

3/79/2024

ISSN 1733-8662

ACADEMIA

MAGAZYN POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Ewolucja



PAWEŁ GOLIK
WĘDRÓWKI ZAPISANE
W NASZYM DNA

MAŁGORZATA ANNA GAZDA
KOLOROWA PTASIA
UKŁADANKA

NATALIA SOBCZAK
WYKUĆ
PRZYSZŁOŚĆ



4 PANORAMA WĘDRÓWKI ZAPISANE W NASZYM DNA

| Paweł Golik

Dzięki badaniom współczesnego genomu możemy odtworzyć wędrówki ludzkości.



30 BADANIA W TOKU KOLOROWA PTASIA UKŁADANKA

| Małgorzata Anna Gazda

Nie ma jednoznacznej odpowiedzi, dlaczego u ptaków pojawiły się kolorowe pióra często zdobione ornamentami.

44 ROZMOWA NUMERU WYKUĆ PRZYSZŁOŚĆ

O pracy inżyniera w obszarze ciekłego metalu opowiada prof. dr hab. inż. Natalia Sobczak wiceprezesa Polskiej Akademii Nauk.



Panorama

- 10** Jacek Mańko **KWESTIA MASZYN**
- 14** Krzysztof Argasiński **BIĆ SIĘ ALBO NIE BIĆ**
- 17** Tanishka Soni, Mateusz Mikołajczak, Stanisław Mazur, Christian Schiffer
ECHA Z KARPAT
- 22** Witold Zawadzki **PIERWSZY, A NIE CZWARTY**
- 26** Rafał Sikora, Mirosław Masojć, Grzegorz Michalec, Byamba Gunchinsuren
ŻYCIE I ŚMIERĆ NA PUSTYNI

Badania w toku

- 33** Ewa Stefanik, Karolina Wolny
MAŁY BOHATER BADAŃ NAUKOWYCH
- 36** Karol Życzkowski **TYPOWE I ATYPOWE ZMIANY UKŁADÓW KWANTOWYCH**
- 40** Natalia Kartawik, Jolanta Behnke-Borowczyk
NAJSTARSZY KOLONIZATORZY ZIEMI

Prezentacje

- 50** Marek Lewandowski
HISTORIA ZŁODOWACEŃ GLOBALNYCH
- 55** Nikodem Zieliński
O PRZEMIANACH FORM W PRZYRODZIE
- 58** Aneta Duda-Jaśkiewicz **NAUCZYCIEL – (R)EWOLUCJONISTA SYSTEMU EDUKACJI**
- 62** Anna Karnkowska
CZY WSPÓŁPRACA SIĘ OPŁACA?
- 66** Dorota Łagodzka **MALARSTWO MAŁP**
- 71** Filip Biały
OD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI DO GWIAZD
- 74** Michael Pleyer, Sławomir Waciewicz
JAK POWSTAŁ JĘZYK

Punkt widzenia

- 78** Agata Passent
EWOLUCJA TO NIELINEARNA OPOWIEŚĆ

W obiektywie

- 80** Justyna Słowiak, Adam Halamski
KRÓTKA HISTORIA ŻYCIA

Aktualności

- 86** Joanna Borkowska
LUDWIK HIRSZFELD – ZAPOMNIANY GIGANT BAKTERIOLOGII I IMMUNOLOGII

ZBUDOWANI Z MATERII GWIAZDOWEJ

Ewolucja niejedno ma imię – biologiczna, układów kwantowych, kulturowa, tektoniczna, poglądów, technologiczna... To skutek rozszerzenia znaczenia tego terminu, który powstał gdzieś na styku nauk biologicznych i nauk o środowisku, na inne dziedziny, często jako synonim rozwoju. Dziś ewolucji podlegają także systemy abiotyczne, choć np. Wszechświat ulega raczej regresji, bo od Wielkiego Wybuchu powoli gaśnie wraz ze wzrostem entropii i nie może korzystać z atrakcji doboru naturalnego jak pawie Wilkonia (poniżej), bo nie ma w czym wybierać. No, chyba że gdzieś w czarnych dziurach tuneluje z innymi, może lepszymi wszechświatami.

Na Ziemi, najważniejszym obiekcie we Wszechświecie (niech się na mnie astronomowie nie złością), kres naturalnej ewolucji biologicznej wydaje się bliski. Człowiek (czyli ja, ty, pan, pani) może metodami inżynierii genetycznej wpływać na ewolucję świata ożywionego. Mnożą się zatem obiekty modyfikowane genetycznie (GMO), jak grzybopodobna kukurydza. Swoją drogą, kiedy widzę jajka reklamowane pochodzeniem od kur karmionych paszą bez GMO, to nie kupuję. Wolę jajko z paszą GMO niż skażoną funkcjami.

Co więcej, zaczęliśmy tworzyć systemy informatyczne sztucznej inteligencji (SI), które ewoluują według algorytmów genetycznych, inspirowanych naturalnymi procesami biologicznymi. Zapewne niedługo SI zaczną grzebać w naszych genach, szukając genotypu zdolnego do życia na ogrzanej planecie. Zdigitalizowana, wypełni w końcu Wszechświat kopią ludzkiej świadomości.

Carl Sagan powiedział onegdaj, że wszyscy jesteśmy zbudowani z materii gwiazdowej (atomów). Ten naukowy fakt ma swoje konsekwencje filozoficzne, które kryją się w pytaniu – czy materia nieożywiona, kombinując z atomami metodą prób i błędów, nie znalazła w końcu skutecznego środka, by zrozumieć samą siebie? Na Ziemi ewolucja trwała około czterech miliardów lat. Jej zwieńczeniem jest mózg, uzbrojony w matematyczną teorię gier ewolucyjnych. Od zrozumienia jeden krok.

Człowiek odniósł niezwykły sukces ewolucyjny. W ostatnich 100 latach przybyło nas z górą sześć miliardów. Stanowiąc promile masy materii ożywionej, dominujemy nad światem roślin i zwierząt, redukując (świadomie lub nie) liczbę gatunków i wielkość ich populacji. Ograniczając bioróżnorodność, spowalniamy proces ewolucji naturalnej ze szkodą dla nas samych. W końcu zostaniemy ze sztuczną inteligencją i sztuczną ewolucją...

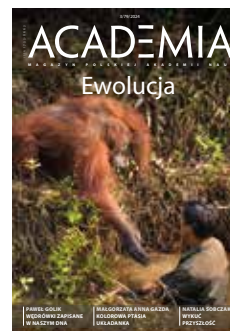
PROF. DR HAB. MAREK LEWANDOWSKI

Józef Wilkoń,
Pawie, 2022,
technika wodna mieszana

Ilustrator, malarz, rzeźbiarz, twórca plakatów i scenografii teatralnych. Urodził się w 1930 roku w Bogucicach koło Wieliczki. Absolwent malarstwa na Akademii Sztuk Pięknych w Krakowie (dyplom w 1955 roku) i historii sztuki na Uniwersytecie Jagiellońskim (dyplom w 1954 roku). Zilustrował ponad 200 książek dla dzieci i dorosłych w kraju i za granicą oraz sam (m.in. *Pana Tadeusza* w 1973 roku, *Don Kichota* 2016 roku).



FUNDACJA „ARKA” IM. JÓZEFA WILKONIA



**MAGAZYN
POLSKIEJ AKADEMII
NAUK**

nr 3/79/2024

kwartalnik

ISSN 1733-8662

nakład: 2000 egz.

© Polska Akademia Nauk

Biurowo ds. Komunikacji

i Informacji Naukowej

pl. Defilad 1

00-901 Warszawa

www.pan.pl

www.academia.pan.pl

academia@pan.pl

ZESPÓŁ REDAKCYJNY

Jolanta Iwańczuk

redaktor naczelna

nauki o Ziemi

jolanta.iwanczuk@pan.pl

Daniel Sax

redaktor, tłumacz

Mariusz Gogół

nauki biomedyczne

i biochemiczne

Patrycja Strzetelska

nauki humanistyczne

Witold Zawadzki

nauki ścisłe i techniczne

Dominik Wódz

redakcja językowa

Andrzej Figatowski

grafika

Sylwia Piwowar

edycja zdjęć

Anna Bielec

koordynator projektu

RADA NAUKOWA

Marek Konarzewski

prezes PAN

(przewodniczący)

Dariusz Jemielniak

(wiceprzewodniczący)

Andrzej Buko

Katarzyna Czarnecka

Patrycja Dołowy

Paweł Golik

Janusz Jurczak

Tomasz Kapitanik

Marek Krawczyk

Krzysztof Nowak

Anna Zawadzka

Druk:

Agencja Wydawniczo-

-Poligraficzna Gimpo



**prof. dr hab.
Paweł Golik**

Genetyk i biolog ewolucyjny, profesor na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Wcześniej pracował w Center for Molecular Medicine w Emory University w stanie Georgia w USA oraz w Centre de Génétique Moléculaire CNRS w Gif-sur-Yvette we Francji. Zajmuje się badaniami mechanizmów działania genów, a także projektami z pogranicza genetyki i teorii ewolucji. We współpracy z Wydziałem „Artes Liberales” UW uczestniczy też w projektach łączących biologię z humanistyką i sztuką. Popularyzator nauki, przewodniczący Rady Upowszechniania Nauki PAN.
p.golik@uw.edu.pl

WĘDRÓWKI ZAPISANE W NASZYM DNA

W przeszłości ludzie prowadzili koczowniczy tryb życia, przemieszczali się w poszukiwaniu pożywienia, zasiedlając kolejne kontynenty.



GAYLEEN FROESE/SHUTTERSTOCK.COM

Goryl – nasz bliski krewny z rodziny człowiekowatych

Od zarania dziejów człowiek zadawał sobie pytania dotyczące jego przeszłości. By zrozumieć, kim jesteśmy, musimy przecież wiedzieć, skąd pochodzimy i jakie były nasze dawne losy. W najogólniejszej skali odpowiedź dał w połowie XIX wieku Karol Darwin – nasz gatunek powstał tak jak każdy inny na wspólnym drzewie życia na Ziemi – w wyniku ewolucji biologicznej. Późniejsze, wciąż trwające badania paleontologiczne dają dosyć dobry wgląd w to, jak wyglądały kolejne etapy ewolucji linii homininów, która około siedmiu milionów lat temu oddzieliła się od tej, która poprowadziła do naszych najbliższych wciąż żyjących krewnych – szympansov, a której jedynym obecnie przedstawicielem jest nasz gatunek, zwany dumnie (i może nieco na wyrost) człowiekiem rozumnym – *Homo sapiens*. Czasy nam najbliższe to domena historyków. Prehistoria – najczęściej rozumiana jako okres od pojawienia się pierwszych przedstawicieli rodzaju *Homo* do wynalezienia pisma – z jednej strony od dawna nas fascynuje, a z drugiej zazdrośnie strzeże swoich tajemnic.

Do niedawna jedynym źródłem wiedzy o najdawniejszej przeszłości człowieka było badanie szczątków kopalnych, a także pozostawianych przez ludzi artefaktów, takich jak narzędzia, a później też grobowce czy dzieła sztuki. To dzięki takim badaniom wiemy, że ewolucyjna historia homininów rozpoczęła się przed milionami lat w Afryce, a pierwsze gatunki należące do rodzaju *Homo*, jak *H. habilis* – człowiek zręczny – powstały około 2,5 mln lat temu. Z kolei nasz gatunek pojawił się na scenie stosunkowo (przynajmniej w ewolucyjnej skali czasu) niedawno, około 300 tys. lat temu.

Na długo przed pojawieniem się *H. sapiens*, już około dwóch milionów lat temu, przedstawiciele naszego rodzaju, jak *H. habilis* czy nieco późniejszy *H. erectus*, rozpoczęli eksplorację terenów położonych poza Afryką, docierając do Azji (na Kaukaz oraz tereny dzisiejszych Chin i Indonezji) i Europy. Począwszy od mniej więcej 400 tys. lat temu, Europę i zachodnią część Azji aż po góry Altaju zamieszkiwali neandertalczyki – gatunek bardzo do nas podobny, który zniknął ze sceny już po pojawieniu się na naszym kontynencie człowieka, około 40 tys. lat temu. Badanie szczątków kopalnych nie dawało jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o relacje naszego gatunku i tych pierwszych praludzkich wędrowców. Czy byli



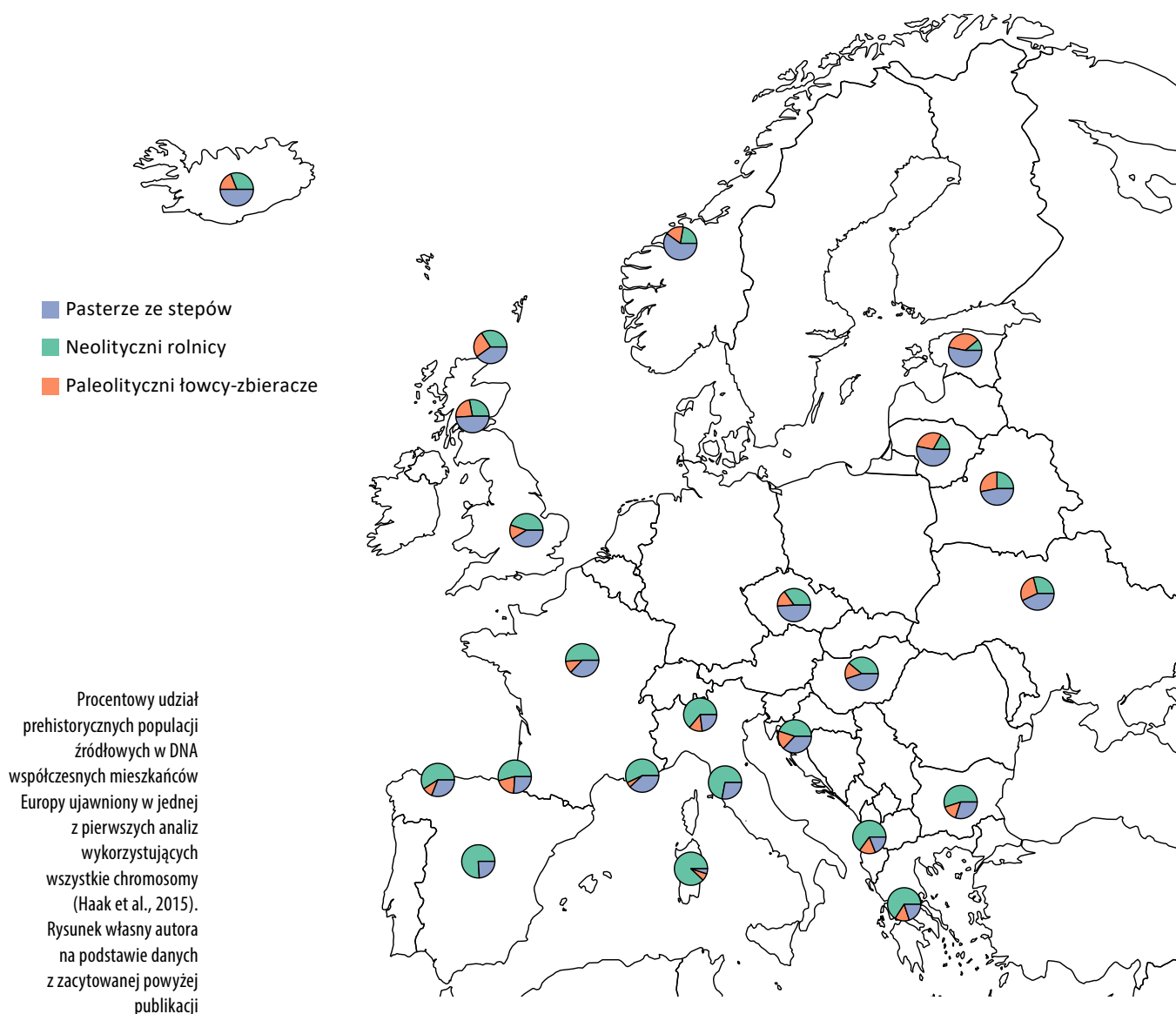
oni naszymi bezpośrednimi przodkami, ewoluującymi w stronę człowieka współczesnego na rozległym, obszarze obejmującym nie tylko Afrykę?

Najmłodsza emigracja

Nowe sposoby udzielenia odpowiedzi na pytania o naszą prehistorię, wykraczające poza badania szczątków kopalnych, pojawiły się stosunkowo niedawno. Na przełomie lat 70. i 80. XX. wieku genetycy opracowali metody odczytywania sekwencji, czyli kolejności nukleotydów („liter”) w łańcuchach DNA. Miało to przełomowe znaczenie nie tylko dla poznania mechanizmów funkcjonowania komórek i organizmów, lecz także dla badań ewolucji. W najogólniejszym zarysie ewolucja polega na dziedziczonych z pokolenia na pokolenie zmianach w sekwencji DNA, które podlegają określonym prawom i mogą być nawet modelowane matematycznie. Porównując DNA współczesnych organizmów – czy to należących do tego samego gatunku, czy do odległych gałęzi drzewa życia – można odtwarzać relacje ewolucyjnego pokrewieństwa między nimi. Nie jest to zresztą idea całkowicie nowa i przynależna jedynie biologii – już w XIX wieku językoznawcy, badając współczesne języki, w podobny sposób odtwarzali ich historię, a nawet brzmienie dawno zapomnianych języków-przodków. Można nawet powiedzieć, że w biologii zadanie jest nieco prostsze, gdyż prawa rządzące ewolucją DNA są bardziej logiczne i regularne.

Już pod koniec lat 80. pojawiły się zatem pierwsze prace, w których porównano DNA ludzi zamieszkujących obecnie różne rejony świata, by na tej podstawie odtworzyć prehistorię naszego gatunku. W tych pionierskich badaniach wykorzystano pewien szczególny fragment naszego genomu – DNA mitochondrialne (mtDNA). W odróżnieniu od chromosomów znajdujących się w jądrze komórki, dziedziczonych

Kość palca człowieka z Denisowej Jaskini. Genom tych krewnych człowieka współczesnego i neandertalczyka poznano w 2012 roku



od obojga rodziców, mtDNA zwierząt, w tym człowieka, jest przekazywane potomstwu wyłącznie przez matkę. Ta cecha bardzo ułatwia analizy ewolucyjne – nie musimy uwzględniać tego, że kolejne pokolenia otrzymują chromosomy „wymieszane” przez proces rekombinacji od różnych przodków każdego z rodziców – widzimy tylko zmiany zachodzące w ciągłej linii matczynej.

Wyniki pierwszych analiz mtDNA ludzi współczesnych potwierdziły to, co przypuszczano na podstawie badań szczątków kopalnych, że ewolucja naszego gatunku rozpoczęła się w Afryce. Tam znalazł się korzeń drzewa ewolucyjnego mtDNA człowieka, a wszystkie sekwencje mtDNA ludzi spoza Afryki stanowią tylko jedno z odgałęzień jednego z trzech głównych afrykańskich konarów tego drzewa. Jednak kolejny płynący z tej analizy wniosek był już niespodzianką. Uwzględniając tempo, w którym gromadzą się zmiany w sekwencjach mtDNA, obliczono, że przodkowie

wszystkich zamieszkujących całą naszą planetę ludzi zamieszkivali jako stosunkowo niewielka populacja Afrykę jeszcze około 200 tys. lat temu i należeli już bez wątpienia do naszego gatunku. Wcześniejsi przedstawiciele homininów, tacy jak *H. erectus* czy neandertalczyk, którzy znacznie wcześniej opuścili Afrykę i eksplorowali rozległe tereny Eurazji, nie mogli zatem być naszymi przodkami. Stanowili wcześniejsze odgałęzienia drzewa pokrewieństw, a nasi przodkowie po stosunkowo niedawnym wyjściu z Afryki wyparli ich i ostatecznie zastąpili. Nie jesteśmy potomkami tych pierwszych fal migracji, tylko tej ostatniej, która zaczęła się niecałe 100 tys. lat temu.

