Bioinspiracja: od mechanizmów natury do technologii cywilizacji w ujęciu Samuela Corda Stiera

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Tekst analizuje proces przekształcania naturalnych regularności świata w społeczne standardy technologiczne. Autor wprowadza rozróżnienie między czasem zdarzeniowym (T_0), zakorzenionym w biologicznych rytmach organizmu i chronobiologii, a czasem mierzalnym (T_1), będącym abstrakcyjną konwencją kulturową. Artykuł wskazuje, że choć ludzki organizm funkcjonuje jako zegar biologiczny na długo przed wynalezieniem urządzeń pomiarowych, to dopiero technologiczne parcelowanie doby umożliwiło złożoną synchronizację społeczną i gospodarczą. Poprzez przywołanie przykładów ludów Amondawa i Hopi, tekst podkreśla, że numeryczny system kalendarzowy nie jest uniwersalny, lecz stanowi specyficzną technologię kulturową, która zmieniła sposób, w jaki człowiek funkcjonuje w świecie następstwa zdarzeń.

8. The text analyzes the process of transforming natural regularities of the world into social technological standards. The author introduces a distinction between event-based time (T_0), rooted in the biological rhythms of the organism and chronobiology, and measurable time (T_1), which is an abstract cultural convention. The article indicates that although the human organism functioned as a biological clock long before the invention of measuring devices, it was only the technological partitioning of the day that enabled complex social and economic synchronization. By citing examples of the Amondawa and Hopi peoples, the text emphasizes that the numerical calendar system is not universal, but constitutes a specific cultural technology that changed how humans function in a world of sequential events.

Artykuł analizuje bioinspirację nie jako proste kopiowanie form przyrody, lecz jako zaawansowany proces abstrakcji i domestykacji biologicznych regularności. Autor

stawia tezę, że człowiek przekształca naturalne mechanizmy w technologie, instytucje społeczne oraz kapitał wiedzy, co pozwala redukować koszty poszukiwania innowacji poprzez traktowanie ewolucji jako gigantycznego, darmowego działu R&D. Tekst prowadzi czytelnika od fundamentalnych narzędzi cywilizacyjnych – takich jak zegar i pieniądz, które są w istocie sformalizowanymi wersjami rytmów kosmicznych i biologicznych – przez zaawansowaną biotechnologię (CRISPR), aż po ekonomię innowacji. Kluczowym wnioskiem jest stwierdzenie, że natura dostarcza jedynie 'proof of concept', podczas gdy rzeczywista wartość powstaje w procesie translacji tych wzorców na konkretne rozwiązania techniczne i instytucjonalne. Bioinspiracja jawi się zatem jako metoda delokalizacji poszukiwań innowacyjnych, gdzie bioróżnorodność pełni funkcję kapitału opcyjnego: chronimy ekosystemy nie tylko dla ich wartości przyrodniczej, ale by zachować dostęp do informacji, których znaczenia nie jesteśmy jeszcze w stanie odczytać.

SŁOWA KLUCZOWE

bioinspiracja | mechanizmy natury | technologie cywilizacji | chronobiologia | rytm okołodobowy | Mechanizm z Antykithery | biomimetyka | path dependence | lock-in technologiczny | komensuracja czasu i wartości | kapitał wiedzy biologicznej | egzaptacja technologiczna | metabolizm gospodarczy | instytucje graniczne

Przekształcenie naturalnych regularności w standardy społeczne

Solar System in a Bottle. Jak człowiek wyjął czas z nieba, zamknął kosmos w przekładniach i nauczył naturę pełnić funkcję pieniądza.

Natura była początkowo źródłem zachwytu, który prowadził do pytań. Z czasem jednak nastąpił krok bardziej radykalny: obserwowana regularność została zamieniona w standard. Przestaliśmy pytać jedynie o to, jak działa oko homara, skrzydło ptaka czy rozwijający się liść; zaczęliśmy wykorzystywać powtarzalność świata jako zewnętrzną miarę ludzkiego działania. Wschód Słońca stał się punktem odniesienia dla organizacji dnia, cykl Księżyca wyznaczył miesiące, sezonowa zmienność nieba stworzyła kalendarz, a długość cienia – godzinę. Przewidywalność

astronomicznego cyklu została ostatecznie odtworzona przez koła zębate. Ta przemiana oznacza przejście od "pasywnego śledzenia cieni do aktywnej symulacji dynamiki kosmosu". Jest to jedno z najgłębszych przejść w historii techniki, ponieważ człowiek nie skopiował tu biologicznego organu, lecz regularność świata, przekształcając ją w infrastrukturę społeczeństwa.

Należy jednak rozdzielić czas od zegara. Warto wprowadzić tu heurystyczne rozróżnienie pomiędzy czasem zdarzeniowym (T_0) a czasem mierzalnym (T_1). Pierwszy pozostaje związany z rytmami organizmu i konkretnych wydarzeń: po przebudzeniu, po deszczu, przed polowaniem, podczas dojrzewania owoców czy po zachodzie Słońca. Drugi jest czasem abstrakcyjnym, podzielonym na porównywalne jednostki, które można liczyć niezależnie od treści samego zdarzenia. Podział ten nie powinien być traktowany jako sztywna ontologia fizyki czasu; służy on raczej temu, by zauważyć, że istnienie procesów temporalnych nie jest tożsame z istnieniem kulturowej technologii ich pomiaru. Człowiek nie wynalazł rytmu dobowego – jego organizm jest produktem środowiska, w którym światło i ciemność przeplatały się na długo przed pojawieniem się naszego gatunku.

Współczesna chronobiologia opisuje rytmy okołodobowe jako około dwudziestoczterogodzinne oscylacje procesów fizjologicznych, psychicznych i behawioralnych. Najważniejszymi synchronizatorami środowiskowymi są światło i ciemność, choć wpływ mają na nie również aktywność, spożywanie pokarmu, temperatura czy relacje społeczne. U człowieka niemal wszystkie tkanki i narządy posiadają własne rytmy. Biologiczny organizm był zatem "zegarem", zanim pojawił się pierwszy zegarmistrz. Nie oznacza to jednak, że biologiczny zegar wskazuje godzinę 14:37. Organizm przewiduje regularności środowiska, podczas gdy godzina jest jedynie abstrakcyjną konwencją.

W tym punkcie zaczyna się technologiczna historia czasu. Cykl naturalny zostaje najpierw zauważony, następnie podzielony i reprezentowany symbolem, by w końcu zostać powierzonym urządzeniu i wykorzystanym do koordynowania innych ludzi. Z biologicznej synchronizacji z dniem i nocą wyłania się społeczna synchronizacja spotkań, pracy, transportu, handlu, rytuałów, szkoły, giełdy czy transmisji cyfrowych. Antropologia dowodzi przy tym, że sposób konceptualizowania czasu nie jest jednolity. Przykłady ludów Amondawa, Hopi i Balijczyków pokazują istnienie społeczności, które zachowują bardziej zdarzeniowe lub jakościowe doświadczenie temporalności.

Parcelowanie czasu jako technologia kulturowa

Badania Chrisa Sinha i jego współpracowników nad językiem Amondawa wykazały brak numerycznie zorganizowanego systemu kalendarzowego oraz brak systematycznego mapowania czasu na przestrzeń, tak charakterystycznego dla wielu języków europejskich. Autorzy

argumentowali, że pomiar przedziałów czasowych jest w dużej mierze konstruowany za pomocą liczb i artefaktów kulturowych. Nie twierdzili jednak, że Amondawa nie rozumieją następstwa zdarzeń, zmiany, przeszłości czy przyszłości.

Jeszcze większej ostrożności wymaga przypadek Hopi. Słynna teza Benjamina Lee Whorfa, jakoby język ten nie posiadał odpowiedników europejskiego czasu rozumianego jako jednorodny przepływ, została później poddana intensywnej krytyce. Ekkehart Malotki udokumentował rozbudowane sposoby wyrażania relacji temporalnych w języku Hopi, a cały spór stał się klasycznym przykładem debaty o relatywizmie językowym. Popularne twierdzenie, że „Hopi nie mają pojęcia czasu", jest więc nie do utrzymania. Istotna lekcja jest jednak subtelniejsza: wszystkie społeczeństwa funkcjonują w świecie następstwa i zmiany, lecz nie wszystkie muszą organizować tę zmianę przy użyciu tej samej metafory, identycznego kalendarza czy presji na numeryczne parcelowanie doby. To właśnie owo parcelowanie stało się jedną z wielkich technologii cywilizacji.

Rok nie jest tworem arbitralnym – odzwierciedla cykl orbitalny Ziemi i związane z nim sezony. Miesiąc ma oczywiste historyczne związki z fazami Księżyca, choć kalendarze z czasem wielokrotnie odchodziły od ścisłej zgodności miesiąca kalendarzowego z lunacją. Tydzień ma natomiast genealogię bardziej kulturową. Siedmiodniowy porządek został powiązany w tradycji hellenistycznej i rzymskiej z siedmioma „planetami" klasycznej astronomii, do których obok Słońca i Księżyca zaliczano Marsa, Merkurego, Jowisza, Wenus i Saturna. Ślady tej kosmologii przetrwały w nazwach dni. W językach romańskich poniedziałek, wtorek, środa, czwartek i piątek nadal zdradzają związki z Luną, Marsem, Merkurym, Jowiszem i Wenus; w języku angielskim zaś część rzymskich bóstw zastąpiono ich germańskimi odpowiednikami: Tiwem, Wodenem, Thorem i Frigg.

W codziennym kalendarzu Europejczyka znajduje się więc małe muzeum dawnej astronomii. Możemy sprawdzać środę w aplikacji cyfrowej, nie zdając sobie sprawy, że samo słowo zachowuje warstwę kulturową systemu, w którym odpowiednikiem rzymskiego Merkurego stał się Woden. Technologie czasu są pod tym względem wyjątkowo konserwatywne. Mogą zmieniać materialny nośnik – od kamienia i koła zębatego po oscylator kwarcowy i zegar atomowy – zachowując jednocześnie jednostki, podziały i nazwy pochodzące z bardzo odległych kosmologii. Najprostszym pomostem pomiędzy niebem a mechanicznym zegarem był cień. Gnomon nie produkuje czasu.

Mechanizacja czasu jako przejście od obserwacji natury do dyscypliny instytucjonalnej

Zegar słoneczny pozwala wykorzystać ruch Ziemi względem Słońca jako wskaźnik. W jego najprostszej formie pionowy pręt rzuca cień, którego położenie zmienia się wraz z pozornym ruchem Słońca. Na średnich szerokościach półkuli północnej cień przemieszcza się wokół gnomonu w kierunku, który później nazwano zgodnym z ruchem wskazówek zegara. NASA przywołuje tę zależność jako tradycyjne wyjaśnienie genezy określenia "clockwise". Należy jednak odróżnić fizyczną obserwację od historycznej pewności.

To, że północny zegar słoneczny generuje taki ruch cienia, jest faktem geometrycznym. Twierdzenie, iż średniowieczni konstruktorzy mechanizmów świadomie kopiowali ten wzorzec, jest prawdopodobne i powszechnie przyjmowane, jednak brak dokumentacji z momentu standaryzacji nie pozwala mówić o absolutnym determinizmie. Historycy zegarmistrzostwa zauważają, że technicznie równie łatwo zbudować zegar obracający się w stronę przeciwną. To kolejny przykład naszej zasady metodologicznej: analogia może być silna, nawet jeśli nie dysponujemy zapisem pierwszego rzemieślnika stwierdzającego, że to właśnie od cienia zaczerpnął kierunek ruchu.

Doniosłość zegara mechanicznego polegała jednak na czymś innym niż sam kierunek wskazówki. Zegar uwolnił społeczny pomiar czasu od bezpośredniej obserwacji nieba. Chmura nie mogła już zatrzymać godziny. Noc nie zawieszała mechanicznej chronometrii. System mógł pracować w ciemnym klasztorze, warsztacie, a z czasem w fabryce. Człowiek stworzył sztuczny oscylator i zaczął produkować regularność, której wcześniej szukał na niebie.

Lewis Mumford dostrzegł w tej zmianie tak głęboką transformację, że w pracy "Technics and Civilization" z 1934 roku uznał zegar – a nie maszynę parową – za kluczowy mechanizm nowoczesnej epoki przemysłowej. Dla Mumforda znaczenie zegara wynikało z automatyzacji, standaryzacji i produkcji szczególnego "towaru", jakim jest dokładny pomiar czasu. Była to teza bardziej socjologiczna niż techniczna: maszyna parowa zwielokrotniła energię, ale zegar umożliwił koordynację tej energii, ludzi i procesów. Czas mechaniczny stał się tym samym technologią władzy. Praca mogła być wynagradzana za godzinę, spóźnienie stało się mierzalne, transport zyskał rozkład, szkoła lekcję, wojsko godzinę wymarszu, fabryka zmianę, giełda moment otwarcia, a państwo jednolitą strefę czasu. Naturalny cykl nie znika, lecz społeczeństwo nakłada na niego drugą warstwę temporalności. Budzimy się nadal jako organizmy synchronizowane światłem i ciemnością, lecz idziemy do pracy według cyfry na ekranie.

Nowoczesny człowiek funkcjonuje więc jednocześnie w dwóch porządkach: chronobiologicznym i instytucjonalnym. Jet lag oraz skutki pracy zmianowej są fizjologicznym świadectwem konfliktu między nimi. NIGMS wskazuje, że przesunięcie stref czasowych i praca nocna zakłócają rytmy okołodobowe, powodując m.in. senność oraz problemy z koncentracją i koordynacją.

Zanim jednak zegar zaczął dyscyplinować fabrykę, człowiek dokonał jeszcze bardziej zdumiewającego eksperymentu: zbudował maszynę, która nie tylko odmierzała czas, ale próbowała symulować niebo. Mechanizm z Antykithery jest jednym z tych artefaktów, które okresowo zmuszają historyków technologii do ponownego przemyślenia wizji liniowego postępu.

Mechanizm z Antykithery jako miniaturyzacja cykli astronomicznych

Stier określa go mianem "Układem Słonecznym w butelce", opisując urządzenie jako miniaturyzację cykli astronomicznych, osiągniętą dzięki zastosowaniu ponad trzydziestu kół zębatych. Metafora ta jest trafna, o ile nie przekształcimy jej w anachroniczną tezę, jakoby Grecy zbudowali heliocentryczny model współczesnego Układu Słonecznego. Historia odkrycia artefaktu jest niemal tak niezwykła, jak sama konstrukcja. Wiosną 1900 roku nurkowie gąbkowi z wyspy Symi natrafili w pobliżu Antykithery na starożytny wrak. Jednym z nich był Ilias (Elias) Stadiatis, który wydobył fragment posągu, pomagając tym samym ujawnić skalę znaleziska. Systematyczne prace wydobywcze prowadzono w latach 1900–1901 przy udziale greckiej marynarki. Sam mechanizm odnaleziono wśród wielu innych przedmiotów, jednak jego charakter jako urządzenia z przekładniami rozpoznano dopiero w 1902 roku. Przypisywanie odkrycia Stadiatisowi w 1901 roku łączy dwa etapy procesu: samo natrafienie na wrak w 1900 roku oraz późniejsze wydobywanie artefaktów. Urządzenie datuje się zazwyczaj na II lub I wiek p.n.e., choć precyzyjne ramy czasowe pozostają przedmiotem dyskusji.

Do naszych czasów przetrwała około jedna trzecia pierwotnej konstrukcji, obecnie podzielona na 82 fragmenty, w których zachowało się około trzydziestu brązowych kół zębatych. Dzięki tomografii rentgenowskiej i obrazowaniu powierzchniowemu udało się odczytać niewidoczne wcześniej inskrypcje oraz zrekonstruować znaczną część funkcji urządzenia.

Najlepiej udokumentowane funkcje dotyczą cykli słonecznych i księżycowych. Mechanizm realizował kalendarz lunisolarny, wskazywał fazy Księżyca oraz cykle służące do przewidywania zaćmień. Badania opublikowane w „Nature” wykazały m.in. wykorzystanie babilońskiej astronomii arytmetycznej oraz mechaniczne odwzorowanie nierównomierności ruchu Księżyca, analizowanej

w starożytności. Inskrypcje sugerują również, że przednia tarcza urządzenia prezentowała pozycje planet w zodiaku. Rekonstrukcja pełnego modułu planetarnego jest jednak trudniejsza, gdyż większość przedniej przekładni nie przetrwała. Model opublikowany w 2021 roku w „Scientific Reports” rekonstruuje system pierścieni reprezentujących Słońce, Księżyc i pięć znanych wówczas planet; autorzy zaznaczają jednak, że jest to rozwiązanie hipotetyczne, wymuszone fragmentarycznością znaleziska, a nie opis zachowanej maszyny. W tym miejscu należy skorygować kolejne efektowne sformułowanie, które mówi o przekładniach epicyklicznych jako "inżynieryjnej kopii eliptycznych orbit". Byłoby to anachronizmem.

Starożytna astronomia grecka opierała się na geocentrycznych modelach kół, deferentów i epicykli; nie znała Keplerowskiego systemu planet poruszających się po elipsach wokół Słońca. Mechanizm faktycznie realizował zaawansowane modelowanie nierównomierności ruchu Księżyca – co fizycznie wynika z jego eliptycznej orbity – lecz twórcy ujęli ten problem w aparacie teoretycznym swojej epoki. „Nature” wskazuje na mechaniczną realizację teorii Hipparcha dotyczącej obserwowanych anomalii ruchu Księżyca, a nie na implementację praw Keplera.

