybom płetwy, w jakim celu powstał mózg i układ nerwowy, po co pawiom długie i barwne ogony, a jeleniom poroża, dlaczego enzymy mają takie a nie inne właściwości kinetyczne ... A więc o ile bezproduktywne wydaje się doszukiwanie się celowości w układach czysto fizykochemicznych, o tyle ma ono głęboki sens w układach biologicznych. Trzeba jednakże starannie uważać, aby obu tych rodzajów celowości ze sobą nie pomylić, i aby jasno określić, o której z nich się w danej chwili mówi.

Każdą cechę, każdy element budowy i funkcji organizmów żywych można i należy rozpatrywać z punktu widzenia ewolucji biologicznej i określanej przez nią celowości struktury i funkcji. Na przykład, dzięki ogromnemu postępowi w rozwoju biologii w XX i na początku XXI wieku, możemy rozsądnie orzekać o celowości (i jej rodzaju, to jest do czego dane celowe rozwiązania służą) takich cech budowy i działania osobników żywych, jak:

- ⇒ sekwencja aminokwasów w białku enzymatycznym, jego trójwymiarowa struktura i funkcja, parametry kinetyczne;
- ⇒ skład błon białkowo-lipidowych w komórce, przenoszenie przez nie substancji i jonów;
- ⇒ budowa i funkcja organów: serca, mózgu, nerek itp.;
- ⇒ zachowanie się (behawior) organizmów żywych – percepcja rozmaitych cech otoczenia i odpowiednie reagowanie na nie;
- ⇒ budowa aparatu kurczliwego oraz mechanizm skurczu mięśnia;
- ⇒ wielkość, kształt i ubarwienie ciała;

⇒ przebieg cyklu życiowego, ilość potomstwa, długość okresu dojrzewania;

⇒ budowa i funkcja oka u kręgowców, głowonogów i owadów.

Nadrzędna, naczelną celowość biologiczną żywego osobnika wyraża się oczywiście w maksymalizacji jego dostosowania (ang. *fitness*) – szans na przeżycie i reprodukcję, na powielenie jego tożsamości w możliwie dużej ilości możliwie podobnych kopii. Osobniki, które nie są najlepsze, najbardziej efektywne w realizacji tego zadania, których poszczególne aspekty struktury i funkcji nie są najbardziej optymalne w danych warunkach środowiska (niszy ekologicznej) po prostu nie prześlą swoich cech (swojej tożsamości) dalej i wyginą bezpotomnie. Ewolucja biologiczna opiera się na prostej, bezwzględnej, bezdusznej i (z ludzkiego punktu widzenia) odpychającej wręcz dyrektywie: „bądź najlepszy, albo giń (bezpotomnie)”.

Warto także pamiętać, że o ile ewolucja ulepsza i optymalizuje, nie znaczy to, że zawsze znajduje „najlepsze z możliwych”, „optymalne”, „doskonałe” rozwiązania. Nie jest więc wszechmocna, nie planuje na przyszłość, działa „tu i teraz”, oportunistycznie, i nie przewiduje dalekosiężnych konsekwencji zachodzących właśnie zmian (stąd biorą się na przykład tak zwane „ślepe uliczki” ewolucji). Dużą rolę w ewolucji odgrywa przypadek (bezkierunkowe mutacje). Ewolucja jest kumulatywna – wcześniej nabyte cechy warunkują do pewnego stopnia (ograniczają) drogi dalszego rozwoju osobników będących „nosicielami” tych cech. Dobudowuje więc ona nowe na bazie starego, a nie planuje i tworzy wszystkiego od nowa. Ewolucja musi także „uwzględniać”, co wydaje się trywialnie wręcz oczywiste, ograniczenia świata fizycznego: nie mogą istnieć obiekty żywe lżejsze od wodoru, przekraczające szybkość światła, przechowujące i kopiujące informację z nieskończoną dokładnością itp.

