

BILL SCHUTT

SERCE

HISTORIA
NATURALNA

TŁUMACZENIE
DARIUSZ ROSSOWSKI



Błękitna krew i stare sushi

Jestem inny. Mam inną budowę,
inny mózg, inne serce.

CHARLIEE SHEEN

Krwawię błękitem Dodgersów!

TOMMY LASORDA

Około trzydziestu metrów od starszej, lecz wyglądającej wciąż zupełnie dobrze bliźniaczej pochylni dla łodzi, kolejna przeciwna plażę Monument Beach złowrogim pasem granitowych kamieni i betonu.

– Czy mieszkańcy nie protestowali, kiedy to budowano?

Pytanie zadała moja wieloletnia przyjaciółka, specjalistka biologii bezkręgowców Leslie Nesbitt Sittlow, a było ono skierowane do Dana Gibsona, wysportowanego siedemdziesięciokilkuletniego neurobiologa z Instytutu Oceanograficznego Woods Hole, niedaleko Falmouth w Massachusetts. Razem z Leslie dołączyliśmy do Dana pięć minut wcześniej, po dotarciu tu z Great Bay, zatoki w New Hampshire, innego nadmorskiego habitatu, który odwiedzaliśmy w ramach objazdu Nowej Anglii w celu zbierania materiałów do książki.

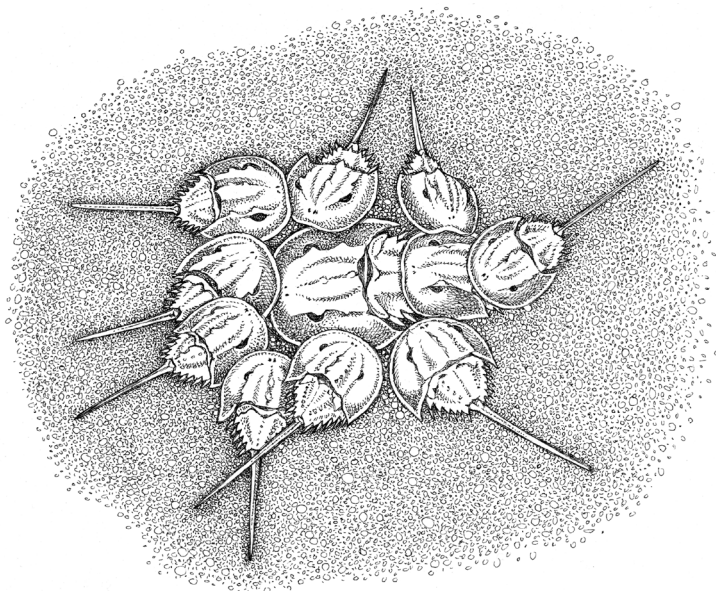
Gibson szukał właśnie czegoś w piasku.

– Mieszkam parę kilometrów stąd – odpowiedział – ale zanim usłyszałem cokolwiek o planach, nowa pochylnia była już gotowa.

Wróciwszy do swego zajęcia, wskazał ręką na niewielkie księżycowate zagłębienie w podłożu. Korzystając z plastikowego kubeczka, zaczął ostrożnie zgarniać cienkie warstewki piasku, aż dostał się mniej więcej dziesięć centymetrów pod powierzchnię. Następnie posłał nam promienny uśmiech i sięgnął ręką do wykopanej jamki. Obmacał ją ostrożnie przez kilka chwil palcami, po czym wyciągnął garść drobnych, niebieskawoszarych kulek.

Jajeczka należały do *Limulus polyphemus*, jednego z czterech pozostałych przy życiu gatunków staroraków. Od Jukatenu po Maine te kopulaste z wierzchu, a szponiaste od spodu stworzenia stanowią dobrze znany widok, gdy na przełomie wiosny i lata pielgrzymują z głębin morskich na przybrzeżne płycizny. Samice poruszają się wraz z przyływem i moszczą się, by złożyć jaja, ponieważ ich gniazda muszą być przykryte wodą w czasie przyływu, a suche i ogrzewane promieniami słonecznymi podczas odpływu. Na podstawie obserwacji poprzedniego dnia w Great Bay wiedzieliśmy, że samce staroraków są od dwudziestu do trzydziestu procent mniejsze od samic i dosiadają ich jak na zlocie motocyklistów. Każdy samiec przepycha się, by zająć jak najlepszą pozycję, i stara się wsiąść na samicę, po czym przywrzeć parą maczugowatych odnóży do jej skorupy. Tak usadowiony, ma idealne warunki do złożenia swojej podobnej do mleka spermy na przypominające wielkością orzecha włoskiego skupiska jajeczek po spodniej stronie ciała samicy. Ostatecznie w czasie jednego przyływu zostaje złożonych od dwóch do pięciu takich skupisk – każde może zawierać łącznie aż cztery tysiące jajeczek – po czym wszyscy wracają do głębin, zapewne w oczekiwaniu na kolejne, sygnalizowane przyływem miłosne zbliżenie. Gibson powiedział, że do czasu zakończenia sezonu godowego samica staroraka składa około osiemdziesięciu tysięcy jajeczek.