Od kopiowania formy do modelowania relacji

To rozróżnienie czyni mechanizm jeszcze bardziej interesującym. Maszyna nie musi opierać się na nowoczesnej teorii świata, by niezwykle precyzyjnie modelować regularności obserwacyjne; jest urządzeniem epistemicznym działającym w ramach określonego systemu wiedzy. Koło zębate nie „wie”, czym jest orbita – ono realizuje relację liczbową pomiędzy cyklami. Mechanizm z Antykithery jest zatem odległym przodkiem symulacji komputerowej: materializuje model, dzięki czemu użytkownik, obracając korbę, może przeprowadzać świat przez kolejne stany i odczytywać przewidywany układ zjawisk.

Nie wiemy, kto skonstruował urządzenie. Stier efektownie łączy je z Archimedesem, nazywając rozdział o mechanizmie wręcz jego „Układem Słonecznym w butelce”. Bezpośrednie autorstwo Archimedesa nie jest jednak możliwe do udowodnienia i chronologicznie pozostaje problematyczne dla większości proponowanych dat powstania obiektu. Współczesna literatura podkreśla, że twórca pozostaje nieznany.

Związek z Archimedesem ma inne, fascynujące źródło: Cyceron opisywał przypisywane mu mechaniczne planetarium, które za pomocą jednego ruchu miało przedstawiać zróżnicowane biegi Słońca, Księżyca i pięciu znanych wówczas planet. Choć nie zachowało się ani samo urządzenie, ani instrukcja jego budowy, relacja Cycerona stanowi ważne świadectwo tego, że idea mechanicznego reprezentowania nieba nie musiała być jednostkowym fenomenem Antykithery. Mechanizm należy

prawdopodobnie do szerszej, w ogromnym stopniu utraconej tradycji hellenistycznej mechaniki astronomicznej. Przypomina to o kluczowym problemie historii technologii: brak zachowanych maszyn nie dowodzi braku tradycji mechanicznej. Brąz można przetopić, drewno gnije, instrument ulega rozebraniu, a rękopis przepada.

Antikythera przetrwała właśnie dlatego, że zatonęła. Morze zniszczyło znaczną część urządzenia, ale jednocześnie uchroniło fragmenty przed dwoma tysiącami lat ludzkiego recyklingu. Dlatego często powtarzane stwierdzenie, że przez następne tysiąc lat nie zbudowano niczego równie skomplikowanego, wymaga semantycznej ostrożności. Możemy stwierdzić, że nie znamy zachowanego urządzenia o porównywalnej złożoności mechanicznej z kolejnych wielu stuleci – tak właśnie opisują Antikytherę badania i instytucje muzealne. Nie możemy jednak z pełną pewnością założyć, że nikt niczego podobnego nie skonstruował. Archeologia technologii zawsze mierzy rzeczywistość przez filtr przeżywalności materiału.

Mechanizm z Antykithery jest szczególnie istotny dla teorii bioinspiracji, ponieważ obrazuje przejście od kopiowania pojedynczej cechy przyrody do budowania fizycznego modelu relacji między wieloma cyklami. Urządzenie nie przypomina nieba: nie świeci jak gwiazda, nie wygląda jak Księżyc i nie ma kształtu planety. Jest pudłem z przekładniami.

Podobieństwo zostało tu całkowicie przeniesione z poziomu morfologii na poziom relacji matematycznej. Jeśli wcześniejsza włócznia mogła naśladować dziób, a profil lotniczy zasadę skrzydła, Antikythera naśladuje regularność. Tym samym natura staje się nie tylko nauczycielem technologii, lecz również źródłem standaryzacji. Astronomiczny cykl dostarcza wspólnego punktu odniesienia, niezależnego od pojedynczego człowieka, co jest cechą niezbędną dla powstawania dużych instytucji.

Jeżeli dwie osoby mogą uzgodnić czas poprzez odwołanie do wspólnego standardu, są w stanie koordynować działanie bez bezpośredniego kontaktu. Wraz z coraz dokładniejszą chronometrią rośnie potencjalna skala społeczeństwa sieciowego: kolej, żegluga, wojsko, giełda, telekomunikacja i współczesny Internet wymagają synchronizacji nieporównywalnie precyzyjniejszej niż lokalna wspólnota rolnicza. Można rzec, że zegar wykonał wobec czasu operację podobną do tej, którą pieniądz wykonał wobec wartości. W obu przypadkach jakościowo zróżnicowane zdarzenia zostają przełożone na wspólną jednostkę. Godzina pracy lekarza, robotnika i prawnika ma identyczną długość fizyczną, choć jej cena może się zasadniczo różnić. Pieniądz pozwala natomiast zestawić rzeczy ontologicznie nieporównywalne: kilogram zboża, dzień pracy, ziemię, książkę i usługę transportową. Czas i pieniądz są więc wielkimi technologiami komensuracji, umożliwiającymi organizowanie złożonych społeczeństw poprzez wspólne skale. W tym miejscu Stier wprowadza

muszle kauri, opisując je jako „pierwszą uniwersalną walutę świata”, której podaż była regulowana przez biologiczne tempo wzrostu mięczaków. Pierwsze z tych twierdzeń jest zbyt mocne.

Kauri jako instytucjonalna domestykacja biologicznego produktu

Nie istniała jedna globalna waluta kauri, którą można by porównać do współczesnego dolara. Muszle różnych gatunków pełniły funkcje pieniężne i proto-pieniężne na ogromnych obszarach Azji, Afryki i Oceanii, wykazując wyjątkowo szerokie rozpowszechnienie geograficzne. Penn Museum wskazuje kauri jako jeden z najpowszechniejszych rodzajów pieniądza muszlowego; trafniej byłoby jednak mówić o jednym z najbardziej rozległych i długotrwałych systemów pieniądza towarowego w historii. Dlaczego to właśnie niewielka muszla mogła pełnić rolę pieniądza? Z ekonomicznego punktu widzenia posiadała szereg przydatnych właściwości: była trwała, mała, przenośna, łatwo rozpoznawalna i występowała w powtarzalnych formach. Bank of Canada Museum podkreśla właśnie trwałość, mobilność oraz trudność w fałszowaniu jako cechy sprzyjające jej użytkowaniu.

Jej wartość nie wynikała jednak z samej biologii – musiała zostać uznana społecznie. Muszla leżąca na plaży jest obiektem naturalnym; muszla przyjmowana w zapłacie staje się instytucją. Pieniądz powstaje dopiero wtedy, gdy wspólnota zakłada, że kolejni uczestnicy wymiany również zaakceptują dany nośnik. Kauri stanowi więc przykład szczególnej technologii natury: człowiek nie kopiuje biologicznego rozwiązania, lecz zatrudnia produkt biologiczny jako komponent instytucji społecznej. Żywy organizm wytwarza ustandaryzowany obiekt, a kultura nadaje mu funkcję rachunkową i wymienną, której ewolucja mięczaka nigdy nie „projektowała”. Jest to odpowiednik technologicznej egzaptacji: element powstały dla jednej funkcji otrzymuje w nowym systemie przeznaczenie zupełnie inne.

W Chinach znaczenie kauri było szczególnie głębokie. Badania nad historią shell money wskazują na ich rolę w gospodarce chińskiej co najmniej w drugim tysiącleciu przed naszą erą; inskrypcje na brązach dokumentują wymiany denominowane w kauri jeszcze przed 1045 rokiem p.n.e., a z czasem powstawały również ich imitacje z kości, kamienia i brązu. Ślad tej historii utrwalił się w piśmie: znak 貝, pierwotnie przedstawiający muszlę, jest elementem wielu znaków związanych z wartością, kupowaniem, sprzedażą i dobrami. Martwy mięczak nadal „żyje” zatem w języku największej współczesnej gospodarki Azji jako paleontologiczny ślad dawnej technologii wartości.

Nie można jednak równie łatwo zaakceptować sugestii, że otwory w późniejszych monetach są bezpośrednim dziedzictwem sposobu nawlekania kauri. Historia chińskiej monety z otworem jest lepiej udokumentowana poprzez ewolucję lokalnych form metalowego pieniądza. American Numismatic Association opisuje przejście od brązowych środków płatniczych przypominających noże i łopaty do okrągłych monet z centralnym otworem, który ułatwiał ich łączenie w większe jednostki. Podobieństwo funkcjonalne do nawlekanych muszli jest atrakcyjne, lecz bez mocniejszych dowodów nie należy zamieniać go w prostą genealogię „otwór w muszli → otwór w monecie". Jeszcze bardziej fascynująca jest koncepcja biologii jako naturalnego ogranicznika podaży pieniądza. Na pierwszy rzut oka wydaje się, że w przeciwieństwie do banknotu, który państwo może drukować, liczba naturalnych muszli zależy od ekologicznej produkcji mięczaków. To jednak tylko część mechanizmu.

Wartość pieniądza kauri zależała również od transportu, handlu i możliwości importowania coraz większej liczby muszli do regionu, w którym pełniły funkcję monetarną. Historia Afryki Zachodniej dostarcza tu spektakularnego przykładu. Przez stulecia ogromne ilości kauri transportowano na dalekie dystanse, m.in. z Oceanu Indyjskiego, by następnie włączyć je do afrykańskich systemów wymiany.

Klasyczna literatura opisywała późniejsze fale importu jako jedną z przyczyn znacznej deprecjacji pieniądza muszlowego. Najnowsze badanie opublikowane 20 sierpnia 2026 roku w The Economic History Review rekonstruuje roczne importy kauri do Afryki Zachodniej w latach 1650–1905, wskazując na napływ miliardów muszli. Autorzy kreślą obraz znacznie bardziej złożony niż prosta opowieść o automatycznej hiperinflacji: podaż monetarna, import, rozbudowa rynku i handel niewolnikami tworzyły dynamiczny system gospodarczy. Jest to kapitalna lekcja ekonomii bioinspirowanej. Natura może ograniczać produkcję jednostki, ale człowiek potrafi zmienić skalę obiegu poprzez logistykę. Wzrost mięczaka jest biologiczny; podaż pieniądza w konkretnym kraju jest instytucjonalna. Muszla z drugiego krańca świata może wejść na lokalny rynek i zmienić strukturę cen. Wraz z handlem dalekosiężnym naturalna rzadkość staje się zmienną geopolityczną. Historia kauri posiada również mroczny wymiar, którego nie należy ukrywać pod estetyką pięknej muszli.

System pieniądza muszlowego został silnie spleciony z handlem atlantyckim, w tym z handlem ludźmi. Cambridge University Press opisuje kauri jako istotny środek płatniczy w zachodnioafrykańskich transakcjach związanych z niewolnictwem, a badania nad gospodarką atlantycką pokazują, że importowane muszle były elementem infrastruktury umożliwiającej europejskim kupcom nabywanie osób zniewolonych.

Bioinspiracja jako proces abstrakcji i budowy instytucji

To ważne przypomnienie, że naturalne pochodzenie narzędzia nie nadaje moralności systemowi, w którym zostaje ono wykorzystane. Muszla może być biologicznie elegancka i społecznie uczestniczyć w zbrodniczej instytucji. Przykład ten zamyka drogę do jednego z najgroźniejszych uproszczeń biomimetyki: utożsamiania tego, co „naturalne", z tym, co „dobre". Natura może dostarczyć trwałego nośnika wartości, lecz to człowiek decyduje, co jest przedmiotem handlu. Może dostarczyć toksyny, a kultura rozstrzygnie, czy powstanie z niej lekarstwo, czy trucizna. Może dostarczyć algorytmu konkurencji, ale nie określa moralnych reguł rynku. Inspiracja biologiczna ma charakter epistemiczny, a nie normatywny.

Czas i pieniądz spotykają się w tym samym punkcie. Oba zjawiska wyrastają z materii, lecz ich dojrzała postać zależy od zbiorowego zaufania do reprezentacji. Godzina istnieje społecznie, ponieważ uznajemy wspólny system pomiaru. Moneta działa, gdyż uczestnicy wierzą, że kolejny odbiorca również ją zaakceptuje. Zegar i pieniądz są zatem technologiami umożliwiającymi koordynację anonimowych ludzi; dzięki nim współpraca może przekroczyć granice lokalnej obecności.

Określenie Solar System in a Bottle okazuje się więc szerszą metaforą niż tylko opisem Mechanizmu z Antykithery. Cywilizacja wielokrotnie "butelkuje" regularności świata. Zamyka cykl Słońca w tarczy zegara, rytm atomu w standardzie sekundy, geometrię przestrzeni w mapie, wartość w jednostce pieniężnej, a później informację w bicie. Za każdym razem niewyobrażalnie złożona rzeczywistość zostaje sprowadzona do reprezentacji pozwalającej na wykonywanie operacji. Cena tej zdolności jest ambiwalentna. Abstrakcja zwiększa moc koordynacji, lecz może również przesłaniać rzeczywistość, którą reprezentuje. Gdy czas zamieniamy w godziny pracy, możemy zapomnieć o biologicznym rytmie organizmu. Gdy wartość staje się pieniądzem, zaczynamy zachowywać się tak, jakby wszystko posiadało wymienialną cenę.

Gdy kosmos zostaje zamknięty w modelu, łatwo pomylić model ze światem. Największa siła cywilizacji – zdolność abstrahowania – jest jednocześnie źródłem jej charakterystycznych błędów. Mumfordowska teza o zegarze jako kluczowej maszynie nowoczesności nabiera przez to nowego znaczenia. Zegar nie był jedynie narzędziem mierzenia rzeczywistości; uczył społeczeństwo, że rzeczywistość powinna stać się mierzalna. Wraz z nim rozwijały się rachunkowość, standaryzacja, pomiar wydajności, harmonogramowanie i możliwość porównywania zdarzeń za pomocą liczb. Kolejne epoki rozszerzyły tę logikę na temperaturę, masę, energię, produktywność, ryzyko kredytowe, ruch internetowy czy aktywność biologiczną. Nowoczesność jest pod wieloma

względami projektem przekształcania jakości w liczby. Nie oznacza to, że pomiar z definicji zubaża rzeczywistość – bez niego nie istniałaby współczesna nauka.

Problem zaczyna się wtedy, gdy wskaźnik zastępuje przedmiot. Ekonomista Charles Goodhart sformułował regułę mówiącą, że gdy miara staje się celem, może przestać być dobrą miarą. Ta intuicja ma głęboki związek z historią zegara: narzędzie stworzone do reprezentowania naturalnej regularności może zacząć organizować ludzkie zachowanie tak silnie, że człowiek dostosowuje rzeczywistość do wskaźnika. Bioinspiracja prowadzi nas tutaj zatem do czegoś większego niż wynalazek pojedynczego urządzenia – pokazuje genezę cywilizacji pomiarowej. Najpierw natura dostarcza regularności, którą następnie odkrywa człowiek i tworzy jej reprezentację. Potem buduje urządzenie reprodukujące tę reprezentację niezależnie od pierwotnego zjawiska, aż wreszcie społeczeństwo reorganizuje własne życie wokół tego urządzenia. Natura inspiruje technologię, technologia produkuje instytucję, a instytucja zaczyna modyfikować zachowanie biologicznego człowieka. To sprzężenie zwrotne będzie powracać.

Biologia nie jest wyłącznie magazynem gotowych rozwiązań technicznych; jest jednym ze źródeł kategorii, za pomocą których organizujemy świat. Rytm staje się czasem, powtarzalność standardem, muszla pieniądzem, a ruch planet przekładnią. Gdy natura zostaje przetłumaczona na symbol lub mechanizm, technologia rozpoczyna własną ewolucję, coraz bardziej oddalając się od biologicznego czy astronomicznego punktu wyjścia. Najbardziej niezwykłe jest to, że po tysiącach lat tego procesu pierwotne źródło nadal pozostaje obecne. Organizm pracownika może protestować przeciw nocnej zmianie, przypominając fabryce, że zegar społeczny nie zlikwidował zegara okołodobowego. Nazwa dnia tygodnia wciąż przechowuje planetę i bóstwo, mimo że użytkownik kalendarza nie wierzy już w astrologiczny porządek siedmiu sfer. Chiński znak pieniądza może zawierać muszlę, choć płatność odbywa się za pomocą kodu QR.

Ptaki jako żywa linia ewolucyjna dinozaurów

Mechanizm z Antykithery może spoczywać w muzeum jako skorodowany fragment, podczas gdy współczesne satelity obliczają trajektorie z dokładnością niewyobrażalną dla jego konstruktora. Technologie przerastają swoich biologicznych i kosmicznych nauczycieli, lecz noszą ich ślady niczym ewolucyjne narządy szczątkowe.

Kolejna część analizy ukaże równie niezwykły rodzaj takich śladów. Człowiek nie tylko mierzył niebo i obserwował organizmy – on przede wszystkim słuchał. Miliony lat temu po Ziemi stąpały dinozaury, z których jedna linia przetrwała katastrofę końca kredy i do dziś codziennie śpiewa nad naszymi głowami. Ptaki okażą się tu jednocześnie dinozaurami, partnerami nawigacyjnymi,

sygnalistami środowiska i potencjalnymi współtwórcami ludzkiej wyobraźni muzycznej. W "Dancing with Dinosaurs" trzeba będzie jednak jeszcze wyraźniej niż dotąd oddzielić fascynującą hipotezę od dowodu. Relacja o żółtym trznadlu ukrytym w V Symfonii Beethovena jest zbyt piękna, by przyjąć ją bezkrytycznie; hipoteza o ptasich źródłach pierwszych słów jest zbyt szeroka, by traktować ją jak fakt, a możliwość wykorzystania ptasich migracji przez wczesnych ludzi nie może zostać pomylona z udokumentowaną mapą wyjścia z Afryki. To właśnie tutaj bioinspiracja spotka się z językiem, muzyką, ewolucją kultury i pamięcią głębokiego czasu. Jeśli mechanizm z Antykithery był próbą zamknięcia nieba w pudełku, następna część postawi jeszcze bardziej osobliwe pytanie: ile prehistorii Ziemi nadal śpiewa w ludzkiej kulturze, choć przestaliśmy rozpoznawać głos jej biologicznych nauczycieli?

