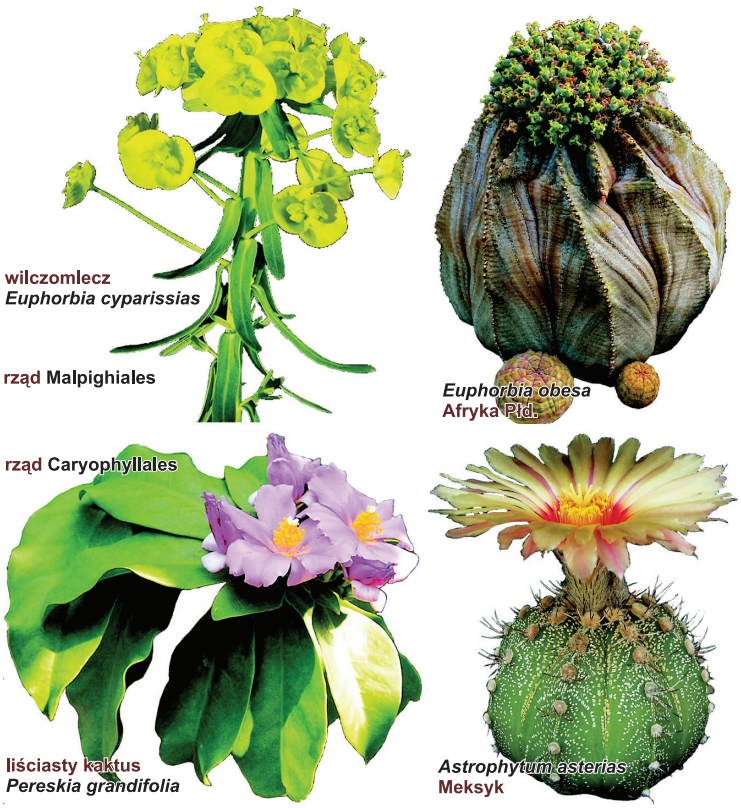
Przyczyny zbieżności
Dokąd zmierza ewolucja?

Przyszła pora na zadanie pytania najważniejszego – o istnienie i (jeśli istnieje) naturę porządku w świecie żywym. Skoro nie podlega dyskusji, że obecny jego stan jest rezultatem miliardów lat ewolucji, można temu pytaniu nadać postać całkiem konkretną: Czy zmiany ewolucyjne są chaotyczne, czy może zmierzają w z góry określonym kierunku? Rozliczne paradoksy ujawniające się w naturze ważnych aspektów życia przywołują myśli niekoniecznie wiodące do jednoznacznej konkluzji. Takie, na przykład, jak pozorna czy rzeczywista sprzeczność między przyczynami a skutkami zjawiska płci.

Wiemy, że procesy płciowe ograniczają różnorodność w obrębie grup krzyżujących się osobników, podobnie jak wszelkie inne formy horyzontalnego przepływu informacji genetycznej. Z drugiej strony, próbując wskazać korzyści z istnienia zjawiska płci, uznajemy, że stymuluje ono jednak tempo zwiększania odmienności między różnymi liniami ewolucyjnego rozwoju, dzięki czemu jest jednym z istotnych powodów anatomicznej, fizjologicznej i behawioralnej różnorodności świata żywego. Mimo to niespokrewnione organizmy bywają uderzająco do siebie podobne, co nazywa się **konwergencją**. To zjawisko sprawiające wrażenie, jak gdyby przyroda chciała osiągnąć określony stan niezależnie od tego, jaki jest punkt wyjścia. Choć poszukiwanie przyczyny tego aspektu ewolucji zajmuje badaczy od dwóch stuleci, nie doprowadziło do jednoznacznej konkluzji. Dostarczyło jednak wielu argumentów na rzecz tezy, że ewoluujące organizmy są mocniej związane niezmiennymi prawami fizyki i chemii niż uwarunkowaniami mechanizmu ewolucji. W tym rozdziale chcę je skonfrontować. Dopiero to, co pozostanie po uwzględnieniu tego oczywistego aspektu zagadnienia, warto rozważyć jako mające nietrywialną, być może pozaprzyrodniczą naturę.

Zacznijmy od klasycznego przykładu analogii między organizmami z różnych kontynentów, których postać na pierwszy rzut oka sprawia wrażenie, jakby były sobie pokrewne. To pustynne kaktusy o kulistych pędach, np. częsty na europejskich oknach *Echinocactus* z Ameryki Płd., oraz południowoafrykańskie wilczomlecze, np. *Euphorbia obesa*. W obu przypadkach pękata łodyga ma podłużne żebra z rzędami kolców. Podobieństwo to nie ma jednak żadnego związku z rodowodem tych roślin. By się o tym przekonać, wystarczy porównać ze sobą ich ulistnionych i niewątpliwie ewolucyjnie pierwotniejszych krewniaków. Rosnący u nas europejski wilczomlecz *Euphorbia cyparissias* to zwyczajna roślina zielna ze złożonymi kwiatostanami, w których z trudem można się dopatrzyć uproszczonych pojedynczych kwiatów (funkcje wabienia owadów pełnią u niej żółte liście). Bardzo podobne kwiatostany pojawiają się wiosną u pustynnego afrykańskiego gatunku, nie pozostawiając wątpliwości co do jego pokrewieństw. Natomiast ulistniony kaktus *Pereskia* z Ameryki Płd., skąd wywodzi się cała rodzina kaktusów, to krzew z pięknymi pojedynczymi kwiatami o licznych, spiralnie rozmieszczonych amarantowych płatkach. Budowa słupka z zalążkami umiejscowionymi na centralnej osi wskazuje na pokrewieństwa kaktusów (rodzina Cactaceae) z goździkami (Caryophyllaceae), a nie z ewolucyjnie od goździków odległymi wilczomleczami (Euphorbiaceae). Podobieństwo