Znikające DNA

Koncepcja ta zyskała pod sam koniec XX wieku dodatkowe wsparcie. Oprócz mtDNA do analiz dołączono kolejny fragment naszego genomu, który jest przeka-



*Australopithecus
afarensis*

PROCY/SHUTTERSTOCK.COM

zywany w prostej linii tylko przez jednego z rodziców – chromosom Y. Linie dziedziczonych z ojca na syna chromosomów Y z całego świata również zbiegają się w Afryce niecałe 200 tys. lat temu. Ponadto rozwój technik izolacji, amplifikacji i analizy DNA pozwolił na podjęcie prób badania sekwencji zachowanych w szczątkach kopalnych. Wczesne badania kopalnego DNA (aDNA, z ang. *ancient DNA*) pod koniec lat 90. umieściły europejskich neandertalczyków na gałęzi drzewa życia równoległej do *H. sapiens*, dalej od współczesnych mieszkańców Europy niż gałęzie afrykańskie, co zdawało się potwierdzać, że nie byli oni przodkami człowieka współczesnego, tylko wypartą przez niego boczną gałęzią.

Dzięki obejmującym coraz większe grupy ludzi badaniom mtDNA i chromosomu Y na przełomie XX i XXI wieku stworzono mapy odtwarzające szlaki prehistorycznych wędrówek przedstawicieli *H. sapiens*, pokazujące m.in., że już około 50 tys. lat temu, przemieszczając się wzdłuż wybrzeży Azji, dotarli oni do dzisiejszej Australii, a członkowie tzw. bazalnej populacji Eurazji migrowali na zachód do Europy (gdzie dotarli około 45 tys. lat temu), a na wschód na tereny Azji, by z Syberii przez Cieśninę Beringa (wówczas możliwą do przejścia lądem) kilkanaście tysięcy lat temu dotrzeć do obu Ameryk. Pojawiły się nawet prywatne firmy, oferujące na podstawie badania mtDNA i chromosomu Y przypisanie klienta do jednej z głównych linii ludzkiej prehistorii.

Analizy te miały jednak poważny problem. To, co czyniło je tak łatwymi – wykorzystanie fragmentów genomu dziedziczonych w prostej linii tylko od jednego z rodziców – stanowiło też ich ograniczenie. Jeżeli wyobrazimy sobie współczesną rodzinę, dzieci w niej odziedziczyły mtDNA przez matkę od jej matki (babki ze strony matki). Właściciele chromosomu Y przez ojca odziedziczyli go po jego ojcu. Już w pokoleniu dziadków mamy zatem dwie osoby, po których genetyczny ślad zaginął: babkę ze strony ojca i dziadka ze strony matki – ich mtDNA i chromosom Y do pokolenia wnuków nie mogły dotrzeć. Im dalej

w przeszłość, tym więcej historii zanika. Narzędzia pozwalające na rozwiązanie tego problemu pojawiły się w repertuarze nauki stosunkowo niedawno.

Bogactwo danych

Pierwsza dekada XXI wieku przyniosła nowe, znacznie wydajniejsze metody odczytywania sekwencji DNA, zwane sekwencjonowaniem nowej generacji (NGS, ang. – *next generation sequencing*). Dzięki nim w krótkim czasie przeszliśmy od wielkiego projektu poznania pierwszego genomu człowieka (zakończonego w latach 2000–2001) do zbadania tysiąca kompletnych genomów ludzi z różnych stron świata w 2015 roku. Od 2022 roku dysponujemy już tysiącem kompletnych sekwencji genomowych mieszkańców Polski, a w Wiel-

Badania z wykorzystaniem całych genomów, zwłaszcza kopalnych, przyniosły też nieoczekiwany zwrot w historii naszych relacji z neandertalczykami.

kiej Brytanii i w USA powstają bazy danych zawierające kompletny zapis DNA setek tysięcy osób. Ten gwałtowny rozwój genomiki człowieka nie tylko zrewolucjonizował nauki biomedyczne, lecz także wywarł ogromny wpływ na badania prehistorii i ewolucji.

Ostatnie dwie dekady to także ogromny rozwój badań nad kopalnym DNA. Dzięki połączeniu sekwencjonowania nowej generacji, udoskonalonych do granic możliwości metod izolacji DNA oraz nowych

Rekonstrukcja wyglądu
Homo habilis,
Muzeum Rama 9
w Bangkoku



AKKHARAT JARUSILAWONG/SHUTTERSTOCK.COM

metod komputerowej analizy sekwencji, wykorzystujących rosnącą moc obliczeniową współczesnych komputerów możliwe stało się poznawanie genomów pochodzących z czasów prehistorycznych. Dobrze zachowane w arktycznej zmarzlinie szczątki pozwoliły na odczytanie kompletnej sekwencji DNA mamutów sprzed ponad miliona lat. Oczywiście tak dawno temu ludzi na dalekiej północy nie było, a afrykański klimat nie sprzyja zachowaniu się DNA. Do prehistorii człowieka i jego krewnych możemy sięgnąć głównie na podstawie szczątków zachowanych w Eurazji. Między 2006 a 2010 rokiem kierowany przez Svante Pääbo zespół z Lipska odtworzył prawie kompletną sekwencję genomu neandertalczyka sprzed kilkudziesięciu tysięcy lat, a najstarsze poznane kompletne DNA naszego gatunku liczą około 45 tys. lat.

Bogactwo współczesnych i kopalnych sekwencji całego genomu człowieka pozwoliło na spojrzenie w naszą prehistorię z precyzją znacznie przekraczającą to, na co pozwalały analizy ograniczające się do mtDNA i chromosomu Y. Ogromną rolę obok poznawania

sekwencji DNA odegrało też opracowanie nowych metod matematycznej analizy podobieństw i różnic między nimi, uwzględniających to, że fragmenty pochodzące od obojga rodziców każdej osoby są tasowane przed przekazaniem genów kolejnym pokoleniom. Przełom, który metody te przyniosły badaniom ludzkiej prehistorii, najlepiej prześledzić na przykładzie najlepiej jak dotąd poznanych pradziejów Europy.

Kolonizacja Europy

Człowiek dotarł na nasz kontynent około 45 tys. lat temu, napotykając na miejscu i po drodze żyjących poza Afryką od setek tysięcy lat neandertalczyków. Pierwsi ludzie z Europy byli wędrownymi łowcami-zbieraczami należącymi do różnych kultur paleolitu. Losy tych zachodnich łowców-zbieraczy (WHG, ang. *western hunter-gatherer*) na naszym kontynencie były skomplikowane – ostatnie maksimum zlodowacenia wymusiło odwrót do cieplejszych rejonów południa kontynentu, a następnie ponowną kolonizację. Kolejnym znaczącym wydarzeniem w dziejach Europy było pojawienie się rolnictwa, które do naszej części świata zaczęło docierać z Bliskiego Wschodu (tzw. Żyznego Półksiężycza) około 9 tys. lat temu. Wreszcie, ponad 5 tys. lat temu, na przełomie epoki kamienia i brązu, do Europy dotarli mieszkańcy położonego na pograniczu Europy Wschodniej i Azji Stepu Pontyjskiego, wraz z którymi pojawiły się języki z grupy indoeuropejskiej.

Badania wykorzystujące tylko mtDNA i chromosom Y sugerowały, że pochodzenia ogromnej większości mieszkańców Europy należy szukać właśnie w tej ostatniej, stepowej migracji indoeuropejskiej, a jedynych pozostałości wcześniejszych grup można się doszukiwać ewentualnie wśród Basków. Obraz ten jednak zmienił się, gdy w 2015 roku pojawiły się pierwsze prace, które do odtworzenia prehistorii Europy wykorzystywały kompletne genomy setek ludzi współczesnych, a także kopalne DNA ze szkieletów z epok kamienia i brązu. Okazało się, że kolejne fale migracji mieszały się z wcześniejszymi, a DNA współczesnych Europejczyków zawiera ślady wszystkich tych grup! Obecnie wiemy, że gdy w Europie pojawili się pierwsi neolityczni rolnicy (EEF, ang. *early European farmers*) i napotkali wcześniejszych łowców-zbieraczy z grupy WHG, z początku żyli osobno obok siebie, ale po upływie setek lat zaczęli się mieszać między sobą. Gdy w epoce brązu pojawili się stepowi pasterze, oni też nie zastąpili całkowicie wcześniejszych mieszkańców, tylko się z nimi wymieszali. A i oni sami też byli rezultatem wymieszania wielu wcześniejszych populacji – łowców-zbieraczy ze wschodu Europy, Azji i Kaukazu, z domieszkami z Bliskiego Wschodu (dzisiejszy Iran), a także z Syberii. W naszym DNA nosimy do dziś ślady wszystkich tych wędrówek i wielokrotnego mieszania się (fachowo zwanego admiksją)

Czaszki przedstawicieli *Homo* razem z *H. antecessor*, jednego z pierwszych przodków człowieka, którego ślady zostały odkryte w Europie



Homo neanderthalis



Homo antecessor



Homo sapiens



Homo erectus



Rekonstrukcja wyglądu
Homo erectus,
Muzeum Historii Naturalnej
w Wiedniu

różnych grup. Procentowy udział różnych składników tej mieszanki może być inny zależnie od tego, z jakiej części kontynentu ktoś pochodzi, różnice te jednak nie pokazują wyraźnych granic, lecz układają się w gradienty odzwierciedlające główne kierunki pradawnych migracji.

Splątana historia

Ostatnie lata przynoszą coraz to nowe badania, analizujące prehistorię różnych części świata. Szczegóły się różnią, ale ogólny obraz wszędzie jest podobny. Na wszystkich kontynentach dochodziło do kolejnych fal migracji, których efektem było mieszanie się różnych populacji. Do niedawna można było przeczytać, że rdzenni mieszkańcy pustyni południa Afryki są przykładem „czystej” i pozbawionej późniejszych domieszek populacji, genetycznie niezmiennej od początków naszego gatunku. Badania z ostatnich kilku lat, dzięki którym po raz pierwszy zaczęto poznawać ogromną różnorodność mieszkańców Afryki, wykazały jednak, że i w tamtej części świata jej mieszkańcy noszą w sobie ślady pradawnych wędrówek i mieszaniny różnych grup.

Badania z wykorzystaniem całych genomów, zwłaszcza kopalnych, przyniosły też nieoczekiwany zwrot w historii naszych relacji z neandertalczykami. To, że nasze linie rozeszły się, na długo zanim *H. sapiens* zaczął opuszczać Afrykę, zasadniczo się potwierdziło. Okazało się jednak, że nasi przodkowie po wyjściu z Afryki napotkali neandertalczyków, z którymi zaczęli się krzyżować (krzyżówki między tak bliskimi

sobie gatunkami nie są w zoologii niczym niezwykłym). Do dziś nosimy w sobie ślady tych krzyżówek – od dwóch do nawet czterech procent DNA mieszkańców Eurazji pochodzi od neandertalczyków (w genomach mieszkańców Afryki takie ślady też są, jest ich jednak o wiele mniej). Z kolei w Azji ludzie krzyżowali się także z kolejnym, o wiele słabiej poznany gatunkiem, którego szczątki odkryto w górach Ałtaju i nazwano człowiekiem z Denisowej Jaskini. Denisowanie i neandertalczyki też między sobą się krzyżowali, czego ślady odkrywamy w DNA izolowanym z liczących niemal 100 tys. lat szkieletów. Trwające wciąż intensywne badania starają się odpowiedzieć na pytanie, czy pamiątki po tych krzyżówkach w naszym DNA są tylko ewolucyjną ciekawostką, czy też mogą mieć wpływ na nasze zdrowie. Nie na próżno pionier archeogenetyki – Svante Pääbo – został uhonorowany w 2022 roku Nagrodą Nobla w dziedzinie medycyny i fizjologii.

Wykorzystywanie analiz genomowych do badania prehistorii, czyli archeogenetyka – jest wciąż dziedziną bardzo młodą i szybko się rozwijającą. Jest też dziedziną interdyscyplinarną. DNA to tylko część historii, pozostałe części muszą dopowiedzieć badania archeologiczne i antropologiczne. Z pewnością czeka nas w tej dziedzinie jeszcze wiele niespodzianek. Wiemy jednak już, że wędrówki towarzyszyły naszemu gatunkowi od początków jego istnienia i ukształtowały to, kim jesteśmy – odkrywcami i eksploratorami, otwartymi na nowych przybyszy. Nie można podzielić nas na zamknięte grupy, w genach nosimy splątanie historii łączących mieszkańców różnych stron świata. ■

Chcesz wiedzieć
więcej?

Haak W. et al., *Massive migration from the steppe was a source for Indo-European languages in Europe*, „Nature” 2015, vol. 522.

Pääbo S., *Neandertalczyk. W poszukiwaniu zaginionych genomów*, 2015.

Reich D., *Kim jesteśmy, skąd przyszliśmy*, 2019.

Rutherford A., *Krótką historią wszystkich ludzi, którzy kiedykolwiek żyli*, 2017.



mgr Jacek Mańko

Z wykształcenia jest kognitywistą. Obecnie zajmuje się badaniem wpływu technologii i mediów cyfrowych na społeczeństwo.
jmanko@kozminski.edu.pl

Satyra przeciwko korupcji:
ogromny automat
reprezentujący nowy
London University (później
University College London)
depcze chciwych
duchownych, lekarzy,
prawników i koronę

KWESTIA MASZYN

Historyczna ewolucja poglądów o wpływie technologii na pracę.

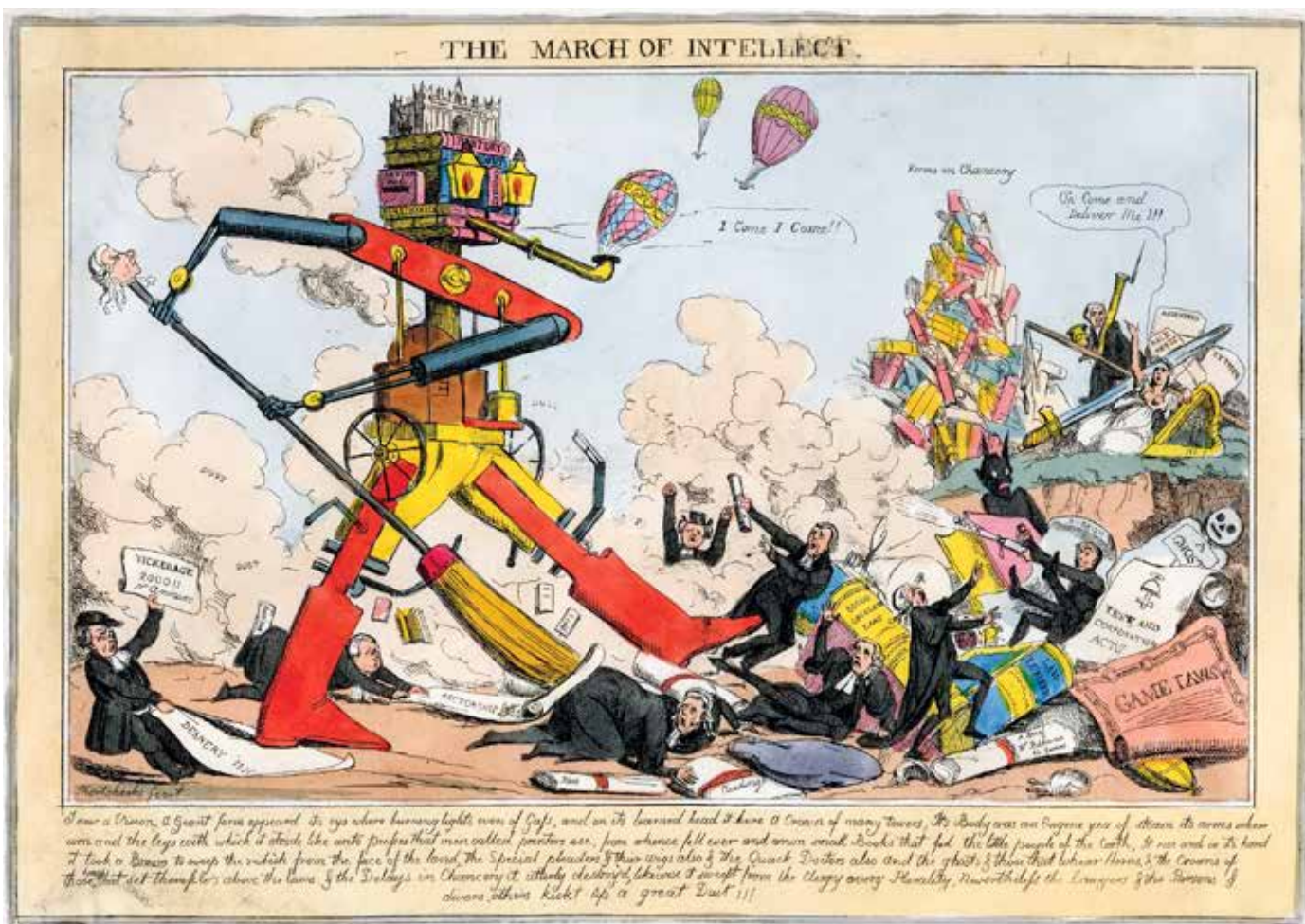
Jacek Mańko

Katedra Zarządzania w Społeczeństwie Sieciowym
Akademia Leona Koźmińskiego w Warszawie

Gatunek ludzki, a mówiąc językiem biologii ewolucyjnej, *Homo sapiens*, pojawił się na Ziemi około 300 tys. lat temu. Jednakże przez sporą część naszego istnienia nic nie wskazywało na to,

że oto w ciągu paru tysięcy lat rozwinie my zaawansowaną cywilizację, wylądujemy na Księżycu czy wymyślimy TikToka.

A przecież używanie rozmaitych może jeszcze nie maszyn, ale już narzędzi było nieodłączną cechą naszego gatunku. Na bardziej zaawansowane maszyny, niekiedy wyprzedzające swoje czasy o całe wieki, przyszło ludzkości czekać aż do czasów starożytnych. Zarazem rozwój technologiczny czy cywilizacyjny nigdy nie przebiegał liniowo, lecz bardziej na zasadzie przełomów albo wręcz niekiedy dość gwałtownych rewolucji. Istotny wpływ miała tu także ogólnie sytu-



ROBERT SEYMOUR, c.1828 © TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM (CC BY-NC-SA 4.0)

acja ekonomiczna czy społeczna, np. dzięki bardziej wydajnemu rolnictwu powstawał naddatek ludzi mogących pracować w rodzącym się przemyśle.

Pierwsza historycznie oficjalna rewolucja przemysłowa to już czasy nowożytne – mowa tu bowiem o przełomie XVIII i XIX wieku w Wielkiej Brytanii. To właśnie wtedy na przemysłową skalę zastosowano maszynę parową, co umożliwiło rozwój wielu gałęzi przemysłu, zwłaszcza włókienniczego. Wraz z powstającymi fabrykami i maszynami rodziły się pytania o przyszłość pracy i rolę pracowników. Tytułowa „kwestia maszyn” to problem poruszony już w 1817 roku przez ekonomistę Davida Ricardo, który pisał tak:

„Jeżeli przy zatrudnianiu tej samej ilości pracy, liczba pończoch dzięki ulepszonej maszynie wzrasta w czwórnasób, popyt zaś na nie podwaja się tylko, to pewna liczba robotników traci zajęcie w pończosznictwie”.