Dancing with Dinosaurs. Ptaki, muzyka, język i nawigacja – ile prehistorii Ziemi nadal mieszka w ludzkiej kulturze.

Gdy człowiek słyszy rano śpiew kosa, trznadla albo skowronka, rzadko myśli o tym jak o spotkaniu z dinozaurem. Tymczasem współczesna systematyka ewolucyjna nie traktuje ptaków jedynie jako potomków zwierząt, które kiedyś należały do tej grupy. Ptaki są ocalałą linią dinozaurów teropodowych; podczas gdy formy nieptasie wymarły u schyłku kredy. Stier buduje z tego faktu efektowny punkt wyjścia rozdziału Dancing with Dinosaurs: kataklizm sprzed około 66 milionów lat nie zakończył całkowicie historii dinozaurów, lecz radykalnie ją przefiltrował, pozostawiając linię, której późniejsza radiacja wytworzyła dzisiejszą różnorodność ptaków. Wróbel na parapecie znajduje się zatem bliżej tyranozaura niż jakikolwiek współczesny jaszczur, choć oczywiście nie jest jego bezpośrednim potomkiem. Oba gatunki należą do wielkiego drzewa dinozaurów teropodowych, którego tylko ptasia gałąź przetrwała granicę kreda-paleogen.

Zmiana kategorii pojęciowych jako klucz do bioinspiracji

Samo masowe wymieranie było wydarzeniem o skali trudnej do objęcia ludzką intuicją. Około 66 milionów lat temu uderzenie asteroidy w rejon dzisiejszego Jukatanu utworzyło krater Chicxulub i wywołało globalne zaburzenia środowiskowe. Zapis kopalny wiąże z tym momentem zagładę około trzech czwartych gatunków, w tym wszystkich dinozaurów nieptasich. Współczesne badania wskazują, że skutki uderzenia obejmowały gwałtowne załamanie produkcji pierwotnej i sieci troficznych, choć dokładna rola współistniejącego wulkanizmu Dekanu oraz stan różnorodności dinozaurów przed katastrofą pozostają przedmiotem dyskusji.

Przeżycie nie było zatem triumfem „najdoskonalszego projektu", lecz skutkiem selektywnego filtra katastrofy, właściwości ekologicznych ocalałych linii i zapewne sporej dawki historycznego przypadku. Warto podkreślić ten element losowości, gdyż znakomicie współgra on z krytyką teleologii rozwijaną od początku artykułu. Dzisiejszy lot ptaków może wydawać się oczekiwanym finałem długiej historii ewolucyjnej, lecz żadnego takiego planu nie było. Większość linii ptasich i ptakopodobnych istniejących pod koniec kredy również zginęła. Natural History Museum podkreśla, że przetrwały jedynie niektóre linie prowadzące do współczesnych ptaków; ich przewagą były prawdopodobnie niewielkie rozmiary, zdolność korzystania ze zróżnicowanych zasobów, mobilność oraz – w niektórych przypadkach – naziemny tryb życia, przydatny w krajobrazie pozbawionym lasów.

Nie należy więc opowiadać tej historii jako prostego zwycięstwa lotu. Sama zdolność latania nie uratowała ogromnej liczby innych form. Jeszcze w XIX wieku pokrewieństwo to brzmiało niemal obrazoburczo. Thomas Henry Huxley, jeden z najważniejszych propagatorów darwinizmu, porównywał Archaeopteryx z niewielkim dinozaurem Compsognathus i już w 1868 roku argumentował za bliską relacją między ptakami a dinozaurami. Jego propozycja przez dziesięciolecia nie stała się jednak dominującym paradygmatem.

Dopiero prace Johna Ostroma, zwłaszcza analiza cech Deinonychus antirrhopus, ponownie uczyniły hipotezę teropodowego pochodzenia ptaków centralnym punktem paleontologii. W 1976 roku Ostrom argumentował na podstawie szczegółowej anatomii, że Archaeopteryx wykazuje rozległy zestaw cech wspólnych z małymi celurozaurami i że współczesne ptaki należy rozumieć jako dinozaurzych potomków. Późniejsze odkrycia pierzastych dinozaurów i rozwój analizy filogenetycznej zasadniczo wzmocniły ten obraz. Ta historia stanowi cenną lekcję filozofii nauki.

Ten sam zestaw kości może w różnych epokach należeć do różnych światów pojęciowych. Pióro, furcula, budowa nadgarstka czy sposób ustawienia kończyn były początkowo katalogowane jako cechy oddzielnych kategorii: „ptaka" i „gada". Dopiero teoria ewolucyjna pozwoliła dostrzec w nich ślady transformacji historycznej. Natura nie zmieniła skamieniałości; zmieniła się sieć pojęć pozwalających ją odczytać. Bioinspiracja wymaga dokładnie tej samej kompetencji: nie tylko obserwacji struktury, lecz umiejętności zmiany kategorii, do której ją przypisujemy. Związek ptaków z techniką lotu jest oczywisty, lecz Dancing with Dinosaurs idzie dalej. Pyta, czy ptaki oddziaływały również na elementy kultury, które na pierwszy rzut oka nie wydają się technologiczne: muzykę, rytm, język oraz nawigację. Stier proponuje tu zestaw niezwykle atrakcyjnych genealogii. Pieśń ptaka miałaby przechodzić w melodię, naśladowanie dźwięków natury w pierwsze słowa, rytm ludzkiego chodu w preferowane tempo muzyczne, ptasi lot w mapę, a zachowanie miodowodu w międzygatunkowy system informacji. Nie wszystkie te hipotezy

posiadają jednak ten sam status. Właśnie dlatego rozdział staje się doskonałym testem metodologii rozwijanej od początku artykułu.

Muzyka jako abstrakcja dźwięków natury

Najbardziej kuszącym przykładem jest Beethoven. Źródłowa notatka przedstawia tę historię w formie niemal reporterskiej: w 1804 roku kompozytor spaceruje po Praterze, słyszy trznadla zwyczajnego (Emberiza citrinella) i z rytmu jego śpiewu wyprowadza słynne otwarcie V Symfonii – trzy krótkie dźwięki i jeden długi. Opowieść ta ma rzeczywiste podstawy w tradycji biograficznej, lecz nie posiada statusu dowiedzionego faktu.

Uczeń Beethovena, Carl Czerny, rzeczywiście wiązał ten motyw z ptasim śpiewem, a podobne przekazy pojawiają się w dawnych relacjach o kompozytorze. Jednocześnie część tych informacji pochodzi od Antona Schindlera, którego wiarygodność jest poważnie obciążona udokumentowanym koloryzowaniem, a nawet fałszowaniem materiałów dotyczących Beethovena. Library of Congress zwraca uwagę, że przypisywane Schindlerowi opowieści o trznadlu mogą być mieszanką prawdziwego wspomnienia, żartu kompozytora lub późniejszej konstrukcji biograficznej.

Najbardziej znana konkurencyjna legenda mówi oczywiście o „losie pukającym do drzwi". Ona również pochodzi od Schindlera i nie może być traktowana jak stenograficznie utrwalona deklaracja kompozytora. Beethoven-Haus określa jej autentyczność jako wątpliwą, przypominając, że Schindler poznał Beethovena dopiero w ostatnich latach jego życia.

Mamy więc paradoks historiograficzny: jeden z najbardziej rozpoznawalnych motywów muzycznych zachodniej kultury obrósł dwiema konkurencyjnymi opowieściami – heroiczną metafizyką losu i biologiczną historią ptasiego śpiewu – a żadnej nie potrafimy udowodnić w formie popularnego sloganu. Nie oznacza to jednak, że relację między Beethovenem a ptakami należy odrzucić.

W innych utworach jest ona bowiem nieporównanie lepiej udokumentowana muzycznie. VI Symfonia „Pastoralna" zawiera jawne ptasie odniesienia: słowika, przepiórkę i kukułkę; kompozytor przypisał im nawet nazwy w partyturze. Library of Congress analizuje te partie jako świadome elementy pejzażu muzycznego. Nie musimy zatem dowodzić obecności trznadla w V Symfonii, aby wykazać, że ptasi głos był rzeczywistym składnikiem Beethovenowskiego środowiska twórczego.

Jeszcze ważniejszy jest jednak sam problem przejścia od ptasiej pieśni do ludzkiej muzyki. Podobieństwo dźwięków nie oznacza wspólnej funkcji ani genealogii. Śpiew ptaków służy między innymi celom terytorialnym, reprodukcyjnym i społecznym, podczas gdy muzyka ludzka jest praktyką kulturową związaną z rytuałem, emocją, tańcem, pamięcią, tożsamością grupową oraz estetyką. Systemy te mogą dzielić określone właściwości akustyczne – takie jak powtarzalność, sekwencyjność, zmienność wysokości czy frazowanie – lecz nie wynika z tego, że „muzyka wyewoluowała z ptasiego śpiewu". Naukowo silniejsza jest teza, że środowisko akustyczne nasycone wokalizacjami zwierzęcymi mogło dostarczać homininom trwałego materiału percepcyjnego i imitacyjnego, podczas gdy muzyka rozwijała własną ewolucję kulturową.

Kultura jako filtr translacji sygnałów biologicznych

Podobnej korekty wymaga źródłowa teza o 120 uderzeniach na minutę. Stier łączy naturalny chód (około 2 Hz, czyli mniej więcej 120 kroków na minutę) z silną reprezentacją tempa około 120 BPM w muzyce, interpretując to jako biologiczny rezonans ludzkiego ciała z rytmem. Rdzeń tej obserwacji jest dobrze osadzony empirycznie.

Badania nad swobodnym chodem wskazują, że preferowana kadencja często oscyluje wokół 2 Hz, a analizy dużych zbiorów muzyki zachodniej wykazują koncentrację postrzeganego tempa w okolicach 500 milisekund, co odpowiada około 120 BPM. Badania nad groove'em również wskazują zakres 120–130 BPM jako szczególnie sprzyjający synchronizacji ruchowej w określonych kontekstach. Nie wolno jednak przekształcać korelacji w dowód na to, że cała ludzka muzyka została "zaprojektowana przez chód". Preferencje rytmiczne ewoluują wraz z kulturą, gatunkiem muzycznym, wiekiem czy indywidualną motoryką. Nawet fizjologicznie optymalne tempo biegu może znacznie przekraczać 120 BPM, a przeglądy literatury wskazują na dużą zmienność częstotliwości zależnie od wykonywanego zadania. Interesująca pozostaje jednak hipoteza ucieleśnienia rytmu: ludzkie ciało posiada własne oscylacje ruchowe, a percepcja muzyczna jest silnie sprzężona z obszarami motorycznymi mózgu. Rytm słyszany nie jest więc czystym obiektem akustycznym, lecz potencjalnym programem ruchu.

W tym sensie określenie "Dancing with Dinosaurs" uzyskuje pełną treść. Człowiek może reagować ruchem na sekwencję dźwięków wytwarzanych przez potomka dinozaurów, ale reakcja ta przechodzi przez biologiczny aparat rytmu, predykcji i synchronizacji rozwinięty w jego własnej linii ewolucyjnej. Nie istnieje jedna prosta linia: ptak → muzyka → taniec. Mamy raczej do czynienia ze spotkaniem dwóch bardzo starych systemów biologicznych zdolnych do wytwarzania i rozpoznawania zorganizowanych sekwencji dźwiękowych.

Jeszcze bardziej ryzykowna jest genealogia języka. Stier sugeruje, że pierwotne słowa mogły wyrastać z onomatopei i naśladowania głosów ptaków, łącząc tę koncepcję z problematyką pierwszych języków. W rozwiniętej notatce pojawiają się nazwiska badaczy mających wspierać ten kierunek, jednak tego związku nie należy powtarzać. Wspomniani autorzy są kojarzeni z dyskutowanymi próbami rekonstrukcji pokrewieństw i geograficznych wzorców ewolucji języka, lecz nie stanowią podstawy naukowej dla twierdzenia, że prajęzyk powstał z ptasich onomatopei.

Sama onomatopeiczna teoria pochodzenia języka ma długą historię. W XIX wieku Max Müller prześmiewczo nazwał ją teorią "bow-wow": człowiek miałby tworzyć pierwsze słowa poprzez imitację głosów zwierząt i dźwięków otoczenia. Cambridge University Press przypomina ten spór oraz fakt, że Darwin był bardziej otwarty na możliwość, iż imitacja głosów zwierząt, śpiew i ekspresyjne wokalizacje mogły poprzedzać rozwiniętą mowę. Współczesna nauka o ewolucji języka nie dysponuje jednak dowodem pozwalającym zrekonstruować "pierwsze słowo", a sama onomatopeja nie wyjaśnia składni, arbitralności znaku, rekursji, gramatyki ani zdolności do odnoszenia się do obiektów nieobecnych. Pozostaje ona jednak wartościowym modelem pokazującym, jak znak może powstać z podobieństwa między formą dźwięku a cechą desygnatu – jest to przykład ikoniczności przeciwstawianej pełnej arbitralności znaku.

W językach współczesnych nadal istnieją słowa imitujące głosy zwierząt czy dźwięki uderzeń, choć nawet one podlegają filtrowi fonologii danej kultury. Kogut nie "mówi" obiektywnie po polsku "kukuryku", po angielsku „cock-a-doodle-doo”, a po francusku „cocorico”. Ten sam bodziec środowiskowy zostaje przetworzony przez różne systemy językowe: natura dostarcza sygnału, lecz kultura dokonuje translacji.

Starożytność pozostawiła nam przy tym jeden z najbardziej osobliwych "eksperymentów" dotyczących początku języka. Herodot relacjonował, że egipski faraon Psametych chciał ustalić, który lud jest najstarszy. Polecił wychować dwoje dzieci w izolacji od ludzkiej mowy, pod opieką pasterza i kóz, oczekując, że ich pierwsze spontaniczne słowo ujawni język pierwotny. Dzieci miały po pewnym czasie wypowiedzieć „bekos”, co uznano za frygijskie słowo oznaczające chleb.

Z perspektywy dzisiejszej metodologii taki eksperyment byłby etycznie niedopuszczalny i naukowo katastrofalny. Najciekawsze jest jednak alternatywne odczytanie tej historii. Już późniejsi komentatorzy zauważali, że „bekos” może przypominać beczenie kóz, a współczesne badania nad retoryką Herodota wskazują, że opowieść mogła zawierać zamierzoną ironię: faraon interpretuje zwierzęcy dźwięk jako mowę frygijską, ponieważ szuka potwierdzenia konkretnej odpowiedzi. Jeśli tak, historia Psametycha staje się nowoczesną przypowieścią o błędzie epistemicznym. Obserwator nie tylko odczytuje dane; posiada teorię, która decyduje, co uzna za dane.

Dokładnie ten problem towarzyszy każdej próbie odnajdywania ptaków w genezie języka czy muzyki. Możemy usłyszeć podobieństwo, ponieważ wiemy już, czego szukamy. Spektrogram nie rozstrzyga historii inspiracji. Dwie sekwencje mogą być do siebie podobne przypadkiem lub dlatego, że ograniczony system dźwiękowy generuje powtarzalne wzory. Trzeba więc stale odróżniać akustyczne podobieństwo i poznawczą możliwość imitacji od historycznie wykazanego transferu kulturowego. Istnieje jednak obszar, w którym komunikacja człowieka i ptaka jest znacznie lepiej udokumentowana niż hipotetyczne pierwsze słowa.

Symbioza miodowoda i człowieka jako strategiczny system korzyści

Przykładem jest współpraca z miodowodem dużym (Indicator indicator). Stier wskazuje na społeczności Hadza i Mbuti jako grupy wykorzystujące te ptaki do lokalizowania gniazd pszczół. Badania pozwalają szczególnie szczegółowo opisać relację Hadza w Tanzanii oraz łowców miodu w Mozambiku i innych regionach Afryki. Miodowód odnajduje kolonie pszczół, lecz nie potrafi samodzielnie w pełni wykorzystać ich zasobów.

Człowiek dysponuje ogniem i narzędziami niezbędnymi do otwarcia gniazda. Ptak prowadzi go charakterystycznym lotem i głosem; człowiek pozyskuje miód, a miodowód może korzystać między innymi z odsłoniętego wosku. Badania Hadza wykazały, że pomoc ptaków zwiększała tempo odnajdywania gniazd o około 560 procent, a szacuje się, że 8–10 procent całej diety tej grupy mogło pochodzić z produktów zdobytych dzięki ptasiemu przewodnikowi.

Jest to znacznie konkretniejszy wynik niż ogólne sformułowanie o „ponad 50 procentach sukcesu”. Co więcej, relacja nie jest prostą sielanką o międzygatunkowej przyjaźni. Obserwacje Hadza wykazały, że łowcy nie zawsze pozostawiają ptakom dostęp do wosku; potrafią go ukrywać lub niszczyć, interpretując głód miodowodu jako czynnik zwiększający prawdopodobieństwo ponownego poprowadzenia człowieka do gniazda.