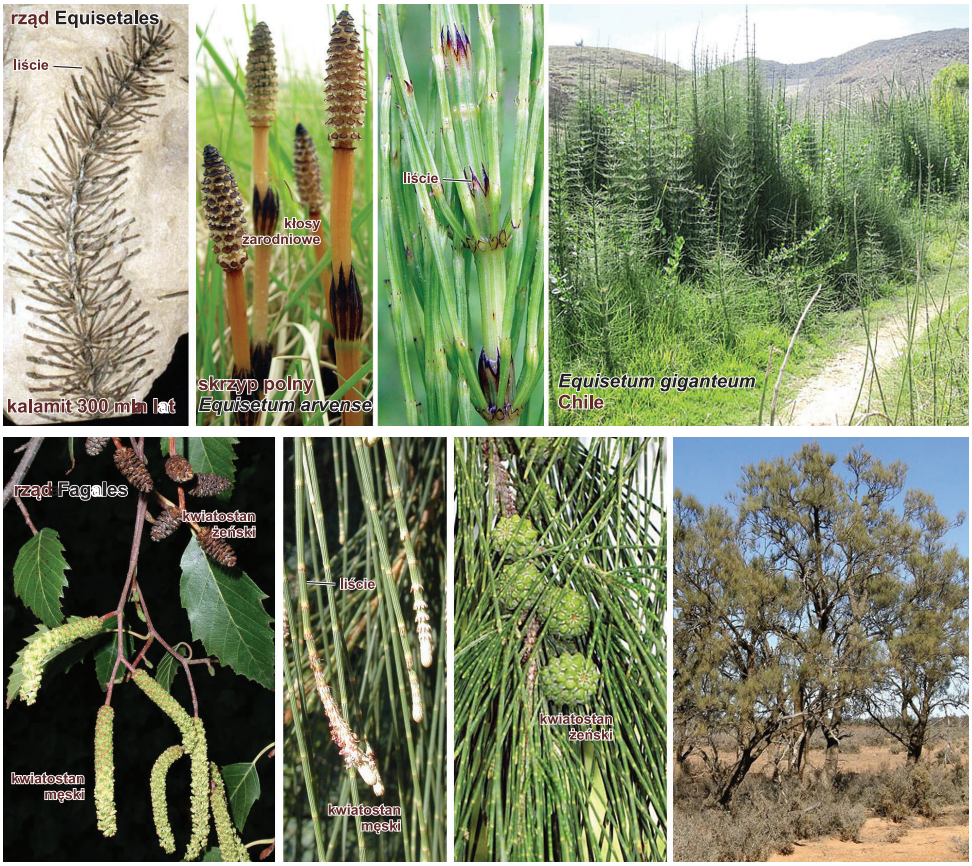
Ewolucyjne upodobnienie pustynnych wilczomleczy i kaktusów wynikające z działania identycznego nacisku selekcyjnego na zupełnie odmienne organizmy wyjściowe

pękatych pustynnych kaktusów do pustynnych wilczomleczy jest więc bez wątpienia przejawem przystosowania do podobnego środowiska życia. Taki kształt to sposób na deficyt wody, umożliwiający magazynowanie jej w tkankach napęczniałego pędu przy jednoczesnym ograniczeniu jej utraty. Kula ma przecież najmniejszy stosunek powierzchni do objętości, a tym samym najmniejszą możliwą powierzchnię parowania. Towarzysząca temu swoistość fizjologii, polegająca na zdolności do wiązania dwutlenku węgla w nocy przy otwartych szparkach, a wychwytywania energii słonecznej w dzień przy szparkach zamkniętych, także ogranicza utratę wody. Liście przekształcone w kolce chronią roślinę przed zwierzętami mającymi apetyt na soczyste tkanki gromadzące wodę wewnątrz łodygi. Wiele roślin przystosowujących się do warunków pustynnych przyjmuje taką postać. To nie kaprys ewolucji, lecz nakaz prostych praw fizyki i chemii.

Inny przykład, odwołujący się do uwarunkowań narzucanych przez zupełnie odmienne środowisko i specyficzną wyjściową anatomię pędów, daje ewolucja skrzypów. Wywodzą się one z kalamitów – bagiennych przodków o odwrotnie klinowatych liściach w okółkach i łodygach wypełnionych przestworami powietrznymi, które ułatwiały dostarczanie powietrza do części pędów zanurzonych w beztlenowym środowisku bagiennego mułu. Kalamity sprzed 320 mln lat przybierały postać niewielkich drzew. Jednak około 240 mln lat temu przodkowie skrzypów zaczęli zasiedlać środowiska prawdopodobnie okresowo suche. Przejawem przystosowania do takich warunków były redukcja liści do postaci brązowych łusek w okółkach, formowanie bulw (podobnie jak u skrzypu polnego *Equisetum arvense*) oraz powstanie zwartego układu zarodni w owalnych kłosach. Tak wyglądają wszystkie dzisiejsze skrzypy, nawet jeśli ich rozmiary i rozgałęzione pędy (np. *E. giganteum* z Chile) przypominają nieco kalamity.

Lecz to nie wymarłe drzewiaste kalamity są najbardziej podobne do dzisiejszych skrzypów, lecz australijskie drzewa kazuaryny *Casuarina*. Są one pokrewne olszy *Alnus*, co wyraża się w rozdzielnopłciowości kwiatostanów i szyszkowatym kształcie owocostanów złożonych ze zdrewniałych łusek, między którymi rozwijają się owoce – orzeszki. Kazuaryny, podobnie jak skrzypy, mają liście zredukowane do łusek w okółkach i nawet ich zwarte kwiatostany przypominają kształtem kłosy zarodniowe skrzypów. Właściwości te wynikają z przystosowania do raczej ubogiego w wodę środowiska. Redukcja liści ograniczyła parowanie, a ponadto na ostrych koniuszkach szczątkowych liści mgła może kondensować się w krople wody spadające rankiem na glebę niczym deszcz. Ubóstwo biogenów w jałowej kamienistej glebie rośliny z takiego środowiska zwykle rekompensują, wykorzystując symbiotyczne bakterie korzeniowe. Kazuaryny asymilują atmosferyczny azot z pomocą bakterii korzeniowych *Funkia* odziedziczonych po przodku podobnym do olszy.

Kolejnym przykładem niezależnych podobieństw są – jeszcze skuteczniejsze od kazuaryn czy kaktusów w kolonizowaniu ekosystemów pustynnych – akacje. To inna droga do tego samego celu: mniej lub bardziej zaawansowana redukcja ulistnienia, kolczaste łodygi (choć niekiedy asymilujące i zielone), a przede wszystkim nieprawdopodobnie rozbudowany system korzeniowy



olsza
Alnus jorullensis

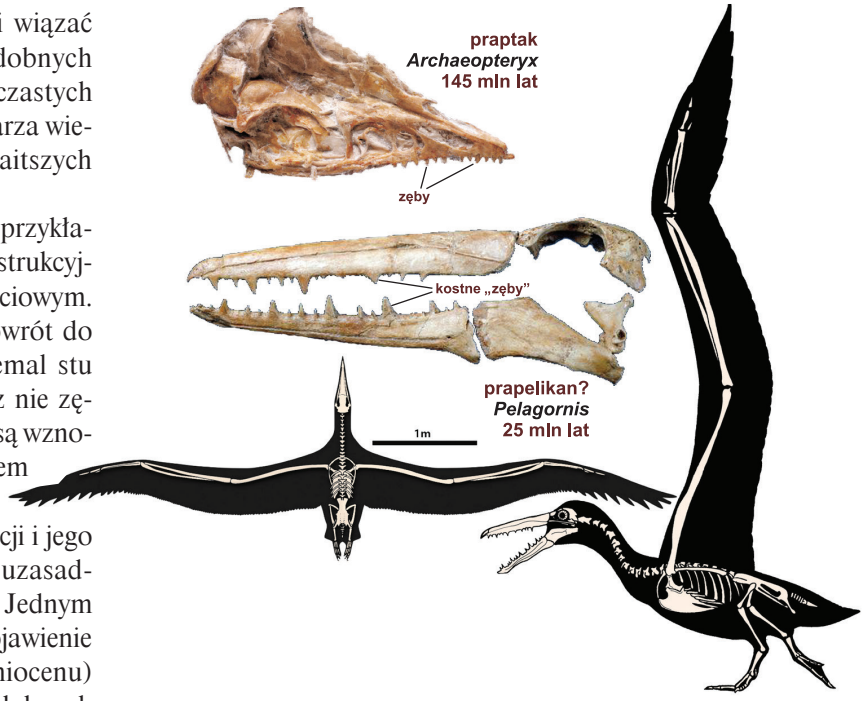
kazuaryna
Casuarina equisetifolia

Upodobnienie australijskich roślin kwiatowych do skrzypów jako skutek zbliżonych uwarunkowań funkcjonalnych

z bakteriami symbiotycznymi mogącymi wiązać azot atmosferyczny. Różnorodność podobnych do akacji niespokrewnionych z nimi kolczastych krzewów w środowiskach pustynnych stwarza wiele możliwości doszukiwania się najrozmaitszych anatomicznych i fizjologicznych analogii.