Choć powyższy przykład może brzmieć cokolwiek niewspółcześnie, a Ricardo zapewne nie słyszał o marketingu czy generowaniu popytu, to w jego słowach dają się wyraźnie dostrzec obawy przed automatyzacją (nawet jeśli nie używano wtedy tego słowa) czy po prostu przed byciem zastąpionym przez maszyny albo zostaniem „człowiekiem zbędnym”.

Rewolucja przemysłowa przyniosła też wiele zmian w ówczesnym społeczeństwie brytyjskim, np. stawiano większy nacisk na upowszechnienie wiedzy naukowej, zwłaszcza z nauk przyrodniczych – zjawisko to, nazwane Marszem Intelaktu, stanowiło zarazem przedmiot gorących dyskusji. Klimat i wyobraźnię tamtych czasów dobrze oddaje rysunek Roberta Seymoura z 1828 roku przedstawiający coś na wzór humanoidalnego robota na parę wymiatającego wielką miotłą wszelkiej maści zapóźnione ustawy parlamentarne, sprawy sądowe czy też szarlatanów.

To już było

Intensywny rozwój narzędzi sztucznej inteligencji (SI), a zwłaszcza tej generatywnej, którego doświadczamy od końca 2022 roku spowodował nasilenie się narracji, które brzmią ludzko podobnie do tych XIX-wiecznych – także dziś toczy się analogiczna debata o charakterze postępu, który SI miałaby przynieść w nauce czy całemu społeczeństwu. Jednocześnie intensywnie dyskutuje się o jej wpływie na pracę czy nawet na całą gospodarkę – mówi się wręcz o kolejnej rewolucji, wzorem tej industrialnej.

Pośród licznych doniesień medialnych o SI dominują te o hipotetycznej masowej automatyzacji wielu stanowisk. Pewien raport przewidywał, iż SI może zastąpić równowartość 300 mln miejsc pracy na świecie, zarazem przyczyniając się do wzrostu produktywności czy tworząc wręcz nowe miejsca pracy. Wielu pra-

cowników martwi się o swoją przyszłość, rozważając zmianę zawodu na mniej zagrożony automatyzacją. Nie brak też kasandrycznych głosów, jakoby wysoce rozwinięta SI miała się kiedyś wymknąć spod kontroli czy zbuntować, sprowadzając na ludzkość nieszczęścia lub wręcz zagładę.

Wszystko to już było co najmniej od XIX wieku, a niekiedy i znacznie dłużej. Choć obecnie obserwujemy kolejną już odsłonę „kwestii maszyn”, nie znaczy to jednak, że kwestia ta jest już (czy na dobrą sprawę kiedykolwiek była) rozwiązana.

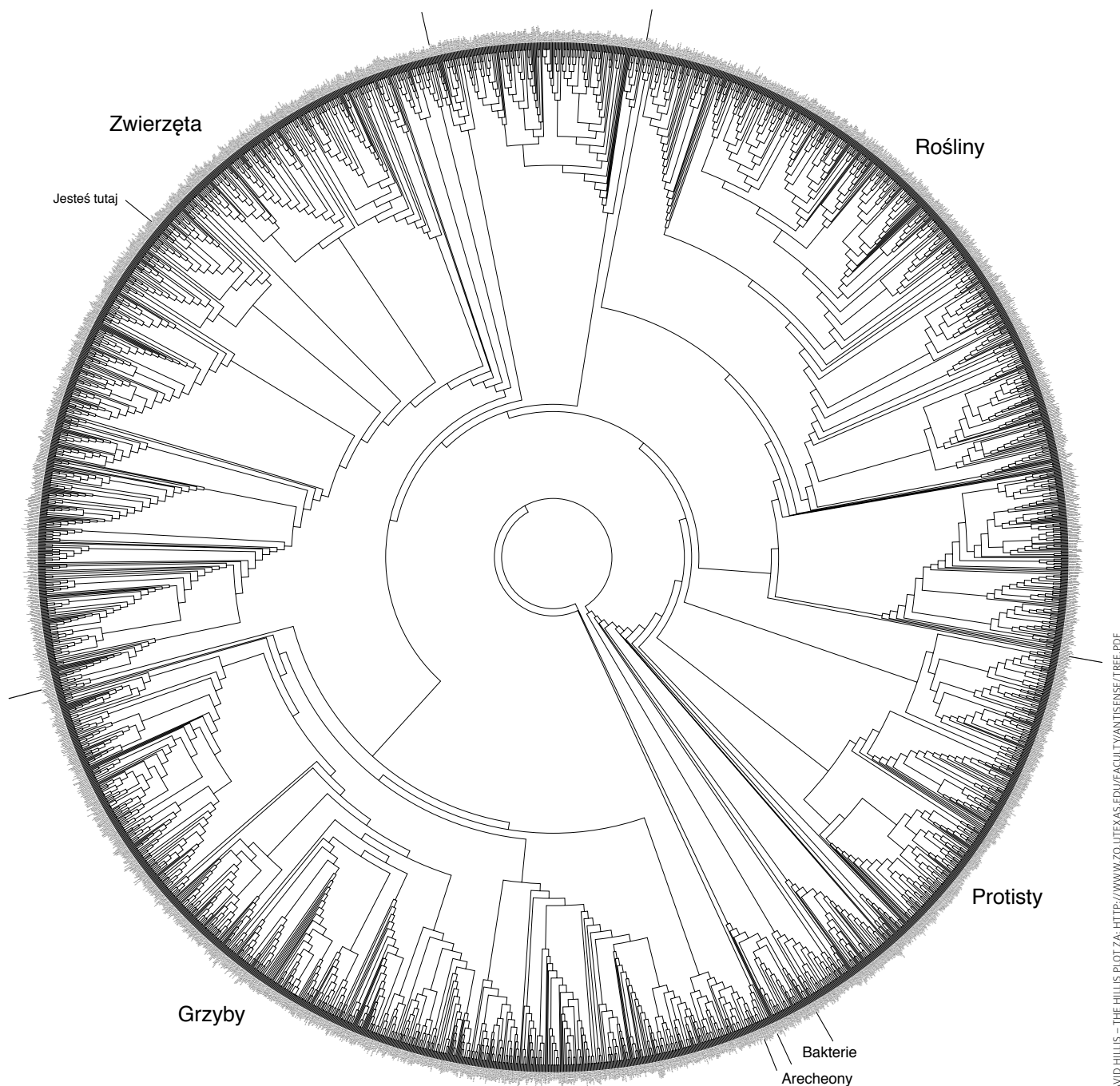
Trzeba stwierdzić, że w zasadzie od zawsze protestowano przeciw jakimikolwiek nowym technologiom, np. przeciw budowie pierwszych linii kolejowych, po których pociągi poruszały się i tak z niewielką prędkością. W latach 60. XX wieku nauczyciele protestowali przeciwko używaniu kalkulatorów w szkołach. Wtedy też zresztą zaczęły upowszechniać się bardziej zaawansowane kalkulatory, tj. komputery, co do których obawiano się, że pozbawią pracy rzeszę pracowników. Faktem jest jednak, iż do maso-

Pewien raport przewidywał, iż SI może zastąpić równowartość 300 mln miejsc pracy na świecie, przyczyniając się do wzrostu produktywności czy tworząc wręcz nowe miejsca pracy.

wego technologicznego bezrobocia nigdy nie doszło – owszem, wiele zawodów zniknęło, ale na ich miejsce pojawiały się nowe. Co więcej, już prawie 100 lat temu ekonomista John Maynard Keynes zakładał, iż rozwój technologii może skrócić tydzień pracy do 15 godzin – to, jak wiemy, również się nie sprawdziło, a możemy mieć odwrotne wrażenie – mimo rozwoju technologii pracujemy dłużej.

Choć dziś również nie brakuje argumentów, że tak jak dekady temu niesłusznie obawiano się kalkulatorów w szkołach czy „bezrobocia komputerowego”, tak teraz niesłusznie obawiamy się SI (zwłaszcza generatywnej) czy w to szkołach, czy w pracy – tym razem dyskusja ma jednak cokolwiek inny charakter, albowiem technologia i tak odgrywa już dominującą rolę w wielu sferach życia, a ponadto jest wytwarzana zupełnie inaczej, niż działo się to wcześniej.

Co bardziej optymistyczni zwolennicy technologii argumentują, że ma tu po prostu miejsce niezaprzeczalny, liniowy, a czasem wręcz skokowy progres – od maszyny parowej, przez elektryczność, po urządzenia cyfrowe – a SI, ta hipotetyczna, rzekomo bardzo

DAVID HILLIS – THE HILLIS PLOT ZA: [HTTP://WWW.ZO.UTEXAS.EDU/FACULTY/ANTISENSE/TREE.PDF](http://www.zo.utexas.edu/faculty/ANTISENSE/TREE.PDF)

„Chmurka” tworząca okrąg to nazwy poszczególnych gatunków, widoczne dopiero w sporym powiększeniu. Wnikliwy czytelnik może zechcieć odszukać w niej nasz gatunek *Homo sapiens*

zaawansowana czy wręcz „przekraczająca ludzkie możliwości”, która według firmy OpenAI może przynieść dobrobyt ludzkości, ma być ukoronowaniem tej swoistej technologicznej ewolucji.

Tylko że to nie do końca (albo wręcz w ogóle) tak nie wygląda.

Bowiem zarówno ewolucja biologiczna, jak i ta technologiczna nie przebiegają linearnie, od stworzeń mniej rozwiniętych po „koronę stworzenia”, tj. np. ludzkość, *Homo sapiens* czy SI. Swoją drogą, ludzkość jest uważana za ową koronę właśnie ze względu na swój intelekt, a co do SI szans i obaw upatruje się właśnie w tym, że rzekomo miałyby zdetronizować

ludzką pod tym względem. Taka drabina ewolucyjna to historycznie (a także współcześnie) całkiem popularny pogląd, a w zasadzie mit nie tylko w okresie przeddarwinowskim.

W rzeczywistości biologiczna ewolucja nie tyle przebiega po drabinie, ile bardziej przypomina dysk rozwijający się w czasie do zewnątrz, tak że występujące obecnie gatunki tworzą jego obwód.

Tutaj w przeciwieństwie do „drabiny” wszystkie (żyjące) organizmy przeszły taką samą ścieżkę ewolucyjną i odniosły taki sam ewolucyjny sukces – nie da się orzec, który fragment okręgu i na jakiej podstawie miałyby być „koroną stworzenia”.

Zarazem takie przedstawienie unaocznia całe mnóstwo scenariuszy, na podstawie których może przebiegać ewolucja. Nie wszystkie udane, przecież są znane w biologii organizmy, które okazały się ewolucyjną ślepą uliczką, przeżyły bardzo krótko, były nieprzystosowane.

Z ewolucją technologiczną jest podobnie. W historii samego XX wieku było sporo ciekawych pomysłów, które z takich czy innych powodów nie mogły się rozwinąć.

By wspomnieć chilijski projekt Cybersyn – oryginalny autorski pomysł własnego internetu, rozwijany w latach 1971–1973, brutalnie zakończony wraz z zamachem stanu. Albo rodzącą się w połowie XX wieku cybernetykę, niekiedy z radykalnie odmiennym poglądem na rolę komputerów, człowieczeństwa czy środowiska. Niektórzy cybernetycy nie chcieli ograniczać roli upowszechniających się do komputerów tylko do obliczeń, predykcji czy automatyzacji pracy – w ich wizji technologia mogła znacząco poszerzać nasze horyzonty, aniżeli tylko biernie podsuwać nam nowe produkty do konsumpcji tudzież ewentualnie sama takie wytwarzać. Nic się z tego nie ziszcilo, gdyż cybernetyka przegrała swoisty ewolucyjny wyścig z powstającą sztuczną inteligencją (która – co ciekawe – sama później podchwyciła wiele pomysłów cybernetycznych).

Na rozwój mamy wpływ

W przeciwieństwie do ślepej ewolucji biologicznej, będącej niczym majster-klepka operujący w myśl dewizy „Jak działa, to nie poprawiaj”, rozwój technologii zależy przede wszystkim od ludzi, skądinąd niekiedy też zaślepionych. O ironio, rozwój ten nie jest sam w sobie automatyczny czy mechaniczny – nic tu się samo nie robi – jest za to wypadkowa wielu czynników, tyleż technologicznych co społecznych czy politycznych.

Revolucja przemysłowa przyniosła fabryki, a w nich pracujące dzieci i ogólnie fatalne warunki pracy. Zarazem w pierwszych latach rewolucji bogacili się głównie przemysłowcy, rosły nierówności ekonomiczne. Taki stan rzeczy zapoczątkował początek walki o coś, co dzisiaj nazywamy prawami pracowniczymi, BHP czy związkami zawodowymi.

Ze sztuczną inteligencją może być (i niekiedy jest) podobnie. Za rozwojem technologii cyfrowych i SI stoi konglomerat gigantycznych firm, który używa swoich produktów technologicznych głównie, by generować zyski i cementować swoją hegemoniczną pozycję. Mimo że na rozwój SI tak na dobrą sprawę pracujemy wszyscy, dostarczając codziennie dane w internecie (a także armia kiepsko opłacanych pracowników Globalnego Południa), to podobnie jak działo się to w XIX-wiecznej Anglii, zyski czerpie wąski oligopol firm technologicznych nieprzejmujący

się np. zalewem fake newsów, deep fake’ów czy erozją procesów demokratycznych. Tak jak w XIX wieku rośnie też opór przeciwko uwłaszczaniu się technologicznych gigantów na coraz to nowych obszarach rzeczywistości – by wspomnieć zeszłoroczny strajk scenarzystów czy aktorów w USA przeciwko SI czy platformom streamingowym, a także niedawny (aczkolwiek nieprawdopodobny) protest w obronie mediów w Polsce.

Choć ludzie przecież nie są maszynami, to w starciu z nieludzką technologią mogą siłą rzeczy być redukowani do czegoś na wzór maszyn – tylko mniej wydajnych – takich, które łatwo zastąpić innymi, lepszymi. A przecież nie ma nic zdrożnego w dążeniu do automatyzacji pracy – jest to efekt pewnego względnie świeżego konsensusu technologiczno-biznesowego, którego efektem są znane dziś technologie.

Człowiek może wpływać na ewolucję biologiczną, np. wybijając jedne gatunki, a inne krzyżując z sobą niekiedy na cele masowych hodowli. Analogicznie ludzkość może wpływać na rozwój technologii

Choć ludzie przecież nie są maszynami, to w starciu z nieludzką technologią mogą siłą rzeczy być redukowani do czegoś na ich wzór.

(może już mniej drastycznymi metodami), która faktycznie może być narzędziem demokratycznym i demokratyzującym albo – jak chcieli cybernetycy – poszerzającym nasze horyzonty w nieoczywisty sposób. Nie będzie to możliwe, jeśli wszystkie ważne decyzje będzie podejmować wąska grupka technologicznych liderów buńczucznie przeświadczonych o swojej misji dziejowej przynoszenia dobrobytu dla całej ludzkości.

Same te firmy, choć już teraz gargantuiczne i rekordowo wyceniane, ciągle myślą o dalszej ekspansji. Zarazem ich ślad węglowy, a w szczególności generatywnej SI, jest ogromny (choć zarazem trudny do dokładnego oszacowania). A przecież już teraz dochodzimy do planetarnych granic takiej eksploatacji, nie można przecież bez konsekwencji rosnać bez opamiętania.

Problemy te były nieznane u progu rewolucji przemysłowej, która dopiero zapoczątkowywała na globalną skalę procesy zarówno wydobywania (i spalania) paliw kopalnych, jak i procesy automatyzacji pracy. „Kwestia maszyn” wciąż, a może właśnie w końcu, czeka na swoje rozwiązanie. Jeśli nie teraz, to kiedy? Inna przyszłość jest (jeszcze) możliwa. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Acemoglu D., Johnson S., *Power and progress: our thousand-year struggle over technology and prosperity*, 2023.

Dundon T., Howcroft D., *Automation, robots and the 'end of work' myth*, 2018, theconversation.com/automation-robots-and-the-end-of-work-myth-89619

Kelly K., *The Myth of a Superhuman AI*, 2017, www.wired.com/2017/04/the-myth-of-a-superhuman-ai/

**dr inż.****Krzysztof Argasiński**

Zajmuje się modelowaniem matematycznym procesów ewolucyjnych, dynamiką populacji, demografią i teorią gier ewolucyjnych.

Jest absolwentem Wydziału Matematyki i Nauk Informatycznych Politechniki

Warszawskiej, doktoryzował się na Wydziale Biologii i Nauk o Ziemi UJ.

Pracował na Uniwersytecie Sussex, w Instytucie Matematycznym PAN. Obecnie realizuje projekt badawczy na Wydziale Matematyki, Informatyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego.

k.argasiński@uw.edu.pl

BIĆ SIĘ ALBO NIE BIĆ

Procesy ewolucyjne kształtujące wzorce zachowań zwierząt i ludzi mogą być opisywane przy użyciu teorii gier, matematycznego podejścia stworzonego na potrzeby ekonomii.

Krzysztof Argasiński

Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki
Uniwersytet Warszawski

z badań biologicznych. Co więcej, jedna z najbardziej przełomowych teorii współczesnej nauki, czyli teoria chaosu, obok modeli zjawisk pogodowych zawdzięcza swoje istnienie również prostym modelom dynamiki populacji przedstawionym przez Roberta Maya.

Teorja ewolucji Darwina jest jedną z najważniejszych teorii współczesnej nauki. Wywarła ona wszechobecny wpływ na inne, odległe dyscypliny, takie jak nauki społeczne, a nawet filozofia. Współczesne nauki przyrodnicze opierają się na matematyce, rodzi się zatem pytanie o relacje łączące biologię ewolucyjną z królową nauk. Prawdopodobnie pierwszym historycznym przykładem modelu matematycznego procesów ewolucyjnych był model ewolucji proporcji płci przedstawiony przez niemieckiego uczonego Carla Düsinga pod koniec XIX wieku, stosunkowo niedługo po opublikowaniu przełomowego dzieła Karola Darwina. Później, w latach 20. XX wieku, pojawiła się matematyczna genetyka populacyjna sformułowana przez Ronalda A. Fishera, Sewalla Wrighta i Johna Haldane'a, którzy są uznawani za ojców tzw. syntezy neodarwinowskiej. Wiele koncepcji teoretycznych, takich jak teoria systemów, stworzona przez austriackiego biologa Ludwiga von Bertalanffyego, wyrosło



VLADIMIR TURKENICH/SHUTTERSTOCK.COM



VLADIMIR TURKENICH/SHUTTERSTOCK.COM

Strategie jastrzębia i gołębia oznaczają wzorce zachowań polegające na eskalacji konfliktu prowadzącego do obrażeń lub nawet śmierci (czyli kosztów w grze, w której zyskiem jest sukces reprodukcyjny), lub ucieczki

Zjawiska ewolucyjne stanowią też inspirację dla informatyków pracujących nad algorytmami optymalizacji (genetycznymi i ewolucyjnymi) czy algorytmami uczenia. Sama biologia ewolucyjna również czerpie inspirację z nauk ścisłych i chętnie sięga po narzędzia matematyczne czy symulacje komputerowe używane w innych dyscyplinach nauki, takich jak fizyka czy nawet ekonomia. I tu dochodzimy do głównego tematu. W biologii ewolucyjnej istotnym elementem wyjaśniania zjawisk obserwowanych w przyrodzie jest rachunek zysków i strat spowodowanych przez daną cechę czy zachowanie. Dotyczy on zarówno takich cech jak rozmiar ciała, przeznaczenie zdobytej energii na rozród czy np. odpowiedź immunologiczną, jak i wzorców zachowań godowych aż po wyjaśnianie powstania zachowań altruistycznych w przyrodzie. Wiele sytuacji obserwowanych w naturze jawi się jako paradoksalne. Nie jest łatwo wyjaśnić, dlaczego drapieżniki są mniej agresywne wobec siebie niż gryzonie i dlaczego u większości gatunków obserwujemy równą proporcję samców do samic (jak w pionierskim modelu Düsinga). W sytuacji, w której werbalne dywagacje nie prowadzą do żadnych konkluzji, należy sięgnąć po matematykę.