Powstaje zatem system obejmujący kooperację, konflikt interesów i strategiczne zachowanie. Abraham Lincoln mógł metaforycznie „niszczyć wroga, czyniąc z niego przyjaciela”, lecz ekologia ewolucyjna dodaje do tej maksymy chłodniejszą poprawkę: partner pozostaje partnerem tak długo, jak konfiguracja korzyści podtrzymuje współpracę. Jeszcze ciekawsze wyniki pojawiły się w 2023 roku.

Biointerakcja jako włączanie kompetencji zwierząt do systemów ludzkich

Claire Spottiswoode i Brian Wood wykazali eksperymentalnie, że łowcy miodu w różnych częściach Afryki posługują się odmiennymi, przekazywanymi kulturowo nawoływaniami. Ptaki w Tanzanii i Mozambiku chętniej reagują na sygnały charakterystyczne dla lokalnej społeczności niż na zawołania obce. Wyników tych nie da się wyjaśnić wyłącznie różnicami w propagacji dźwięku; wskazują one, że dzikie ptaki uczą się ludzkich, lokalnych konwencji sygnałowych. Odkrycie to ma znaczenie wykraczające daleko poza etologię. Mamy do czynienia z systemem, w którym kultura jednego gatunku staje się środowiskiem uczenia drugiego. Sygnał nie musi być naturalnym odgłosem imitującym pszczołę czy ptaka – może być kulturową konwencją, której znaczenie stabilizuje się dzięki regularnej interakcji. Miodowód wchodzi w lokalny dialekt ludzkiej praktyki łowieckiej. Nie otrzymujemy tu języka międzygatunkowego w ludzkim rozumieniu, lecz coś teoretycznie niezwykle istotnego: dowód, że arbitralny element tradycji kulturowej może zostać przyswojony przez dzikiego przedstawiciela innego gatunku i włączony do systemu wspólnego działania. Właśnie dlatego miodowód jest lepszym przykładem związku ptaków z kulturą niż romantyczne teorie o „pierwszych słowach". Tutaj kierunek transferu można zaobserwować eksperymentalnie.

Nie musimy zgadywać, czy pradawny człowiek usłyszał ptaka; możemy sprawdzić, czy współczesny ptak odróżnia dwa ludzkie sygnały i jak na nie reaguje. Bioinspiracja przechodzi w biointerakcję: człowiek nie tyle kopiuje zwierzę, co włącza jego kompetencje do własnego systemu pozyskiwania informacji. Podobną logikę niesie wykorzystywanie ptaków jako wskaźników środowiskowych. Tradycyjna nawigacja oceaniczna Polinezji nie opierała się na jednym „ptasim GPS-ie", lecz na całym zestawie sygnałów: gwiazdach, falowaniu, kierunku i charakterze martwej fali, chmurach, prądach oraz zachowaniu ptaków. Smithsonian opisuje, że określone gatunki ptaków związanych z lądem mogą wskazywać jego bliskość, a kierunki ich lotów dostarczają wyszkolonemu nawigatorowi informacji o położeniu wyspy znajdującej się jeszcze poniżej widzialnego horyzontu. Badania archeologiczno-modelowe nazywają takie otoczenie „land indicator zone": cel nawigacyjny staje się poznawczo większy niż sama wyspa, ponieważ organizmy, chmury i układ fal sygnalizują jej obecność z dystansu. Jest to kolejny przykład używania organizmu jako rozproszonego sensora.

Ptak nie wskazuje człowiekowi współrzędnej geograficznej, jednak jego zachowanie jest funkcją informacji, której nawigator bezpośrednio nie posiada. Człowiek interpretuje zatem trajektorię innego organizmu jako dane dotyczące ukrytej cechy środowiska. Mechanizm poznawczy ten przypomina odczytywanie śladów analizowane w części o technologiach prehistorycznych. Różnica

polega na tym, że ślad był zapisem przeszłego ruchu, podczas gdy lecący ptak jest żywym wskaźnikiem aktualnego stanu przestrzeni.

Stier przywołuje również Hrafna-Flókiego, który według Landnámabók wykorzystał trzy kruki podczas poszukiwania Islandii. Opowieść ta rzeczywiście istnieje w islandzkiej tradycji: jeden kruk miał zawrócić, drugi powrócić na statek, a trzeci polecieć w stronę lądu. Jednak specjalistyczna analiza nawigacji nordyckiej ostrzega przed traktowaniem tego epizodu jako raportu technicznego. Zachowanie kruków opisane w sadze jest biologicznie problematyczne, a konstrukcja narracji może zawierać elementy legendarne lub biblijne. Najbezpieczniej uznać ją za świadectwo kulturowej idei ptaka jako przewodnika, a nie za pewny dowód standardowej nordyckiej technologii nawigacyjnej. Jeszcze większą ostrożnością należy otoczyć najbardziej śmiałą hipotezę źródła: jakoby migracyjne szlaki ptaków nad Bab al-Mandab działały jak „podniebna autostrada" wskazująca wczesnym ludziom drogę z Afryki. Jest to wyobrażalny scenariusz poznawczy, lecz dostępna literatura dotycząca Out of Africa go nie potwierdza.

Debata o południowej trasie przez Bab al-Mandab opiera się na paleoklimacie, poziomach morza, archeologii, technologii kamiennej i danych genetycznych. Nawet rola samego przejścia pozostaje dyskusyjna, gdyż istnieje również trasa północna, przez Egipt i Synaj, a aktualny materiał nie rozstrzyga kwestii wszystkich fal migracji. Nie ma podstaw, by do tej rekonstrukcji dodawać ptaki jako udowodnionych przewodników. Możemy natomiast formułować hipotezę słabszą i antropologicznie bardziej interesującą: człowiek żyjący przez tysiące pokoleń w środowisku pełnym sezonowo migrujących zwierząt prawdopodobnie wykorzystywał ich zachowanie jako informację o przestrzeni, wodzie, pogodzie i zasobach, podobnie jak czyniły to liczne późniejsze społeczności tradycyjne. Twierdzenie to jest zgodne z ogólną ekologią poznawczą łowców-zbieraczy, nie pozwala jednak napisać konkretnej historii o stadzie ptaków prowadzącym Homo sapiens przez Bab al-Mandab. Między plausibility a evidence przebiega granica, której artykuł naukowy powinien bronić szczególnie wtedy, gdy opowieść jest piękna. W ten sposób ptak ukazuje się nie jako jeden „wynalazca" ludzkiej kultury, lecz jako partner wielu różnych reżimów poznania. Paleontolog widzi w nim żywego dinozaura; aerodynamik – laboratorium przepływu; kompozytor – źródło rytmu lub melodii; lingwista – przykład wokalizacji, imitacji i znaku ikonicznego; łowca miodu – informatora; nawigator – wskaźnik niewidocznego lądu. Filozof ewolucji zaś – dowód historycznej ciągłości pomiędzy głęboką przeszłością Ziemi a teraźniejszością.

Bioinspiracja jako interfejs poznawczy i rozszerzenie umysłu

Ta wielofunkcyjność mówi jednak więcej o człowieku niż o samym ptaku. Ta sama biologiczna istota jest odczytywana inaczej, zależnie od pytania, jakie stawia obserwator. To powrót do Gibsonowskich affordances: środowisko nie narzuca jednej funkcji; to relacja między obiektem a kompetencją obserwatora tworzy możliwość działania. Dla paleontologa pióro stanowi cechę filogenetyczną, dla projektanta materiał inspiracji, dla muzyka ptasi głos jest strukturą dźwiękową, a dla nawigatora lot staje się wektorem. Z tego powodu bioinspiracja nie może być jedynie historią "wynalazków skradzionych naturze". Musi być historią interfejsów poznawczych pomiędzy gatunkami.

Człowiek nie tylko obserwuje inne organizmy. Żyje w świecie, w którym produkują one sygnały, przekształcają środowisko, lokalizują zasoby i reagują na zmiany szybciej niż on sam. Inteligencja człowieka polega częściowo na zdolności wykorzystywania cudzej adaptacji jako rozszerzenia własnego poznania. Miodowód jest niemal biologicznym odpowiednikiem wyszukiwarki. Posiada dostęp do informacji, której człowiek potrzebuje, lecz nie potrafi samodzielnie w pełni skonsumować zasobu. Człowiek z kolei dysponuje narzędziami pozwalającymi wykorzystać znalezisko, ale odnajduje je mniej skutecznie. Dopiero połączenie tych kompetencji zwiększa efektywność całego układu. Nie ma tu centralnego projektanta współpracy.

Istnieje za to historia interakcji, wzajemnego uczenia się, wspólnych interesów i lokalnych tradycji sygnałowych. Prowadzi to ku pojęciu extended ecology of cognition – poznania, którego funkcjonalna granica nie pokrywa się z powierzchnią czaszki. Jeśli człowiek wykorzystuje ślad, ptaka, mapę, smartfon czy algorytm jako stały element procesu zdobywania informacji, działanie poznawcze staje się własnością układu obejmującego organizm oraz jego otoczenie. Nie oznacza to oczywiście, że ptak staje się fragmentem ludzkiego mózgu.

Oznacza to raczej, że skuteczność działania zależy od połączenia systemów o odmiennych kompetencjach. Przestaje wówczas dziwić, że jedna z najbardziej zaawansowanych cech człowieka – kultura – rozwijała się w świecie pełnym innych umysłów. Człowiek obserwował nie tylko bierne formy materii, lecz intencjonalnie poruszające się organizmy. Musiał przewidywać zachowanie ofiary, przeciwnika, drapieżnika, partnera czy członka własnej grupy. Teoria umysłu, uczenie społeczne i zdolność dostrzegania związków między sygnałem a niewidocznym stanem nie rozwijały się w społecznej próżni. Dlatego ptasi śpiew można traktować mniej jako hipotetycznego "ojca muzyki", a bardziej jako element środowiska, w którym kształtowała się ludzka zdolność odczytywania sekwencji dźwiękowych. W lesie dźwięk informuje o gatunku, lokalizacji, porze dnia,

zagrożeniu, partnerze, terytorium i sezonie. Ucho rozpoznające różnice między tymi sygnałami posiada konkretną wartość adaptacyjną. Kultura muzyczna przejęła później ten aparat percepcyjny i rozwinęła go w obszary, których dobór naturalny nie mógł "zaplanować": sonatę, fugę, jazz, techno czy symfonię.

Biologiczny kapitał wiedzy i koncepcja frenemy

W ten sposób można interpretować Beethovenowskiego trznadla, nie popadając ani w łatwowierność, ani w przesadny sceptycyzm. Nie wiemy, czy konkretny czterodźwięk V Symfonii pochodzi od Emberiza citrinella. Wiemy jednak, że Beethoven słuchał natury, że w jego muzyce występują udokumentowane ptasie odniesienia i że kompozytor żył w środowisku akustycznym znacznie mniej odizolowanym od głosów ptaków niż współczesne centrum metropolii. Historyczna niepewność szczegółu nie unieważnia szerszej prawdy kulturowej: ludzkie systemy muzyczne rozwijały się przez tysiąclecia w świecie, który już przed nami był pełen rytmu, powtórzeń i wokalizacji. Najbardziej fascynująca perspektywa pojawia się jednak wtedy, gdy spojrzymy na ptaka jako na nośnik dwóch skal czasu równocześnie. Jego pieśń trwa kilka sekund, życie kilka lat, gatunek tysiące lub miliony lat, a filogenetyczny rodowód prowadzi przez mezozoik. Kiedy człowiek słucha ptaka, odbiera chwilowy sygnał wytwarzany przez system będący rezultatem setek milionów lat ewolucyjnej historii. Kultura może następnie przechwycić fragment tej chwili i zachować go przez następne stulecia w partyturze, legendzie, nazwie albo technice nawigacyjnej.

Zatem "taniec z dinozaurami" nie jest metaforą tak przesadzoną, jak początkowo się wydaje. Nie tańczymy oczywiście z rekonstrukcją Deinonychus. Tańczymy w świecie, w którym jego dalsi krewni śpiewają nad naszymi głowami, a cechy powstałe w ewolucji dinozaurów nadal oddziałują na ludzkie systemy percepcji, techniki i symbolu. Głęboki czas biologiczny nie znajduje się wyłącznie w muzeum; jest obecny w codziennym pejzażu dźwiękowym. Jednocześnie właśnie tutaj ujawnia się najważniejsza dyscyplina całego przedsięwzięcia. Im bardziej atrakcyjna jest opowieść o naturze jako nauczycielce człowieka, tym bardziej należy pytać o dowód. Ptaki są dinozaurami – to wniosek filogenetyczny wsparty ogromnym materiałem. Miodowody uczą się lokalnych ludzkich nawoływań – to wynik eksperymentu. Polinezyjscy nawigatorzy wykorzystywali ptaki jako część systemu odczytywania oceanu – posiada to zaplecze etnograficzne.

Beethoven i trznadel to interesująca tradycja historyczna o niepewnym statusie. Pierwsze słowa człowieka wyprowadzone z ptasiego śpiewu to hipoteza bez możliwości bezpośredniego dowodu. Ptaki prowadzące pierwszych Homo sapiens przez Bab al-Mandab to sugestywna spekulacja, której aktualna archeologia migracji nie potwierdza. Tak skonstruowana hierarchia nie zubaża historii;

przeciwnie, ujawnia różne sposoby istnienia wiedzy. Fakt, świadectwo, prawdopodobna rekonstrukcja, model i metafora nie są konkurentami, jeśli nie udajemy, że mają tę samą siłę epistemiczną. Nauka nie musi wyrzucać dobrej metafory; musi tylko umieć podpisać ją właściwą etykietą. Dzięki temu Dancing with Dinosaurs prowadzi do wniosku znacznie szerszego niż pytanie o to, czy ptak napisał Beethovenowi cztery nuty. Najważniejszy jest proces, w którym człowiek przestaje traktować inne gatunki jako tło własnej historii. Organizmy są aktywnymi producentami informacji, z której nasza kultura od dawna korzysta. Czasami je imitujemy, czasami obserwujemy, odczytujemy ich zachowanie, tworzymy z nimi kooperację, a czasami dopiero po wiekach uświadamiamy sobie, że struktura uznawana za własny wynalazek posiada analogię w znacznie starszej historii życia. Następnie Fundacja Dobre Państwo radykalnie zmieni ton tej opowieści.

Do tej pory biologiczny partner bywał nauczycielem, modelem albo przewodnikiem. Teraz pojawi się organizm, którego przez większą część historii medycyny widzieliśmy przede wszystkim jako wroga. Wirus, bakteria i grzyb pokażą jednak, że granica pomiędzy przeciwnikiem a narzędziem jest równie ruchoma jak granica między naturą a technologią. Szczepionka nauczy układ odpornościowy poprzez kontrolowaną imitację zagrożenia; bakteriofag stanie się potencjalnym zabójcą bakterii chorobotwórczej; grzyb dostarczy antybiotyku i statyny; bakteryjny system obronny CRISPR zostanie przekształcony w narzędzie edycji genomu, a sztuczna inteligencja zacznie przeczesywać przestrzeń chemiczną w poszukiwaniu antybiotyków, których człowiek sam nie potrafił wskazać. Know Thy Frenemy. Wróg, którego trzeba było nauczyć się czytać – wirusy, bakterie, grzyby i medycyna zbudowana z cudzych broni.

Dotychczas natura występowała przede wszystkim jako nauczyciel geometrii, przepływu, informacji, rytmu i organizacji. W medycynie relacja jest bardziej niepokojąca, ponieważ jednym z najważniejszych nauczycieli człowieka okazuje się jego przeciwnik. Bakteria, wirus, grzyb i pasożyt nie istnieją po to, aby dostarczać nam technologii. Część z nich wykorzystuje nasze ciała jako środowisko reprodukcji, część niszczy tkanki, konkuruje o zasoby, a część może doprowadzić gospodarza do śmierci. Stier ujmuje tę ambiwalencję pojęciem frenemy: biologicznego wroga, który jednocześnie staje się źródłem wiedzy, narzędzia albo mechanizmu możliwego do przejęcia. Jest to bodaj najbardziej dojrzała postać bioinspiracji, ponieważ nie polega już na podziwie dla piękna natury. Wymaga zdolności uczenia się od tego, czego się boimy.

Od walki z patogenem do domestykacji jego mechanizmów

Historia medycyny zakaźnej to w dużej mierze kronika stopniowego przejścia od demonologii do mechanizmu. Chorobę interpretowano jako karę, nieczystość, zaburzenie równowagi humorów, miazmat lub rezultat wpływu środowiska, zanim rozwój mikroskopii, eksperymentu i epidemiologii pozwolił na identyfikację konkretnych patogenów. Nawet po sformułowaniu teorii drobnoustrojów relacja człowieka z mikroorganizmami długo pozostawała poznawczo jednostronna: „mikrob" oznaczał przede wszystkim przeciwnika, którego należy wyeliminować. Dopiero późniejsza mikrobiologia, immunologia i ekologia mikrobiomu ukazały, że niewidzialny świat nie daje się podzielić prostą linią na organizm ludzki i zewnętrznych najeźdźców. Dobrze ilustruje to historia wirusologii.

W 1892 roku Dmitrij Iwanowski badał chorobę mozaikową tytoniu. Przepuszczał sok z zakażonych roślin przez filtry Chamberlanda, które zatrzymywały znane bakterie, a mimo to filtrat pozostawał zakaźny. W tej historii kryje się metodologiczny paradoks: Iwanowski odkrył zjawisko, lecz nie posiadał jeszcze kategorii, która pozwoliłaby je właściwie nazwać. Historyczne opracowania potwierdzają, że jego doświadczenie wykazało zakaźność czynnika przechodzącego przez filtr bakteryjny; dopiero późniejsze prace Martinusa Beijerincka pomogły sformułować pojęcie nowej klasy czynnika zakaźnego.