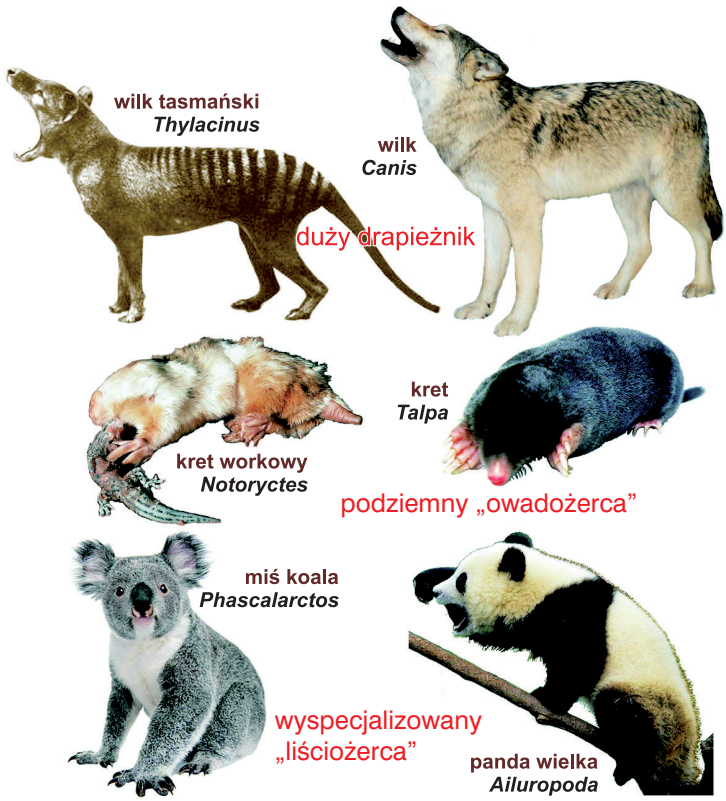
Również królestwo zwierząt dostarcza przykładów powstania podobnych rozwiązań konstrukcyjnych niemających związku ze stanem wyjściowym. Jednym ze szczególnie dobitnych jest powrót do uzębienia szczęk ptaków po upływie niemal stu milionów lat od ewolucyjnej utraty przez nie zębów. Prawie zawsze tego typu nawroty nie są wznowieniem stanu wyjściowego, bowiem system regulacji rozwoju anatomii przez geny homeotyczne ulegał tymczasem destruk- cji i jego odtworzenie było niemożliwe. Takie jest uzasadnienie zasady **nieodwracalności ewolucji**. Jednym z najdziwniejszych jej potwierdzeń było pojawienie się 13 mln lat temu (pod koniec epoki miocenu) pokrewnych pelikanom, a ekologicznie podobnych do albatrosów, ptaków z rodzaju *Pelagornis* o zadziwiającej budowie dziobów. *Pelagornis* miał kostne wyrostki na szczękach wyglądające i pełniące funkcje takie jak zęby. Jego kostne zęby (prawdopodobnie z rogową okrywą) są jednak tylko **analogią** tkwiących w zębodołach zębów prawdziwych – z twardej emalii i dentyny. Niewątpliwie śliską rybę łatwiej utrzymać ostrymi zębami niż gładką krawędzią rogowego dzioba. Nic dziwnego, że pierwotne uzębienie długo utrzymywało się w linii ewolucyjnej morskich praptaków. Jedynie zaawansowane ewolucyjnie morskie ptaki radzą sobie z chwytaniem ryb dzięki szczególnej elastyczności kości czaszki. Obserwatorom imponują umiejętności alki maskonura (*Fratercula*) potrafiącego złowić kolejno kilkanaście rybek, nie wypuszczając z dzioba wcześniej schwytanej zdobyczy. Zdawałoby się, że skoro pojawiła się potrzeba posiadania zębów u następców pozbawionego ich przodka *Pelagornis*, to przecież można by wrócić do stanu późnojurajskiego praptaka *Archaeopteryx* sprzed 145 mln lat, który miał prawdziwe zęby odziedziczone po gadach. Jednak najwidoczniej po ponad stu milionach lat nieużywania i degradacji odpowiedzialnych za ich rozwój genów odtworzenie pierwotnego stanu nie było już możliwe. Zapomniana funkcja odnowiła się wraz z przyjęciem podobnego trybu życia, ale na innych zasadach rozwojowych.

Wykonywanie podobnych czynności wymusza zbliżone rozwiązania konstrukcyjne. Dlatego na różnych kontynentach można skompletować osobne zestawy „typów przystosowawczych", czyli zwierząt i roślin łudząco do siebie podobnych, bo skonstruowanych według tych samych zasad inżynierii.



Powrót do uzębienia szczęk morskich ptaków w wyniku ewolucyjnego wytworzenia wyrostków kostnych imitujących dawno zanikłe prawdziwe zęby praptaka

Klasycznym, podręcznikowym tego przykładem jest porównanie różnorodności torbaczy australijskich ze zróżnicowaniem łożyskowców z innych kontynentów. W Australii istnieje ich pełne *spectrum* – od podziemnych „kretów" workowatych, przez mrówkojady, po nadrzewne ssaki szybujące. Jeśli jednak