Strategia

Jednym z głównych narzędzi służących rozwiązywaniu tego typu problemów jest teoria gier ewolucyjnych. Jest to dziedzina stworzona przez Johna Maynarda Smitha, brytyjskiego biologa ewolucyjnego i byłego inżyniera lotniczego. Powstała ona dzięki zastosowaniu

metod zapożyczonych z ekonomii, stworzonych przez jednego z najwybitniejszych matematyków w historii, Johna von Neumanna, i niemieckiego ekonomistę Oskara Morgensterna (i znacząco rozwiniętych przez Johna Nasha, bohatera filmu pt. *Piękny umysł*). Rodzi się więc pytanie: czym jest gra z punktu widzenia matematyki? Odpowiedź jest prosta: gra to zbiór strategii (czyli wzorców zachowań) oraz funkcje przypisujące jakieś abstrakcyjne wypłaty jej uczestnikom w zależności od używanego działania. Żeby zastosować ten schemat teoretyczny do problemów biologicznych, musimy założyć, że te strategie to po prostu wzorce zachowań organizmów lub inne cechy wpływające na wyniki ich interakcji z innymi organizmami, a wartości wypłat są wyrażone jako sukces reprodukcyjny poszczególnych graczy.

Wiele sytuacji obserwowanych w naturze jawi się jako paradoksalne. Nie jest łatwo wyjaśnić, dlaczego drapieżniki są mniej agresywne wobec siebie niż gryzonie.

Za moment powstania teorii gier ewolucyjnych uważa się opublikowanie w 1973 roku przez Johna Maynarda Smitha wraz z George'em Price'em artykułu *The Logic of Animal Conflict* w prestiżowym czasopiśmie „Nature”. Artykuł był poświęcony wyjaśnieniu paradoksalnego zjawiska rytualizacji konfliktów wśród dobrze uzbrojonych, drapieżnych zwierząt. Model ten, obecnie znany jako gra jastrzęb-gołąb (*hawk-dove game*), pokazuje, że w sytuacji, kiedy agresja jest kosztowna (czyli zwiększona śmiertelność prowadzi do znaczącego spadku sukcesu reprodukcyjnego), proporcja agresywnych osobników (określanых

Dwa walczące węże
to przykład tzw.
zrytualizowanego konfliktu,
w którym konkurenci nie
stosują prawdziwej
przemocy, tylko próbują się
nawzajem przepłoszyć.
Pytanie o wyjaśnienie tego
zjawiska przyczyniło się
do powstania teorii gier
ewolucyjnych

metaforycznie jako „jastrzębie”) spada do pewnego stabilnego poziomu. Okazuje się jednak, że agresywne osobniki nie znikają całkowicie. Model pokazuje więc, że w sprzyjających warunkach agresywne osobniki same skutecznie usuwają się z populacji.

Co bardziej się opłaca

Podobne modele tworzy się do wyjaśniania innych, sprawiających wrażenie paradoksalnych zjawisk obserwowanych w naturze. Są to np. ewolucja zachowań kooperacyjnych, do której używa się modeli bazujących na tzw. dylemacie więźnia. Jest to model powstały w czasach zimnej wojny, opisujący konflikt decyzyjny dotyczący ewentualnej wojny nuklearnej. W tej grze dwóch więźniów stoi przed dylematem: zdradzić kolegę i uzyskać złagodzenie kary czy milczeć. Jeśli obaj gracze będą milczeć, to kara zostanie rozłożona po równo, ale jeśli jeden zdradzi, to drugi zostanie obciążony większą winą i skazany na dużo większy wyrok. W pojedynczym konflikcie tego typu, milczenie jest kompletnie nieopłacalne. Jednak kiedy sytuacja się powtarza, okazuje się, że wybór nie jest taki prosty i może wygrać tzw. strategia „wet za wet” (czyli jak Kuba Bogu, tak Bóg Kubie). Dalsze badania pokazały, że to, czy kooperacja się rozwinie, zależy od struktury populacji, która determinuje kontakt osobników między sobą. W strukturach, w których możliwe jest powstawanie homogenicznych kooperujących podgrup, zachowania kooperacyjne mogą się rozwijać. Jest to problem bardzo złożony i w tym kierunku jest prowadzonych wiele badań.

Teoria gier ewolucyjnych jest dość młoda jak na teorię naukową i ciągle jest w fazie gwałtownego rozwoju. Jednym z jej problemów jest interpretacja pojęć zaczerpniętych z ekonomii w kontekście procesów populacyjnych, co jest związane z definicją darwinowskiego dostosowania (tzw. *fitness*). Najnowsze badania skupiają się na zwiększeniu realizmu modeli używanych w biologii i zrozumieniu relacji między procesami selekcji naturalnej, czynnikami ekologicznymi i demograficznymi. Tworzy się np. metody wyprowadzania funkcji wypłat z modeli demograficznych biorących pod uwagę również cykl życiowy osobników. Wymaga to zastosowania coraz bardziej wyrafinowanych metod matematycznych, takich jak równania różniczkowe z opóźnieniem czy skomplikowane układy równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych. W każdym razie sama dyscyplina wchodzi w okres intensywnego rozwoju.

Trzeba dodać, że powstałe matematyczne techniki i metodologia budowania modeli mogą być wykorzystane w innych dziedzinach nauki i pomóc np. w tworzeniu bardziej precyzyjnych modeli wzrostu nowotworów (do czego zaczęto używać metod teorii gier ewolucyjnych). Jak pokazały przełomowe prace Joela



BINU NARF/SHUTTERSTOCK.COM

Browna, między różnymi typami komórek nowotworowych istnieją konflikty interesów. Stwarza to szansę na wykorzystanie ich do zwiększenia skuteczności terapii. Obecnie modele matematyczne są już używane w praktyce klinicznej i służą do optymalizacji strategii podawania leków. Pozwoliło to na znaczące zwiększenie skuteczności terapii. Metody teorii gier ewolucyjnych zaczęto również stosować do modelowania procesów społecznych i ekonomicznych, takich jak ewolucja norm społecznych, np. współpraca na rzecz wspólnego dobra publicznego. W ten sposób biologia spłaciłaby dług ekonomii, z której zapożyczyła teorię gier. ■

Chcesz wiedzieć
więcej?

Poleszczuk J., *Ewolucyjna teoria interakcji społecznych*, 2004.

Binmore K., *Teoria gier. Krótkie wprowadzenie*, 2017.

Słowackie Tatry Wysokie
– widok na południowy zachód
ze Świstowego Szczytu

**mgr Tanishka Soni**

Jest doktorantką drugiego roku w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk. Jej projekt doktorski jest zatytułowany *Rozwikłanie historii kolizji Zachodnich Karpat poprzez modelowanie geofizyczne i geologiczne*. Ukończyła magisterium z geologii na Uniwersytecie Savitribai Phule Pune (Indie).
ndsoni@cyf-kr.edu.pl

ECHA Z KARPAT

Badania Karpat za pomocą fal sejsmicznych umożliwiają odkrywanie tajemnic ukrytych głęboko pod ziemią.

Tanishka Soni
Mateusz Mikołajczak
Stanisław Mazur

Instytut Nauk Geologicznych
Polska Akademia Nauk w Warszawie

Christian Schiffer

Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet w Uppsali

Karpaty rozciągają się na obszarze Europy Środkowej i Wschodniej. Wyróżniają się w krajobrazie i odgrywają kluczową rolę w historii kulturowej regionu i zachowaniu jego bioróżnorodności. Łańcuch górski ma ponad 1500 km długości i ciągnie się przez terytoria ośmiu krajów: Austrii, Czech, Słowacji, Polski, Węgier, Ukrainy, Rumunii

i Serbii. Karpaty są przedłużeniem alpejskiego pasma górskiego, a ich geologia jest złożona, odzwierciedlając długą historię sedymentacji, aktywności tektonicznej i erozji. Choć góry są badane od ponad 150 lat, a ich geologia powierzchniowa jest dobrze poznana, to ich głęboka struktura pozostaje przedmiotem różnych hipotez. Tylko badania geofizyczne mogą wspierać geologię powierzchniową w odkrywaniu tego, co kryje się pod powierzchnią tego malowniczego łańcucha.

Karpaty są częścią większego alpejsko-himalajskiego pasma górskiego, które powstało w wyniku kolizji płyt tektonicznych – afrykańskiej i eurazjatyckiej. Formowanie się Karpat rozpoczęło się w erze mezozoicznej, w kredzie (około 145–66 mln lat temu), i postępowało w erze kenozoicznej, w paleogenie (około 66–23 mln lat temu) i neogenie (23–2,5 mln lat temu). Powstanie Karpat jest ściśle związane z zamknięciem dawnego Oceanu Tetydy i późniejszą kolizją kontynentu europejskiego z małymi fragmentami kontynentalnymi oraz łańcuchami wysp wulkanicznych będącymi wczesnymi zwiastunami zbliżającej się płyty

**dr Mateusz Mikołajczak**

Pracuje jako adiunkt w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk. Jego główne zainteresowania badawcze to analiza pól potencjalnych, geofizyka stosowana, tektonika płyt i geologia strukturalna. Jest członkiem Grupy Badawczej Systemów Depozycyjnych (DEPOS) w Centrum Badawczym w Krakowie.
ndmikola@cyf-kr.edu.pl



**prof. dr hab.
Stanisław Mazur**

Jest profesorem w Instytucie Nauk Geologicznych Polskiej Akademii Nauk i obecnie pełni funkcję dyrektora. Jego główne zainteresowania badawcze to tektonika, geologia strukturalna, analiza basenów i geofizyka stosowana. Od 2018 roku kieruje Grupą Badawczą Systemów Depozycyjnych (DEPOS) w Centrum Badawczym w Krakowie.
ndmazur@cyf-kr.edu.pl



**doc. Christian
Schiffer**

Pracuje od 2019 roku w Instytucie Nauk o Ziemi Uniwersytetu w Uppsali. Wykorzystuje geofizykę, głównie metody seismologiczne, do rozwiązywania problemów tektonicznych i geodynamicznych na całym świecie. Specjalizuje się m.in. w geodynamice Arktyki, powstawaniu i strukturze litosfery prekambryjskiej, a ostatnio w strukturze pasma alpejsko-dynaryjsko-karpackiego oraz ewolucji płyty adriatyckiej.
christian.schiffer@geo.uu.se

Surowe dane
ze stacji CP15A

afrykańskiej. Łańcuch górski Karpat można podzielić na trzy główne segmenty: Karpaty Zachodnie, Karpaty Wschodnie i Karpaty Południowe. Każdy z nich ma odrębne cechy geologiczne i historię.

Karpaty Zachodnie obejmują góry w Czechach, na Słowacji i w Polsce. Charakteryzują się złożoną budową pasma fałdowego składającego się z licznych płaszczowin, które są dużymi pakietami skał ponaszanych na siebie w wyniku działania sił tektonicznych. W skład Karpat Zachodnich wchodzi mezozoiczne skały osadowe, w tym wapień i dolomity, które są pozostałościami dawnych płytkich mórz. Tatry, należące do Karpat Zachodnich, są zbudowane w większości z granitów, które zostały odsłonięte dzięki wypiętrzeniu się masywu i równoczesnej erozji.

Współczesny krajobraz Karpat jest urozmaicony i odzwierciedla zarówno rodzaj podłoża skalnego i jego strukturę, jak i efekty aktywności tektonicznej, zlodowaceń i erozji. Najwyższe szczyty Karpat znajdują się w Tatrach, gdzie Gerlach na Słowacji osiąga wysokość 2655 m n.p.m. Rzeźba Tatr charakteryzuje się urwistymi szczytami, głęboko wciętych dolinami i zjawiskami krasowymi.

Ewolucja tektoniczna

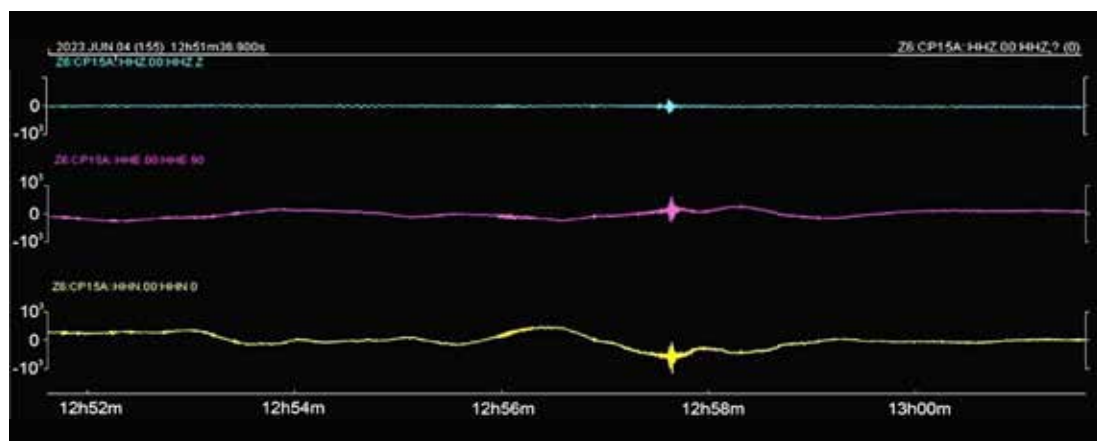
Karpaty znajdują się w strefie kolizji płyty eurazjatyckiej i kilku mniejszych jednostek tektonicznych, w tym płyty adriatyckiej i mikro płyty ALCAPA (Alpy–Karpaty–Kotlina Panońska). Ewolucja tektoniczna i geologiczna Karpat jest ściśle związana z Alpami, które powstały w wyniku kolizji płyt afrykańskiej i eurazjatyckiej oraz subdukcji Oceanu Tetydy. Karpaty zaczęły się formować w późnej jurze (około 150 mln lat temu), podczas zamykania się Oceanu Tetydy. Subdukcja skorupy oceanicznej doprowadziła do akrecji skał osadowych, które później zostały włączone w masywy karpackie.

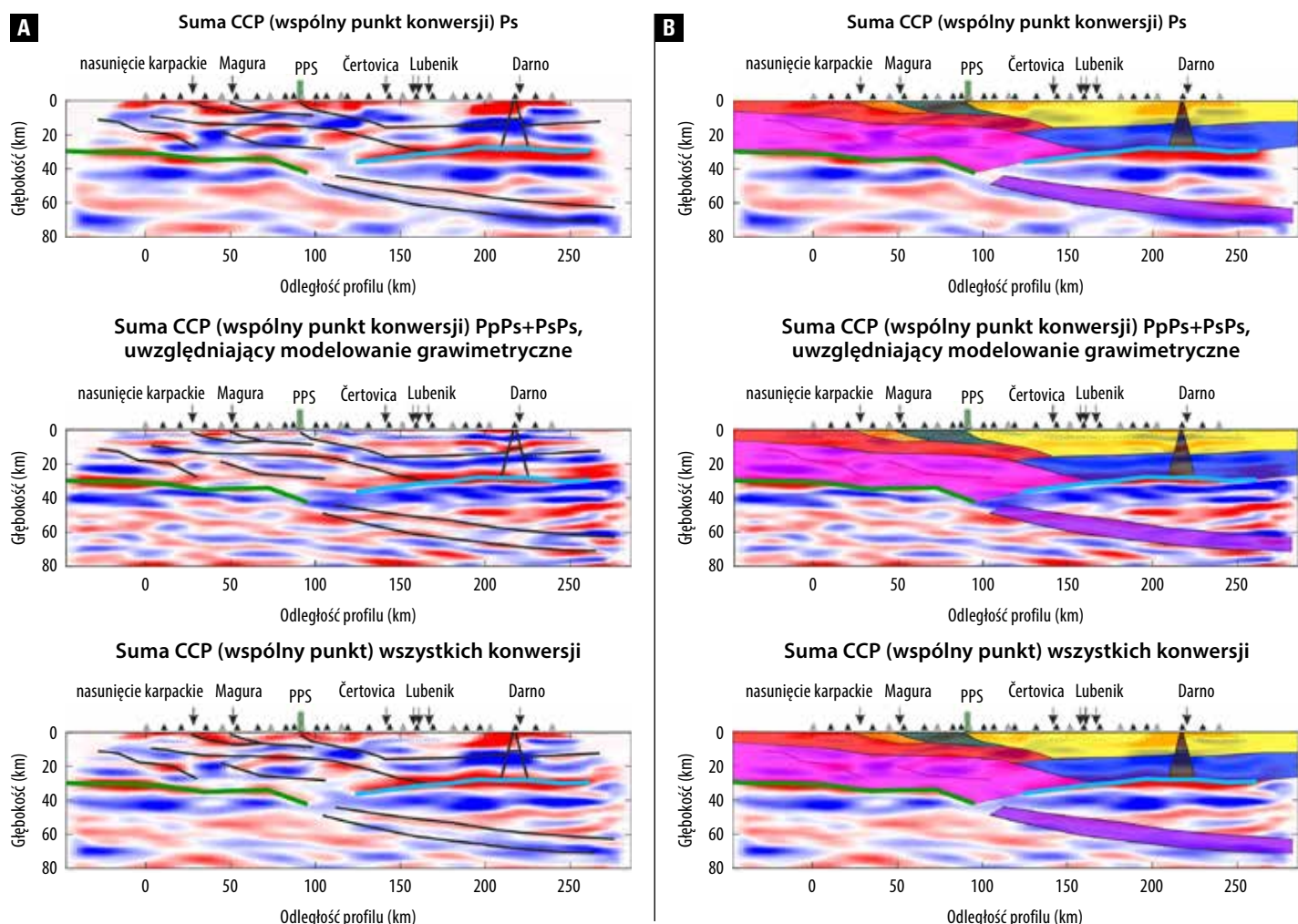
W późnej kredzie (około 100–66 mln lat temu) region doświadczył działania znaczących sił kompresyjnych, prowadzących do rozwoju sieci uskoku i nasu-

wania się płaszczowin. Procesy te były szczególnie intensywne w Karpatach Zachodnich, gdzie kolizja płyty europejskiej z mikro płytą ALCAPA o proveniencji afrykańskiej doprowadziła do znaczącego skrócenia i pogrubienia skorupy ziemskiej. Do najważniejszego etapu ewolucji tektonicznej Karpat doszło w paleogenie i wczesnym neogenie (około 66–15 mln lat temu). Wtedy europejskie obrzeżenie Oceanu Tetydy zdarzyło się z małymi fragmentami kontynentalnymi i łukami wysp związanymi z płytą afrykańską. Ta kolizja doprowadziła do powstania pasma górskiego, które zostało nasunięte na brzeg płyty europejskiej. W tym okresie łuk Karpat zaczął się formować jako wyraźna, regionalna struktura geologiczna.

Reżim tektoniczny Karpat ponownie uległ zmianie w środkowym i późnym miocenie (około 15–5 mln lat temu), gdy subdukująca pod Karpaty płyta europejska zaczęła się cofać. Cofanie się płyty (ang. *slab rollback*) to proces, w którym zanurzająca się płyta tektoniczna cofa się pod własnym ciężarem, powodując ekstensję nadległej, górnej płyty. W przypadku Karpat ekstensja doprowadziła to do powstania Kotliny Panońskiej na terenie dzisiejszych Węgier, obszaru o zredukowanej grubości skorupy ziemskiej i grubej pokrywie skał osadowych. Rozciąganie górnej płyty doprowadziło również do aktywności wulkanicznej w wewnętrznych częściach Karpat. Te zjawiska są kluczowym aspektem ewolucji tektonicznej regionu, ponieważ ukazują dynamiczną interakcję między siłami kompresyjnymi a ekstensyjnymi.