Jest to niemal podręcznikowy przykład sytuacji, w której eksperyment wyprzedza ontologię. Aparatura mówi badaczowi: istnieje coś, czego aktualny system klasyfikacyjny nie obejmuje. Iwanowski nie „zobaczył wirusa", gdyż narzędzia jego epoki na to nie pozwalały; dostrzegł natomiast konsekwencję jego istnienia. W nauce taka sytuacja jest szczególnie płodna: niewidzialny obiekt wchodzi do wiedzy poprzez ślad, który pozostawia. Podobnie jak prehistoryczny tropiciel rekonstruował zwierzę z odcisku stopy, mikrobiolog rekonstruuje czynnik zakaźny z efektu biologicznego po filtracji.

Wirusy okazały się później jeszcze bardziej problematyczne dla tradycyjnego podziału na „żywe" i „nieżywe". Nie posiadają autonomicznego metabolizmu ani nie reprodukują się samodzielnie, lecz wykorzystują molekularne systemy komórki gospodarza do powielania własnej informacji genetycznej. Są jednocześnie strukturą materialną i programem przejmującym cudzą maszynerię. Z punktu widzenia technologii jest to wzorzec fascynujący i groźny: minimalny system zdolny do wejścia w złożony układ, przeadresowania jego funkcji i wytworzenia własnych kopii.

Jeszcze bardziej radykalne jest odkrycie, że część dawnych wirusów nie znajduje się już „na zewnątrz" człowieka. Około 8 procent ludzkiego genomu stanowią sekwencje pochodzące od endogennych retrowirusów – ślady pradawnych infekcji linii rozrodczej naszych przodków. Nie oznacza to, że ta część genomu jest obecnie funkcjonalnym wirusem; większość tych sekwencji uległa mutacjom i dezaktywacji. Z punktu widzenia filozofii organizmu sam ten fakt jest jednak niezwykły: granica między „ja" a dawnym patogenem została zapisana w kodzie genetycznym. Ewolucja potrafi pójść dalej, wykorzystując element dawnej strategii infekcyjnej jako własne narzędzie. Przykładem są syncytyny – białka pochodzące od retrowirusowych genów osłonkowych, które u różnych linii ssaków zostały niezależnie „udomowione" i pełnią funkcje związane z tworzeniem łożyska, uczestnicząc m.in. w fuzji komórek trofoblastu. Mechanizm służący wirusowi do wnikania do komórki został przejęty przez gospodarza do budowania struktury niezbędnej dla reprodukcji ssaków łożyskowych.

Trudno znaleźć lepszą ilustrację egzaptacji. Ewolucja nie tylko broni się przed wrogiem, ale potrafi przejąć jego broń. Organizm jest zatem bardziej podobny do archiwum dawnych konfliktów niż do maszyny zaprojektowanej według jednego planu. Genom zachowuje ślady inwazji, kompromisów, przejęć i molekularnych rozejmów. Biotechnologia postępuje analogicznie, choć robi to świadomie: poszukuje w arsenale mikroorganizmów mechanizmów, które można przenieść do nowej funkcji.

Szczepienie jest jednym z najstarszych przykładów takiego odwrócenia. Nie należy go definiować wyłącznie jako „małej infekcji", gdyż współczesne szczepionki mogą wykorzystywać osłabione drobnoustroje, antygeny, rekombinowane białka, wektory wirusowe lub mRNA. Wspólną zasadą jest tu mechanizm bardziej abstrakcyjny: układ odpornościowy otrzymuje kontrolowaną informację o zagrożeniu, aby kontakt z patogenem nie był pierwszym spotkaniem. Edward Jenner nie znał limfocytów B i T, przeciwciał neutralizujących ani pamięci immunologicznej.

Dysponował jednak obserwacją epidemiologiczną: osoby, które przeszły krowiankę, wydawały się chronione przed ospą prawdziwą. W 1796 roku zaszczepił ośmioletniego Jamesa Phippsa materiałem pobranym ze zmian krowianki u Sarah Nelmes, a następnie przeprowadził procedurę, którą dziś uznalibyśmy za etycznie niedopuszczalny challenge – wystawił chłopca na działanie ospy prawdziwej. Phipps nie zachorował. Nie należy przy tym budować mitu „samotnego geniusza".

Jenner nie był pierwszym, który dostrzegł ochronną rolę krowianki ani próbował jej użyć; Benjamin Jesty przeprowadził podobne szczepienia w swojej rodzinie już w 1774 roku. Znaczenie Jennera polegało na przekształceniu praktycznej obserwacji w program badań i upowszechniania. Jest to kolejny przykład różnicy pomiędzy wynalazkiem a instytucjonalizacją wynalazku. Wiedza może istnieć lokalnie, lecz technologia zmienia cywilizację dopiero wtedy, gdy powstaje system jej reprodukcji. Skutki były bezprecedensowe.

Skala śmiertelności ospy prawdziwej w XX wieku

WHO szacuje, że w samym XX wieku ospa prawdziwa zabiła około 300 milionów ludzi, zanim globalna kampania szczepień doprowadziła do jej eradykacji, oficjalnie ogłoszonej w 1980 roku. Twierdzenie, jakoby choroba ta odpowiadała za śmierć jednej na dwanaście osób w całej historii ludzkości, nie może być traktowane jako fakt – brakuje danych demograficznych, które pozwoliłyby z taką precyzją oszacować całkowitą liczbę zgonów w dziejach naszego gatunku. Dobrze udokumentowana liczba 300 milionów ofiar w XX wieku w zupełności wystarcza, by uchwycić skalę zagrożenia.

Od nauki organizmu do programowania komórki

Szczepionka jest z punktu widzenia bioinspiracji niezwykła przede wszystkim dlatego, że jej działanie nie opiera się na bezpośrednim niszczeniu przeciwnika przez technologię. Technologia uczy organizm. Lekarz nie musi towarzyszyć pacjentowi przy każdym kontakcie z wirusem; układ odpornościowy samodzielnie wykonuje zadanie rozpoznania. Jest to inżynieria pamięci biologicznej.

W odróżnieniu od antybiotyku, który działa jedynie dopóki w organizmie utrzymuje się odpowiednie stężenie cząsteczki, skuteczne szczepienie trwale zmienia dynamikę odpowiedzi immunologicznej. Historia szczepionek pokazuje jednak, że wykorzystywanie biologii jako technologii zawsze wiąże się z problemem kontroli jakości i niezamierzonych pasażerów. Jednym z najbardziej pouczających przypadków była produkcja preparatów przeciw poliomyelitis. W latach 1955–1963 część szczepionek produkowanych w Stanach Zjednoczonych przy użyciu hodowli komórek nerkowych małp została przypadkowo zanieczyszczona wirusem SV40. Według szacunków CDC dotyczyło to około 10–30 procent podawanych w tym okresie preparatów.

Po wykryciu zanieczyszczenia wprowadzono obowiązkowe testowanie nowych partii. Choć był to rzeczywisty skandal bezpieczeństwa biologicznego, jego późniejsza recepcja pokazuje, jak łatwo realne zdarzenie staje się paliwem dla twierdzeń wykraczających poza dowody. SV40 może indukować nowotwory u niektórych zwierząt laboratoryjnych, co wywołało zrozumiałe obawy dotyczące ludzi. Długoterminowe badania epidemiologiczne nie wykazały jednak zwiększonej częstości nowotworów u osób narażonych na zanieczyszczone szczepionki; NCI wprost podsumowuje analizy populacyjne jako niepokazujące wzrostu ryzyka raka. Lekcja jest podwójna: systemy biologiczne rzeczywiście mogą zawierać nieznane ryzyko, ale bezpieczeństwo należy

oceniać poprzez dane epidemiologiczne, a nie przez utrwalanie hipotezy tylko dlatego, że brzmi ona przerażająco.

Rozwój biologii molekularnej przeniósł relację z mikroorganizmami na jeszcze wyższy poziom. Bakteria przestała być wyłącznie obiektem zwalczania, a stała się fabryką. Rekombinowane DNA pozwoliło wprowadzać do mikroorganizmów ludzkie sekwencje genetyczne i zmuszać komórki bakteryjne do produkowania pożądanych białek. W 1978 roku naukowcy City of Hope i Genentech opracowali metodę wytwarzania ludzkiej insuliny z użyciem rekombinowanego DNA, a w 1982 roku FDA zatwierdziła Humulin jako pierwszy lek produkowany tą technologią.

Z filozoficznego punktu widzenia była to rewolucja większa niż zwykłe znalezienie nowego leku. Człowiek przestał jedynie ekstrahować użyteczną substancję z organizmu; zaczął przenosić instrukcję produkcji z jednego organizmu do drugiego. Bakteria Escherichia coli, zwykle kojarzona z jelitem i potencjalną patogennością niektórych szczepów, została przekształcona w przemysłowy aparat syntezy ludzkiego hormonu. Obok insuliny przykładami produktów rewolucji rekombinowanego DNA są interferony oraz czynniki krzepnięcia. Biotechnologia zaczęła działać nie jak klasyczna fabryka chemiczna, lecz jak programista zmieniający instrukcję wykonywaną przez żywą komórkę.

Historia Alexandra Fleminga pokazuje z kolei, że mikroorganizm może stać się źródłem technologii w sytuacji, której początkowo nikt nie planował. W 1928 roku Fleming zaobserwował zahamowanie wzrostu bakterii wokół kolonii pleśni Penicillium. Stier interpretuje tę historię jako przykład przygotowanej serendypności: przypadkowe zanieczyszczenie nie jest jeszcze odkryciem, dopóki ktoś nie rozpozna jego znaczenia. Fleming nie stworzył przemysłowej penicyliny sam; niezbędna była późniejsza praca Howarda Floreya, Ernsta Chaina, Normana Heatleya i wielu innych osób, aby zamienić obserwację laboratoryjną w terapię na dużą skalę. To ponownie przypomina, że wynalazek jest siecią kompetencji, a nie momentem olśnienia pojedynczego bohatera.

Antybiotyk ujawnia jednocześnie brutalną logikę ekologii mikroorganizmów. Wiele naturalnych substancji przeciwdrobnoustrojowych istnieje dlatego, że organizmy konkurują ze sobą. Człowiek włącza się w konflikt trwający setki milionów lat i wybiera z niego broń dogodną dla siebie. Problem polega na tym, że przeciwnik również podlega ewolucji. Powszechne stosowanie antybiotyków tworzy presję selekcyjną sprzyjającą wariantom opornym. Zwycięstwo farmakologiczne zawiera więc mechanizm własnego osłabienia: im skuteczniej i częściej stosujemy daną broń, tym większą przewagę reprodukcyjną może otrzymywać każdy mikroorganizm zdolny ją przetrwać. Antybiotykooporność nie jest zatem zaskakującą „zemstą natury", lecz przewidywalną konsekwencją ewolucji. Technologia medyczna zmienia krajobraz selekcyjny, a populacja

mikroorganizmów odpowiada zmianą częstości wariantów. To jedna z najważniejszych sytuacji, w których teoria Darwina staje się bezpośrednim narzędziem klinicznym.

Od chemicznej wojny do topograficznej prewencji i systematycznego przeszukiwania przestrzeni wiedzy

Lekarz leczący jednego pacjenta działa wewnątrz procesu populacyjnego obejmującego miliardy bakterii i przyszłe zakażenia innych ludzi.

Jednym z najciekawszych współczesnych poszukiwań jest próba rozszerzenia przestrzeni chemicznej, którą możemy badać w poszukiwaniu nowych antybiotyków. W 2020 roku zespół z MIT oraz współpracujących instytucji zastosował model głębokiego uczenia do przewidywania aktywności przeciwdrobnoustrojowej, identyfikując cząsteczkę nazwaną halicyną – na cześć HAL-a, fikcyjnej sztucznej inteligencji z „2001: Odysei kosmicznej".

W doświadczeniach laboratoryjnych halicyna wykazała skuteczność przeciw wielu patogenom, w tym niektórym szczepom wielolekoopornym, co potwierdzono w dwóch modelach zakażeń u myszy. Nie należy jednak twierdzić, że AI „wynalazła antybiotyk" w sposób całkowicie autonomiczny. Badacze zdefiniowali zadanie, przygotowali dane, wytrenowali model i wybrali bibliotekę cząsteczek, a następnie eksperymentalnie zweryfikowali przewidywania. Nowością była sama strategia przeszukiwania.

Podczas gdy Fleming obserwował biologiczną anomalię na szalce Petriego, algorytm mógł analizować ogromne biblioteki chemiczne i wskazywać związki strukturalnie odmienne od typowych antybiotyków. Bioinspiracja spotkała się tutaj z informatyką: technologia nie kopiuje pojedynczego związku z natury, lecz uczy się statystycznego obrazu aktywności biologicznej, by wykorzystać go do eksploracji chemii. Rozwój po 2020 roku jeszcze wyraźniej uwypukla tę zmianę.

W 2023 roku badacze z MIT wykorzystali uczenie głębokie do identyfikacji nowych kandydatów aktywnych wobec MRSA, a w 2025 roku modele generatywne posłużyły do zaprojektowania i komputerowego przesiewu ponad 36 milionów hipotetycznych cząsteczek. Nie oznacza to, że problem oporności został rozwiązany, lecz pokazuje, że obok przypadkowego odkrywania metabolitów pojawia się możliwość systematycznego penetrowania przestrzeni związków, których chemik nie musiał wcześniej projektować ręcznie.

Istnieje jednak druga strategia walki z bakteriami: zamiast zabijać komórkę, można utrudnić jej przyczepienie do powierzchni. Przykładem jest technologia Sharklet, inspirowana skórą rekina,

która stanowi alternatywę dla „wojny chemicznej” antybiotyków. To przeciwstawienie jest koncepcyjnie użyteczne, o ile nie będziemy twierdzić, że skóra rekina „zawsze pozostaje czysta” lub że dany wzór całkowicie uniemożliwia tworzenie biofilmu. Sharklet to w rzeczywistości rodzina mikrowzorów opartych na topografii skóry rekina.

Badania wykazały, że odpowiednio ukształtowane powierzchnie mogą istotnie zmniejszać kolonizację bakteryjną bez konieczności stosowania substancji biobójczych. W eksperymentach nad materiałami do cewników naczyniowych mikrowzór ograniczał kolonizację przez Staphylococcus epidermidis i Staphylococcus aureus oraz zmniejszał adhezję płytek krwi. Nie jest to jednak sterylizator; zmniejszenie prawdopodobieństwa osiedlenia się bakterii różni się od ich absolutnego wyeliminowania. Ta różnica ujawnia alternatywną filozofię bezpieczeństwa biologicznego.

Klasyczne podejście pyta: jak zabić organizm, który pojawił się na powierzchni? Podejście topograficzne pyta: jak ukształtować środowisko, aby kolonizacja była trudniejsza? Jest to zmiana analogiczna do tej w ekologii: zamiast reagować na intruza po jego pojawieniu się, modyfikujemy warunki zasiedlenia. Podobnie działają bariery i higiena w epidemiologii czy architektura ograniczająca powierzchnię ataku w cyberbezpieczeństwie. Najlepsza walka z przeciwnikiem może polegać na tym, by nie stworzyć mu wygodnego miejsca do życia.

Jeszcze inną lekcję przynosi historia statyn. Akira Endo, poszukując naturalnych inhibitorów syntezy steroli, zwrócił się ku metabolitom grzybów. Kierunek ten był trafny, choć szczegóły wymagają doprecyzowania.

Endo rozpoczął program badań nad produktami grzybów, inspirując się między innymi sukcesem Fleminga. W latach 1971–1972 jego zespół przebadał około 3800 szczepów, zanim odkrył aktywność Penicillium citrinum Pen-51, wyizolowanego z próbki ryżu ze sklepu zbożowego w Kioto. Substancję nazwano ML-236B, później compactin lub mevastatin. Najciekawsza jest jednak hipoteza stojąca za samym procesem poszukiwań.

Egzaptacja broni biologicznej jako szczyt abstrakcji

Endo rozumował, że skoro cholesterol i pokrewne sterole są kluczowymi składnikami błon komórkowych, mikroorganizmy mogą wytwarzać związki zakłócające ich syntezę u konkurentów. Było to zastosowanie ekologii chemicznej w farmakologii: zamiast syntetyzować losowe cząsteczki, można przeszukiwać arsenał wyprodukowany przez konkurencję mikroorganizmów.

Compactin hamował reduktazę HMG-CoA – kluczowy enzym biosyntezy cholesterolu. Późniejsze odkrycie lovastatyny i rozwój całej klasy statyn dostarczyły jednego z najważniejszych narzędzi

profilaktyki chorób sercowo-naczyniowych. Nie należy jednak powtarzać sugestii, że grzyby produkują statyny po prostu „aby nie zostać zjedzonymi przez zwierzęta". Funkcja ekologiczna tych metabolitów nie daje się zredukować do jednego zamiaru czy konkretnego przeciwnika. Ewolucja nie tworzy związków „w celu leczenia ludzkiego cholesterolu"; ich pierwotna rola może obejmować szeroką konkurencję mikrobiologiczną i inne interakcje. Farmakologia dokonuje tu ponownej egzaptacji: metabolit powstały w jednej sieci ekologicznej zostaje przeniesiony do całkowicie odmiennej sfery medycyny człowieka. Najbardziej dosłowne znaczenie „frenemy" uzyskuje jednak w terapii fagowej.