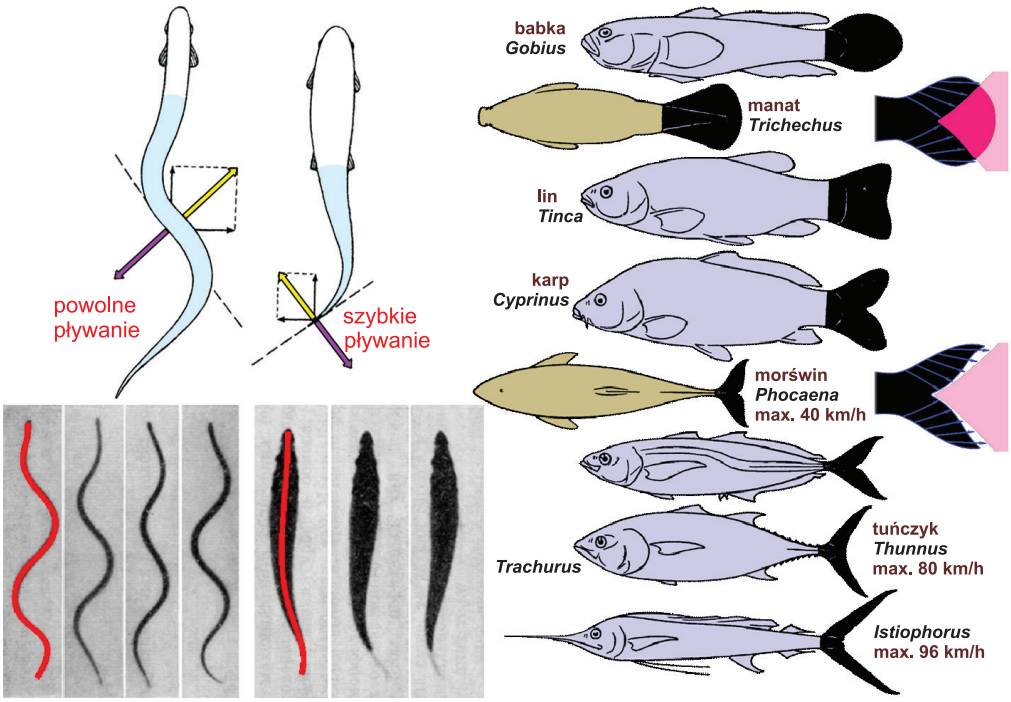


Analogie między australijskimi torbaczami a eurazjatyckimi ssakami łożyskowymi o podobnej specjalizacji ekologicznej

przyjrzeć im się bliżej, okaże się, że podobieństwa są zwykle powierzchowne i wynikają z respektowania tych samych prostych praw mechaniki. To zrozumiałe, że duży drapieżnik musi mieć mocny aparat do rozdrabniania pokarmu, a mrówkojadowi jest on niepotrzebny, bo lepiej temu służy lepki język. Jednak ani wyjściowe stany anatomii, ani kierunki nacisku selekcyjnego ze strony środowiska nie bywają identyczne. **Nisze ekologiczne**, czyli „profesje" uprawiane przez organizmy w ich środowisku życia są niepowtarzalne. Złożona zaś ze wszystkich możliwych nisz „przestrzeń ekologiczna" jest mniej lub bardziej jednorodna i ciągła. Może być w różny sposób podzielona na obszary aktywności poszczególnych gatunków i tak się rzeczywiście dzieje w różnych ekosystemach. Jest to kolejny przejaw niepowtarzalności ewolucji.

Funkcjonalne (inżynierskie) aspekty anatomii prowadzące do analogii planów budowy ciała są szczególnie oczywiste w przypadku technik przemieszczania się w wodzie. Woda jest ośrodkiem nieściśliwym i gęstym, uniwersalne zasady hydrodynamiki są więc bardzo istotnym i ściśle egzekwowanym czynnikiem selekcyjnym. Szczególnie wyraźnie widać to na przykładzie mechanizmu undulacyjnej lokomocji „rybiego" typu. Polega on na przesuwaniu się wzdłuż ciała asymetrycznej fali pobudzenia – mięśnie po obu stronach ciała kurczą się w przeciwnej fazie. Przy małych prędkościach tak wymuszonego ruchu korzystniejsza jest większa długość ciała w stosunku do długości fali pobudzenia (kształt wężowaty). Z kolei przy szybszym pływaniu fala się wydłuża, a ciało skraca, co ostatecznie wygląda jak machanie ogonem na boki. Bezwładność ciała pozwala wtedy na jego unieruchomienie w okolicach środka ciężkości, co wspomaga działanie płetwy ogonowej na takiej samej zasadzie, jak „ósemkowanie" wiosłem z łódki. Środek ciężkości jest z przodu, a płetwa ogonowa z tyłu – to dlatego ryby mają „rybi" kształt. Napęd undulacyjny przy takim kształcie ciała jest najefektywniejszy w jego końcowej części i z tego wynika istnienie osobnej powierzchni napędowej – płetwy ogonowej. Zupełnie odmienna jest funkcja horyzontalnie ustawionych płetw parzystych. Mogą one służyć za podwodne skrzydła, pozwalając na wykorzystanie siły nośnej do unoszenia ciężkiego ciała w wodzie, bądź za ster wysokości. Płetwy nieparzyste na grzbiecie i przy nieruchomej nasadzie ogona to stateczniki, czyli odpowiedniki kila żaglówki – wspomagają bezwładność, bocznym oporem wody dodatkowo unieruchamiając ciało.

Pływanie w wodzie oznacza pokonywanie jej oporu, który zależy od pola powierzchni przekroju poprzecznego ciała, a także jego kształtu – rybi, wymuszony przez mechanizm napędu, szczęśliwie jest zgodny z wymaganiami hydrodynamicznymi. Stopniowo zwężający się ogon umożliwia bowiem, do osiągnięcia pewnych prędkości, niezaburzony (**laminarny**) opływ strug cieczy przemieszczających się wzdłuż ciała. Jednak w pewnym miejscu ciało się kończy – strugi spotykają się wtedy z dwóch stron i zaczynają się zaburzenia opływu (**turbulencje**). Przy znacznej prędkości ruchu turbulencje przy krawędzi spływu strzępią płetwy, co powoduje nacisk selekcyjny na powstanie wycięcia pośrodku płetwy i wąskich bocznych płatów półksiężycowego kształtu (czy raczej jaskółczego ogona). Dzięki tym czynnikom na podstawie pokroju ciała i płetw łatwo odgadnąć maksymalną prędkość pływania. Jasno z tego widać, że i w tym przypadku prawa fizyki są przyczyną konwergencji. Znakomicie się to uwidacznia w podobieństwie kształtów ryb i gadów wodnych, mających ogon pracujący wygięciami na boki, ze ssakami, których kręgosłup wygina się z góry na dół. I wśród ryb, i wśród ssaków występuje podobna różnorodność kształtów –



Mechanizm rybiej lokomocji i związek kształtu ciała z właściwościami hydrodynamicznymi rybokształtnych kręgowców