Choć te doroczne zloty godowe przyciągają tłumy ciekawskich na plaże wzdłuż całego wybrzeża Atlantyku, ja pojawiłem się tu z Leslie w celu badania układu krążenia staroraków,



zwłaszcza ich serca oraz wyjątkowych właściwości krwi. Mimo zaś atrakcyjnej wycieczki na rakową orgię nasza wyprawa odbywała się w bardziej minorowym nastroju, wiązała się bowiem z poważnym zagrożeniem dla dalszego życia tych pradawnych zwierząt w konsekwencji tychże samych aspektów ich biologii, które zwabiły nas na wybrzeże Massachusetts.

Po zaprezentowaniu nam swego znaleziska Gibson pieczołowicie zagrzebał klaster jajeczek z powrotem w wydłubanej przez siebie jamie. Następnie Leslie i ja, mając już neurologicznie wprowadzone obrazy poszukiwanych kulistych obiektów, dostaliśmy własne kubki oraz polecenie zlokalizowania kolejnych gniazd. Po zlustrowaniu szerokiej betonowej pochylni, która wcinała się co najmniej na trzydzieści metrów w płyciznę, szybko postanowiliśmy oddalić się od niej w poszukiwaniu bardziej piaszczystych stanowisk. Widać było, że największa plaża przylega do obszernego parkingu. Dochodziła dopiero dwunasta i stało tam tylko kilka

samochodów, w nich zaś siedzieli ludzie, którzy zatrzymali się tu na krótkie drugie śniadanie albo na papierosa podczas podziwiania morskich widoków.

Jedyne, czego nie znajdowaliśmy na plaży, to gniazda staroraków – przynajmniej nie znajdowaliśmy ich zbyt ich wielu, szczególnie zaś w rejonie, w którym mieliśmy ich szukać, czyli w pobliżu pochylni.

Gdy po pewnym czasie spotkaliśmy się znów z Gibsonem, wyglądał na sfrustrowanego. Wyjaśnił, że twórcy pochylni nie tylko pokryli kamieniami i betonem pięćdziesiąt metrów plaży idealnej do składania jaj, lecz na dodatek trudniejsze stało się dotarcie do dawnego obszaru gniazdowania.

– Skraj starej rampy dawał zwierzętom możliwość spokojnego podpłynięcia i złożenia jajeczek, podczas gdy reszta otwartej plaży jest narażona na gwałtowniejsze fale. Staroraki zbliżające się z głębszych wód zwykle płyną równolegle do brzegu, póki nie trafią na dobre dla siebie miejsce. Teraz mogą znaleźć ten dawny kawałek plaży jedynie wtedy, gdy będą płynąć wprost do brzegu. Płynąc równolegle, wpadną na nową pochylnię.

Staroraki słyną jednak ze swej odporności. Mają za sobą czterysta pięćdziesiąt pięć milionów lat historii utrwalonej w skamieniałościach – sięgają zatem okresu dwustu milionów lat przed pierwszymi dinozaurami – i są jedynymi nadal żyjącymi przedstawicielami nader różnorodnej kiedyś klasy stawonogów, do której zalicza się też bodaj najslawniejsze zamierzchłe bezkręgowce: trylobity. Trudno znaleźć grupę zwierząt, która istnieje na naszej planecie równie długo jak staroraki; są one zwane z tego powodu żywymi skamielinami.

Pesymistyczne przewidywania badaczy tych zwierząt, takich jak Gibson, są więc szczególnie niepokojące. Kontynuacji spektakularnie długiej żywotności staroraków zagraża obecnie wiele czynników oprócz niszczenia habitatów, w tym jeden związany z unikatowym układem krążenia tych stworzeń.