Karpaty Zachodnie mają złożoną budowę geologiczną i obejmują kilka odrębnych jednostek tektonicznych. Na północy znajdują się Karpaty Zewnętrzne, które są zbudowane ze skał osadowych kredy i paleogenu. Dalej na południe leżą Karpaty Centralne i Karpaty Wewnętrzne, w których skład wchodzi m.in. fragmenty starszego podłoża uformowanego jeszcze w trakcie orogenezy warwyskiej (około 370–290 mln lat temu). Dwie znaczące struktury, tzw. szwy tektoniczne, strefa Meliata i Pieśniński Pas Skałkowy (PPS), oddzielają odpowiednio





Wyniki badań sejsmicznych i ich interpretacja. A) Suma CCP z zaobserwowanymi strukturami, B) Suma CCP z interpretacją zaobserwowanych struktur

Karpaty Zewnętrzne od Centralnych i Centralne od Wewnętrznych.

PPS, który powstał po zamknięciu Oceanu Alpejskiej Tetydy, składa się ze skał osadowych i w przeciwieństwie do typowych struktur tego typu (szwów tektonicznych) nie wykazuje niektórych charakterystycznych cech geologicznych. Za miejsce powstania serii osadowych tworzących PPS uznaje się hipotetyczne wyniesienie dna oceanicznego zwane grzbietem czorsztyńskim. Obecnie pozostałości grzbietu czorsztyńskiego powinny być głęboko pogrążone pod Karpatami Centralnymi. W przeszłości grzbiet czorsztyński miał dzielić Ocean Alpejskiej Tetydy na dwa mniejsze baseny: północny – Magurę, i południowy – Vahic.

Badania eksperymentalne

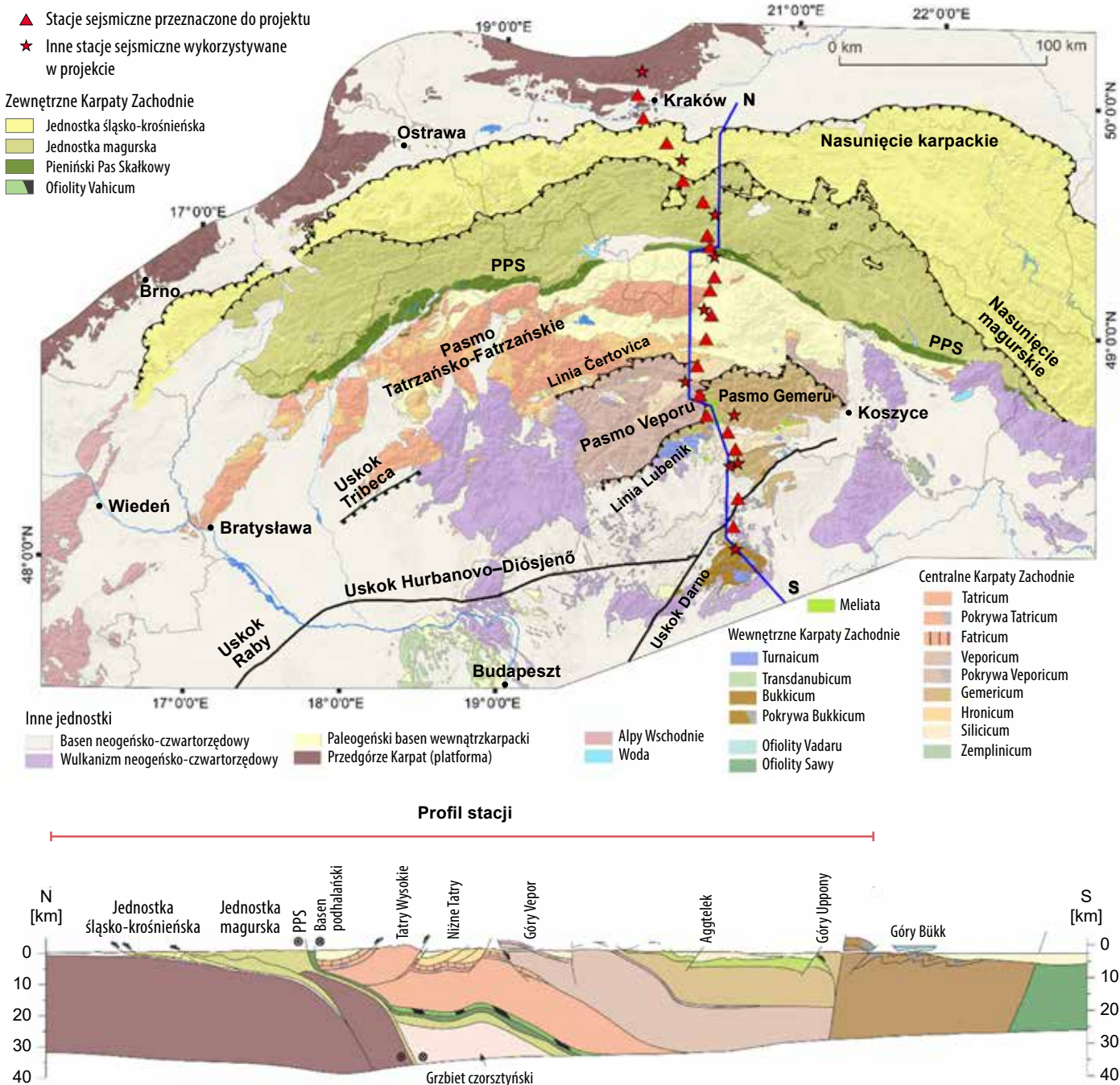
Żeby poznać wewnętrzną strukturę PPS oraz możliwe pozostałości grzbietu czorsztyńskiego, przeprowadzono badania za pomocą pasywnych metod sejsmicznych. W przeciwieństwie do metod aktywnych, w których sztuczne źródła (np. wybuchy, wibracje)

generują fale sejsmiczne, eksperymenty pasywne polegają na wykrywaniu naturalnych fal sejsmicznych generowanych przez trzęsienia ziemi z całego świata.

Pierwszym krokiem eksperymentu było rozstawienie stacji sejsmicznych wzdłuż profilu od Krakowa po Miskolc na Węgrzech. Łącznie uruchomiono 18 stacji sejsmicznych, z czego 12 dostarczył GFZ Poczdam, a sześć Uniwersytet Friedricha Schillera w Jenie w Niemczech. Stacje te zostały rozmieszczone podczas prac terenowych w maju 2023 roku. Ich lokalizacja została starannie dobrana, by zminimalizować szumy wywołane przez człowieka i zapewnić niezawodność zbierania danych – zostały umieszczone w spokojnych obszarach, często w nieużywanych budynkach zapewniających jednocześnie dostęp do energii elektrycznej i zasięg sieci komórkowej. Stacje sejsmiczne nieustannie monitorują wszelkie drgania gruntu, w tym trzęsienia ziemi. Rejestrowane dane są przechowywane na dyskach SSD lub kartach SD, a także przesyłane na serwer online znajdujący się w Jenie. Zebrane dane są wykorzystywane do tworzenia tzw. funkcji odbiorczych (ang. *receiver functions*), które

LEGENDA

- „Europejskie” Moho
- „ALCAPA” Moho
- Obserwowane struktury
- „Europejska” środkowa/dolna skorupa
- „Europejska” dolna skorupa
- Dolna skorupa ALCAPA
- „Europejska” górna skorupa
- Pasma nasunięciowo-fałdowe Karpat Zewnętrznych
- Jednostka magurska
- Jednostki płaszczowinowe ALCAPA
- Uskok Darno



są matematycznymi przekształceniami zarejestrowanych fal sejsmicznych. Funkcje te wizualizują struktury geologiczne pod powierzchnią, analizując, w jaki sposób napływające fale sejsmiczne oddziałują z różnymi warstwami skalnymi powodującymi ich odbicia, załamania i konwersje.

Budowanie modelu podpowierzchniowego

Na podstawie danych zebranych w ciągu ostatniego roku przetworzone funkcje odbiorcze zostały wy-

korzystane do wygenerowania wglębnych obrazów strukturalnych za pomocą metody tzw. wspólnego punktu konwersji (ang. *common conversion point*). Obrazy te tworzy się przez zsumowanie wszystkich informacji strukturalnych z funkcji odbiorczych dla wszystkich zarejestrowanych trzęsień ziemi w każdej ze stacji, konstruując wspólny model. Ta metoda oferuje szczegółowy obraz budowy wglębnej, ponieważ ukazuje zmienności w prędkościach fal sejsmicznych, które odpowiadają różnym warstwom geologicznym. Otrzymane wyniki są konfrontowane z istniejącą literaturą geofizyczną i geologiczną, by zbudować spójny model regionalny.

Obrazowanie sejsmiczne pozwoliło rozpoznać wiele interesujących cech budowy wgłębnej Karpat Zachodnich:

1. Granica między skorupą ziemską a płaszczem została zidentyfikowana na głębokości około 30 km na większości obszaru badań. Jednak zauważono znaczące pogrubienie skorupy o 10 km w odległości około 100 km na południe od Krakowa, po czym powraca ona do swojej typowej grubości na obszarze Słowacji i Węgier. Widać również nieciągłość w płaszczu nachyloną na południe pod Karpatami Centralnymi.
2. W podłożu płaszczowin Karpat Zewnętrznych rozpoznano kilka głębokich nieciągłości sejsmicznych nachylonych na południe. Struktury te są widoczne na odcinku między nasunięciem frontu Karpat a PPS.
3. Serie skalne tworzące PPS są prawie pionowe bezpośrednio poniżej powierzchni terenu, ale głębiej ich nachylenie maleje i PPS zanurza się na południe, pod Tatry i Karpaty Centralne.

Chociaż nasze wyniki są wstępne i eksperyment będzie kontynuowany przez kolejne dwa lata, jego dotychczasowe odkrycia można podsumować następująco.

- Po pierwsze, zaburzenie granicy między skorupą a płaszczem ziemskim na odcinku od 100 do 140 km na południe od Krakowa reprezentuje szew tektoniczny między płytą europejską na północy a mikro płytą ALCAPA na południu.

Płytę europejską pograżającą się stopniowo na południe w płaszczu można obserwować pod Karpatami Centralnymi.

- Po drugie, deformacja związana z nasunięciem Zachodnich Karpat Zewnętrznych nie jest ograniczona jedynie do jednostek osadowych, jak wcześniej sądzono. W podłożu pod płaszczowinami osadowymi Karpat Zewnętrznych istnieją struktury, przypuszczalnie nasunięcia, penetrujące głębokie podłoże płyty europejskiej. Podobna sytuacja została opisana w podłożu basenu wiedeńskiego w rejonie styku Karpat i Alp.
- Po trzecie, PPS jest niemal pionowy jedynie do głębokości około 15 km. Poniżej jego nachylenie maleje i PPS może łączyć się na południu z nasunięciem w podłożu Karpat Centralnych.

Na koniec, środkowa i dolna skorupa bloku ALCAPA jest na północy wkliniwana między górną i dolną skorupę płyty europejskiej. Nie zaobserwowano pozostałości grzbietu czorsztyńskiego na styku między obiema płytami.

Przeprowadzone badania dają nowe spojrzenie na złożoną geologię Karpat Zachodnich, kwestionując wcześniejsze teorie i zapewniając bardziej szczegółowe zrozumienie tektonicznej historii regionu. W miarę jak eksperyment sejsmiczny będzie kontynuowany w kolejnych latach, dalsze dane pomogą doprecyzować model tektoniczny i poznać więcej informacji na temat głębokich struktur, które ukształtowały ten fascynujący fragment Europy. ■



Lokalizacja i konfiguracja stacji sejsmicznych:
A) Lokalizację stacji.
B) Stacja w miejscu po rozmieszczeniu.
C) Części stacji, takie jak digitizer i router.
D) Czujnik

**dr Witold Zawadzki**

Pracuje w Zakładzie Fotoniki w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego. Zajmuje się plazmą i ultraszybką spektroskopią laserową.

W laboratorium, jak sam mówi, „strzela z lasera w plazmę”.

Jego zainteresowania badawcze obejmują optykę atomową, fotonikę i technikę laserową.

Angażuje się również w popularyzację fizyki – wykłady

popularnonaukowe, warsztaty przyrodnicze, konkursy dla uczniów,

np. Ogólnopolski Konkurs Fizyczny

„Lwiątko”,

Ogólnopolski Konkurs Nauk Przyrodniczych

„Świetlik”.

Jest współredaktorem czasopism „Foton”

i „Neutrino”

oraz aktywnym członkiem

Polskiego Towarzystwa Fizycznego.

witold.zawadzki@uj.edu.pl

PIERWSZY, A NIE CZWARTY

Gdy podczas wieczornego spaceru podziwiamy nieboskłon usiany tysiącami gwiazd, nie zdajemy sobie sprawy z tego, że te jasne punkciki to w rzeczywistości przeogromne kule materii znajdujące się w stanie plazmy.

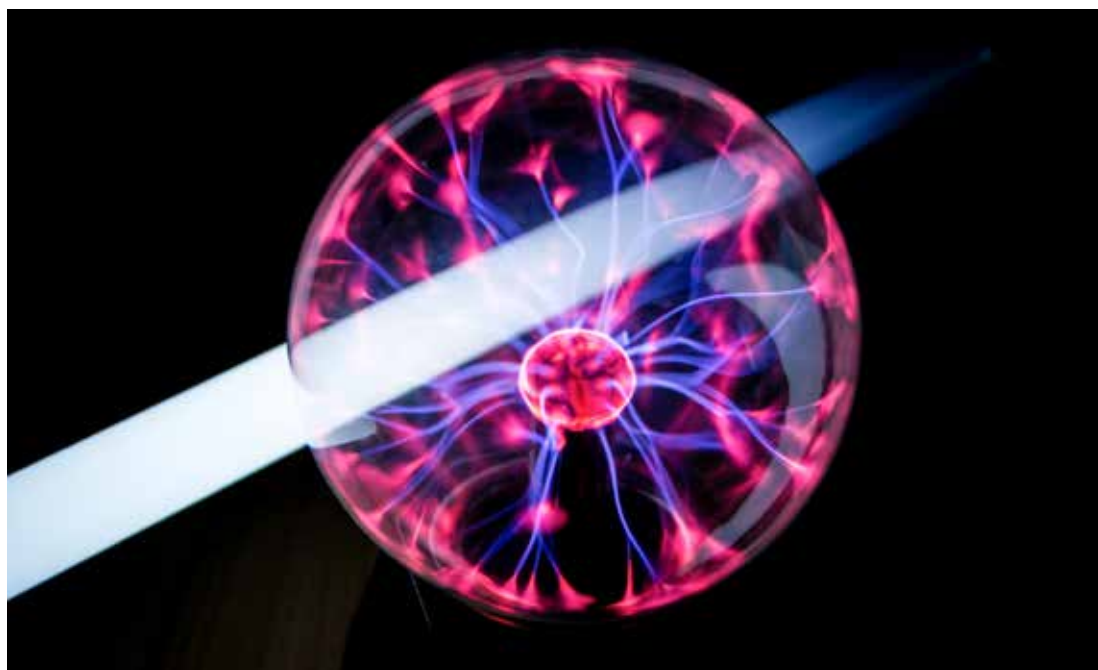
Witold Zawadzki

Zakład Fotoniki, Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

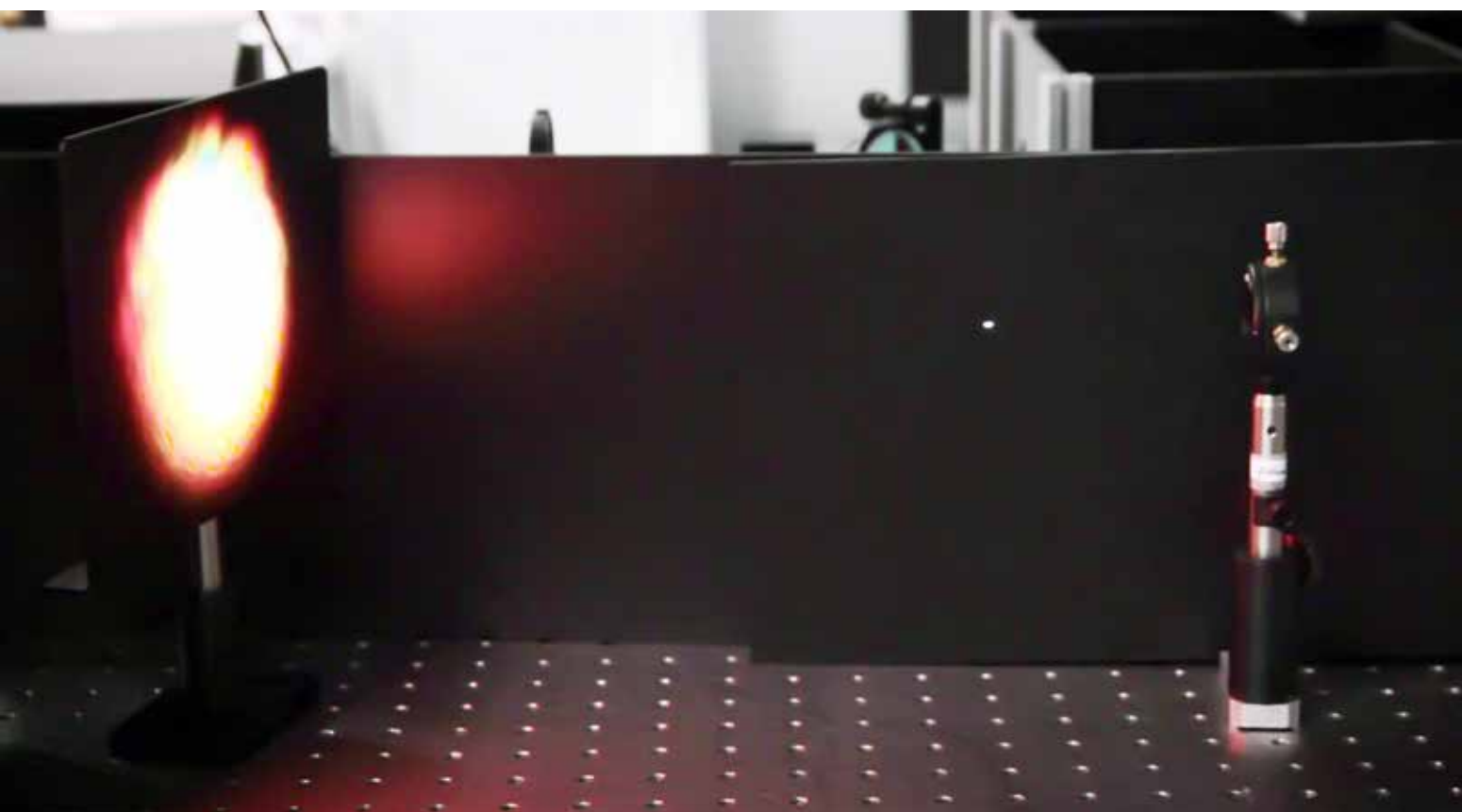
Plazma jest nazywana czwartym stanem skupienia materii, ponieważ istotnie różni się od trzech pozostałych: ciała stałego, cieczy i gazu. Plazma składa się z naładowanych cząstek, takich

jak jony i swobodne elektrony. Elektrony oddzielają się od atomów, gdy gaz jest podgrzewany do wysokich temperatur lub poddany działaniu silnego pola elektrycznego. To właśnie obecność naładowanych cząstek sprawia, że plazma ma inne właściwości niż gaz. W odróżnieniu od zwykłego gazu plazma przewodzi prąd elektryczny i jest też bardziej reaktywna chemicznie. Z powodu tych unikatowych cech plazma jest klasyfikowana jako odrębny stan materii.