Ograniczenia dotyczą zresztą nie tylko samej ewolucji biologicznej, ale także naszej oceny jej rezultatów: cech znanych nam organizmów żywych. Nasza wiedza nie jest często wystarczająca, aby zdecydować, które rozwiązanie jest najsprawniejsze, najbardziej optymalne, a które nie – poza przypadkami ewidentnych „bubli” ewolucyjnych, obarczonych oczywistymi wadami konstrukcyjnymi i funkcjonalnymi, takimi jak skrzyżowanie układu pokarmowego i oddechowego u kręgowców lądowych, oko złożone stawonogów, pewne detale planu budowy oka kręgowców, czy wreszcie – beznadziejne z inżynierskiego punktu widzenia defekty w strukturze i funkcji naszej największej chluby – ludzkiego mózgu (o tych wszystkich strukturalno-funkcjonalnych niedoróbkach ewolucji powiem szerzej poniżej). Należy także pamiętać, że w ostatecznej instancji liczy się bilans zysków i strat: nie zawsze rozwiązania najlepsze z konstrukcyjnego punktu widzenia prowadzą do zwiększenia *fitness*: nie jest tak wtedy, kiedy koszty wytworzenia i utrzymywania danej cechy struktury i / lub funkcji oraz obciążenia wynikające z jej obecności przeważają nad przyniesionymi przez nią korzyściami. Często ewolucyjnie bardziej się opłaca przeznaczyć ograniczone zasoby energetyczne (alokować energię) na rozwój innych, bardziej zwiększających

dostosowanie cech. W procesie ewolucji ścisła buchalteria przeważa zatem nad perfekcjonizmem, a przy optymalizacji rozmaitych cech obowiązuje zasada „coś za coś”.

Ewolucja nie jest wobec tego wszechmocna – nie zawsze znajduje rozwiązania najbardziej optymalne, najpoprawniejsze z inżynierskiego punktu widzenia. Często nie wiemy, czy można było dojść do rozwiązania lepszego. Przykładem jest ślizgowy mechanizm skurczu komórki mięśniowej i całego mięśnia. Występuje on we wszystkich rodzajach mięśni: mięśniach szkieletowych, mięśniu sercowym i mięśniach gładkich, u wszystkich znanych nam organizmów, które posiadają komórki mięśniowe lub mięśniopodobne. Polega on, mówiąc bardzo ogólnie, na tym, że pod wpływem nerwowego pobudzenia komórki mięśniowej i uwolnienia (z cystern retikulum sarkoplazmatycznego) jonów wapnia ( $\text{Ca}^{2+}$ ) do jej wnętrza (cytoplazmy) następuje „wsuwanie się” filamentów miozyny pomiędzy filamenty aktyny, skrócenie miomeru (jednostka aparatu kurczliwego) i całej komórki mięśniowej, a w rezultacie skurcz mięśnia. Nie wiemy, czy mógł powstać inny mechanizm. Aparat kurczliwy w komórkach mięśniowych, działający zgodnie z mechanizmem ślizgowym, powstał w toku ewolucji i różnicowania się komórek i tkanek u organizmów wielokomórkowych z „cienkich” filamentów aktynowych, które do dzisiaj wchodzą w skład cytoszkieletu jednokomórkowych eukariontów, na przykład niektórych ameb, a także roślin [*sic!*], a po których poruszają się główki miozyny transportujące różnego rodzaju ładunek, co napędzane jest hydrolizą ATP. Innowacja przy powstawaniu komórek mięśniowych polegała na dobudowaniu do główek miozyny ogonków, ich „sklejeniu” we włóknistą strukturę, co doprowadziło do powstania „grubych” filamentów miozynowych, oraz ich równoległym ułożeniu pomiędzy filamentami aktyny. To kolejny przypadek reguły, że ewolucja wykorzystuje i modyfikuje to, co istnieje, zamiast tworzyć zupełnie od nowa. Ślizgowy mechanizm skurczu mięśnia wydaje się zadziwiający w swej „zmyślności” i funkcjonalności. Ale czy jest doskonały i optymalny, najlepszy z możliwych, cokolwiek by to miało znaczyć? Możemy sobie pospekulować i wyobrazić mechanizmy alternatywne, na przykład skurcz polegający na zmianie konformacyjnej (skrócenie wzdłuż osi długiej komórki mięśniowej) szeregu połączonych ze sobą białek globularnych (mniej więcej kulistych) ułożonych w paciorek wzdłuż tej osi lub na skróceniu „sprężynki” (zbliżeniu do siebie jej zwojów) także mającej naturę białkową<sup>86</sup>. Nasza wiedza jest niewystarczająca, i najprawdopodobniej zawsze taka pozostanie, żeby zdecydować, czy mechanizmy takie mogłyby samoistnie wyewoluować,