Jajeczka staroraka oraz malutkie larwy, które wyłaniają się z nich po mniej więcej dwóch tygodniach od zapłodnienia, stanowią istotne źródło pokarmu dla ryb oraz ptaków wędrownych, takich jak biegus rdzawy (*Calidris canutus*), przysadzisty przedstawiciel rodziny bekasowatych. W rezultacie ogromna większość jajeczek i larw staroraków nie ma szans rozwinąć się w aktywne rozrodczo dorosłe osobniki, co wymaga dożycia przez nie wieku około dziesięciu lat. Znawca tych zwierząt John Tanacredi powiedział mi, że jego zdaniem do wieku dojrzałego przeżywa larwa z jednego jajeczka na trzy miliony.

Kiedy Europejczycy przybyli do Nowego Świata, przekonali się, że rdzenni Amerykanie używają różnych części ciała staroraków jako pożywienia oraz nawozu, a także materiału do wyrobu narzędzi typu motyka czy groty dzid¹. W miarę mnożenia się kolonii na Wschodnim Wybrzeżu ludzie zbierali staroraki w ilościach, które wydałyby się nam dziś wprost niewiarygodne. W 1856 roku ponad milion osobników zostało zebranych z jednego milowego odcinka plaży w New Jersey. Tego rodzaju praktyki uszczuplające populację kontynuowano przez znaczną część XX wieku, gdy wrzucano te zwierzęta do zagród ciągnących się w wodzie wzdłuż okazałych fragmentów wybrzeża, gdzie czekały na transport do zakładów produkujących nawozy.

Ta gałąź przemysłu, która koncentrowała się wokół zatoki Delaware i wybrzeża New Jersey, upadła w latach sześćdziesiątych zeszłego wieku z uwagi na kurczącą się populację staroraków oraz rosnącą popularność innych form nawożenia. Niestety masowy zbiór zwierząt nie ustał.

Około roku 1860 amerykańscy rybacy zajmujący się połowem węgorzy odkryli, że posiekane staroraki stanowią znakomitą przynętę dla tych ryb, zwłaszcza dla ogromnych, nabrzmiałych od jajeczek samic. Zbieranie staroraków trwało w najlepsze w połowie XX wieku, gdy niektórzy rybacy zaczęli przerzucać się na trąbiki (duże ślimaki morskie) jako

alternatywne źródło dochodu. Problem w tym, że trąbiki również gustują w pokrojonych starorakach, toteż populacja tych drugich ponownie stanęła przed trudnym wyzwaniem, gdy rybacy zbierali przynętę do zastawianych przez siebie pułapek².

Dzisiaj wielu rybaków łapiących węgorze i trąbiki wciąż uznaje staroraki za najlepszą przynętę; branża ta zuboża populację o mniej więcej siedemset tysięcy osobników rocznie. O ile jednak komercyjny połów staroraków w Ameryce jest w pełni regulowany (przynajmniej w teorii), o tyle coraz większym problemem jest kłusownictwo i niemożność kontrolowania przez urzędników skali połowów³.

W Azji trzy pozostałe gatunki staroraków stają w obliczu jeszcze poważniejszego zagrożenia, którego powody wykraczają poza połów węgorza, a dotyczą bezpośrednio zawartości talerza. W takich krajach jak Tajlandia i Malezja jajeczka staroraków uważa się za afrodyzjak, dlatego w niektórych restauracjach ikra ta stanowi główny specjal w jadłospisie.

Spożywanie tej masy jajecznej – która jest zwykle gotowana lub grillowana – ma jednak swoje minusy. Otóż po zjedzeniu ikry staroraków ludzie niekiedy umierają. Zgon przebiega dość gwałtownie i niemal na pewno wiąże się z istotnym aspektem funkcjonowania naszego układu krwionośnego.