Bakteriofagi to wirusy infekujące bakterie. Choć dla człowieka wirus jest archetypowym patogenem, wirus bakterii może stać się przeciwnikiem naszego przeciwnika. Stier przywołuje obserwację Ernesta Hankina z 1896 roku dotyczącą bakteriobójczej aktywności wody z rzek Ganges i Jamuna wobec przecinkowca cholery. Współczesne analizy historyczne potwierdzają to zjawisko, lecz ostrożnie zaznaczają, że przypisanie go konkretnie fagom jest rekonstrukcją późniejszą. Dopiero Frederick Twort w 1915 roku oraz Félix d'Hérelle w 1917 roku opisali mechanizmy, które doprowadziły do identyfikacji wirusów bakterii. D'Hérelle nadał im nazwę bacteriophage i niemal natychmiast dostrzegł potencjał terapeutyczny. Wczesne eksperymenty prowadzono jednak według standardów, które dziś uznalibyśmy za dalekie od rygorów badań klinicznych; d'Hérelle i jego współpracownicy spożywali preparaty fagowe, by osobiście przekonać się o ich bezpieczeństwie przed podaniem pacjentom.

Historia fagów jest zarazem historią geopolityki wiedzy. Po triumfie antybiotyków terapia fagowa w świecie zachodnim niemal zanikła, podczas gdy była intensywnie rozwijana m.in. w Związku Radzieckim i Gruzji. Przeglądy literatury wskazują, że część dawnych badań klinicznych obarczona była istotnymi brakami metodologicznymi: brakiem randomizacji, grup placebo czy precyzyjnego raportowania preparatów. Nie oznacza to jednak, że fagi „nie działają". Oznacza to, że ich współczesne zastosowanie musi zostać oddzielone od romantycznej historiografii i poddane rygorom medycyny opartej na dowodach.

Ich potencjał pozostaje wyjątkowy. Fagi wykazują wysoką swoistość wobec konkretnych bakterii, co pozwala na działanie bardziej precyzyjne niż w przypadku antybiotyków szerokospektralnych. Ta sama specyfika komplikuje jednak terapię: wymaga doboru właściwego faga do konkretnego szczepu, uwzględnienia ryzyka oporności patogenu oraz wpływu układu odpornościowego pacjenta na farmakokinetykę preparatu. „Naturalny zabójca bakterii" nie jest więc gotowym lekiem, lecz biologicznym systemem, który należy farmaceutycznie scharakteryzować i kontrolować.

Najbardziej spektakularnym przykładem przejęcia broni przeciwnika pozostaje CRISPR. Stier opisuje go jako bakteryjny katalog pamięci, w którym fragment materiału genetycznego wirusa

zostaje zachowany niczym „mugshot” intruza, a Cas9 pełni funkcję molekularnych nożyc. Choć metafora jest uproszczona, trafnie oddaje zasadę odporności adaptacyjnej CRISPR-Cas. Bakterie i archeony przechwytują fragmenty DNA infekujących je fagów, umieszczając je jako spacery między powtarzającymi się sekwencjami CRISPR. Informacja ta służy później do wytwarzania RNA, które prowadzi białka Cas ku komplementarnej sekwencji podczas kolejnego ataku. Jest to rzeczywista molekularna pamięć infekcji.

Nagroda Nobla podsumowuje prace Emmanuelle Charpentier i Jennifer Doudny jako wykorzystanie tego systemu do stworzenia programowalnego narzędzia przecinania DNA. W przełomowej pracy z 2012 roku mechanizm ten został uproszczony i przeprogramowany tak, aby kierować Cas9 do wybranej sekwencji DNA. W tym momencie system, którego ewolucyjna funkcja polegała na obronie bakterii przed wirusami, przestał należeć wyłącznie do mikrobiologii, stając się platformą inżynierii genomowej. Za rozwój tej metody Charpentier i Doudna otrzymały w 2020 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii. Trudno o bardziej dosłowną realizację zasady „poznaj swojego przeciwnika”.

Człowiek nie wynalazł systemu Cas9 od podstaw. Odkrył konflikt między bakterią a wirusem, zrozumiał jego mechanizm, oddzielił komponent rozpoznawania od konkretnego biologicznego wroga, a następnie przekierował molekularne ostrze na sekwencję wybraną przez badacza. Bioinspiracja osiąga tu najwyższy poziom abstrakcji: nie kopiujemy organizmu ani jego zachowania. Przeprogramowujemy molekularną broń jednej formy życia tak, aby służyła ludzkiemu celowi.

Biologia dostarcza mechanizmów, ale nie etyki ani bezpieczeństwa

Właśnie dlatego szczególnej korekty wymaga przytoczona w materiale historia pacjenta określanego jako "Michael K.", który miał odzyskać wzrok dzięki naprawie genu bezpośrednio w siatkówce. Badanie EDIT-101, opublikowane w 2024 roku w New England Journal of Medicine, prezentowało jednak inny obraz. Było to otwarte badanie fazy 1-2, w którym wzięło udział 14 uczestników z dziedzicznym zwyrodnieniem siatkówki wywołanym konkretnym wariantem genu CEP290. Preparat CRISPR-Cas9 podawano podsiatkówkowo do oka o gorszej sprawności wzrokowej. Dziewięciu uczestników (64 procent) uzyskało klinicznie znaczącą poprawę w co najmniej jednym z trzech głównych pomiarów funkcji wzrokowej; u sześciu odnotowano istotną poprawę funkcji czopków, a u czterech osiągnięto klinicznie znaczącą poprawę ostrości wzroku.

Choć nie raportowano ciężkich zdarzeń niepożądanych związanych z terapią lub procedurą, autorzy wyraźnie podkreślili małą próbę badawczą i konieczność dalszych analiz. Mimo to wynik pozostaje niezwykły. Po raz pierwszy zaobserwowano kliniczny efekt edycji genomu wykonanej bezpośrednio w tkance oka żywego człowieka. Nie trzeba jednak dopisywać mu cudownej narracji o jednej osobie, której "przywrócono wzrok". Nauka jest wystarczająco fascynująca w swojej prawdziwej wersji: pradawny mechanizm antywirusowej obrony mikroorganizmów został przeprogramowany tak, aby korygować funkcję ludzkiego genu, a pierwsze badanie kliniczne wykazało mierzalne sygnały poprawy u części pacjentów. CRISPR otwiera jednocześnie problem, którego wcześniejsza biomimetyka prawie nie znała. Skopiowanie krawędzi płetwy humbaka może zmienić wydajność turbiny; przeprogramowanie systemu edycji DNA może zmienić dziedziczne podłoże organizmu. W zastosowaniach somatycznych modyfikacja dotyczy komórek pacjenta i zasadniczo nie jest przekazywana potomstwu. Edycja linii zarodkowej stwarzałaby natomiast możliwość zmian dziedzicznych, co przenosi dyskusję z poziomu bezpieczeństwa pojedynczego leczenia do etyki międzypokoleniowej.

Właśnie dlatego słynny przypadek He Jiankui z 2018 roku stał się jednym z największych skandali współczesnej biotechnologii. Chiński badacz ogłosił narodziny dzieci, których genomy embrionów zostały poddane edycji za pomocą CRISPR w celu modyfikacji genu CCR5. Eksperyment został szeroko potępiony ze względu na brak przekonującej potrzeby medycznej, ryzyko zmian niezamierzonych, problem świadomej zgody oraz nieuprawnione narażenie przyszłych osób na konsekwencje dziedzicznej modyfikacji. W konsekwencji He został skazany w Chinach na karę więzienia.

Ten przypadek nie obala CRISPR jako technologii; pokazuje raczej, że im większa techniczna zdolność ingerencji, tym szerszej infrastruktury etycznej i instytucjonalnej wymaga jej użycie. Bioinspiracja medyczna dochodzi tutaj do swojej granicy normatywnej. Natura może wskazać, jak ciąć DNA, ale nie odpowie na pytanie, czy wolno nam dokonać konkretnego cięcia. Bakteria posiada system odporności CRISPR, ale nie posiada komisji bioetycznej. Ewolucja potrafi eliminować, mutować, pasożytować i przejmować geny, lecz nie jest źródłem praw pacjenta, sprawiedliwości w dostępie do terapii ani zasady świadomej zgody. "Naturalne" pozostaje kategorią pochodzenia mechanizmu, a nie argumentem moralnym. To rozróżnienie jest konieczne również w farmakologii. Penicylina jest naturalnym metabolitem pleśni, ale nie czyni to każdego metabolitu pleśni bezpiecznym. Compactin odkryto dzięki biologicznemu screeningowi, lecz wcześniejsza, obiecująca substancja Endo, citrinin, została odrzucona z powodu toksyczności. Jad zwierzęcia może zawierać cząsteczkę będącą punktem wyjścia leku, ale jad pozostaje toksyną. Bioinspirowana topografia może ograniczać adhezję bakterii, lecz musi zostać zweryfikowana pod kątem

konkretnego materiału i zastosowania medycznego. Biologia dostarcza hipotez; medycyna musi zapewnić bezpieczeństwo.

Domestykacja mechanizmów zamiast walki z naturą

"Know Thy Frenemy" ujawnia głęboką zmianę w historii relacji człowieka z naturą. Najpierw uciekaliśmy przed patogenem, potem nauczyliśmy się go identyfikować, a następnie zabijać chemicznie. Z czasem przejęliśmy związki wytwarzane przez jego konkurentów. Wykorzystaliśmy wirusy do walki z bakteriami, bakterie do produkcji ludzkich białek, sekwencje wirusowe do zrozumienia własnego genomu, a bakteryjny system obrony przed wirusem do edycji ludzkiego DNA. Granice gatunków, które w potocznym języku wydają się twarde, z perspektywy biotechnologii okazują się wyjątkowo przepuszczalne. Informacja genetyczna może zostać przeniesiona do bakterii, białko wirusa zaadaptowane przez ssaka, a enzym bakteryjny stać się narzędziem laboratoryjnym. Fag może służyć jako lek, a mikroorganizm zmienić się w linię produkcyjną. Ewolucja przez miliardy lat tworzyła molekularne narzędzia w jednym kontekście; człowiek coraz częściej uczy się przenosić je do drugiego. Nie jest to jednak zwycięstwo nad ewolucją, lecz wejście do jej gry z nowym zestawem instrumentów.

Bakteria nadal może rozwinąć oporność na antybiotyk lub faga, wirus może mutować, a komórka nowotworowa zostać poddana selekcji w wyniku leczenia. Układ odpornościowy potrafi wytworzyć odpowiedź na wektor terapeutyczny. Każda interwencja zmienia środowisko selekcyjne, na co żywy system odpowiada adaptacją. Medycyna przyszłości musi więc coraz bardziej przypominać ekologię strategiczną, a coraz mniej wojnę prowadzoną przeciw statycznemu przeciwnikowi. Najważniejszą lekcją płynącą z obserwacji mikroorganizmów jest być może nie konkretne narzędzie, lecz rezygnacja z metafory absolutnego zwycięstwa. Ekosystemu nie da się sterylizować w nieskończoność. Człowiek sam jest ekosystemem; jego organizm współistnieje z ogromnym zespołem bakterii, archeonów, grzybów i wirusów, a prawidłowe funkcjonowanie tych wspólnot wpływa na metabolizm, odporność i rozwój. Medycyna nie może zatem dążyć do świata wolnego od mikroorganizmów, lecz musi nauczyć się zarządzać relacjami pomiędzy gospodarzem a mikrobiologiczną wspólnotą. Abrahamowi Lincolnowi przypisuje się pytanie, czy nie niszczymy wrogów właśnie wtedy, gdy czynimy z nich przyjaciół; Stier przywołuje tę maksymę jako motto rozdziału. Biologia dodaje do niej własną poprawkę.

Nie zawsze trzeba uczynić przeciwnika przyjacielem. Czasem wystarczy zrozumieć jego mechanizm tak dobrze, aby przejąć jego kompetencję. Wirus może pozostać wrogiem, podczas gdy jego molekularna historia stanie się częścią naszego łożyska. Bakteria może pozostać patogenem, a

mechanizm jej odporności stać się technologią leczenia. Grzyb może konkurować w środowisku, podczas gdy jego metabolit przedłuża ludzkie życie. Najgłębszym produktem bioinspiracji okazuje się więc nie naśladowanie, lecz domestykacja mechanizmu. Człowiek bierze proces ukształtowany przez ewolucyjny konflikt i odrywa go od pierwotnego interesu biologicznego uczestnika. To, co służyło bakterii przeciw fagowi, zaczyna służyć lekarzowi. To, co pomagało wirusowi w fuzji błon, zostaje wykorzystane przez ewolucję ssaka. To, co służyło grzybowi w jego chemicznej ekologii, zamienia się w lek.

Przeciwnik nie musi zniknąć, aby jego wiedza została przejęta. Właśnie tutaj bioinspiracja osiąga jednak punkt, w którym sama sprawność techniczna przestaje wystarczać. Jeżeli potrafimy przejmować mechanizmy życia, musimy zapytać, kto posiada prawo do ich komercjalizacji, kto ponosi ryzyko eksperymentu, kto otrzyma dostęp do terapii i gdzie przebiega granica pomiędzy odkrywaniem istniejącej biologii a tworzeniem patentowalnego wynalazku. Gen nie został wymyślony przez przedsiębiorstwo.

Biologia jako filtr heurystyczny redukujący koszty poszukiwania innowacji

Zmodyfikowany system edycji może jednak wymagać ogromnej pracy badawczej i znacznego kapitału. Mikroorganizm występuje w naturze, lecz skonstruowany szczep produkcyjny jest już rezultatem inżynierii.

Kolejny etap wywodu musi przenieść bioinspirację z laboratorium do sfery ekonomii. Koncepcja „natury jako kapitału wiedzy” stawia pytanie: ile właściwie warte są cztery miliardy lat ewolucyjnego "R&D"? Czy można ekonomicznie wycenić biologiczny proof of concept? Dlaczego przedsiębiorstwa ponoszą kosztowne poszukiwania rozwiązań, które przyroda już demonstruje i czy różnorodność biologiczna może być traktowana jako kapitał opcyjny dla technologii, których jeszcze nie potrafimy sobie wyobrazić? Metafora natury jako laboratorium zostanie tu zderzona z myślą Schumpetera, Nelsona i Wintera, teorią wiedzy rozproszonej, kosztami poszukiwania, path dependence oraz ekonomią innowacji. Przejdziemy zatem od biologii do gospodarki: natura jako kapitał wiedzy, przestrzeń poszukiwań i ekonomia niewynalezionych jeszcze możliwości.

Tezy Fundacji Dobre Państwo prowadziły – od ucha Alexandra Grahama Bella, przez płetwę humbaka, algorytm mrówkowy, oko homara i bakteryjny system CRISPR – do wniosku, że biologiczna inspiracja może działać na bardzo różnych poziomach abstrakcji. Raz przenosimy kształt, innym razem mechanizm fizyczny, regułę sterowania, sposób organizacji informacji albo

molekularne narzędzie. W każdym przypadku pojawia się jednak problem, którego biologia sama nie rozwiązuje: aby obserwacja stała się innowacją gospodarczą, musi przejść przez sito laboratorium, finansowania, infrastruktury, własności intelektualnej, regulacji, skalowania produkcji i rynku.

Materiał źródłowy ujmuje naturę jako dział badań i rozwoju pracujący od miliardów lat, a biologiczny wzorzec jako proof of concept, który pokazuje inżynierowi, że określona klasa rozwiązań jest fizycznie wykonalna. Metafora ta jest bardzo produktywna, o ile nie odczytamy jej dosłownie. Ewolucja nie posiada budżetu R&D, zarządu, celu ani oczekiwanej stopy zwrotu. Jej gospodarcza wartość polega na czymś bardziej subtelnym: dostarcza ogromnego zbioru historycznie wygenerowanych rozwiązań, które mogą zmniejszać koszt ludzkiego poszukiwania. Ekonomia innowacji od dawna wie, że jednym z największych kosztów wynalazku nie jest samo wykonanie produktu, lecz znalezienie właściwego miejsca w przestrzeni możliwych rozwiązań. Jeśli projektant dysponuje tysiącem dopuszczalnych geometrii, materiałów i architektur, każda kolejna hipoteza eksperymentalna kosztuje czas, pieniądze i uwagę.

Biologia może działać w tej sytuacji jak szczególny filtr heurystyczny. Nie wskazuje, które rozwiązanie okaże się najlepsze w warunkach przemysłowych, ale pozwala wybrać region przestrzeni projektowej, którego nie trzeba przeszukiwać zupełnie na ślepo. Płetwa humbaka nie jest gotowym projektem turbiny, lecz dowodem, że nierówna krawędź natarcia może w określonych reżimach przepływu funkcjonować znakomicie. Oko homara nie jest teleskopem rentgenowskim, ale pokazuje refleksyjną geometrię optyczną wartą technicznego przełożenia. CRISPR nie jest gotową terapią, lecz biologicznym systemem rozpoznawania i przecinania materiału genetycznego, który można przeprogramować.

Proof of concept posiada zatem ekonomiczną wartość nie dlatego, że eliminuje ryzyko, lecz dlatego, że zmienia jego strukturę. Inżynier przestaje pytać: „czy taka zasada w ogóle może działać?”, a przechodzi do trudniejszego pytania: „czy uda się ją przenieść do naszych materiałów, skali, warunków produkcyjnych i struktury kosztów?”. To nie jest mała różnica.