---

<sup>86</sup> Można też fantazjować, czy nie byłby możliwy mechanizm skurczu mięśnia (lub organu mięśniopodobnego) oparty nie na aktynie i miozynie, jak u znanych organizmów zwierzęcych, ale na mikrotubulach i kinezyne lub dyneinie. Tak jak w komórkach niemięśniowych rozmaite ładunki transportowane są przez główki miozyny, którym za „szyny” służą filamenty aktynowe, tak inne ładunki, na przykład pęcherzyki „odpączkowane” od aparatu Golgiego lub mitochondria są transportowane przez kinezyny i dyneiny, których „prowadnicami” są mikrotubule (wszystkie te rodzaje transportu napędzane są przez hydrolizę ATP). Teoretycznie rzecz biorąc, ślizgowy mechanizm skurczu mógłby powstać poprzez dobudowanie kinezyinom lub dyneinom długich ogonów, połączeniu ich w „grube” filamenty i ułożenie ich równolegle pomiędzy mikrotubulami.

a jeśli tak, to czy byłyby lepsze od mechanizmu ślizgowego. Czy mechanizm ślizgowy powstał dlatego, że jest najbardziej efektywny, czy też w wyniku przypadku, a raczej swego rodzaju preadaptacji polegającej na tym, że wcześniej były już gotowe u jednokomórkowych przodków zwierząt wyższych prawie wszystkie elementy potrzebne do jego zaistnienia? Nigdy zapewne się tego nie dowiemy.

Podsumowując, wśród cech organizmów żywych dominuje celowość, ale nie oznacza to, że ewolucja biologiczna zawsze dochodzi do rozwiązań optymalnych lub też „najlepszych” z inżynierskiego punktu widzenia. Wprost przeciwnie, często „błądzi” ona i „schodzi na manowce”. W jej przebiegu bardzo istotną rolę odgrywa czysty przypadek (oraz ograniczenia fizykochemiczne). Powtórzmy: ewolucja nie jest wszechmocna i nie z góry na przyszłość nie planuje. Dlatego też odnajdujemy w strukturze i funkcji organizmów żywych, oprócz rozwiązań zadziwiająco zmyślnych, czy wręcz „genialnych”, wiele niesamowicie „głupich” pomyłek i rozwiązań konstrukcyjnych.

Przyjrzyjmy się teraz kilku przykładom zarówno ogromnej „zmyślności” i „pomyślowości” ewolucji, prowadzących do niesamowicie „inteligentnych” rozwiązań, jak i jej bezdennej „głupoty”, na której widok każdy szanujący się inżynier doznałby uczucia głębokiego zażenowania. Co ciekawe, do jednej i do drugiej kategorii należą ... oko kręgowców (w tym człowieka) oraz ludzki mózg.

Ponieważ niewiarygodne „pozytywne” osiągnięcia i wytwory ewolucji biologicznej są powszechnie znane, wspomnę tylko o dwóch z nich (jestem pewien, że każdy Czytelnik, nawet nie będący z wykształcenia biologiem, sam bez trudu przywoła sobie wiele innych przykładów). Pierwszy przypadek to rybka zwana mydliczką (przykład ten zaczerpnąłem z książki Williamsa „Światelko mydliczki”; Williams, 1997). Rybka ta żyje w oceanach, gdzie ma wielu naturalnych wrogów – przede wszystkim ryby drapieżne. Jakikolwiek obiekt „zawieszony” w toni wodnej widziany od spodu na tle rozświetlonego nieba, czy to w pełnym słońcu, czy też o zmroku, widoczny będzie jako czarny kształt, nawet jeśli sam z siebie miałby barwę lśniąco białą. Jak więc stać się w takiej sytuacji niewidocznym dla drapieżnika? Otóż brzuch mydliczki emituje światło widzialne, i to dokładnie o takiej intensywności, jaka jest potrzebna, aby skompensować światło dochodzące od powierzchni wody w różnych warunkach oświetlenia. Rybka ta reguluje zatem natężenie swojego świecenia stosownie do pory dnia, pogody itd. (oczywiście nic ona nie wie o porach dnia i pogodzie, a jedynie odbiera natężenie światła dochodzącego od powierzchni oceanu i odpowiednio na nie reaguje<sup>87</sup>). Jest to zdecydowanie celowe i zaskakująco „zmyślne” zachowanie, świadczące o potencjale twórczym tkwiącym w ewolucji biologicznej.