Tetrodotoksyna to śmiertelny środek blokujący pracę nerwów, który jest co najmniej o rząd wielkości (czyli dziesięć razy) bardziej zjadliwy niż jad pająka czarnej wdowy. Wprawdzie jej mroczna sława pochodzi głównie z obecności w bodaj najbardziej niebezpiecznych daniach kuchni egzotycznej – w mięsie (niewprawnie przyrządzonej) ryby fugu z rodziny rozdymkowatych – wytropiono jednak, że kilka epizodów zatrucia tetrodotoksyną wynikało ze spożycia ikry staroraków. Substancja ta jest szalenie niebezpieczna, ponieważ po strawieniu gromadzi się w tkankach mięśniowych i nerwowych. Choć wciąż nie wiemy, w jaki konkretnie sposób dostaje się do układu nerwowego, jej zabójcze działanie przynajmniej

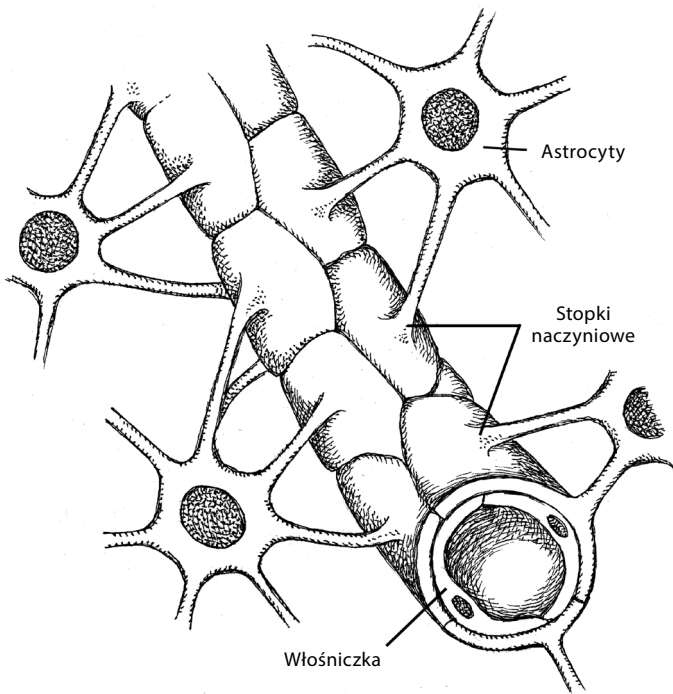
częściowo wiąże się ze zdolnością do przenikania przez blokadę ochronną, zwaną barierą krew–mózg (BKM)⁴.

Bariera ta jest częściowo regulowana przez gwiaździste w kształcie komórki, które nazywamy astrocytami. Stanowią one jeden z kilku typów komórek glejowych (neurogleju), które wspierają, chronią i naprawiają supergwiazdy układu nerwowego: neurony. Astrocyty wykonują wiele różnych zadań. Okazuje się, że między innymi przywierają do włóściczek w mózgu. Podobnie jak w całym ciele naczynia te dostarczają tlen i substancje odżywcze do tkanek, a wyprowadzają z nich zbędne produkty przemiany i dwutlenek węgla. W mózgu astrocyty ograniczają jednak zakres tej wymiany, dopuszczając tylko niektóre substancje (na przykład tlen, glukozę i alkohol) do wnikania z włóściczek. Astrocyty mają stopowate wypustki, nazwane stosownie stopkami naczyńnowymi, które pokrywają ściany włóściczek i działają tam w charakterze bariery. Z reguły to dobrze, ponieważ zapobiegają przedostawaniu się z układu krążenia szkodliwego materiału, takiego jak bakterie i pewne związki chemiczne, które mogłyby uszkodzić delikatną tkankę nerwową mózgu.

Niestety bariera krew–mózg uniemożliwia też przenikanie z krwiobiegu do mózgu pożytecznych substancji, na przykład antybiotyków, co tłumaczy, dlaczego *każda* infekcja mózgu może przerodzić się w stan zagrożenia życia.

„Istotną przeszkodą w leczeniu chorób zwyrodnieniowych układu nerwowego jest w tej chwili to, że większość lekarstw nie może przekroczyć bariery krew–mózg”⁵ – napisał Kelly McNagny, profesor z Zakładu Genetyki Medycznej w Uniwersytecie Kolumbii Brytyjskiej.

Na barierę tę oprócz astrocytów składają się również inne elementy. W szczególności należą do nich „ciasne połączenia”, to jest szwy pomiędzy sąsiednimi komórkami w wewnętrznej wyściółce naczyń krwionośnych. Poluzowanie tych szwów może prowadzić do poważnych konsekwencji. W badaniach wykazano na przykład prawdopodobną zależność między



bakterią związaną z paradontozą a rozwojem choroby Alzheimera⁶. Niektórzy naukowcy sądzą, że *Porphyromonas gingivalis* potrafi przedrzeć się przez BKM i atakuje tkankę mózgową, być może przeciskając się przez szczeliny ciasnych połączeń lub podróżując na gapę wewnątrz białych krwinek, których prawidłowe funkcjonowanie wymaga, aby wydostawały się poza obręb układu krwionośnego.