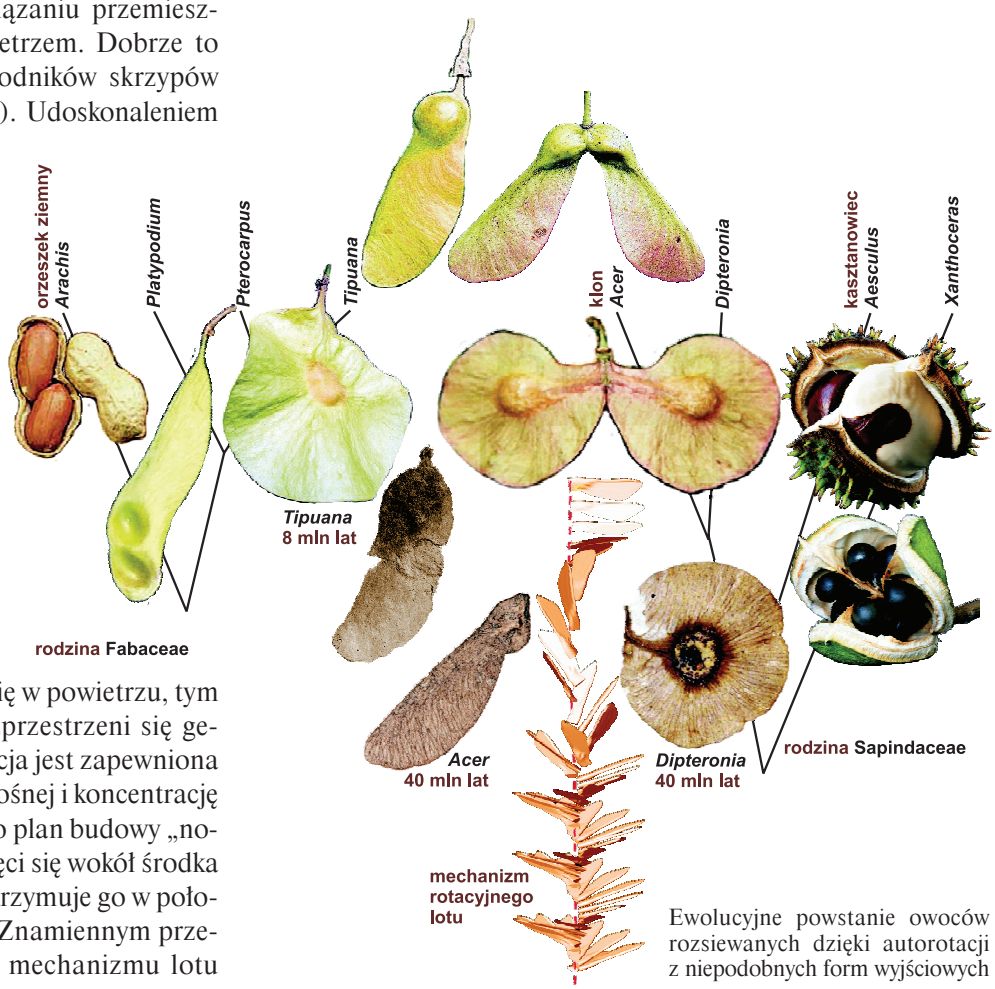
od wężowatych ciał zwierząt najwolniej pływających po najbardziej wyrafinowane, takie jak u merlina. Nakładają się tu na siebie uwarunkowania konstrukcyjne i historyczne. Tej samej natury są problemy, przed którymi stoi konstruktor łodzi: z jednej strony wymagania narzucone przez prawa fizyki, z drugiej – tradycja kulturowa wymagająca nadania jachtowi mniej lub bardziej tradycyjnego kształtu. Inżynieria wygrywa jednak z historią.

Przemieszczanie się w powietrzu wymaga przystosowań podobnych do niezbędnych w wodzie, choć nacisk selekcyjny na kształt bywa mniejszy i pozwala na większą różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych. Nawet w świecie roślin lądowych, które od początków swojej ewolucji wykorzystują powietrze jako medium rozsiewania własnego genomu, można znaleźć liczne przykłady łudząco podobnych konstrukcji wyprowadzonych z zupełnie odmiennych stanów wyjściowych.

Powietrze jest płynem ściśliwym i mniej gęstym niż woda, ale przemieszczanie się w nim wymaga poddania się podobnym ograniczeniom. Przy bardzo małych rozmiarach obiektów dominują **siły lepkości**. Takie były uwarunkowania rozprowadzania z wiatrem zarówno zarodników pierwszych roślin lądowych, jak i pyłku roślin wyższych. Ich kształty i przydatki służą związaniu przemieszczającego się obiektu z powietrzem. Dobrze to uzmysławia wyposażenie zarodników skrzypów w rozwijane przydatki (elatery). Udoskonaleniem sposobu wykorzystania lepkości powietrza jest kunsztowna konstrukcja opatrzonego włoskami „spadochronu" w owocach mniszka *Taraxacum* („dmuchawce"). Bardzo podobne konstrukcje można znaleźć w świecie wodnych zwierząt planktonowych.

Ale istnieją też latające owoce roślin, u których nastąpiło rozdzielenie funkcji między masywną część działającą na zasadzie **bezwładności** a część przypominającą rybi ogon. To owoce autorotujące. Im dłużej owoc unosi się w powietrzu, tym dalej dotrze i tym szerzej rozprzestrzeni się genom zawarty w nasionie. Rotacja jest zapewniona przez asymetrię powierzchni nośnej i koncentrację masy na przeciwnym skraju. To plan budowy „noska" klonowego. Cały owoc kręci się wokół środka ciężkości, a siła odśrodkowa utrzymuje go w położeniu prawie horyzontalnym. Znamiennym przejawem wykształcenia takiego mechanizmu lotu jest historia ewolucyjna owoców klonu. Z nałożenia różnorodności morfologicznej na pokrewieństwa molekularne wynika, że ich wyjściowa forma była prawdopodobnie podobna do owoców kasztanowca *Aesculus*. W toku ewolucji, którą można odgadnąć z różnorodności dzisiejszych krewniaków tych roślin i z (ubogiego, niestety) zapisu kopalnego, kolczasta osłonka nasiona stawała się płaska, co zwiększało jej powierzchnię, spowalniając opadanie i zwiększając zasięg rozsiewania. Działa to dopóty, dopóki owoc utrzymuje położenie mniej więcej horyzontalne. Jeśli ustawi się pionowo, szybko i chaotycznie spadnie na ziemię. Dopiero kontrolowana rotacja pozwala na utrzymanie horyzontalnego ustawienia. Dobór naturalny premiował więc asymetrię skrzydełka. Tak przebiegała ewolucja w rodzinie Sapindaceae, do której należy klon *Acer*.

W Ameryce Płd., tak jak u nas klonami, ulice obsadza się drzewami tipu *Tipuana*. Leżą pod nimi „noski" łudząco podobne do klonowych, tyle że niezłączone parami przed oderwaniem się od szypułek, lecz pojedyncze. Nie bez przyczyny, droga ewolucyjna bowiem, która doprowadziła do takiego kształtu, jest zupełnie odmienna od przemian owoców klonu. Tipu to roślina z rodziny motylkowych Papiliona-



Ewolucyjne powstanie owoców rozsiewanych dzięki autorotacji z niepodobnych form wyjściowych

ceae (czyli Fabaceae) i jej owoc jest zmodyfikowanym strąkiem! Zapewne najpierw wydłużony strąk jej przodka zredukował swoją zawartość do jednego, dwóch nasion, co odpowiada orzeszkowi ziemnemu *Arachis*, potem stracił płaską część u nasady, aż wreszcie wykształcił asymetryczne skrzydełko. To fascynujący (przynajmniej dla mnie) przykład, jak nacisk selekcyjny wywoływany prawami aerodynamiki prowadzi do w zasadzie identycznego rezultatu, nie przejmując się wcześniejszą historią organizmu. Tak fizyka narzuca biologii reguły gry.