W procesie innowacji redukcja niepewności co do wykonalności może być niezwykle wartościowa, mimo że nie usuwa ryzyka technologicznego, regulacyjnego ani rynkowego. Biologiczny wzorzec przypomina eksperyment wykonany przez inny system, którego wynik jest dostępny bez ponoszenia przez przedsiębiorstwo kosztu pierwszego odkrycia zasady. Nie oznacza to jednak, że ewolucja przeprowadziła eksperyment laboratoryjny w naukowym znaczeniu. Dobór naturalny nie porównuje kontrolowanych prób, nie izoluje zmiennych i nie zapisuje rezultatów. Organizmy są rezultatem procesów historycznych obciążonych kompromisami, przypadkiem, pleiotropią i ograniczeniami rozwojowymi.

Metafora biologicznego R&D staje się więc niebezpieczna, jeśli prowadzi do przekonania, że każdy zachowany organizm jest rozwiązaniem optymalnym. Ekonomicznie trafniejszą analogią byłby ogromny, częściowo chaotyczny katalog prototypów, które przeszły co najmniej jeden brutalny test: potrafiły przez odpowiednio długi czas funkcjonować i reprodukować się w określonym środowisku.

Tak rozumiana bioinspiracja dobrze wpisuje się w Schumpeterowską teorię innowacji jako tworzenia „nowych kombinacji". Schumpeter nie definiował rozwoju gospodarczego wyłącznie przez absolutnie nowe odkrycia naukowe. Nowość może powstać poprzez odmienne połączenie istniejących materiałów, sił, metod produkcji, rynków i form organizacyjnych. Właśnie „nowe kombinacje" należą do centralnych kategorii jego teorii rozwoju gospodarczego.

Bioinspiracja jest szczególnym przypadkiem takiej rekombinacji: element pochodzący z jednej domeny funkcjonalnej zostaje zestawiony z problemem należącym do domeny zupełnie innej. Ucho plus elektromagnetyzm daje jeden z intelektualnych warunków telefonu. Etologia mrówek plus optymalizacja kombinatoryczna prowadzi do Ant Colony Optimization. Bakteryjna odporność adaptacyjna plus biologia molekularna prowadzi do programowalnej edycji genomu. Biologiczna topografia skóry plus technologia polimerów tworzy powierzchnię ograniczającą adhezję drobnoustrojów.

Bioinspiracja jako metoda delokalizacji poszukiwań innowacji

W każdym przypadku nowość nie wynika ze stworzenia składników ex nihilo, lecz z ich nowego zestawienia. Mary Shelley pisała o wynalazku jako o porządkowaniu chaosu, a nie tworzeniu z próżni; Stier przywołuje tę intuicję obok maksym dotyczących bioinspiracji. Z perspektywy ekonomii innowacji oznacza to, że najcenniejszym zasobem przedsiębiorstwa może być nie tyle sama zdolność generowania informacji, co umiejętność dostrzegania nieoczywistych kombinacji wiedzy już istniejącej. Tu właśnie bioinspiracja spotyka się z ekonomią ewolucyjną Richarda Nelsona i Sidneya Wintera.

W ich ujęciu przedsiębiorstwa nie zachowują się jak abstrakcyjne maszyny, które w każdej chwili rozwiązują problem maksymalizacji. Funkcjonują one dzięki rutynom, kompetencjom i regułom wykształconym w czasie, a innowacja pojawia się poprzez proces poszukiwania nowych lub zmodyfikowanych schematów, które następnie podlegają ekonomicznej selekcji. Nelson i Winter świadomie wykorzystują metaforę ewolucyjną: poszukiwanie jest analogiczne do źródła

zmienności, natomiast rynek selekcjonuje rozwiązania poprzez zróżnicowaną zdolność firm do wzrostu i osiągania zysków. Ta teoria pozwala zrozumieć, dlaczego sam dostęp do biologicznego wzorca nie wystarcza.

Przedsiębiorstwo szuka zazwyczaj w pobliżu własnych kompetencji. Firma produkująca śruby posiada wiedzę o śrubach, dlatego nowych rozwiązań intuicyjnie poszukuje w przestrzeni stopów, gwintów czy metod obróbki. Aby spojrzeć na problem mocowania przez pryzmat struktury rzepu roślinnego lub przyczepności gekona, musi opuścić lokalny obszar technologicznych poszukiwań. Bioinspiracja jest więc metodą delokalizacji search – próbą świadomego wyjścia poza trajektorię narzuconą przez istniejącą wiedzę organizacji. Paradoks innowacji polega jednak na tym, że aby skutecznie uczyć się z odległej dziedziny, trzeba posiadać wystarczająco dużo własnych kompetencji, by w ogóle rozpoznać znaczenie tego, co widzimy. Cohen i Levinthal nazwali tę właściwość absorptive capacity: zdolnością przedsiębiorstwa do rozpoznania wartości zewnętrznej wiedzy, jej przyswojenia i komercyjnego wykorzystania. Badania R&D nie produkują zatem wyłącznie nowych informacji; budują aparat poznawczy, który pozwala korzystać z odkryć dokonanych gdzie indziej.

To kluczowy paradoks polityki innowacyjnej: otwartość na wiedzę nie eliminuje potrzeby posiadania własnych kompetencji. Firma bez biologów niekoniecznie zrozumie funkcję organizmu, firma bez inżynierów nie potrafi jej przetłumaczyć, a firma bez zaplecza przemysłowego nie zbuduje produktu. Dlatego bioróżnorodność sama w sobie nie jest automatycznym programem rozwoju gospodarczego. Las deszczowy może zawierać miliony potencjalnie cennych struktur i mechanizmów, ale bez taksonomii, laboratoriów, edukacji czy instytucji transferu technologii pozostają one gospodarczo nieme.

Ekonomista Amir Lebdioui, analizując biomimetykę jako narzędzie polityki innowacyjnej, zwraca uwagę na szczególny paradoks: znaczna część światowej bioróżnorodności znajduje się w krajach rozwijających się, podczas gdy zdolność do jej technologicznego wykorzystania pozostaje skoncentrowana w państwach uprzemysłowionych. Jego analiza wskazuje na bariery koordynacyjne i instytucjonalne, które sprawiają, że państwo posiada biologiczny zasób, ale nie przechwytuje powstającej z niego wartości wiedzochłonnej. Jest to problem strukturalnie podobny do klasycznej zależności surowcowej, z tą różnicą, że „surowcem" staje się informacja.

Kraj może eksportować nie tylko rudę czy ropę, lecz również biologiczną możliwość, której największa wartość ekonomiczna zostanie wygenerowana dopiero w laboratorium i systemie patentowym znajdującym się gdzie indziej. Jeśli biomimetyka ma stać się strategią rozwoju, polityka nie może ograniczyć się do ochrony ekosystemów czy udostępniania próbek. Wymaga

infrastruktury pozwalającej lokalnym instytucjom przechodzić od znajomości organizmu do abstrakcji funkcji, od abstrakcji do prototypu i od prototypu do przedsiębiorstwa.

Tu pojawia się problem wiedzy ukrytej. Część biologicznej informacji zapisana jest w genomie, lecz istotna wiedza o ekosystemie jest zakumulowana w praktykach ludności lokalnej i rdzennej. Znajomość właściwości roślin czy zachowań zwierząt może znacząco skrócić drogę badacza do interesującego mechanizmu. Oznacza to, że „biblioteka natury" posiada nie tylko biologiczne egzemplarze, ale również ludzkich bibliotekarzy.

Natura jako kapitał wiedzy i pułapki ekonomizacji bioróżnorodności

Gdy globalna korporacja wykorzystuje taki zasób bez odpowiedniego uznania i sprawiedliwego podziału korzyści, bioinspiracja przestaje być niewinną metaforą edukacyjną, a staje się zarzewiem konfliktu o własność i biopiractwo. Właśnie dlatego Konwencja o różnorodności biologicznej oraz Protokół z Nagoi wprowadziły zasadę Access and Benefit-Sharing. Dokument przyjęty w 2010 roku ma regulować dostęp do zasobów genetycznych oraz zapewniać sprawiedliwy i równy podział korzyści wynikających z ich eksploatacji. Idea ta ma istotny wymiar ekonomiczny: jeśli biologiczny zasób stanowi źródło wartości wiedzochłonnej, system instytucjonalny powinien pytać nie tylko o to, kto sfinansował laboratorium, ale skąd pochodził zasób i czy wspólnota oraz państwo źródłowe uczestniczą w zyskach.

Jeszcze bardziej złożony jest przypadek biomimetyki, gdyż biologicznej idei funkcjonalnej nie zawsze używa się tak, jak materiału genetycznego. Inżynier może analizować skrzydło ptaka, strukturę liścia czy zachowanie kolonii owadów bez pobierania próbek i bezpośredniego wykorzystania DNA. Pojawia się pytanie: czy i w jakim sensie krajobraz biologiczny może być źródłem ekonomicznie chronionej wiedzy? Problem ten wymaga osobnej analizy prawnej w dalszej części, lecz już teraz widać pewien zgrzyt: innowacja potrzebuje swobodnego przepływu idei, podczas gdy sprawiedliwość wymaga uznania źródeł wartości, które rynek chętnie traktuje jako darmowe. Ekonomiczna metafora natury jako "darmowego działu R&D" jest w tym miejscu najbardziej myląca. Natura nie wystawia faktury, ale korzystanie z niej nie jest bezkosztowe. Utrzymanie ekosystemu generuje koszty społeczne w postaci rezygnacji z alternatywnych sposobów zagospodarowania terenu – ochrona siedlisk może bowiem ograniczać wydobycie, rolnictwo, urbanizację czy krótkoterminowy dochód z eksploatacji.

Ponadto wiedza o ekosystemie wymaga finansowania muzeów przyrodniczych, kolekcji biologicznych, badań terenowych, taksonomii, genomiki i infrastruktury danych. "Darmowy" wzorzec biologiczny często opiera się na kosztownej publicznej infrastrukturze wiedzy. Można jednak uzasadnić jego ochronę poprzez pojęcie wartości opcyjnej i quasi-opcyjnej. W ekonomii środowiska analizuje się sytuacje, w których zniszczenie zasobu jest nieodwracalne, podczas gdy przyszła wiedza o jego wartości pozostaje niepewna. Zachowanie ekosystemu pozwala zatem odroczyć decyzję do momentu, gdy będziemy wiedzieć więcej. Literatura rozwijająca argument Arrowa, Fishera i Henry'ego interpretuje quasi-option value właśnie jako wartość przyszłego uczenia się, zachowaną dzięki powstrzymaniu nieodwracalnej decyzji.

W kontekście bioróżnorodności intuicja ta jest wyjątkowo silna. Gatunek, którego funkcji technologicznej dziś nie znamy, może posiadać wartość informacyjną dla problemu, który jeszcze nie istnieje. Sto lat temu nikt nie potrzebował biologicznego wzorca do miniaturyzacji anten Wi-Fi. Przed rozwojem astronomii rentgenowskiej oko homara nie było postrzegane jako analogia teleskopowa, a przed genetyką molekularną bakteryjna odporność przeciw fagom nie stanowiła potencjalnego systemu edycji genomu.

Wartość biologicznego zasobu zależy zatem częściowo od przyszłych pytań, których z definicji nie potrafimy dziś wycenić. Nie oznacza to jednak, że każdemu gatunkowi należy przypisać astronomiczną wartość oczekiwaną tylko dlatego, że "może kiedyś dostarczyć lek". Ekonomia bioprospekcji wnosi tu potrzebny sceptycyzm. Klasyczna praca Simpsona, Sedjo i Reida wykazała, że prywatna marginalna wartość dodatkowego gatunku jako źródła potencjalnego leku może być znacznie skromniejsza, niż sugerowała publicystyka o "zielonym złocie". Nie jest to argument przeciw ochronie bioróżnorodności, lecz przeciw próbie obrony całej przyrody wyłącznie jednym rynkowym uzasadnieniem.

Przyroda posiada bowiem wartości, których nie da się zredukować do potencjalnego patentu. IPBES w ocenie wartości natury podkreśla wielość sposobów definiowania relacji człowieka z przyrodą i ostrzega przed sprowadzaniem jej do jednej metryki ekonomicznej. Ekosystem może mieć znaczenie ekologiczne, kulturowe, relacyjne, duchowe czy egzystencjalne, niezależnie od tego, czy dostarczy mechanizmu przydatnego przemysłowi. Wartość opcyjna wiedzy technologicznej jest jednym z argumentów za ochroną, ale nie powinna stać się nową wersją antropocentrycznego przekonania, że gatunek zasługuje na istnienie tylko wtedy, gdy jest dla nas użyteczny. Dlatego pojęcie "kapitału naturalnego" wymaga podwójnej ostrożności. Jest niezwykle użyteczne, gdy przypomina ekonomii, że gleba, woda i stabilność ekosystemów nie są darmowym tłem produkcji.

Może jednak prowadzić do iluzji, że skoro nazwaliśmy coś kapitałem, potrafimy wycenić jego pełną wartość w pieniądzu. Kapitał finansowy powstaje w systemie społecznym właśnie po to, by

podlegać rachunkowi. Gatunek, ekosystem czy proces ewolucyjny nie powstały jako aktywa bilansowe. Ekonomiczna analogia jest narzędziem zarządzania, a nie ontologiczną definicją natury. Można natomiast wprowadzić precyzyjniejsze pojęcie kapitału wiedzy biologicznej. Nie oznaczałoby ono pieniężnej wartości całego życia, lecz zasób potencjalnych informacji o tym, jak materia może organizować się pod określonymi ograniczeniami.

Bioróżnorodność jako niedoszacowany kapitał informacyjny

Każdy organizm przechowuje rozwiązania konkretnych problemów: wymiany gazowej, przepływu, adhezji, ochrony, magazynowania energii, komunikacji, regulacji temperatury, rozpoznawania sygnałów, reprodukcji czy naprawy. Choć nie każde z nich jest technologicznie użyteczne, ich zbiorowa różnorodność zwiększa liczbę dostępnych modeli.

W tym ujęciu wymieranie ma nie tylko wymiar ekologiczny, lecz również informacyjny. Utrata gatunku oznacza nieodwracalne usunięcie unikalnej konfiguracji funkcji, genomu, zachowań i relacji ekologicznych. Możemy zachować próbkę DNA lub opis morfologii, ale rzadko udaje się utrzymać pełny system interakcji, sposób rozwoju czy funkcje ujawniające się dopiero w konkretnym środowisku. Biblioteka biologiczna nie jest więc kolekcją statycznych książek. Część "tekstu" istnieje wyłącznie w relacjach między organizmami.

Stąd wynika istotny paradoks dla polityki gospodarczej. Bioróżnorodność stanowi globalny zasób potencjalnej innowacji, jednak mechanizmy rynkowe mogą systematycznie niedoszacowywać kosztów jej ochrony. Przedsiębiorstwo nie przejmuje dziś całej przyszłej wartości wiedzy, która być może zostanie odczytana z ekosystemu za pięćdziesiąt lat, przez co nie jest w stanie w pełni internalizować korzyści z zachowania zasobu. Tymczasem zniszczenie siedliska często przynosi natychmiastowy, prywatny dochód. Klasyczny konflikt między krótkoterminową stopą zwrotu a długoterminową wartością opcji staje się tutaj wyjątkowo ostry.

Dodatkowo innowacja sama w sobie jest dobrem generującym pozytywne efekty zewnętrzne. Wiedza raz odkryta rozprzestrzenia się między firmami, badaczami i sektorami; badania jednego podmiotu zwiększają zdolność innych do dalszych odkryć. Właśnie problem spilloverów stanowi jedno z klasycznych ekonomicznych uzasadnień publicznego finansowania badań i rozwoju. Jeśli połączymy spillover wiedzy z trudną do zawłaszczenia przyszłą wartością bioróżnorodności, otrzymujemy podwójny powód, dla którego rynek prywatny może inwestować w badania podstawowe oraz ochronę biologicznego zasobu wiedzy mniej, niż byłoby to społecznie optymalne.

Nie wystarczy więc sugerować przedsiębiorstwom, by „patrzyli na naturę”. Potrzebna jest infrastruktura translacji.

Biolog opisuje mechanizm innym językiem niż inżynier. Jedna dyscyplina klasyfikuje według taksonomii, druga według funkcji. Dla zoologa kluczowa może być homologiczność struktury, dla projektanta zaś pytanie o to, czy powierzchnia ogranicza opór. Bez pomostu semantycznego powstaje koszt wyszukiwania: firma może nie wiedzieć o istnieniu biologicznego rozwiązania, mimo że precyzyjnie odpowiada ono jej problemowi. Jednym z najważniejszych zasobów gospodarki bioinspirowanej stają się zatem instytucje graniczne: zespoły interdyscyplinarne, laboratoria łączące biologię z inżynierią, repozytoria funkcji biologicznych oraz ontologie pozwalające wyszukiwać organizmy według mechanizmu, a nie tylko nazwy gatunkowej.

Współczesna polityka naukowa coraz częściej dostrzega, że ochrona bioróżnorodności i innowacja nie muszą być dziedzinami rozdzielnymi. OECD w raporcie z kwietnia 2026 roku wskazuje technologie cyfrowe, AI, obserwację satelitarną i nowe modele biznesowe jako narzędzia mogące jednocześnie wspierać ochronę biologiczną i tworzyć nowe możliwości gospodarcze, podkreślając potrzebę współpracy między dyscyplinami i sektorami. Trzeba jednak uniknąć jeszcze jednej pułapki: przekonania, że technologia biologicznie inspirowana automatycznie wygra na rynku tylko dlatego, że jest technicznie lepsza.