W eksperymentach na myszach pokazano, że po dostaniu się do mózgu bakterie *P. gingivalis* wydzielają toksyczne substancje zwane gingipainami, które zakłócają funkcjonowanie ważnych białek, uszkadzają neurony i pogłębiają efekty choroby Alzheimera. Infekcja powoduje również kumulowanie się dwóch charakterystycznych białek – amyloidu i tau – które historycznie uważano za sygnatury tej choroby, choć obecnie coraz częściej podejrzewa się, iż w rzeczywistości te lepkie

masy są mechanizmami obronnymi przed *P. gingivalis* i same w sobie nie wywołują choroby Alzheimera⁷. Prowadzone teraz badania w tym zakresie mogą mieć ogromne znaczenie społeczne, ponieważ choroba ta znajduje się na szóstym miejscu przyczyn zgonów w Stanach Zjednoczonych i powodu je śmierć większej rzeszy ludzi niż rak piersi i rak prostaty łącznie*.

Do substancji, które są w stanie przechodzić przez barierę krew–mózg, należy natomiast tetrodotoksyna, a ludzie spożywający jajeczka staroraków powinni wiedzieć, że jej obecność w ikrze jest nie do przewidzenia. Uważa się, że staroraki połykają pewne bakterie wytwarzające tę neurotoksynę, gdy zjadają zarażone nią skorupiaki lub rozkładającą się materię. Objawy zatrucia u ludzi zaczynają się najczęściej niewielkim drętwieniem warg i języka, co nie należy do wyjątkowych wrażeń podczas jedzenia pikantnych potraw tajskiej kuchni. Mrowienie i sztywnienie twarzy może być już jednak pierwszym sygnałem dla stołowników, że dzieje się coś bardzo groźnego. Szybko dołączają się alarmujące objawy w postaci bólu głowy, rozwolnienia, bólu brzucha i wymiotów. W miarę rozprzestrzeniania się tetrodotoksyny w ciele pojawiają się trudności z chodzeniem, ponieważ substancja ta zaczyna blokować impulsy nerwowe, które prowadzą do skurczu mięśni podlegających woli, takich jak te w nogach. Tetrodotoksyna może też przerwać rozchodzenie się sygnałów elektrycznych w miokardium – grubej warstwie mięśnia sercowego. Jak zobaczymy dalej, chodzi tu o układ elektryczny, który odpowiada za skoordynowane kurczenie się i rozprężanie serca, czyli za jego bicie.

* Według danych Ośrodków Kontroli Chorób za rok 2018, czyli najnowszych dostępnych w chwili pisania książki, chorobie Alzheimera przyporządkowano 122 019 zgonów w Stanach Zjednoczonych. Skoro liczba zgonów z powodu COVID w 2020 roku znacznie przekracza tę wielkość, choroba Alzheimera spadnie zapewne o oczko, na pozycję siódmą.

Ostatecznie około siedmiu procent ofiar zatrucia tetrodotoksyną umiera, najczęściej z zachowaniem przytomności i z pełną wiedzą, że lepsze byłoby zjedzenie zepsutego, tygodniowego kalifornijskiego makizushi czy nawet samej japońskiej pałeczki niż ikry staroraka albo ryby fugu, które stały się ich ostatnim posiłkiem*.

Niemniej oprócz ryzyka, że zostaną spożyte, zmielone na nawóz lub posiekane na przynętę, staroraki stają też w obliczu innego, wyjątkowego zagrożenia dla swego bytu.

Wbrew nazwie amerykańskie staroraki *Limulus polyphemus* i ich trzech kuzyni z rejonu Indo-Pacyfiku wcale nie są rakami. Tak jak prawdziwe raki, należą jednak do stawonogów, niezmiernie zróżnicowanego typu zwierząt, do którego zaliczamy owady, pajęczaki i skorupiaki, cechujące się posiadaniem segmentowanego szkieletu zewnętrznego. Co szczególnie ważne dla staroraka, wszystkie mają też *otwarty* układ krwionośny. Układ taki zasadniczo różni się od zamkniętego, jaki spotykamy na przykład u płetwali błękitnych, ludzi i z grubsza pięćdziesięciu tysięcy innych gatunków ssaków, ryb, płazów, gadów i ptaków. Jak niedługo zobaczymy, niektóre bezkręgowce, na przykład dżdżownice, ośmiornice czy kałamarnice, również mają zamknięte układy krwionośne, choć bardzo odmienne od obserwowanych u stworzeń, które są skazane na dźwiganie kręgosłupa.