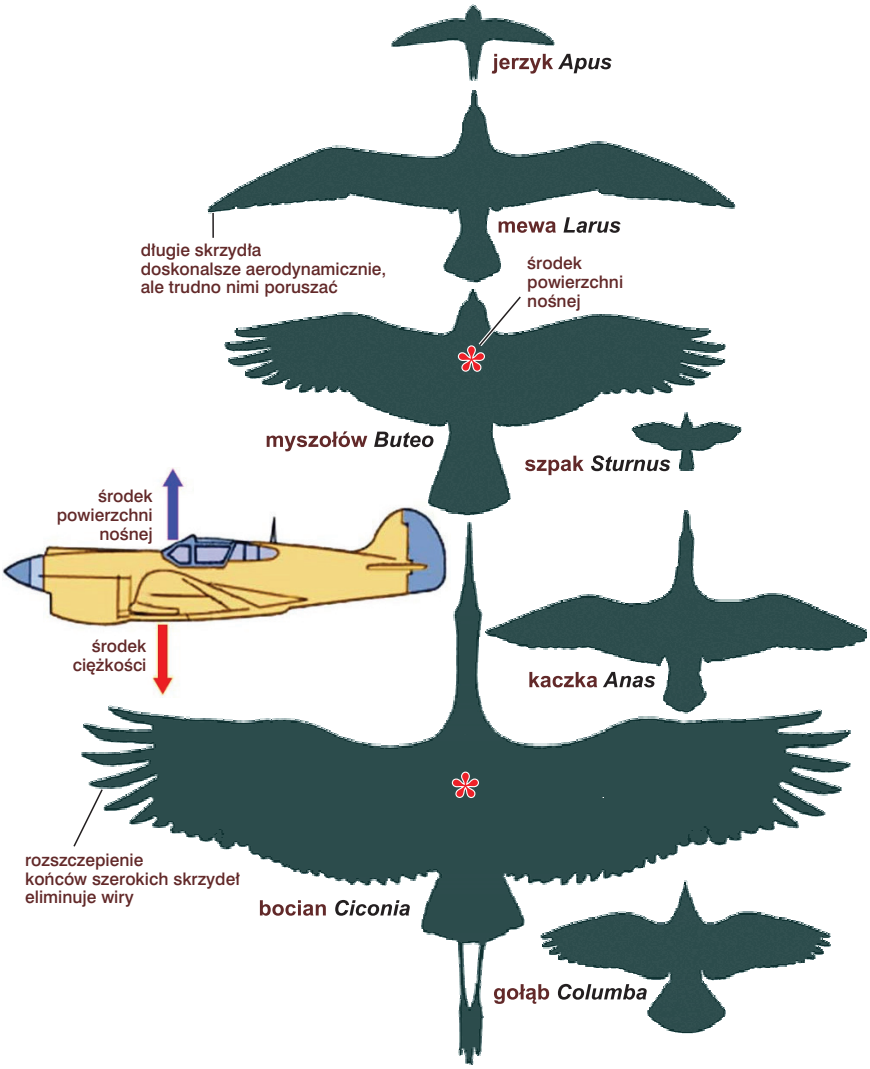
Skoro tok wywodu obejmuje środowisko powietrzne, nie wypada pominąć opowieści o tym, jak latają ptaki. Jest to możliwe dzięki tym samym rozwiązaniom konstrukcyjnym, które inżynierowie (wykorzystując wiedzę przyrodniczą) wprowadzili w samolotach. W stabilnie szybującym aeroplanie środek ciężkości musi się znajdować przed środkiem powierzchni nośnej, a lekki ogon zachowuje jego stateczność i dzięki statecznikowi pionowemu utrzymuje kierunek ruchu. Statecznik poziomy ogona jest urządzeniem samoregulującym. Nieustannie przyciska do dołu mający skłonność do unoszenia się ogon, podczas gdy przód samolotu wykazuje tendencję do pikowania w dół (znajduje się bowiem przed środkiem powierzchni skrzydeł). Gdyby tego stałego nacisku nie było, ogon działałby tylko przy istotnych wychyleniach w górę lub dół, samolot leciałby więc „wężykiem".

Związek środka ciężkości z powierzchnią skrzydeł i ogonem przesądza o tym, że samolot (tak jak ptak) ma rybi kształt stawiający powietrzu niewielki opór przy większych prędkościach lotu. Z powodu gęstości powietrza mniejszej od gęstości wody skrzydła ptaków (i samolotów) muszą być większe niż pełniące tę samą funkcję płetwy piersiowe rekina. O tym, jak istotna to odmienność uwarunkowań, świadczą małe zmodyfikowane skrzydła pingwinów dobrze służące im do lotu pod wodą.

Skrzydła nie tylko muszą być duże, ale powinny się też charakteryzować – jak mawiają lotnicy – doskonałością aerodynamiczną. Najlepsze pod tym względem są bardzo długie skrzydła (takie jak w szybowcach), ale ptakom trudniej nimi poruszać. Gdyby skrzydła miały zarys prostokątny i kończyły się jednorodną poprzeczną krawędzią, powietrze wypływające od dołu krawędzi wytwarzałoby wir pochłaniający energię i strzępiący końcówkę skrzydła. Aby temu zapobiec, konstruktorzy samolotów zwężają ją parabolicznie (podobnie jak w historycznym myśliwcu Spitfire) lub umieszczają skierowane do góry skrzydełko (to rozwiązanie wykorzystuje się w wielkich samolotach pasażerskich).

Konstrukcja ptasiego skrzydła złożonego z osobnych piór narzuca inne rozwiązania. Są to albo ostre zakończenie wąskiego skrzydła u ptaków małych czy też mających skrzydła wykazujące dużą doskonałość aerodynamiczną (np. albatros *Diomedea*), albo rozszczepienie skrzydła na liczne zaostrzone końcówki (np. orzeł *Aquila*). Ten drugi sposób eliminacji zawirowań występuje u ciężkich, mających duże rozmiary ptaków.

Największą stabilność lotu zapewnia długi ogon (długie jest wtedy ramię dźwigni), ale wiąże się to z niewielką zwrotnością. Im krótszy ogon, tym mniejszy udział czynnika pasywnego w sterowaniu. Dlatego krótki ogon jest kryterium zdolności do manewrowania skrzydłami. Niewielka odległość między statecznikami ogonowymi a skrzydłami cechuje też nowoczesne samoloty myśliwskie, którym konstruktorzy chcą nadać dużą zwrotność.