Niektórzy jednak nazywają plazmę pierwszym stanem materii. Argumentem jest fakt, że zdecydowana większość dostępnej obserwacji części Wszechświa-



Kula plazmowa jest przykładem wyładowania elektrycznego przy niskim ciśnieniu gazu. Prąd zmienny o wysokiej częstotliwości przepływa przez gaz, jonizując go. Powstała plazma ma kształt niteczek rozchodzących się promieniście od centralnej elektrody. Umieszczona w pobliżu kuli jarzeniówka świeci się – pole elektryczne kuli jonizuje również gaz wewnątrz rury jarzeniówki



ta (szacuje się, że 99 proc.) to materia w stanie plazmy. Ponadto to właśnie plazma stanowiła materię bezpośrednio po Wielkim Wybuchu, uznawanym za początek istnienia Wszechświata.

To tylko błysk

Mimo że plazma stanowi większość widzialnej materii we Wszechświecie, to na Ziemi występuje stosunkowo rzadko – np. w postaci płomienia, błyskawicy czy iskry elektrycznej. Ludzie nauczyli się korzystać z własności plazmy zarówno tej wytworzonej przez naturę, jak i generowanej przez specjalnie skonstruowane urządzenia. Plazma odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu procesów zachodzących w gwiazdach, w tym w naszym Słońcu, znajduje też szerokie zastosowanie w technologii i nauce. Badania nad plazmą są prowadzone w odniesieniu do różnych dziedzin nauki, duże znaczenie mają nauki medyczne, bada się zastosowanie plazmy w przypadku leczenia ran, dezynfekcji przy sterylizacji narzędzi. Ciągłe rozwijają się zastosowanie plazmy w produkcji półprzewodników, nanotechnologii oraz inżynierii powierzchni. Największe nadzieje są pokładane w pracach nad kontrolą plazmy w kontekście fuzji jądrowej, do produkcji czystej energii. Projekty takie jak Międzynarodowy Eksperymentalny Reaktor Termonuklearny ITER (ang. *International Thermonuclear Experimental Reactor*) badają, jak

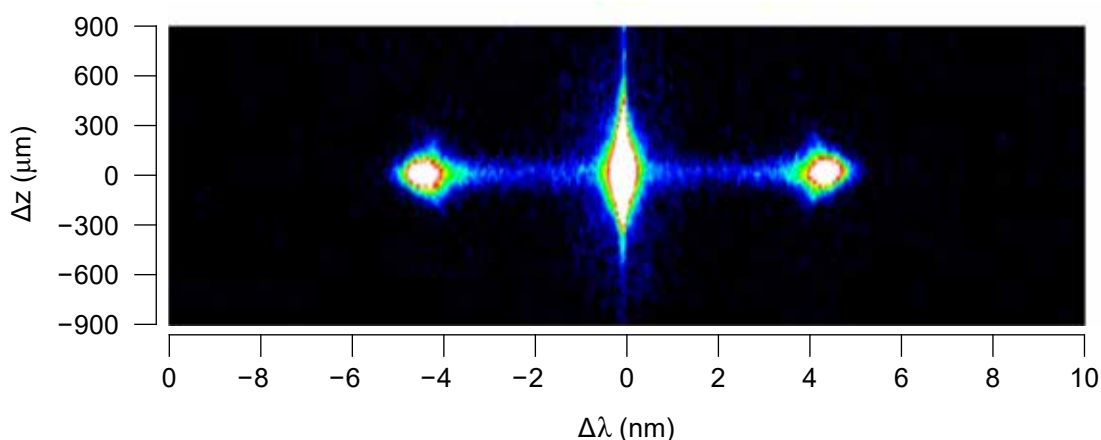
utrzymać stabilną plazmę w procesie fuzji. W pracach tych uczestniczą także Polacy, np. fizycy z Uniwersytetu Opolskiego.

Polscy naukowcy nie tylko biorą czynny udział w badaniach plazmy w zagranicznych ośrodkach, lecz także sami prowadzą prace w naszych krajowych instytutach i na uczelniach. Głównym ośrodkiem badań nad plazmą w Polsce jest Instytut Fizyki Plazmy i Laserowej Mikrosyntezy w Warszawie. IFPiLM specjalizuje się w badaniach związanych z syntezą termojądrową, fizyką plazmy oraz technologiami laserowymi. Z kolei w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku prowadzi się badania nad zastosowaniami plazmy w fizyce jądrowej i technologiach związanych z energetyką termojądrową. Fizycy z Uniwersytetu Warszawskiego i Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu zajmują się m.in. astrofizyką plazmy. Naukowcy Wydziału Fizyki oraz Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej pracują nad wykorzystaniem technologii plazmowych w przemyśle i energetyce. Plazma może być również wytwarzana w akceleratorach cząstek – zarówno ten temat, jak i zagadnienie plazmy w kontekście fizyki jądrowej są realizowane w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

Na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie prowadzi się badania plazmy w dziedzinie fizyki

Zdjęcie plazmy laserowej (mała, jasna plamka w centrum zdjęcia). Wiązka promieniowania laserowego z zakresu bliskiej podczerwieni pada od prawej strony na soczewkę skupiającą. Plazma powstaje w ognisku soczewki. Po lewej stronie widoczne światło tzw. superkontinuum – promieniowanie laserowe, przechodząc przez bardzo gorący obszar plazmy, oddziałuje z nim, przez co zmniejszeniu ulega długość fali promieniowania. Biała poświata świadczy o generacji światła w pełnym zakresie widma widzialnego. Eksperyment wykonany za pomocą lasera generującego impulsy o czasie trwania 30 femtosekund ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)

Obraz rozpraszania Thomsona w plazmie łukowej zarejestrowany przez szybką kamerę ICCD sprzężoną ze spektrometrem. Kierunek poziomy odpowiada zmianie długości fali $\Delta\lambda$ światła rozproszonego względem długości fali lasera (532 nm), kierunek pionowy to wymiar przestrzenny, wzdłuż próbującej wiązki laserowej. Różne kolory odpowiadają różnym intensywnościom zarejestrowanego światła (kolor biały odpowiada największej intensywności). Jasna, pionowa linia na środku odpowiada rozproszonemu światłu wiązki lasera o niezmienną długości fali. Jaśniejszy, poziomy pas to światło rozproszone o długości fali zmienionej w wyniku zjawiska Dopplera. Dwa skrajne białe obszary odpowiadają dużemu natężeniu światła rozproszonego związanego z kolektywnym ruchem elektronów swobodnych w plazmie.



teoretycznej i eksperymentalnej, astrofizyki, syntezy jądrowej i oddziaływań wysokoenergetycznych. W Instytucie Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego, a konkretnie w Zakładzie Fotoniki, prowadzi się badania pozwalające lepiej poznać i zrozumieć procesy zachodzące w plazmie oraz opracować zastosowania plazmy w technologiach.

Plazmę można wytworzyć, podgrzewając materię do wysokiej temperatury. Można tego dokonać za pomocą lasera – wiązka światła z lasera jest zogniskowana na powierzchni próbki lub w gazie. Energia wiązki laserowej jest absorbowana przez elektrony w materiale, które w konsekwencji wybijają atomy z powierzchni i tworzą chmurę zjonizowanego gazu. Plazma taka emituje światło, którego widmo zależy m.in. od składu próbki. Analiza widma świecącej plazmy pozwala na identyfikację materiału badanej próbki. Laserowo wzbudzana spektroskopia emisyjna LIBS (ang. *laser-induced breakdown spectroscopy*) jest uniwersalną techniką umożliwiającą analizę składu chemicznego ciał stałych, cieczy i gazów. Jedną z głównych zalet tej metody jest to, że „odparowaniu” ulega tylko niewielka ilość materiału. Powstały w próbce krater ma mikroskopijne rozmiary (rzędu dziesiątek mikrometrów), dzięki czemu można uznać tę technikę za nieniszczącą. Metoda LIBS została z sukcesem zastosowana przez NASA w łaziku Curiosity do analizy składu chemicznego skał na Marsie. Niewątpliwie zalety metody LIBS pozwalają stosować ją również na Ziemi – np. w działaniach związanych z badaniem autentyczności dzieł sztuki.

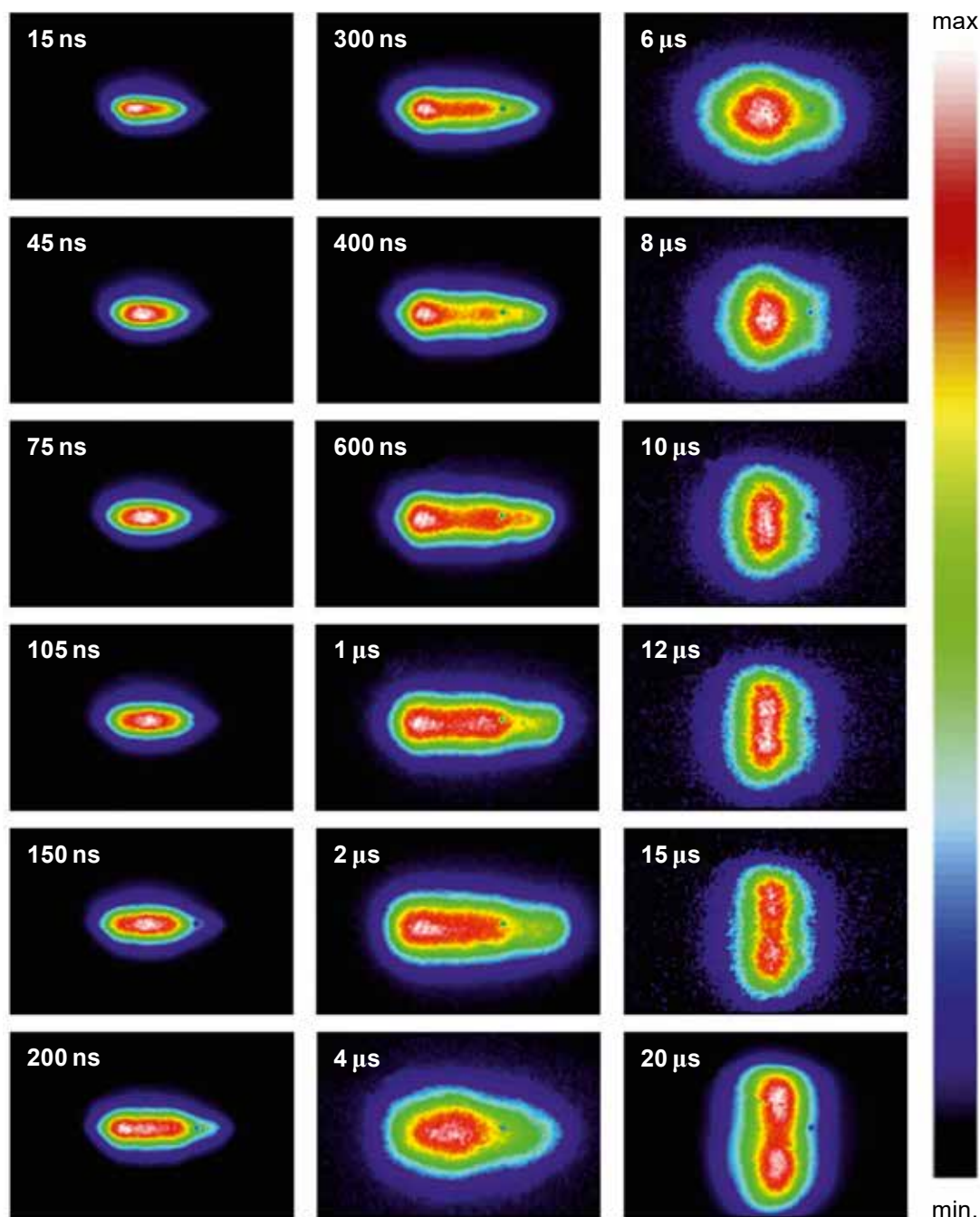
Laserem w plazmę

Badania prowadzone przez grupę z Zakładu Fotoniki UJ mają na celu poznanie podstawowych właściwości plazmy generowanej laserowo. Ich znajomość jest istotna dla jej późniejszego właściwego zastosowania. Przeprowadza się eksperymenty pozwalające na jednoczesne wykorzystanie wielu komplementarnych metod diagnostycznych plazmy, czyli ustalenia

parametrów plazmy, takich jak temperatura oraz koncentracja swobodnych elektronów. Stosuje się zarówno metody spektroskopowe, jak i aktywne metody rozproszeniowe. Te drugie polegają na próbkowaniu plazmy impulsem laserowym i analizie widma rozproszonego promieniowania.

Często stosowaną metodą wyznaczenia parametrów plazmy jest tzw. rozpraszanie Thomsona. Jest to technika oparta na rozpraszaniu światła laserowego na elektronach plazmy. W plazmę kieruje się skupioną wiązkę światła z drugiego lasera. Fale świetlne (a ściślej mówiąc – pole elektryczne fali) wprawiają swobodne elektrony w szybkie oscylacje, w wyniku czego elektrony emitują dookoła siebie promieniowanie. Można to porównać do wytwarzania fal radiowych przez prąd płynący tam i z powrotem w antenie nadającej audycję radiową. Jednak z powodu bardzo szybkiego ruchu elektronów w plazmie i zjawiska Dopplera (tego samego, dzięki któremu zmienia się wysokość tonu słyszanego, gdy przejeżdża koło nas samochód), obserwowane promieniowanie rozproszone ma inną długość fali niż światło lasera. Analiza widma promieniowania rozproszonego pozwala na wyznaczenie rozkładu prędkości elektronów, co z kolei umożliwia wyznaczenie temperatury plazmy. Poważnym problemem techniki rozpraszania Thomsona jest zaburzenie stanu plazmy impulsem sondującym. Żeby światło rozproszone miało natężenie wystarczające do zarejestrowania, impuls światła musi mieć wystarczająco dużą energię, a to skutkuje dodatkowym podgrzewaniem plazmy. Żeby otrzymać wiarygodny wynik pomiaru temperatury niezaburzonej plazmy, należy zastosować pewne techniki, które wymagają znajomości jej zachowania się oraz stałych fizycznych, charakteryzujących zachodzące procesy.

Należy mieć na uwadze, że plazma wytwarzana impulsami światła nie jest tworem statycznym. Powstaje podczas impulsu lasera (o czasie trwania rzędu od femtosekund do nanosekund). Jeszcze przez sam impuls laserowy może być ona dodatkowo podgrzewana – jest do niej dostarczana energia. Sama



Sekwencja zarejestrowanego świecenia plazmy argonowej w zależności od opóźnienia względem impulsu wytwarzającego plazmę. Każda klatka odpowiada wymiarom 3 na 2 mm. Plazma była wytwarzana impulsami światła o czasie trwania około 8 ns, a gęstość energii wynosiła 2 kJ/cm^2 . Kolory oznaczają różne poziomy intensywności promieniowania plazmy (skala względna po prawej stronie) (Mendys et al., 2011)

plazma emituje promieniowanie – „oddaje energię”. Plazma ewoluuje, i to bardzo szybko, bo w skali nanosekund. Problem rozwiązania bilansu energii jest dość skomplikowany. Plazma nie jest przecież jednorodną przestrzenią – w środku „obłoczka” ma najwyższą temperaturę, im dalej od środka, tym temperatura jest niższa. Z pomocą przychodzą obliczenia numeryczne i tworzone różne modele uwzględniające takie zjawiska, jak przepływ ciepła, emisja i pochłanianie promieniowania, oddziaływanie elektronów i jonów, ciśnienie, pole elektryczne i magnetyczne oraz inne procesy fizyczne, zachodzące w plazmie.

Badania plazmy wytwarzanej laserem to fascynujący obszar fizyki wymagający połączenia zaawansowanych technologii laserowych, precyzyjnych metod diagnostycznych oraz modelowania numerycznego. Pozwalają one na dokładne monitorowanie procesu powstawania, ewolucji i rozprzestrzeniania się plazmy. Poznanie zachodzących zjawisk i procesów jest kluczowe w kontekście takich technologii jak synteza termojądrowa czy obróbka materiałów. Jednym z kierunków prac prowadzonych na Uniwersytecie Jagiellońskim jest wdrożenie metody LIBS do badań nad dziełami sztuki, które wymagają zastosowania stosunkowo nieinwazyjnej metody. ■

Further reading:

Celiński Z., *Plazma*, seria Biblioteka Problemów, 1980.

Bolshakov A., „LIBS At Work On Mars,” www.appliedspectra.com/mars-lib.html

Mendys A., Dzierżęga K., Grabiec M., Pellerin S., Pokrzywka B., Travaillé G., Bousquet B., *Investigations of laser-induced plasma in argon by Thomson scattering*, „Spectrochimica Acta Part B” 2011.

**dr Rafał Sikora**

Geolog, prowadzi badania w dziedzinie geologii regionalnej, geozagrożeń i ewolucji masywów skalnych. Współorganizator i uczestnik kilku ekspedycji naukowych do Mongolii. Łączy warsztat geologii strukturalnej z geomorfologią, zainteresowania naukowe kieruje również ku zdarzeniom geologicznym i problemom zmian klimatu. Popularyzator geologii. Wiceprezes Polskiego Towarzystwa Geologicznego.
rafal.sikora@pgi.gov.pl

M. SZYMUT

ŻYCIE I ŚMIERĆ

Dno wyschniętego jeziora. Badania geologiczne pozwolą odpowiedzieć na zagadki dotyczące warunków środowiskowych, w których funkcjonowały wczesne społeczności łowiecko-zbierackie

**prof. dr hab. Mirosław Masojć**

Archeolog, od ponad 20 lat uczestniczy lub kieruje międzynarodowymi projektami badawczymi na terenie Polski, Egiptu, Sudanu, Wietnamu i Mongolii. We wrześniu 2023 roku w związku z realizowanym projektem badawczym otrzymał od mongolskiego ministra kultury odznaczenie „Zasłużony dla kultury Mongolii”.
miroslaw.masojc@uwr.edu.pl

Wpływ zmian klimatycznych na funkcjonowanie paleolitycznych społeczności łowiecko-zbierackich i współczesnych grup koczowniczych na pograniczu pustyni Gobi i Ałtaju Gobijskiego.