Ekonomiczne bariery wdrożenia bioinspiracji

Ekonomia path dependence ukazuje zgoła odmienną perspektywę. Brian Arthur wykazał, że w obliczu rosnących korzyści z adopcji, efektów sieciowych, procesu uczenia się oraz kosztów utopionych, niewielkie historyczne przewagi mogą doprowadzić do lock-in technologii, która wcale nie musi być globalnie najefektywniejsza. Jest to istotna korekta popularnej narracji biomimetycznej: natura może sugerować lepsze rozwiązanie, a gospodarka i tak pozostanie przy gorszym. Powód jest prosty. Nowa technologia nie konkuruje z inną technologią na pustym stole laboratoryjnym. Rywalizuje ona z istniejącymi fabrykami, normami, urządzeniami, wyszkolonym personelem, siecią serwisową, patentami, standardami technicznymi, preferencjami użytkowników i wcześniejszymi inwestycjami. Nawet jeśli materiał inspirowany biologicznie zużywa mniej energii, jego wdrożenie może wymagać przebudowy całej linii produkcyjnej. Rozwiązanie zastane staje się coraz tańsze dzięki efektowi skali, podczas gdy nowa technologia startuje z niekorzystnego punktu krzywej kosztów. Dlatego historia mirasol, struktur Sharklet czy licznych materiałów biomimetycznych powinna być interpretowana nie jako pasmo sukcesów lub porażek samej idei bioinspiracji, lecz jako przykład systemowej selekcji technologicznej.

Laboratoryjne parametry to tylko część fitness produktu. Rynkowe „dostosowanie” obejmuje cenę, niezawodność, kompatybilność, regulacje, skalowalność, prawa własności, łatwość naprawy i dostęp do kapitału. Technologia może być biologicznie elegancka, ale ekonomicznie źle dopasowana do zastanego ekosystemu przemysłowego. Co więcej, sama gospodarka przemysłowa posiada własną historię ewolucyjną, która tworzy ograniczenia analogiczne do historycznych uwarunkowań organizmu. Fabryka budowana przez dwadzieścia lat nie może zostać dowolnie przeprojektowana z dnia na dzień. Standard komunikacyjny używany przez miliardy urządzeń nie znika tylko dlatego, że pojawił się bardziej elegancki protokół. Miasto nie zmienia układu ulic jak plik CAD.

Nelson, Winter i Arthur pomagają dostrzec, że gospodarka również jest strukturą historyczną: jej obecny kształt wynika nie tylko z aktualnej optymalności, lecz także z wcześniejszych decyzji. Rodzi to interesujące podobieństwo między ewolucją biologiczną a technologiczną, ale ujawnia też kluczową różnicę. Organizm nie może świadomie zwołać rady nadzorczej i zdecydować o zmianie planu ewolucyjnego. Społeczeństwo posiada przynajmniej częściową zdolność do korygowania trajektorii poprzez politykę, standardy, zamówienia publiczne, podatki, regulacje i inwestycje badawcze. Jeśli zatem bioinspirowane rozwiązanie niesie znaczną korzyść społeczną, której rynek nie wynagradza — na przykład redukcję emisji, ograniczenie toksycznych odpadów czy ochronę ekosystemu — państwo może próbować zmienić warunki selekcji technologicznej. Tutaj zaczyna się polityczna ekonomia biomimetyki. Nie wystarczy finansować ciekawych laboratoriów; należy pytać, jakie reguły rynku premiują określone architektury produkcji.

Wartość biologiczna jako dynamiczny kapitał wiedzy

Jeśli koszt wydobycia zasobu pozostaje niski, a koszty utylizacji odpadów są przerzucone na społeczeństwo, przedsiębiorstwo może racjonalnie wybrać technologię liniową – nawet wtedy, gdy system zamkniętego obiegu jest ekologicznie lepszy. Bioinspiracja systemowa wymaga zatem nie tylko kopiowania metabolizmu ekosystemu, lecz przede wszystkim tworzenia instytucji, które ekonomicznie wynagradzają domykanie obiegów.

Skala problemu materialnego obrazuje wagę tego zagadnienia. Źródłowa notatka operuje liczbą 68 miliardów ton rocznie w kontekście globalnego wydobycia surowców, jednak dane te są już nieaktualne. Raport Global Resources Outlook 2024 Międzynarodowego Panelu Zasobów UNEP szacuje globalną ekstrakcję materiałów w 2024 roku na około 106,6 miliarda ton, podczas gdy w 1970 roku wynosiła ona około 30 miliardów ton.

Ta korekta nie osłabia argumentu źródła; wręcz przeciwnie – radykalnie go wzmacnia. Gospodarka przemysłowa nie mierzy się z marginalnym problemem ulepszenia kilku produktów, lecz funkcjonuje w skali przepływów materiałowych, których czterokrotny wzrost w ciągu półwiecza stawia fundamentalne pytanie o konstrukcję całego metabolizmu gospodarczego. W tym miejscu należy jednak oddzielić ten wątek od kolejnych etapów argumentacji.

Ekonomia wiedzy odpowiada przede wszystkim na pytanie, dlaczego warto szukać rozwiązań biologicznych i dlaczego rynek może robić to w niewłaściwy sposób lub zbyt rzadko. Dopiero w drugiej kolejności należy zapytać, jakie konkretnie rozwiązania powinny przebudować system materiałowy. Rozdział A Future Worth Inventing proponuje między innymi wykorzystanie węgla jako surowca, mycelium w opakowaniach, zasadę mono-materiality, przemysłowe sieci przepływów oraz miasta inspirowane organizacją biologiczną. Przykłady te wymagają osobnej analizy, gdyż na poziomie gospodarki obiegu zamkniętego łatwo pomylić atrakcyjną analogię ekologiczną z rzeczywistym bilansem środowiskowym.

Wątek ekonomiczny prowadzi natomiast do istotniejszego wniosku: bioróżnorodność można traktować jako przestrzeń możliwości, lecz jej wartość gospodarcza nie jest immanentnie zapisana w organizmach. Wartość ta wyłania się w relacji między biologiczną strukturą a ludzkim problemem, istniejącą wiedzą, instytucjami oraz zdolnością do transferu. Ten sam gatunek może przez milion lat nie mieć żadnego zastosowania technologicznego, by nagła zmiana problemu technicznego uczyniła jedną z jego właściwości niezwykle cenną. To właśnie zasadniczo różni biologiczny kapitał wiedzy od klasycznego surowca – tona miedzi posiada zestaw znanych właściwości przemysłowych już dzisiaj.

Bioróżnorodność jako kapitał wiedzy i dylemat patentowy

Organizm może posiadać funkcję, której znaczenie ujawni się dopiero po wynalezieniu aparatury pozwalającej ją dostrzec. Blue Morpho nie „stał się” fotoniczny w momencie powstania mikroskopii; jego nanostruktura istniała znacznie wcześniej.

Człowiek zyskał jedynie język i instrumenty umożliwiające odczytanie jej technologicznego znaczenia. Wartość wiedzy jest zatem częściowo produkowana przez rozwój samego obserwatora. Z perspektywy teorii opcji można uznać, że zachowanie różnorodności chroni nie tyle zbiór znanych produktów, co możliwość przyszłego uczenia się. Wartość tej opcji rośnie szczególnie tam, gdzie zniszczenie jest nieodwracalne, a zasób informacji może zwiększać się z czasem. Nie dowodzi to, że

każdy hektar powinien być nietykalny, ani że ekonomia jest w stanie obliczyć jedną, właściwą cenę ekosystemu. Obnaża natomiast asymetrię epistemiczną: po wymarciu gatunku nie możemy wrócić do stanu sprzed decyzji i zapytać, czy utracony organizm zawierał istotny mechanizm.

W ten sposób bioróżnorodność staje się również kwestią sprawiedliwości międzypokoleniowej. Dzisiejsze pokolenie zna tylko część pytań, które będą zadawać ci, którzy przyjdą po nas. Zniszczenie biologicznej opcji jest więc decyzją podejmowaną przez ludzi niezdolnych do pełnego poznania wartości rezygnacji dokonywanej w imieniu osób nieobecnych. Charlesowi Ketteringowi przypisuje się bon mot, że warto interesować się przyszłością, ponieważ właśnie tam spędzimy resztę życia; Stier wykorzystuje go jako motto przyszłości bioinspirowanej. Ekonomia środowiska dopowiada: część przyszłości jest cenna właśnie dlatego, że nie wiemy jeszcze, czego w niej będziemy potrzebować.

Powstaje jednak ostatnia trudność. Jeżeli wiedza biologiczna posiada wartość ekonomiczną, ktoś spróbuje ją zawłaszczyć. Patent, tajemnica handlowa czy licencja są narzędziami, które pozwalają przedsiębiorstwu odzyskać koszty badań. Bez możliwości przejęcia części korzyści prywatny podmiot może nie chcieć finansować długiego procesu translacji biologicznego wzorca w produkt. Z drugiej strony zbyt szeroka wyłączność może blokować kolejnych badaczy przed wykorzystaniem wiedzy, która przecież pochodzi z powszechnie dostępnego świata przyrody. Tu Schumpeter spotyka Darwina, a ekonomia spotyka prawo. Rynek potrzebuje motywacji dla innowatora, ale natura nie ma biura patentowego. Pająk nie opatentował pajęczyny, bakteria Cas9, gekon adhezji, a humbak tuberkli. Człowiek może jednak opatentować konkretne rozwiązanie techniczne, zbudowane dzięki abstrakcji tych mechanizmów. Pojawia się zatem kwestia granicy: gdzie kończy się odkrycie zasady istniejącej w świecie, a zaczyna wynalazek stworzony przez człowieka?

> W świecie, w którym model coraz częściej zastępuje rzeczywistość, ryzykujemy zapomnienie, że zegar społeczny nigdy nie zlikwidował rytmu okołodobowego. Prawdziwa siła bioinspiracji nie leży w doskonałości technicznej kopii, lecz w pokorze wobec faktu, że natura nie jest magazynem gotowych produktów, a dynamicznym procesem, którego nie da się całkowicie zamknąć w patencie. Czy potrafimy zatem budować cywilizację, która czerpie z biologii, nie próbując jednocześnie sprowadzić całej złożoności życia do roli darmowego zasobu w bilansie korporacyjnym?

Inspiracje

[1] 

"Bioinspired" Samuel Cord Stier

2026 | Timber Press | ISBN: 9781643261447

Samuel Cord Stier jest uznanym ekspertem w dziedzinie innowacji inspirowanych biologią, znanych również jako biomimikra. Jest dyrektorem-założycielem Centrum Nauki z Naturą (The Center for Learning with Nature), organizacji non-profit, która oferuje programy nauczania przedmiotów ścisłych (STEM) oraz szkolenia dla nauczycieli, podkreślając rolę przyrody w rozwoju technologicznym. Stier opracował wielokrotnie nagradzane materiały edukacyjne wykorzystywane w ponad 70 krajach i był wykładowcą na wydziale zrównoważonego projektowania w Otis College of Art and Design oraz na wydziale inżynierii na Texas Tech University. Jako ceniony mówca i konsultant ds. innowacji, koncentruje się na tym, jak inżynieria inspirowana naturą może stawić czoła globalnym wyzwaniom i wspierać zrównoważony rozwój. Jego praca łączy zasady biologiczne z nowoczesnym wzornictwem technologicznym, inspirując przyszłe pokolenia innowatorów do poszukiwania rozwiązań w naturze.

Samuel Cord Stier *is a recognized expert in biologically inspired innovation, also known as biomimicry. He is the founding director of The Center for Learning with Nature, a non-profit organization dedicated to providing STEM curricula and teacher training that emphasizes the natural world's role in technological advancement. Stier has developed award-winning educational materials used in over 70 countries and has served as a faculty member in sustainable design at Otis College of Art and Design and in engineering at Texas Tech University. A sought-after public speaker and innovation consultant, he focuses on how nature-inspired engineering can address global challenges and foster sustainable development. His work bridges the gap between biological principles and modern technological design, aiming to inspire future generations of innovators to look to nature for solutions.*

The Center for Learning with Nature

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autora i dzieła przywołane w tekście:



[1] "Engineering Education for the Next Generation"

Samuel Cord Stier

2020 | W. W. Norton & Company | ISBN: 9780393713787



[2] "Science in Seconds for Kids"

Samuel Cord Stier, Jean Potter

2020 | John Wiley & Sons | ISBN: 9781119685500

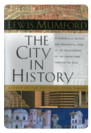


[3] "Philippines"

Tammy Mildenstein, Samuel Cord Stier, Charles F. Gritzner

2009 | Infobase Publishing | ISBN: 9781438105475

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[4] "The City in History"

Lewis Mumford

Houghton Mifflin Harcourt | ISBN: 9780156180351



[5] "The City in History / Lewis Mumford. - 1961"

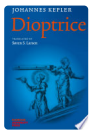
Lewis Mumford



[6] "Somnium"

Johannes Kepler

Madison : University of Wisconsin Press



[7] "Dioptrice"

Johannes Kepler

Radboud University Press | ISBN: 9789465150703



[8] "The Sand Reckoner"

Archimedes

CreateSpace | ISBN: 9781517349844



[9] "De Officiis"

Marek Tulliusz Cyceron

[10] **"Academica"**

Marek Tulliusz Cyceron

ISBN: 9781433091766

[11] **"Fidelio"**

Ludwig Van Beethoven



[12] **"Touchstone for ethics, 1893-1943"**

Thomas Henry Huxley



[13] **"Man's Place in Nature, and Other Essays"**

Thomas Henry Huxley

2022 | DigiCat



[14] **"Aphorisms and Reflections from the works of T. H. Huxley"**

Thomas Henry Huxley

2022 | DigiCat

[15] **"The Perception of the Visual World"**

James J. Gibson

Greenwood Publishing Group | ISBN: 9780837178363



[16] **"The ecological approach to visual perception"**

James J. Gibson

Psychology Press | ISBN: 9780898599596



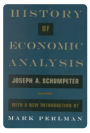
[17] **"An Inquiry into the Causes and Effects of the Variolæ Vaccinæ"**

Edward Jenner



[18] **"Capitalism, Socialism and Democracy"**

Joseph Schumpeter



[19] **"History of Economic Analysis"**

Joseph Schumpeter

Oxford University Press, USA | ISBN: 9780195105599



[20] "History of Economic Analysis (Oxford Press, 1955)"

Joseph Schumpeter

Taylor & Francis | ISBN: 9781134838714



[21] "An Evolutionary Theory of Economic Change"

Richard R. Nelson

Harvard University Press | ISBN: 9780674041431

[22] "Memoir upon the formation of a deaf variety of the human race"

Alexander Graham Bell



[23] "Social Choice and Individual Values"

Kenneth Arrow

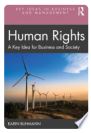
Yale University Press | ISBN: 9780300186987



[24] "Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things"

Michael Braungart

Random House | ISBN: 9781407021324



[25] "Human Rights"

Karin Buhmann

2021 | Routledge | ISBN: 9781000484878

Artykuły naukowe

Artykuły naukowe autora:

[1] "Habitat selection of endangered and endemic large flying-foxes in Subic Bay, Philippines"

Tammy L. Mildenstein, Sam C. Stier, Christine Ely Nuevo-Diego, L. Scott Mills

2005 | Biological Conservation | DOI: 10.1016/j.biocon.2005.05.001

Źródło

[2] "DIETARY HABITS OF THE WORLD'S LARGEST BATS: THE PHILIPPINE FLYING FOXES, ACERODON JUBATUS AND PTEROPUS VAMPYRUS LANENSIS"

Sam C. Stier, Tammy L. Mildenstein

2005 | Journal of Mammalogy | DOI: 10.1644/1545-1542(2005)086[0719:dhotwl]2.0.co;2

Źródło

[3] **"The Kyoto Protocol: an Opportunity for Biodiversity Restoration Forestry"**

Sam C. Stier, Stephen F. Siebert

2002 | Conservation Biology | DOI: 10.1046/j.1523-1739.2002.01626.x

Źródło

[4] **"Climate, community and biodiversity project design standards (First edition)"**

John O'Niles, Toby Janson-Smith, Cathleen Kelly, Jenny Henman, Bill Stanley, Sam C. Stier

2005 | Agritrop (Cirad)

Źródło

[5] **"Dietary habits of two threatened co-roosting flying foxes (Megachiroptera) Subic Bay Philippines"**

Sam C. Stier

2003 | The Mathematics Enthusiast

Źródło

[6] **"Is Knowledge Random? Introducing Sampling and Bias through Outdoor Inquiry"**

Sam C. Stier

2010 | Science Scope

Źródło

[7] **"Letters"**

Sam C. Stier, Stephen F. Siebert

2003 | Conservation Biology | DOI: 10.1046/j.1523-1739.2003.17102.x

Źródło

[8] **"CULTURAL FESTIVALS: ITS IMPLICATIONS TO BAT CONSERVATION ON NEGROS ISLAND, PHILIPPINES"**

Apolinario Bernardo Cariño, Tammy L. Mildenstein, Sam C. Stier, Vincent Villarin Gunot, Renee Mae Lorica

2008

Źródło

[9] **"Schoolyard Microclimate: Students Learn the Differences between Weather and Climate as Well as the Degree of Natural Variation in Climate"**

Joseph J. Fontaine, Sam C. Stier, Melissa L. Maggio, Karie L. Decker

2007 | The Science Teacher

Źródło

[10] "Standard Climat, Communauté et Biodiversité pour projets en phase d'élaboration (Première Edition)"

John O. Niles, Toby Janson-Smith, Kelly, Cathleen, Jenny Henman, Bill Stanley, Sam C. Stier

2005 | HAL (Le Centre pour la Communication Scientifique Directe) | DOI: 10.13140/rg.2.1.2427.1605

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.
APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: 6ca0c3a5-3126-4ed7-9d45-42cd597335b8