Mechanizm stabilnego lotu aeroplanu i różnorodność właściwości aerodynamicznych ptaków

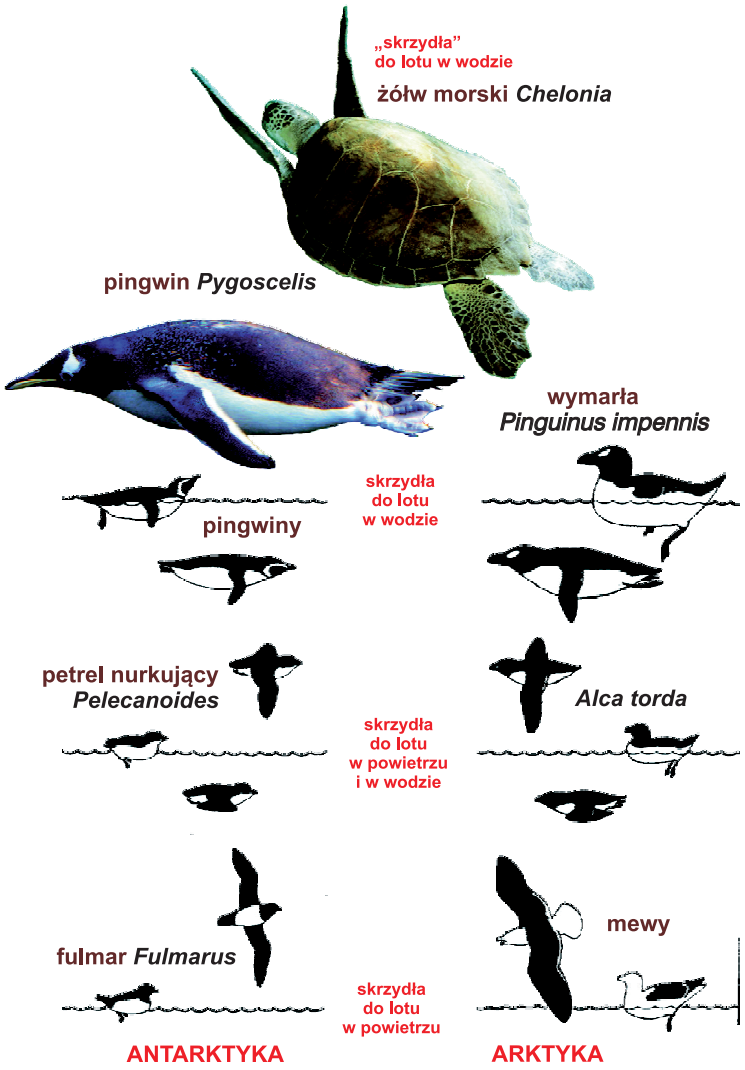
Aspekty aerodynamiki ptaków są kontrolowane przez dobór naturalny nie mniej rygorystycznie niż budowa samolotów przez rynek. Dlatego na podstawie sylwetki ptaków z dużą wiarygodnością można ocenić, jakie są ich zdolności lotu i z jaką maksymalną prędkością mogą się poruszać w powietrznych przestworzach.

Budowa skrzydeł ptaków podlegała znamiennym przemianom wraz z ich przechodzeniem do aktywnego przemieszczania się w środowisku wodnym. Są wśród nich takie, które naprzemiennie wykorzystują skrzydła do latania i pływania pod wodą (np. nury *Gavia*). Funkcja lotna dominuje, ponieważ jest trudniejsza. Kiedy jednak dla niektórych różnorodnych w północnych krajach alk (pokrewnych mewom) lot przestawał być istotny, ich skrzydła ulegały skróceniu, przekształcając się w struktury przypominające płetwy.

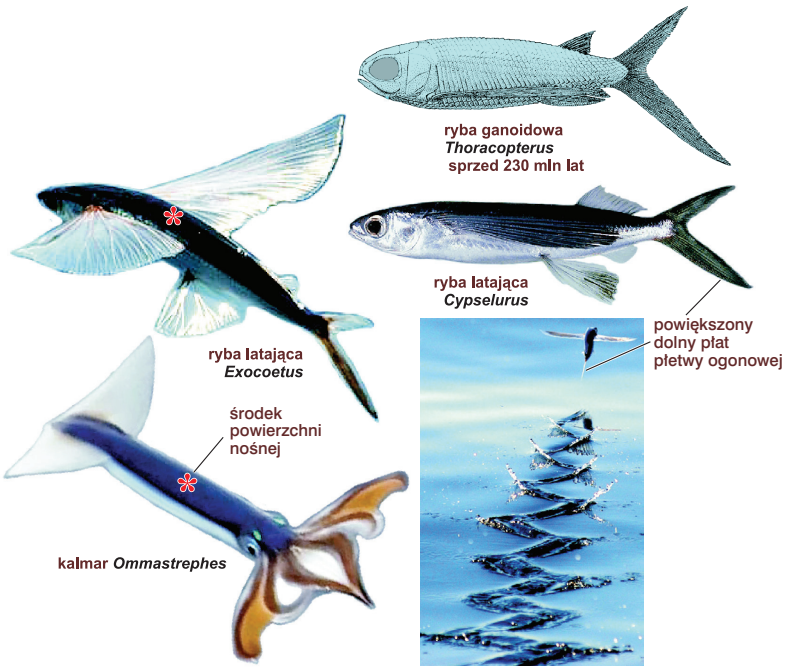
Tak wyglądała wymarła w 1844 roku nielotna alka *Pinguinus*. Znamienne jest podobieństwo jej nazwy do pingwinów zasiedlających półkulę południową i niespokrewnionych z nią, bo wywodzących się z nurów. Mają one znacznie dawniejszą od alk historię ewolucyjną. Przekształciły skrzydła w płetwy w ekosystemie antarktycznym w podobnym okresie, kiedy powstały w nim wieloryby. Potem ograniczyła się ruchliwość ich szyi (przywracając tym samym stan bliski rybom) i skróciły tylne kończyny, co w chodzie nadaje im wzruszająco ludzki wygląd. Rezultaty ewolucji na przeciwnych krańcach ziemskiego globu są w tych dwóch liniach ewolucyjnych niemal identyczne – z powodów wyłącznie konstrukcyjnych: w wodzie trzeba mieć właśnie takie proporcje.

W morzach żyją od ponad 100 mln lat jeszcze inne zwierzęta uprawiające podwodny lot: to żółwie morskie, których przednie kończyny mają kształt zbliżony do skrzydeł pingwinów i bardzo podobnie wykorzystują je do podwodnego fruwania (zgodnie z tymi samymi zasadami hydrodynamiki, którym podlegały pingwiny).