Rafał Sikora

Zakład Geologii Regionalnej i Złożowej
Państwowy Instytut Geologiczny
– Państwowy Instytut Badawczy w Warszawie

Grzegorz Michalec

Instytut Archeologii
Uniwersytet Wrocławski

Mirosław Masojć

Zakład Archeologii Pozaeuropejskiej
Instytut Archeologii
Uniwersytet Wrocławski

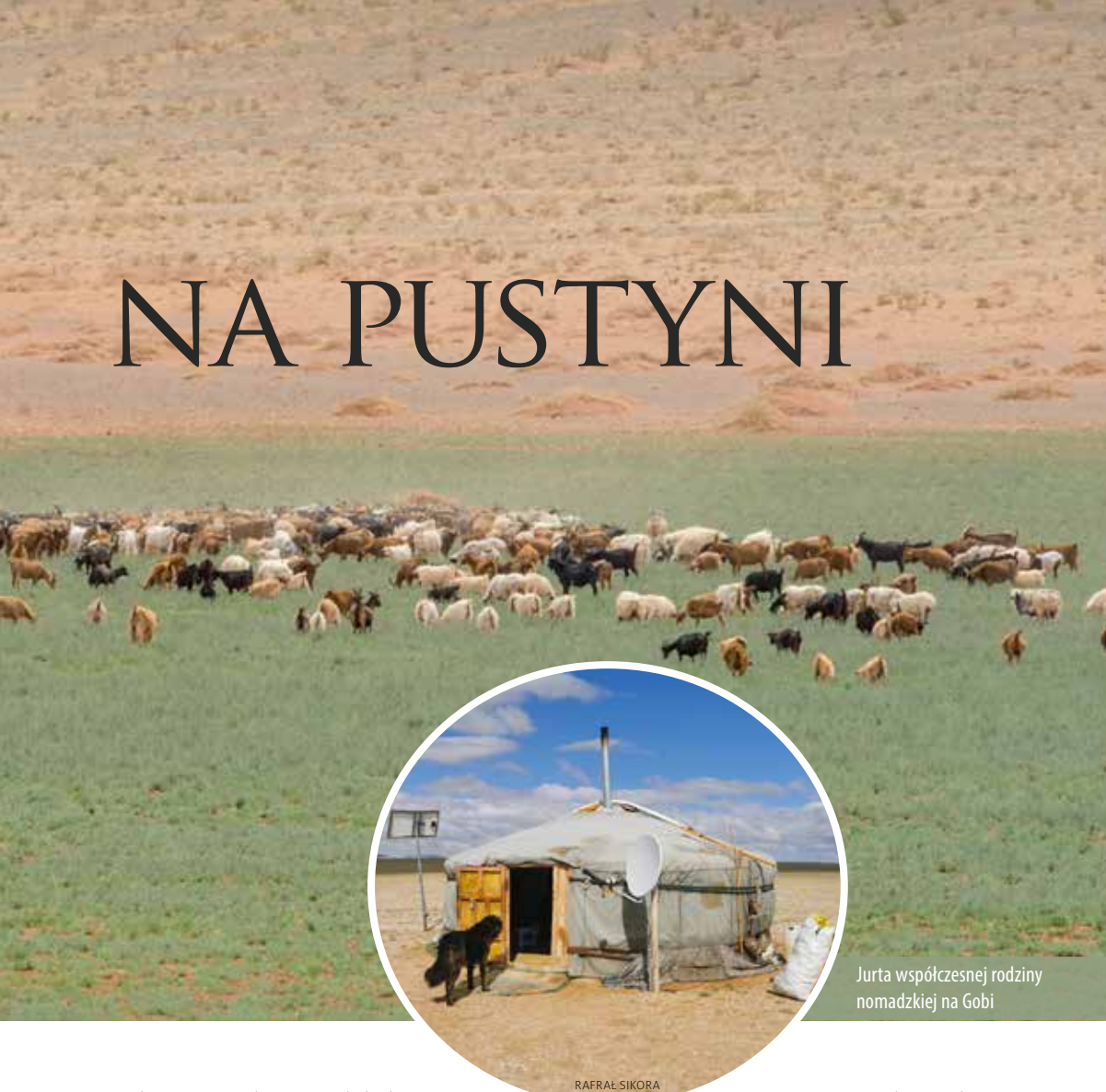
Byamba Gunchinsuren

Dział Epoki Kamienia
Instytut Archeologii, Mongolska Akademia Nauk

Tereny Azji Środkowej, w tym Mongolia, należą do wyjątkowo ciekawych obszarów badawczych ze względu na ślady z plejstocenu i wczesnego holocenu pozostawione przez społeczności

łowiecko-zbierackie. Ich członkowie zamieszkiwali dynamicznie zmieniające się środowisko kontrolowane przez krótko- lub długookresowe zmiany klimatu, a ich adaptacja była uzależniona od dostępności pożywienia i surowców do wyrobu narzędzi. Aktywność ludzka w obszarach pustynno-stepowych i pustyn-

NA PUSTYNI



Jurta współczesnej rodziny
nomadzkiej na Gobi

RAFRAŁ SIKORA

nych w szczególny sposób była i jest skoncentrowana wokół zbiorników wodnych, co prowadzi do wykształcenia specyficznych technik przetrwania i często warunkuje mobilność społeczności. Z tego powodu dla wnioskowania archeologicznego istotne jest jak najwierniejsze odtworzenie warunków paleośrodowiskowych w ramach badań geologicznych (sedymologicznych i geochemicznych, a niekiedy nawet tektonicznych).

Obszar mongolskiego plateau, w szczególności na pograniczu pustyni Gobi i Altaju Gobijskiego, reprezentujący tzw. krajobraz marginalny, jest wrażliwy na intensyfikację współczesnych zmian klimatycznych. Od lat 50. XX wieku jest odnotowywane znaczne pustynnienie terenów i kurczenie się zasięgów jezior. Szczególnie dotyczą one Doliny Jezior Gobijskich i rejonów na południe od Altaju Gobijskiego. To z kolei ma wpływ na funkcjonowanie współczesnych grup koczowniczych, których byt jest oparty na wypasie bydła.

Ciągłe zmiany

Badania polsko-mongolskiej ekspedycji archeologicznej są prowadzone od 2021 roku w południowej części górskiego masywu Arts Bogd (wschodnia część Altaju Gobijskiego) i północno-wschodnim obrzeżeniu kotliny Shereegeen Gashoon.

Najnowsze dane wskazują, że na tym obszarze (badaniami objęto teren o powierzchni 600 km²) w plejstocenie i wczesnym holoenie mogło istnieć nawet kilkanaście różnej wielkości zbiorników wodnych. Ich występowanie wynikało z uwarunkowań geologicznych i geomorfologicznych wpływających na rozwój sieci dolin i niecek deflacyjnych (obniżen terenu utworzonych w wyniku długotrwałego wywiewania materiału skalnego) wypełnianych w okresach wilgotnych wodą. Jedynie część zbiorników była przepływowa, w większości były one bezodpływowe. Na podstawie datowań osadów metodą OSL (ang. *optical stimulated luminescence*) udało się potwierdzić istnienie jezior już około 140 tys. lat temu, a więc przed nastaniem ostatniej epoki lodowcowej.

Badania wskazują również, że współcześnie panujący, silnie kontynentalny, suchy (aridowy) klimat nie jest czymś wyjątkowym dla tego obszaru. W zapisie kopalnym paleojezior zachowały się zmiany poziomu i zasięgu lustra wody powodowane globalnymi zmianami klimatycznymi lub lokalnymi czynnikami pogodowymi. Z dotychczasowych analiz wiadomo, że część z nich miała charakter płytkich, okresowo wysychających zbiorników typu playa. W zapisie kopalnym występują utwory eoliczne, które zasypywały wyschnięte jeziora. Podobny proces jest obserwowany współcześnie, kiedy na teren zbiorników wkraczają pokrywy piaszczyste i niskie wydmy, tworząc w ten



mgr Grzegorz Michalec

Archeolog, doktorant w Instytucie Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego. Badacz i uczestnik ekspedycji naukowych dotyczących archeologii północnej Afryki (Sudan, Egiptu) oraz Mongolii i Wietnamu. Uczestnik licznych programów stypendialnych oraz konferencji naukowych. Popularyzator archeologii.
grzegorz.michalec@uwr.edu.pl



prof. Byamba Gunchinsuren

Archeolog, kierownik Działu Epoki Kamienia w Instytucie Archeologii Mongolskiej Akademii Nauk. Współkierownik kilku międzynarodowych projektów dotyczących paleolitu w Mongolii. W badaniach skupia się na litycznych metodach produkcji, chronologii i datowaniu stanowisk z okresu paleolitu środkowego i górnego, a także na strategiach adaptacyjnych społeczności plejstoceńskich z Azji Środkowej.
bgunchinsuren@yahoo.com

Nagłe burze piaskowe
potrafią zasłonić
pustynny krajobraz



RAFAŁ SIKORA (7)

Fot. 1
Suchy, kontynentalny klimat
sprzyja zachowaniu
szczątków kości oraz
zabytków archeologicznych

Fot. 2
Współczesna kość ssaka
na tle tzw. Gobi pavement
– powierzchni pokrytej
brukiem deflacyjnym

Fot. 3
Śmierć na pustyni
jest jej nieodzownym
elementem

sposób pagórki fitogeniczne (ang. *hummocky dunes*). W okresach wilgotniejszych (związanych m.in. z nasileniem letnich monsunów azjatyckich) w wyniku intensywnego odprowadzania wód opadowych z pobliskiego masywu górskiego zmieniał się charakter osadów. W zapisie kopalnym pojawiają się osady okresowych paleorzek, które przenosząc materiał, zasypywały płytkie zbiorniki stożkami napływowymi.

Powyższe czynniki wpływały na zmiany linii brzegowej, a przez to na lokalizację ludzkich siedlisk. Ukazują to liczne, udokumentowane stanowiska archeologiczne z górnego paleolitu związane z dłuższą lub krótszą obecnością społeczności na tym obszarze. Grupy osadnicze w tym rejonie umiejętnie korzystały

z dostępnych surowców do wyrobu narzędzi. W tym celu wykorzystywano skały krzemionkowe (czerty, jaspisy, chalcedon), bazalt czy soczewy kwarcytowe wypracowane z wychodni fyllitów. Co więcej, usytuowanie kamiennych artefaktów poza obszarem ich pozyskania i miejscami obróbki pozwoliły na stwierdzenie dużej mobilności ówczesnych grup ludzkich mimo dość skomplikowanych warunków topograficznych. Narzędzia znajdowano w odległości do blisko 36 km od potencjalnego źródła pozyskania surowców. Odkryte liczne stanowiska wraz ze zróżnicowanymi zabytkami potwierdzają, że w mezolicie i neolicie panowały dogodne warunki bytowe związane z dostępem do wody i surowców.



RAFAŁ SIKORA (7)

Optimum klimatyczne

Duża zmienność lateralna osadów jeziornych, fluwialnych i eolicznych w obrębie zbiorników nie pozwala oszacować okresów suszy. Na niektórych stanowiskach położonych w obrębie zbiorników zaznacza się ich sezonowość. Niektóre zabytki były i są wrażliwe na redepozycję spowodowaną m.in. nasileniem procesów fluwialnych lub eolicznych, a więc zmian środowiskowych. Szczyt obecności ludzkiej w pobliżu jezior przypada na wczesny holocen (okres ten rozpoczął się około 11,7 tys. lat temu). Wtedy też nastąpił wzrost wilgotności klimatu prowadzący do podniesienia poziomu wód w jeziorach. Z kolei znane z li-

teratury dane wskazują na istnienie we wschodniej części pustyni Gobi wilgotnego i ciepłego klimatu jeszcze w środkowych holocenie. Aktywność wczesnych ludzi w tym rejonie koreluje się więc z tzw. holocেনским optimum klimatycznym. Według różnych źródeł na terenie Mongolii trwało ono między 8,5 a 6,0 tys. lat temu, a na pustyniach w północno-wschodnich Chinach między 12 a 6,6 tys. lat temu. Dokonane przez chińskich i niemieckich naukowców korelacje czynników klimatycznych dla Gobi ukazały rozpoczynające się w późnym holocenie (ok. 4 tys. lat temu) osuszanie klimatu, spadek poziomu wód w jeziorach, wystąpienie procesów ewaporacji i nasilenie procesów eolicznych.

Współcześnie obserwuje się znaczne (nawet o 30 proc.) zmniejszenie powierzchni jezior w obrębie mongolskiego plateau. W ciągu ostatnich 50 lat proces jeszcze bardziej przyspieszył i część zbiorników całkowicie znikła. Tereny zamieszkiwane niegdyś przez grupy łowiecko-zbierackie w epoce brązu (około 3,4 tys. lat temu) zostały opanowane przez ludy koczownicze, które oparły swój byt na wypasie bydła. Dlatego pustynnienie tego obszaru jest niekorzystne dla funkcjonowania grup pasterskich. Niesprzyjające są również towarzyszące mu procesy ewaporacji soli i gipsów powodujące coraz słabszą roślinność i tak już skąpej roślinności stepowo-pustynnej.

Mimo zmian kulturowo-społecznych woda i czynniki klimatyczne nadal odgrywają kluczową rolę w obecności człowieka na tych terenach. Ratunkiem dla współczesnych pasterzy-koczowników są studnie głębinowe umożliwiające pojenie zwierząt. Warto zauważyć, że równoległym zagrożeniem dla kultury koczowniczej jest postępująca ewolucja społeczno-ekonomiczna prowadząca do odpływu ludności do ośrodków miejskich. Ten czynnik wraz z niekorzystnymi zmianami klimatycznymi może ostatecznie doprowadzić do opuszczenia tych terenów przez ludzi i zaniku jego stałej obecności po kilkunastu tysiącach lat.

Artykuł powstał na podstawie badań prowadzonych w ramach grantu NCN 2019/33/B/HS3/01113 pn. „Wokół Tsakhiurtyn Hondi. Badania epoki kamienia pogranicza Altaju i Pustyni Gobi w Mongolii” pod kierunkiem prof. Mirosława Masojcicia. Oprócz autorów artykułu zespół badawczy tworzą naukowcy z Zakładu Archeologii Pozaeuropejskiej z Instytutu Archeologii UW (prof. Józef Szykułski, dr hab. Marta Osypińska), Instytutu Archeologii i Etnologii PAN w Poznaniu (dr Przemysław Bobrowski, dr Maciej Jórdeczka), Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB (prof. Antoni Wójcik), Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN (dr hab. Andrzej Gałaś), Instytutu Nauk Geologicznych UJ (dr hab. Patrycja Wójcik-Taboła), Muzeum Archeologicznego w Gdańsku (Marcin Szmit), Fundacji Scientia et Arte (mgr Patryk Muntowski), Poznańskiego Laboratorium Radiowęglowego (prof. Tomasz Goslar), Instytutu Geologii UAM w Poznaniu (prof. Mirosław Makohonienko, dr Dominik Pawłowski), Instytutu Archeologii i Etnologii Mongolskiej Akademii Nauk (dr Odsuren Davaakhuu, dr Bazangur Dashzeveg) oraz Narodowego Mongolskiego Uniwersytetu Edukacyjnego (dr Gankhuyag Odurev).

Fot. 4

Jaskinia w dolinie Khutul Usny Agui w masywie Arts Bogd. Udokumentowane przez polsko-mongolską ekspedycję miejsce bytowania wczesnych ludzi

Fot. 5

Koryto rzeki okresowej. Podczas suszy jest wypełniane utworami eolicznymi

Fot. 6

Pomocne w wypasie baktrianów są studnie głębinowe

Chcesz wiedzieć więcej?

Masojć M., Gunchinsuren B., Szykułski J. et al., *Palaeolakes, caves and settlement during the Pleistocene and Holocene around Tsakhiurtyn Hundi, Mongolia*, „Antiquity” 2024, vol. 98(399), doi: 10.15184/aaq.2024.44

Gunchinsuren B., *The development of prehistoric archaeology in Mongolia*, (w:) J. Habu, P.V. Lape, J.W. Olsen (red.), *Handbook of Southeast Asian Archaeology*, 2017.



BEARFOTOS/SHUTTERSTOCK.COM

Udomowione kanarki.
Widoczne karotenoidowe
(żółte i czerwone)
zabarwienie kolorowych piór

KOLOROWA PTASIA UKŁADANKA

Naukowcy cały czas szukają odpowiedzi na pytanie,
w jaki sposób i dlaczego u ptaków pojawiły się
kolorowe pióra często zdobione ornamentami.

Małgorzata Anna Gazda

Wydział Nauk Biologicznych
Uniwersytet Montrealski

Podobnie jak wygląd u ludzi tak ubarwienie u ptaków odgrywa kluczową rolę przy ich dobieraniu się w pary. Naukowo mówi się o tzw. doborze płciowym. U ptaków najczęściej samce mogą się poszczycić pięknymi, kolorowymi piórami, samice zazwyczaj mają brązowo-szare, niepozorne ubarwienie.

Ważny jest nie tylko sam kolor upierzenia, lecz także forma piór. Niektóre z nich tworzą okazałe ornamenty. Są to np. wyjątkowo długie ogony u rajszych ptaków. Na pierwszy rzut oka wydają się nierozsądnym dodatkiem, ponieważ mogą utrudniać ucieczkę przed drapieżnikiem, co w konsekwencji może spowodować śmierć. Jednak takie ogony robią duże wrażenie na samicach, co zwiększa szanse rozrodu i przekazania swoich genów kolejnym pokoleniom.

Pochodzenie ubarwienia

Pióra ptaków przyjmują wiele żywych kolorów. Ewolucja wypracowała dwa główne mechanizmy, które

tym rządzą: ubarwienie strukturalne i ubarwienie pigmentowe. Pierwsze z nich wynika z fizycznego oddziaływania światła ze strukturami w skali nano, które są obecne na powierzchni. Te niewidoczne gołym okiem chropowatości powodują rozpraszanie światła, a w rezultacie tworzą opalizująco-metaliczne kolory, np. różne odcienie niebieskiego. Takie widzimy m.in. u sikory modrej. Z kolei ubarwienie pigmentowe powstaje na skutek obecności barwników, czyli kolorowych związków chemicznych. Te w różny sposób pochłaniają i odbijają różne fale, które składają się na światło białe – te składowe można zaobserwować, podziwiając tęczę. Odbite fale światła wywołują w nas wrażenie barwy. Bardziej nasycone kolory mogą świadczyć o połączeniu mechanizmów strukturalnych i pigmentowych.

Ubarwienie ptaków jest wywoływane przez różnorodne barwniki. Zalicza się do nich turacyny (czerwony, zielony, niebieskozielony, czerwono-fioletowy), psittakofulwiny (czerwony, różowy, pomarańczowy, żółty), pterydyny (żółty, pomarańczowy). Jednak najbardziej rozpowszechnionymi barwnikami wśród wielu gatunków ptaków są melaniny i karotenoidy. Pierwsze z nich dają kolor czarny, szary i brązowy. Karotenoidy zaś – żółty, czerwony i pomarańczowy. Tych ostatnich w naturze opisano ponad 750 rodzajów. Jednak tylko niewielka ich część jest wykorzystywana przez ptaki, które nie potrafią ich samodzielnie syntetyzować w organizmie. Pozyskują je z pokarmu, którym są nasiona i owoce.

Ubarwienie piór oparte na karotenoidach jest powszechne u ptaków i występuje u prawie połowy (około 40 proc.) gatunków ptaków śpiewających (*Passeriformes*) i nielicznych (13 proc.) gatunków nieśpiewających. Wydaje się, że ewolucja upierzenia bazującego na tych barwnych związkach zachodziła wielokrotnie w sposób niezależny u współczesnych ptaków. Najwcześniejsze, obecnie znane pochodzenie tego rodzaju pigmentacji karotenoidowej piór sięga 56 mln lat wstecz, do przodka współczesnych ptaków śpiewających. Oprócz możliwości ubarwienia piór i tkanek (np. skóry i tłuszczu) karotenoidy biorą udział w wielu procesach biologicznych. Jednym z nich jest antyoksydacja, czyli oczyszczanie organizmu z niebezpiecznych cząsteczek zwanych wolnymi rodnikami, które mogą uszkodzić komórki. Biorą udział także w odpowiedzi immunologicznej i produkcji witaminy A. Ponadto – mimo że pigmentacja karotenoidowa jest zaangażowana w selekcję płciową i może sygnalizować, że dany osobnik nadaje się na partnera do rozrodu – z ich ilością organizm ptaka nie powinien przesadzać. Wysokie stężenia karotenoidów działają negatywnie. Potwierdzają to badania pokazujące wpływ barwników na stres wynikający z nadmiaru produkowanych wol-

nych rodników u pustulek i zmniejszenie wydajności lotu u amerykańskich szczygłów.