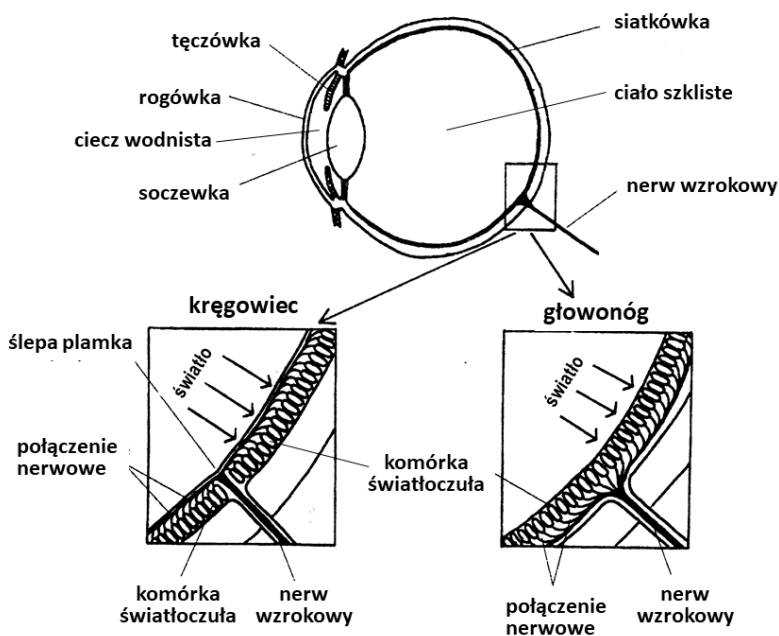
Inny wielce „pozytywny” przykład możliwości ewolucji to oko człowieka (a także wszystkich kręgowców, u których ma ono zasadniczo ten sam plan budowy). Oko ludzkie

---

<sup>87</sup> To jeden z przykładów sprzężenia zwrotnego ujemnego – proszę sobie o nim przypomnieć czytając rozdział 6!

to narząd bardzo złożony, a jednocześnie wysmienicie przystosowany do pełnienia swojej funkcji, czyli rejestracji dynamicznego obrazu (przestrzennego rozkładu kwantów promieniowania elektromagnetycznego, fotonów, w zakresie widzialnym o różnej długości fali oraz jego zmian w czasie) i przesyłania go do mózgu w celu dalszej obróbki (wstępna obróbka, np. ekstrahowanie plam z „pikseli” obrazu, czyli pobudzonych komórek światłoczułych, zachodzi już w obrębie siatkówki). Składa się ono z wielu elementów: ciała szklanego, wypełniającego większość gałki ocznej; siatkówki, czyli warstwy komórek światłoczułych (pręcików, czułych na słabe nawet światło, oraz czopków, odpowiedzialnych za widzenie kolorów) wyścielającej dno gałki ocznej; połączeń nerwowych (neuronów i ich wypustek: dendrytów i aksonów), odbierających sygnały od tych komórek, dokonujących ich wstępnej obróbki, łączących się w nerw wzrokowy i przesyłających informacje do mózgu; soczewki, ogniskującej obraz na siatkówce; osłaniającej ją rogówki; tęczówki, której mięśnie kurczące się lub rozkurczając określają rozmiar źrenicy, a przez to ilość wpadającego do oka światła; naczyńiówki, otaczającej siatkówkę i zawierającej czarny pigment nieprzepuszczalny dla światła; leżącej na zewnątrz od niej twardówki, chroniącej oko i nadającej mu kształt itd.. Ilustruje to ryc. 5.1 (część górna). Poszczególne „optyczne” części oka, takie jak soczewka, ciało szkliste i rogówka (oraz leżąca pomiędzy nią i soczewką komora przednia zawierająca ciecz wodnistą) wykazują ewidentną „znajomość praw fizyki” pozwalającą na możliwie dobre widzenie: charakteryzują się odpowiednią przezroczystością, współczynnikiem załamania światła i krzywizną. Oko może reagować zmniejszeniem średnicy źrenicy w odpowiedzi na silne światło, tak aby ostro widzieć i nie uszkodzić komórek światłoczułych, lub też jej zwiększeniem przy słabym oświetleniu, tak aby widzieć cokolwiek (aby przez źrenicę wpadała wystarczająca ilość fotonów). Pod wpływem skurczu utrzymujących ją mięśni soczewka może przybrać kształt bardziej płaski, umożliwiając widzenie dalekich obiektów, natomiast przy ich rozkurczu staje się bardziej kulista, co umożliwia widzenie z bliska (nazywamy to akomodacją oka). Niewątpliwie zatem oko człowieka to narząd wielce złożony, bardzo dobrze wykonujący swą funkcję i celowo ukształtowany. Jako taki, stanowi ono ulubiony przykład przeciwników ewolucji biologicznej (na czele z kreacjonistami i wyznawcami Inteligentnego Projektu) jako organu, który nie mógł wyewoluować samoistnie z czegoś znacznie prostszego przez rozmaite w pełni funkcjonalne stadia przejściowe („przecież nie można widzieć połową oka” – oto próbka poziomu ich argumentacji). Niemniej jednak nawet Darwin, przekonany oczywiście o prawdziwości swojej teorii ewolucji na drodze doboru naturalnego, przyznawał, że ma kłopoty z wyobrazeniem sobie, jak tak złożony, zmyślny i celowy organ, jak oko ludzkie mógł samoistnie powstać w procesie ewolucji, że na pierwszy rzut oka (przepraszam za tę niezamierzoną grę słowną) spontaniczne wyewoluowanie oka wydaje się w najwyższym stopniu absurdalne. Dziś wiemy, że jego obawy były nieuzasadnione, znamy bowiem praktycznie wszystkie najważniejsze stadia pośrednie (przejściowe) w ewolucji oka pomiędzy plamką światłoczułą na powierzchni ciała a okiem