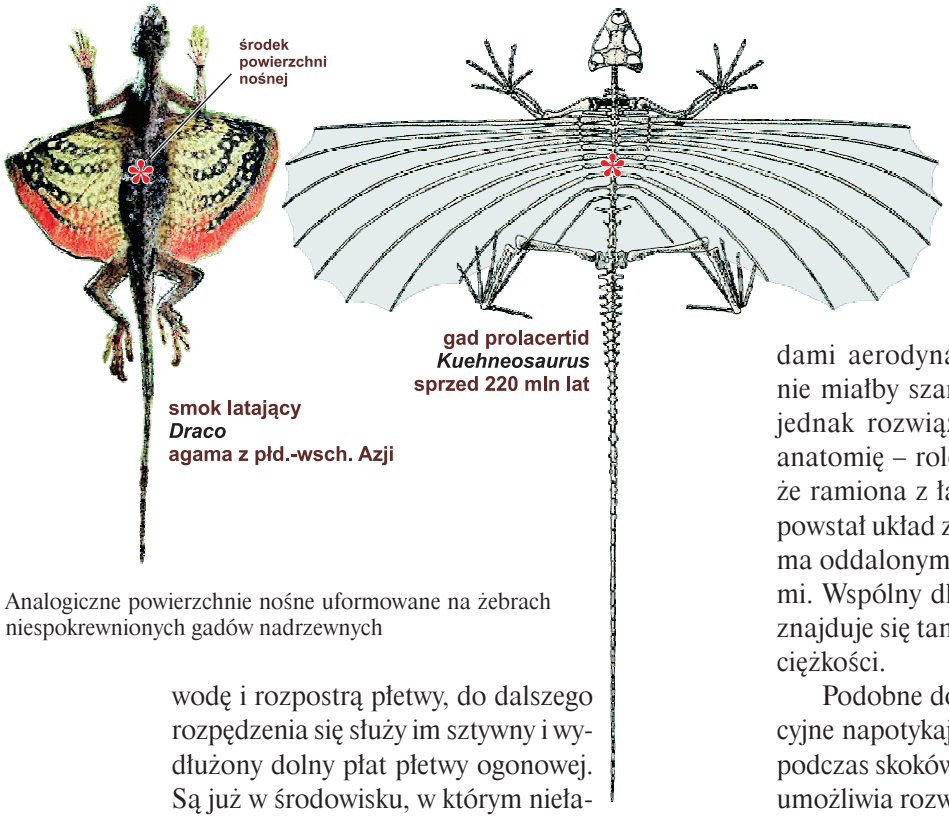
Były też szlaki ewolucji wiodące w przeciwnym kierunku niż przystosowania wodne ptaków. Istnieją przecież ryby mogące unosić się w powietrzu. Uciekając przed drapieżnikiem do obcego dla nich żywiołu, dezorientują prześladowcę. Jest to o tyle łatwe, że mniejszy od wody opór powietrza pozwala na uzyskanie znacznie większej prędkości po jej opuszczeniu przy niezmienionym wydatku energii. Pojawia się jednak problem podobny do napotkanego przez nurkujące ptaki: długie skrzydła niezbędne do lotu nad wodą przeszkadzają podczas pływania. Ryby latające, pływając, trzymają swoje ogromne płetwy piersiowe przytulone do ciała. Skoro się jednak wynurzą w skoku nad



Niezależne powstanie w rejonach arktycznych i antarktycznych ptaków zdolnych do podwodnego lotu oraz ich konwergentne podobieństwo do żółwi morskich



Właściwości aerodynamiczne ryb latających i kalmarów



Analogiczne powierzchnie nośne uformowane na żebrach niespokrewnionych gadów nadrzewnych

wodę i rozpostrą płetwy, do dalszego rozpędzenia się służy im sztywny i wydłużony dolny płat płetwy ogonowej. Są już w środowisku, w którym niełatwo znaleźć oparcie dla niewielkiego urządzenia napędowego, czyli ogona, ale dzięki jego częściowemu zanurzeniu mogą dalej wykorzystywać walory gęstej i nieściśliwej wody. Nic więc dziwnego, że taka konstrukcja z asymetrią płetwy ogonowej powstawała wielokrotnie w różnych grupach wymarłych ryb.

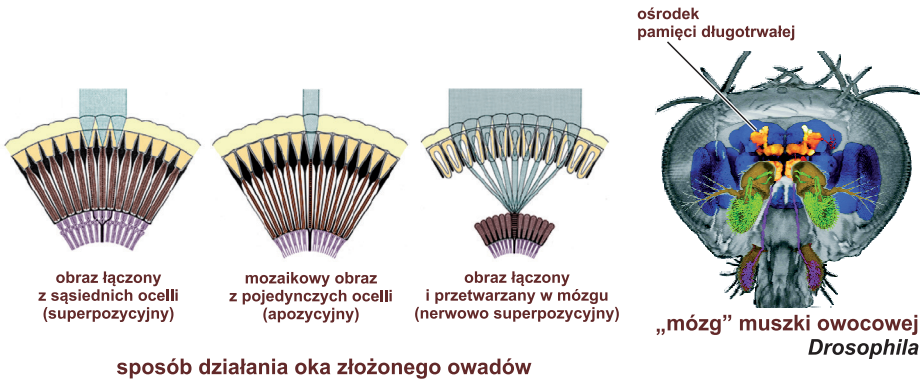
Są też latające (z tego samego powodu) mięczaki głowonogie – kalmary, których ewolucja rozpoczęła się w zupełnie innym punkcie wyjścia. Dla nich głównym problemem było powiązanie środka ciężkości ze środkiem powierzchni lotnej. Kalmary nieprzystosowane do lotu w powietrzu mają dużą romboidalną płetwę na końcu ciała przeciwnym do głowy. Głowa z ramionami znajduje się na przedzie, kiedy płetwa faluje, umożliwiając zwierzętom powolne pływanie.

Podczas szybkiej ucieczki z wykorzystaniem odrzutowego napędu wody wyrzucanej przez lejek z jamy skrzelowej głowa znajduje się z tyłu. Gdyby wtedy wykorzystać jedynie płetwę jako powierzchnię nośną do szybowania w powietrzu, środek tej powierzchni znalazłby się nie tam, gdzie powinien zgodnie z zasadami aerodynamiki. Tak skonstruowany obiekt nie miałby szans na stabilny lot. Problem został jednak rozwiązany w sposób narzucony przez anatomię – rolę powierzchni nośnej przejęły także ramiona z łączącymi je błonami. W rezultacie powstał układ zwany w lotnictwie kaczką – z dwiema oddalonymi od siebie powierzchniami nośnymi. Wspólny dla nich środek powierzchni nośnej znajduje się tam, gdzie trzeba – nieco za środkiem ciężkości.

Podobne do kalmarów ograniczenia konstrukcyjne napotykają jaszczurki czy rzekotki szybujące podczas skoków z drzewa na drzewo. Ich anatomia umożliwia rozwiązanie problemów aerodynamicznych dwoma sposobami: utworzenie powierzchni nośnych z błony pławnej na dłoniach i stopach (czyli taki układ, jak u kalmarów latających czy u przodka ptaków) albo z bocznych fałdów skóry w okolicy brzusznej. W przypadku gadów rozszerzenie brzusznych okryw ciała pozwala na wykorzystanie do ich usztywnienia skostnień skórnych – ochronnych struktur wywodzących się prawdopodobnie z rybich łusek.

Błona lotna rozpięta na żebrach, zatem w pobliżu środka ciężkości, została wyselekcjonowana wśród gadów przynajmniej trzykrotnie: po raz pierwszy około 310 mln lat temu (w okresie permskim ery paleozoicznej), drugi raz przed 220 mln lat (w okresie triasowym ery mezozoicznej) i stosunkowo niedawno – w anatomii dzisiejszych jaszczurek agam *Draco* (smoków latających) z południowej Azji. Jest to rozwiązanie odpowiednie dla gadów o słabych i stosunkowo krótkich kończynach.

Wyliczane dotąd przystosowania anatomiczne odnoszą się do funkcji biologicznych będących wyrazem prostych rozwiązań fizykochemicznych. Nic więc dziwnego, że dobór naturalny prowadzi do ich doskonalenia w łatwy do zrozumienia sposób. Nietrudno też o wyjaśnienie empiryczne przez wskazanie zwykle trywialnego ewolucyjnego początku. Sprawa przedstawia się



Mechanizm powstawania obrazu w różnych rodzajach oczu złożonych owadów oraz „mózg" muszki owocowej