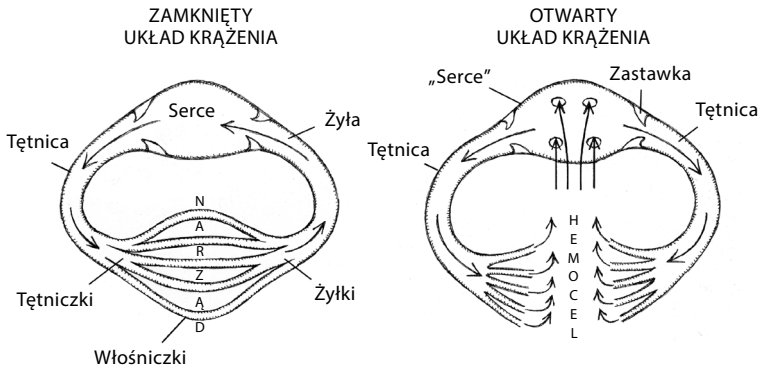
* Ponieważ mimo paralizującego działania tetrodotoksyny ofiary zachowują świadomość, entobotanik Wade Davis zasugerował w 1983 roku, że czarownicy voodoo używali jej do zmieniania ludzi w zombie, którzy następnie pracowali niewolniczo na haitańskich plantacjach. Teoria ta została jednak wkrótce rozbita w drobny pył przez innych naukowców, którzy szczęśliwie mieli trochę pojęcia o tetrodotoksynie i jej rzeczywistym działaniu (zob. T. Hines, *Zombies and Tetrodotoxin*, „Skeptical Inquirer” 2008, 32, no. 3).

W zamkniętych układach krążenia krew opuszcza serce wielkimi tętnicami, które rozgałęziają się w coraz mniejsze tętnice i jeszcze mniejsze tętniczki. Tętniczki wnikają do narządów i tkanki mięśniowej, po czym dzielą się dalej na jeszcze mniejsze naczynia, zwane włosniczkami. Te mikroskopijne rurki składają się w przybliżeniu na osiemdziesiąt procent całkowitej długości układu krwionośnego – i właśnie w tych gęstych sieciach, znanych jako łożysko włosniczkowe, dochodzi do wymiany substancji między krwią a ciałem. Jak pisałem, tlen z płuc lub skrzelii oraz składniki odżywcze wchłonięte z układu pokarmowego przenikają przez cienkie ścianki włosniczek do otaczających je tkanek. Jednocześnie do krwi dyfundują uboczne produkty metabolizmu, takie jak dwutlenek węgla i amoniak, które następnie podążają w stronę serca najpierw małymi żyłkami, a potem coraz większymi żyłami.

U kręgowców skrzelowych, takich jak ryby, niektóre salamandry i wszystkie larwy płazów, ta odtlenowana krew zostaje przepompowana przez skrzelia, gdzie dwutlenek węgla dyfunduje do otaczającej wody, a nowa porcja tlenu wnika do krwi. Jak pewnie zauważyłeś jako istota nieoddychająca w wodzie, w pewnym momencie nastąpiła istotna modyfikacja tego systemu, która pozwoliła na zachodzenie wymiany tlenu i dwutlenku węgla w atmosferze, a nie w wodzie. Co jest istotą tej modyfikacji? Płuca. Więcej o tym będę pisał w dalszych rozdziałach.

Bez względu na to, czy krew zostaje natlenowana w skrzelach czy w płucach, tym, co wyróżnia wszystkie zamknięte układy krążenia, jest ograniczenie jej obiegu do zamkniętej pętli. Inaczej jest u większości bezkręgowców, w tym staroraków. W ich otwartych układach krążenia płyn (zwany nie krwią, lecz hemolimfą) również opuszcza serce tętnicami*,

* W opisie otwartych układów krążenia termin „tętnica” jest stosowany bardziej dla wygody niż w znaczeniu ściśle naukowym. Puryści nazewnictwa anatomicznego wymagają, aby tętnice z prawdziwego



jednak zamiast wpływać do włosniczek, hemolimfa rozlewa się z naczyń do jam ciała, zwanych hemocelami, tak że narządy, tkanki i komórki, z którymi wchodzi w kontakt, są w niej skąpane. Tam hemolimfa przekazuje na zasadzie dyfuzji składniki odżywcze, a jednocześnie pobiera zbędne produkty przemiany materii. Wiele otwartych układów krążenia służy także wymianie tlenu i dwutlenku węgla, ale jak przekonamy się w następnym rozdziale, ważnym wyjątkiem od tej reguły są owady.