kręgowców (patrz niżej) oraz rozumiemy całkiem dobrze mechanizmy rozwojowe prowadzące do powstania oka w czasie embriogenezy, które mogą ulegać ewolucyjnej modyfikacji, a także potrafimy symulować uproszczoną ewolucję oka przy użyciu komputera.



Ryc. 5.1. Plan budowy oka – wspólny dla kręgowców i głwonogów (u góry). Szczegółowa budowa siatkówki (na dole) ujawnia wyraźne różnice. U kręgowców połączenia nerwowe odchodzą od komórek światłoczułych w kierunku do wnętrza gałki ocznej, przez co „przesłaniają widok” i tworzą ślepa plamkę w miejscu, gdzie łączą się w nerw wzrokowy. U głwonogów połączenia nerwowe komórek światłoczułych odchodzą w kierunku na zewnątrz od gałki ocznej, przez co nie leżą na drodze promieni świetlnych i nie tworzą ślepej plamki.

Po tych peanach na cześć pomysłowości, zmyślności, czy wręcz geniuszu ewolucji (w końcu ludzkość ciągle jeszcze nie jest w stanie powtórzyć wielu jej osiągnięć), pora przejść do przypadków jej, nie to że głupoty, ale wręcz niewiarygodnego debilizmu (czyżbyśmy mieli więc tu do czynienia z Bardzo Mało Inteligentnym Projektem?). O jego przypadkach rzadziej się mówi, przedyskutuję je zatem nieco szerzej. A ponieważ często uważamy się – my, reprezentanci gatunku *Homo sapiens* – za szczytowe osiągnięcie ewolucji, wręcz „koronę stworzenia”, wiele z nich dotyczyć będzie człowieka.

Żeby znowu sięgnąć do wspomnianej książki Williamsa (Williams, 1997), przytoczę fakt skrzyżowania przewodu pokarmowego z układem oddechowym, a mianowicie gardła-przełyku z przewodami nosowymi oraz jamą gębową i krtanią-tchawicą, obecnego u człowieka wraz ze wszystkimi kręgowcami lądowymi. Przez to skrzyżowanie krztusimy się płynem, który niechcący dostanie się do tchawicy, a możemy nawet śmiertelnie udławić się stałą cząstką pokarmu. Jest więc to ewidentnie spartaczone rozwiązanie anatomiczno-funkcjonalne. A przecież wystarczyłoby poprowadzić przewody oddechowe od nosa do tchawicy obok przewodu pokarmowego w ten sposób, że światła tych przewodów nie kontaktowałyby się z sobą (nie krzyżowałyby się). Skąd taka konstrukcyjna głupota? Ano stąd, że kręgowce lądowe pochodzą od ryb trzonopłetwych, u których, jak u wszystkich ryb (a wcześniej – u pierwotnych strunowców, beczaszkowców *Acrania*, takich jak lancetnik<sup>88</sup>), skrzela (czyli ich układ oddechowy) znajdują (znajdowały) się w szczelinach łączących przewod pokarmowy (gardziel) z powierzchnią ciała. Żeby oddychać, ryby pobierają wodę z rozpuszczonym w niej tlenem przez pysk, a następnie przepuszczają ją przez skrzela, gdzie pobierany jest tlen. Pierwotne płuca u ryb trzonopłetwych (i dwudysznych) miały po prostu postać worka będącego jedynie uchylkiem przewodu pokarmowego. Ryby te zatem nadal pobierały tlen, tym razem połykając go wraz z powietrzem, przez pysk, co stało się później schedą ewolucyjną wszystkich ich lądowych potomków, łącznie z nami. Powtarzam to do znudzenia: ewolucja, kiedy może, wykorzystuje i modyfikuje to, co już istnieje, zamiast tworzyć od nowa.

Drugi przykład ewolucyjnego bubla także wzięłem z książki Williamsa i także dotyczy człowieka. Chodzi o przebieg nasieniowodów u dorosłych mężczyzn. W czasie rozwoju osobniczego jądra schodzą z jamy brzusznej do moszny. Chodzi o ich ochłodzenie – w wyższej temperaturze panującej we wnętrzu ciała plemniki nie mogłyby przeżyć. Jednakże zaszłości ewolucyjne spowodowały, że schodząc do moszny jądra, „ciągnąc” za sobą nasieniowody, „zahaczają” nimi o moczowody, przez co ostatecznie nasieniowody są znacznie dłuższe, niż mogłyby być, gdyby jądra wędrowały do worka mosznowego po drugiej stronie moczowodów. Wydawałoby się, że to głupia, ale łatwa do naprawienia pomyłka. Jednak ewolucja nie myśli, nie analizuje zaistniałej sytuacji i nie planuje na przyszłość. Poza tym, ten ewidentny feler konstrukcyjny ma najprawdopodobniej znikomy wpływ na dostosowanie. A wobec tego opisany stan rzeczy nie uległ, i najprawdopodobniej nie ulegnie zmianie.

Trzeci przykład faktu bezmyślności ewolucji i braku jej długofalowego planowania na przyszłość, tym razem pochodzący ode mnie, stanowi ludzki mózg. Jest to najbardziej

---

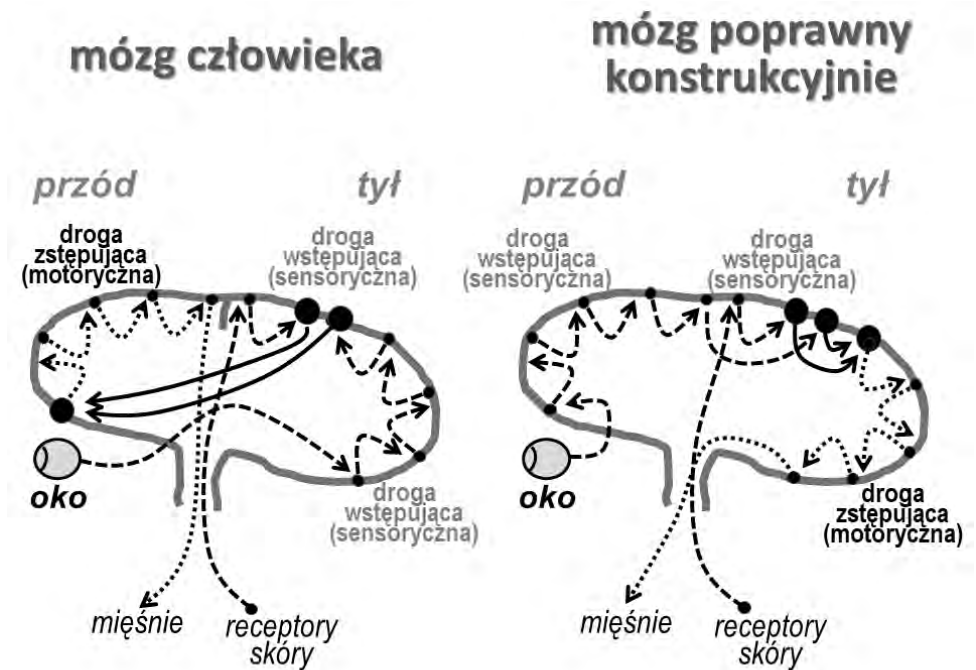
<sup>88</sup> W istocie, szczeliny skrzelowe „przebijające” ściany gardzieli to cecha charakteryzująca, przynajmniej na pewnym stadium rozwojowym (np. larwalnym, embrionalnym), wszystkie strunowce (*Chordata*), w tym osłonice, a najprawdopodobniej wszystkie wtórrouste (*Deuterostomia*) wraz z przedstrunowcami (półstrunowcami, *Hemichordata*): jelitodyszynymi i pióroskrzelnymi (przypuszcza się, że szkarłupnie *Echinodermata* wtórnie je utraciły).

złożony znany nam układ we Wszechświecie. Dzięki niemu jesteśmy tym, kim jesteśmy (w sensie psychicznym). To on jest siedliskiem naszej psychiki, świadomości i samoświadomości, w tym sensie, że wyłaniają się one jako epifenomen, stanowią aspekt lub po prostu „produkt uboczny” aktywności sieci neuronalnej w mózgu człowieka. To on stanowi podstawowe narzędzie umożliwiające spektakularny rozwój nauki, technologii i medycyny. To dzięki niemu w końcu naszym udziałem jest posiadane etyki i estetyki, w tym rozwój sztuki, literatury i muzyki. To w nim leży źródło naszego człowieczeństwa, ze wszystkimi jego blaskami i cieniami.