Choć skrzela automatycznie kojarzą się nam z rybami, te narządy oddechowe są też obecne u wielu bezkręgowców, w tym u staroraków. Jest to kolejny przykład ewolucji zbieżnej. Mimo że kręgowce i bezkręgowce rozwijały się osobno, jedne i drugie korzystają z dyfuzji do wciągania tlenu do dobrze znanego nam układu blaszek skrzelowych, który często przypomina spięte z sobą kartki w książce. U stawonogów – oprócz owadów – natlenowana hemolimfa opuszcza skrzela i podąża

zdarzenia miały wewnętrzną warstwę tkanki nabłonkowej zwaną śródbłonkiem, która nie występuje w otwartych układach krążenia. Na nasze potrzeby termin „tętnica” będzie używany w sensie czysto funkcjonalnym, w odniesieniu do naczynia, którym płyn ustrojowy zmierza w kierunku *od* serca (natomiast żyły przewodzą płyn *do* serca).

z powrotem do serca układem krążenia. W przypadku staroraków na tym etapie ulega też dodatkowej transformacji: zmienia się z mlecznobiałej w cudnie bladoniebieską.

„Błękitna krew” staroraków i takich bezkręgowców jak głowonogi, małże, homary, skorpiony i tarantule wynika z obecności hemocyjaniny – białka, którego podstawą jest miedź. Hemocyjanina, przenoszona w hemolimfie w postaci rozpuszczonej, po wejściu w kontakt z tlenem łączy się z nim. Kiedy zaś miedź ulega utlenieniu, nabiera niebieskawej barwy – i dlatego hemolimfa opuszczająca skrzela staje się błękitna, podlegając takiej samej reakcji chemicznej, jaka nadaje słynny zielonkawoniebieski pobłysk miedziowanej powłoce Statuy Wolności.

Z wyjątkiem wspomnianej błękitnej krwi cząsteczką przenoszącą tlen u niemal wszystkich innych stworzeń mających układ krążenia jest hemoglobina. W jej przypadku tlen łączy się z atomem żelaza, a nie miedzi. Ponadto w odróżnieniu od hemocyjaniny hemoglobina nie pływa swobodnie we krwi, lecz jest transportowana w wyspecjalizowanym typie komórek – w erytrocytach, które przeznaczają swój około czteromiesięczny żywot na rozprowadzanie hemoglobiny po całym układzie krwionośnym*. Ponieważ erytrocyty zawierają żelazo, a nie miedź, po utlenowaniu nie odbijają światła niebieskiego, tylko czerwone. Zapewne nie są ci one obce – to tak zwane krwinki czerwone. A jeśli zmiana koloru powodowana tlenem też wydaje ci się znajoma, jest tak dlatego, że taka sama reakcja utleniania zachodzi, gdy żelazny płot wystawiony jest na kontakt z tlenem atmosferycznym i staje się rdzawoczerwony.

Dlaczego ludzie i inne kręgowce nie mają błękitnej krwi? Odpowiedź wiąże się prawdopodobnie z wielkością ciała i wydajnością przenoszenia tlenu. Większe organizmy potrzebują

* Hemoglobina występuje również w niektórych innych komórkach oprócz erytrocytów, na przykład we wspomnianych wcześniej astrocytach w mózgu.

więcej tlenu, a hemoglobina lepiej nadaje się do tego zadania. Każda cząsteczka hemoglobiny może przenosić cztery cząsteczki tlenu, podczas gdy hemocyjanina – tylko jedną. Dlatego z biegiem czasu organizmy mające we krwi hemoglobinę mogły wykształcić większe ciała niż te korzystające z hemocyjaniny.

* Czytelnicy powinni mieć świadomość, że jama okołosercowa (worek osierdziowy) w zamkniętych układach krwionośnych funkcjonuje