A jednak wystarczy nieco przyjrzeć się budowie i działaniu ludzkiego mózgu, aby wiele występujących w nim rozwiązań uznać za fatalne z punktu widzenia jakiegokolwiek racjonalnej logiki (i inżynierii). Przede wszystkim, połączenia nerwowe pomiędzy narządami zmysłów a mózgiem oraz pomiędzy różnymi częściami mózgu są znacznie dłuższe i znacznie bardziej poplątane (krzyżujące się), niż mogłyby być, gdyby mózg został zaprojektowany racjonalnie przez jakiegoś inżyniera, a zatem był konstrukcyjnie poprawny. Ilustruje to ryc. 5.2. Widać na niej, że połączenia nerwowe przesyłają bodźce wzrokowe z oczu (ulożonych z przodu głowy) na tył głowy, do płata potylicznego. Potem sygnały te są na wielu etapach integrowane w coraz to bardziej złożone obrazy sensoryczne w korze potylicznej, ciemieniowej i skroniowej. Sygnały od receptorów (dotyku, bólu, ciepła, zimna) ulokowanych w skórze na całym ciele docierają do kory sensorycznej na przedniej krawędzi płata ciemieniowego i także ulegają integracji, choć nie tak złożonej, jak bodźce wzrokowe. Sygnały słuchowe od uszu docierają do kory skroniowej, nie pokazanej na tym schemacie. Wszystko to reprezentuje „wstępującą” (sensoryczną) drogę sygnałów nerwowych. Gdzieś w korze ciemieniowej sygnały (obrazy) różnych modalności (wzrokowej, słuchowej, węchowej, dotykowej) są ze sobą łączone i przesyłane przez długą „magistralę” nerwową z tylnej do przedniej części mózgu, kory przedczołowej, będącej siedliskiem „pamięci operacyjnej” mózgu, procesów myślenia, planowania i podejmowania decyzji (a także stanowiącej „nośnik” psychiki i samoświadomości). Zarówno w tworzeniu obrazów w korze ciemieniowej i skroniowej, jak i w myśleniu i podejmowaniu decyzji wykorzystywane są istniejące zapisy pamięciowe. Z kolei nowe obrazy sensoryczne, procesy myślowe i planowanie przyszłych działań uczestniczą w tworzeniu nowych zapisów pamięciowych. Podjęte decyzje o aktywności ruchowej (może to być lokomocja, operacje manualne, mimika twarzy lub generowanie mowy) są rozpisywane w korze czołowej na sygnały dotyczące aktywacji grup mięśni i poszczególnych mięśni, i następnie przesyłane do poszczególnych włókien mięśniowych przez połączenia nerwowe wychodzące z kory motorycznej, leżącej na tylnym krańcu płata czołowego mózgu. Reprezentuje to „zstępującą” (decyzyjno-motoryczną) drogę sygnałów nerwowych. Połączenia pomiędzy receptorami, efektorami (mięśniami) i różnymi częściami mózgu człowieka, a przede wszystkim pomiędzy samymi tymi czę-



ściami, charakteryzują się znaczną długością i poplątaniem – wielokrotnie się ze sobą krzyżują. Znacznie pogarsza to szybkość i efektywność komunikacji między nimi. Pokazuje to lewy schemat na ryc. 5.2.



Ryc. 5.2. Porównanie połączeń nerwowych pomiędzy receptorami (tutaj: okiem i receptorami w skórze: dotyku, ciepła, zimna, bólu), efektorami (mięśniami) i różnymi częściami mózgu w mózgu człowieka i mózgu „poprawnym konstrukcyjnie”. Przerwane strzałki reprezentują połączenia od narządów zmysłów do mózgu oraz kolejne, coraz to wyższe (tworzące bardziej złożone obrazy sensoryczne) etapy integracji danych zmysłowych w obrębie mózgu, czyli drogę wstępującą (sensoryczną). Kropkowane strzałki oznaczają planowanie i podejmowanie decyzji oraz wprowadzanie ich w życie, czyli skoordynowaną aktywację różnych grup mięśni, rozpisywanie jej na stymulację poszczególnych mięśni wedle określonego wzorca przestrzenno-czasowego, a w końcu – wysłanie sygnałów do mięśni, czyli drogę zstępującą (decyzyjno-motoryczną). Ciągłe strzałki to przesyłanie sygnałów, komunikacja pomiędzy częścią sensoryczną a motoryczną w mózgu, czyli, ogólniej rzecz ujmując, pomiędzy nerwową drogą wstępującą i zstępującą.

Niewątpliwie, w ludzkim mózgu połączenia nerwowe są długie i poplątane (często krzyżują się ze sobą). Nerwy z oczu, znajdujących się z przodu głowy, biegną do najbardziej tyłnej części mózgu, czyli płata potylicznego, gdzie znajduje się pierwotna kora wzrokowa.

Sygnaly pochodzące od oczu ulegają wieloetapowej integracji na coraz to wyższym poziomie, coraz to bardziej złożonej, najpierw w płacie potylicznym, a potem ciemieniowym i skroniowym, tworząc coraz to wyżej zorganizowane obrazy sensoryczne. Natomiast połączenia od receptorów na powierzchni ciała zdążają do kory sensorycznej, leżącej na przednim skraju płata ciemieniowego. Sygnaly od nich także ulegają integracji, chociaż znacznie mniej złożonej, niż sygnaly wzrokowe. (Sygnałów / połączeń nerwowych od innych narządów zmysłów dla prostoty nie pokazano). W końcu, zintegrowane obrazy sensoryczne o różnej modalności zmysłowej zostają jako połączone, by utworzyć jeden wspólny multimodalny obraz sensoryczny i przesłane długimi połączeniami nerwowymi do kory przedczołowej, gdzie następuje ich finalne zjednoczenie, interpretacja i użycie jako „substratu” do planowania i podejmowania decyzji. Następnie, w kolejnych krokach, decyzje zostają rozpisane na wielu etapach na aktywację poszczególnych grup mięśni, pojedynczych mięśni w obrębie tych grup, aż w końcu kora motoryczna, leżąca na tylnej krawędzi płata czołowego, wysyła dyspozycje o ruchu do mięśni w różnych częściach ciała. Należy zwrócić uwagę na długie i krzyżujące się połączenia neuronalne w mózgu człowieka: oko – płat potyliczny, receptory skórne – kora sensoryczna, kora motoryczna – mięśnie, oraz płat ciemieniowy (i skroniowy, niewidoczny na tym przekroju) – płat przedczołowy (czyli: część sensoryczna – część decyzyjno-motoryczna mózgu).

Zupełnie inaczej sytuacja wygląda w hipotetycznym mózgu poprawnym konstrukcyjnie<sup>89</sup>. Tutaj w dużym stopniu przód i tył mózgu zamieniają się miejscami. Kora wzrokowa, zawiadująca poszczególnymi etapami integracji bodźców wizualnych, zlokalizowana jest w przedniej części mózgu, w bezpośrednim sąsiedztwie oczu. Sygnaly od receptorów skórnych płyną do kory sensorycznej położonej na tylnej krawędzi przedniej części mózgu i ulegają umiarkowanej integracji. „Pamięć operacyjna” i sterowanie ruchem ulokowane są w części tylnej. Najwyżej zintegrowane, multi-modalne obrazy sensoryczne zostają przekazane do leżącej zaraz obok, „najwyższej” części kory decyzyjno-motorycznej, a mianowicie ośrodka poznawczego odpowiedzialnego za myślenie, planowanie i podejmowanie decyzji (funkcjonalnego odpowiednika płata przedczołowego). Decyzje są następnie wprowadzane w życie poprzez „rozpisywanie” ich na pobudzenie odpowiednich grup mięśni i poszczególnych mięśni, co jest realizowane przez szereg połączeń nerwowych zmierzających w stronę tylnej części mózgu. Ostatecznie, instrukcje dotyczące skurczu przesyłane są przez połączenia nerwowe prowadzące do samych mięśni. Ogólna długość połączeń pomiędzy receptorami, efektorami (mięśniami) i różnymi częściami mózgu jest tutaj znacznie krótsza, niż w ludzkim mózgu. Dodatkowo, połączenia te krzyżują się jedynie z rzadka, nie są one tak

---

<sup>89</sup> Zapewne dostanę wiele propozycji, jak ten mózg można by dalej usprawnić i uczynić go jeszcze bardziej poprawnym konstrukcyjnie. Nie twierdzę, że znalazłem rozwiązanie doskonałe. Poza tym, z konieczności schemat połączeń w mózgu przedstawiam w dwóch wymiarach, ignorując *explicitie* np. płat skroniowy mózgu.