Genetyczno-biochemiczne puzzle

Od strony biochemicznej można spojrzeć na ubarwienie ptaków w różny sposób: pod kątem przetwarzania barwnych cząsteczek i odkładania ich w tkankach we własnym organizmie, regulacji ilości pigmentu i możliwości jego rozkładania oraz biochemicznych przemian prowadzących do przetwarzania jednego rodzaju pigmentu w drugi. Za każdy z przedstawionych procesów biochemicznych odpowiadają konkretne cząsteczki, których struktury są zakodowane w genach ukrytych w DNA komórki. Naukowcy starają się ułożyć te elementy w jedną układankę. Obecnie dla każdej z wyżej wymienionych przemian udało się dopasować odpowiedni „genetyczny puzzle”. Jeśli chodzi o możliwość odkładania pigmentu, gen odpowiedzialny za tę przemianę został zbadany u kanarków. Porównywano białe, nieposiadające takiej zdolności ptaki tego gatunku oraz barwne, które miały karotenoidowe ubarwienie. Naukowcy znaleźli gen odpowiedzialny za to zjawisko znany pod nazwą SCARB1. Innym genem, tym razem kontrolującym ilość odkładanych karotenoidów w tkankach, przez rozbijanie ich na drobniejsze cząsteczki, jest BCO2. Koduje on enzym, który rozkłada znany m.in. z marchewki β -karoten. Rola tego genu wiąże się także z dichromatyzmem płciowym ptaków, czyli wcześniej opisywaną różnicą ubarwienia oby płci. Przykładami takich widocznych różnic jest seryna europejska.



dr Małgorzata Anna Gazda

Pracuje na stanowisku adiunkty na Wydziale Nauk Biologicznych Uniwersytetu Montrealskiego. Jej badania łączą w sobie biologię ewolucyjną, genetykę, genomikę i ekspresję genów ptaków. Uzyskała doktorat w dziedzinie bioróżnorodności, genetyki i ewolucji na Uniwersytecie w Porto. Pasjonatka metabadań, dbałości o jakość naukowej dokumentacji fotograficznej i metadanych.
malgorzata.anna.gazda@umontreal.ca

Czyż czerwony – gatunek ptaka wykorzystany do stworzenia czerwonych kanarków



LUKE MCKENNA UK/SHUTTERSTOCK.COM



ALEX COOPER PHOTOGRAPHY/SHUTTERSTOCK.COM

Fot. 1

Sikora modra z widocznym strukturalnym ubarwieniem piór (kolor niebieski)

Fot. 2

Wielobarwny rajski ptak z charakterystycznym długim ogonem

Chcesz wiedzieć więcej?

Praca doktorska autorki:
www.proquest.com/openview/ea29f1d8073f123f71dba54032e0ba63/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y

Price-Waldman R., Caswell Stoddard M., *Avian Coloration Genetics: Recent Advances and Emerging Questions*, „Journal of Heredity” 2021, vol. 112(5), doi: 10.1093/jhered/esab015.

Campagna L., Toews D.P.L., *The genomics of adaptation in birds*, „Current Biology” 2022, vol. 32(20), doi: 10.1016/j.cub.2022.07.076. PMID: 36283387.

Courtier-Orgogozo V., Arnoult L., Prigent S.R., Wiltgen S., Martin A., *Gephebase, a database of genotype–phenotype relationships for natural and domesticated variation in Eukaryotes*, „Nucleic Acids Research” 2020, vol. 48(D1), doi: 10.1093/nar/gkz796.

Samce tego ptaka inaczej zwanego kulczykiem mają kuper, piersi i czoło w kolorze żółtocytrynowym, a brzuch biały. Samice są bledsze i sprawiają wrażenie zielonoszarych. Wreszcie nie tak dawno dwie grupy naukowców zbadały niezależnie dwa znane ze sklepów zoologicznych gatunki ptaków. Mowa o kanarkach i zeberkach. Opisali w ich DNA gen o nazwie CYP2J19. Jest on niezbędny do przekształceń biochemicznych karotenoidów, które m.in. sprawiają, że żółty barwnik zmienia się w czerwony. Jednak jak okazało się później – sam CYP2J19 jest niewystarczający do przeprowadzenia tego procesu. Lukę w coraz bardziej skomplikowanej układance została wypełniona dzięki komputerowym analizom danych o ekspresji genów w elementach światłoczułych oka zlokalizowanych w siatkówce. Brakującym elementem zmieniającym kolory okazał się gen o nazwie BDH1L. Odkrycie tego puzzla pokazało, że proces ten jest dwuetapowy.

Wraz z odkryciem kluczowej roli BDH1L naukowcy prześledzili genetyczne źródło jeszcze jednej kolorowej odmiany ptaka. Tym razem analizowali pomarańczową odmianę gatunku, który zazwyczaj jest czerwony. Chodzi o papuzika czerwonicę. Odkryto, że zmutowana wersja genu (TTC39B) jest ściśle związana z jego pomarańczową odmianą. Co ciekawe, osobniki z takim ubarwieniem mają także inne „czerwone” braki. W komórkach światłoczułych oka brakuje im czerwonych barwników odpowiedzialnych za widzenie części kolorów. Oznacza to, że te ptaki postrzegają świat inaczej niż pozostałe. Ponadto stwierdzono, że ten element układanki (TTC39B) znacznie zwiększa produkcję czerwonych ketokarotenoidów w hodowli komórkowej, gdy może współpracować z dwoma kolejnymi genami – CYP2J19 i BDH1L. Układanka więc nadal się powiększa, ale wraz z jej wzrostem kolejne luki są bardziej widoczne.

Czerwony kanarek

Jednak mimo ograniczonej wiedzy na temat molekularnych mechanizmów rządzących ubarwieniem w sklepach zoologicznych można dostać wiele różnych ciekawych ptaków, ryb i innych gatunków. Wielką różnorodność kolorów, form, śpiewu, wielkości hodowcy uzyskują w procesie sztucznej selekcji. Nie wymaga on szczegółowej wiedzy molekularnej, tylko znajomości podstawowych praw dziedziczenia. Polega na tworzeniu par do rozrodu z osobników, które mają pożądane cechy. Ponieważ amatorom zwierząt domowych marzył się czerwony kanarek, profesjonalni hodowcy ptaków podjęli się takiego wyzwania. W naturze są one zazwyczaj szaro-brązowo-żółte. Z kolei uzyskane metodami hodowli mogą mieć różnorodne barwy – od białego, przez żółte, po szare bądź brązowe. Czerwona odmiana powstała na skutek sparowania żółtego kanarka i czyżby czerwonego. Ten drugi jest również niewielkim, 10–11-cm ptakiem, u którego samce mają jaskrawoczerwone zabarwienie. Ich potomstwo skrzyżowano następnie z żółtymi kanarkami. Finalnie cały proces zakończył się sukcesem, a więc uzyskaniem czerwonej odmiany kanarków. Co ciekawe, w tym procesie powstała też inna, nowa rasa kanarków – kanarki mozaikowe. Charakteryzują się one sporym dymorfizmem płciowym. Ubarwienie samców na głowie, skrzydłach i ogonie jest dużo intensywniejsze niż u samic.

Naukowcy, badając zagadnienia kolorów upierzenia ptaków, tworzą coraz większą bazę wiedzy. Ta komplikuje się ze względu nie tylko na widoczne coraz wyraźniej luki, lecz także ujawniające się powiązania, ponieważ geny odpowiadające za kolor upierzenia są również odpowiedzialne za różnorodne procesy w każdym organizmie. ■

Artykuł powstał w ramach realizacji grantu z Uniwersytetu Montrealskiego, nr FN406095.



KIT LEONG/SHUTTERSTOCK.COM



Danio pręgowany

MAŁY BOHATER BADAŃ NAUKOWYCH

Ryba *Danio rerio* zrewolucjonizowała badania naukowe, umożliwiając dogłębne zrozumienie wielu procesów biologicznych oraz potafizjologii ludzkich chorób.

**Ewa Stefanik
Karolina Wolny**

Zakład Biologii Rozwoju Zwierząt
Wydział Nauk Biologicznych, Uniwersytet Wrocławski

Danio pręgowany (*Danio rerio*) to mała ryba o długości kilku centymetrów. Swoją nazwę zawdzięcza charakterystycznym niebieskim paskom biegnącym wzdłuż całego ciała. Naturalnie występuje w Azji Południowej, ale można ją również znaleźć w wielu domowych akwariach. Danio zyskał ogromną popularność nie tylko wśród amatorów

akwarystyki, lecz także naukowców wielu dziedzin. Wykorzystują go jako organizm modelowy. Badania na takich organizmach dają rezultaty, które można odnieść do szerszej grupy gatunków. Innymi słowy, zgłębiając np. mechanizmy genetyczne danio, możemy pośrednio przyjrzeć się tym działającym u człowieka. Jest to możliwe, mimo że ludzi i ryby tego gatunku dzieli 400 mln lat ewolucji. To właśnie wtedy doszło do rozdziału ich linii rozwojowych. Jednak w perspektywie 3,5 mld lat istnienia życia na Ziemi jasne jest, że mimo tej rozłuki, wykształciły się wspólne cechy biologiczne. Chociaż ewidentnie dostrzegamy między nimi różnice na poziomie komórkowym, organy człowieka i danio, takie jak serce, mózg czy mięśnie, działają bardzo podobnie. Wynika to oczywiście z podobieństwa genetycznego. Porównawcze badania



mgr Ewa Stefanik
Doktorantka Kolegium
Doktorskiego
Nauk Biologicznych
Uniwersytetu
Wrocławskiego.
Założycielka projektu
popularnonaukowego
Zebrafish Adventure
oraz członek zarządu
Fundacji Marsz
dla Nauki. Wykonawca
w granie Sonata 17.
ewa.stefanik2@uwr.edu.pl

**mgr Karolina Wolny**

Absolwentka genetyki i biologii eksperymentalnej na Uniwersytecie Wrocławskim. Przewodnicząca SKN Genetyków Strażnicy Genomu UW. Na co dzień zajmuje się popularyzacją nauki oraz badaniami z obszaru rozwoju oraz fizjologii mięśni szkieletowych. 321274@uwr.edu.pl

z genomem człowieka wskazały, że aż 80 proc. genów danio pręgowanego znajduje swój odpowiednik w genomie ludzkim.

Naturalne i podkręcone cechy

W zgłębianiu mechanizmów biologicznych danio pomagają jego istotne cechy. Ryba rozmnaża się szybko, co umożliwia przeprowadzenie badań w krótkim czasie. Daje również liczne potomstwo (od jednej pary można uzyskać nawet 300 jaj), co pozwala na przeprowadzenie dużej liczby powtórzeń. Co więcej, to właśnie jaja danio stanowią jedną z najatrakcyjniejszych cech tej ryby. Są one przezroczyste, a ich rozwój zachodzi poza organizmem samicy. Umożliwia to obserwację rozwoju zarodkowego osobników już od pierwszych minut ich życia. Podobnie przezroczyste ciało larw daje możliwość dokładnego zbadania procesów rozwoju najważniejszych narządów, tj. serca czy mięśni szkieletowych, w czasie rzeczywistym. Kolejnym atutem danio pręgowanego jest krótki cykl życiowy. Po trzech miesiącach od zapłodnienia ryby osiągają dojrzałość płciową, co daje naukowcom możliwość analizy eksperymentów w perspektywie kilku pokoleń w krótkim czasie. Ponadto małe rozmiary ryb umożliwiają utrzymanie dużej populacji w laboratorium stosunkowo niskim kosztem.

Kolejnym ważnym aspektem jest łatwość prowadzenia manipulacji genetycznych w obrębie genomu tej niepozornej ryby. Tworzenie w ten sposób odpowiedników ludzkich chorób u ryby pozwala dokładnie zbadać funkcję konkretnych genów, ich rolę w wielu szlakach metabolicznych oraz skutki mutacji w ich obrębie. Danio pręgowane z powodzeniem sprawdza się jako model nowotworów, takich jak czerniak, mięsak, rak tarczycy, białaczka oraz wiele innych.

Obecnie naukowcy dysponują całą gamą technik umożliwiających także tworzenie „wersji” danio o specjalnych cechach ułatwiających badania. Jedną z nich jest linia Casper. Opisywana wcześniej przezroczystość ciała danio trwa przez pierwsze pięć dni życia. Po tym czasie zaczyna się synteza barwnika, dającego białoniebieskie ubarwienie ciała. Linia Casper przez wprowadzenie mutacji zachowuje przezroczystość przez całe życie. Dzięki temu świetnie sprawdza się w badaniach nowotworów, umożliwiając śledzenie w czasie rzeczywistym formowanie guza nowotworowego oraz powstawanie przerzutów. Obserwacja jest możliwa dzięki wprowadzeniu fluorescencyjnych komórek nowotworowych do organizmu ryby, których świecenie obserwuje się przez przezroczystą skórę.

Nie tylko nowotwory

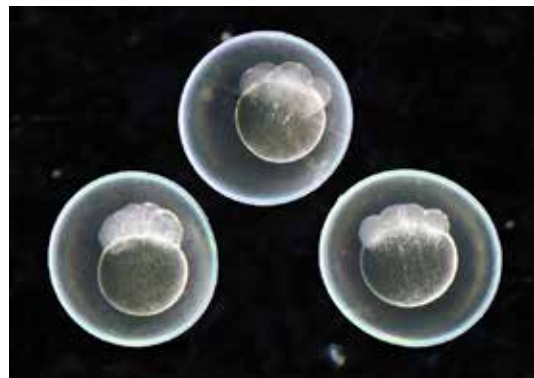
Danio sprawdza się także jako organizm modelowy w badaniach chorób układu krążenia. Te stanowią jedną z najczęstszych przyczyn zgonów na całym świecie.

Dzieje się tak mimo niewątpliwego rozwoju medycyny, która jednak wciąż napotyka problemy w znalezieniu skutecznych metod zapobiegania oraz leczenia problemów w funkcjonowaniu serca. Komórki budujące ten narząd u ssaków utraciły zdolność do podziału. Gdy zostanie ono uszkodzone, nie może się w pełni się zregenerować. Pomocna w znalezieniu rozwiązania tego problemu może być obserwacja jednej z fascynujących cech danio. Jest nią nadzwyczajna zdolność do regeneracji tkanek. Po uszkodzeniu narządy takie jak serce mogą odzyskać pełną funkcjonalność. Zrozumienie tego mechanizmu pozwoli nam w przyszłości skuteczniej leczyć pacjentów, którzy doświadczyli np. zawału serca.

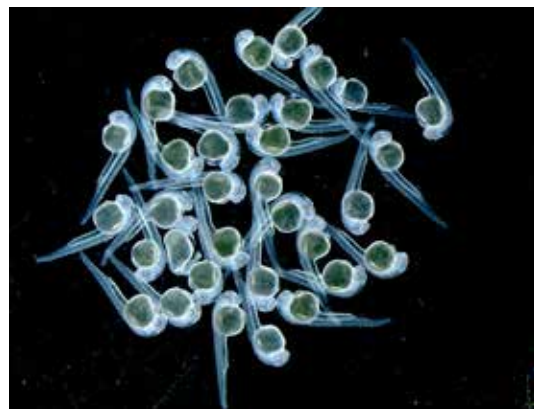
Kolejną zaskakującą cechą tego narządu u danio jest jego elektrofizjologia. Jest ona znacznie bardziej zbliżona do ludzkiej niż powszechnych w nauce myszy. Serce danio pręgowanego kurczy się z częstotliwością odpowiadającą rytmowi serca ludzi, podczas gdy u wspomnianych gryzoni liczba ta jest 10-krotnie wyższa. Dzięki temu ryba z powodzeniem jest także wykorzystywana do modelowania chorób związanych z zaburzeniem rytmu pracy serca. Dodatkowo z racji przezroczystości larwy danio pręgowanego oraz jej rozwoju poza organizmem samicy możliwe jest śledzenie wszelkich zmian w obrębie tego narządu już od pierwszych minut życia. Jest to istotne w kontekście badań nad wrodzonymi wadami serca. Wiele z nich wynika z zaburzenia procesów rozwojowych

Embriony danio pręgowanego w półprzezroczystych osłonkach jajowych

48-godzinne larwy danio pręgowanego



DR JOANNA NIEBALSKA-TARNOWSKA



DR JOANNA NIEBALSKA-TARNOWSKA

Linia Casper
danio pręgowanego

podczas życia zarodkowego. Tego typu badania nie byłyby możliwe w przypadku mysiego modelu. Śledzenie rozwoju tego narządu u gryzonia uniemożliwia rozwój płodu w organizmie samicy.

Danio pręgowany zyskuje coraz większe uznanie również przy modelowaniu chorób neurologicznych. Wynika to z faktu, że również mózg tego prostego organizmu i człowieka wykazują zasadnicze podobieństwo na poziomie neurochemicznym. Charakterystyczne cechy leżące u podłoża patologii tego narządu, takie jak gromadzenie białek czy zwyrodnienia neuronów, można z łatwością kształtować w centralnym układzie nerwowym ryby. Dzięki temu danio pręgowany jest używany w badaniach nad chorobami Parkinsona, Alzheimer, Huntingtona czy stwardnieniu rozsianym. Co ciekawe, wykorzystując tę rybę, można również badać zaburzenia psychiczne. W przypadku ich leczenia niezbędna jest wiarygodna diagnoza kliniczna, w związku z czym opracowanie skutecznego modelu zwierzęcego polega na dokładnym poznaniu molekularnego mechanizmu choroby oraz jego wpływu na zachowanie osobnika. Danio pręgowany wykazuje złożone zachowania, które są zbliżone do tych obserwowanych u gryzoni czy ludzi. Z tego względu jest cennym modelem badawczym w przypadku zaburzeń takich jak depresja czy schizofrenia. Dodatkowo wiele narzędzi opracowanych do testów behawioralnych sprawia, że ryba ta z powodzeniem jest wykorzystywana w badaniach zgłębiających temat mechanizmu uzależnień od alkoholu czy opioidów, formowania pamięci i uczenia się.

Pasiasty sportowiec

Miopatie to grupa chorób, w których dysfunkcja mięśni powoduje ich osłabienie. Są to głównie choroby dziedziczne, u których podłoża leży wiele mutacji genetycznych. Zaletą wykorzystania danio w przypadku badania zaburzeń mięśni szkieletowych jest fakt, że tkanka mięśniowa ryby szybko się rozwija. Jest już w pełni wykształcona w ciągu 24 godzin po zapłodnieniu. Dodatkowo wiele procesów molekularnych,

takich jak mechanizm skurczu, pozyskiwanie energii do pracy czy regeneracja, zachodzi tak samo jak w przypadku ludzkich mięśni szkieletowych. Ponieważ larwy danio pręgowanego zaczynają pływać już po pierwszej dobie życia, możliwe jest badanie wpływu mutacji na zdolność wysiłku fizycznego już od wczesnych etapów życia organizmu.

Przykładem miopatii jest choroba McArdle'a. Wynika ona z mutacji w genie kodującym enzym, który jest odpowiedzialny za rozkład glikogenu w glukozę – podstawowe źródło energii dla organizmu. Jest więc chorobą genetyczną. Pacjenci dotknięci chorobą nie są w stanie pozyskać energii niezbędnej do pracy mięśni. Skutkiem tego jest obniżona zdolność do podejmowania wysiłku fizycznego oraz bóle spowodowane nadmiernymi skurczami. Szacuje się, że choroba ta występuje u 1 na 100 tys. osób. Dotychczas nie udało się opracować skutecznej metody jej leczenia. W związku z tym grupa badawcza z Uniwersytetu Wrocławskiego pod kierunkiem dr Marty Migockiej-Patrzałek pracuje nad stworzeniem modelu choroby McArdle'a z wykorzystaniem danio pręgowanego. W trakcie modelowania do zarodka wprowadza za pomocą precyzyjnej igły czynniki powodujące mutację. Już dziś wstępne wyniki badań pozwalają stwierdzić, że model ten nie tylko pomoże lepiej zrozumieć mechanizm leżący u podstawy choroby, lecz także sprawdzi się podczas poszukiwania skutecznej terapii i leczenia.

Danio pręgowany stanowi doskonały przykład organizmu modelowego wykorzystywanego w badaniach naukowych. Swoją popularność zawdzięcza unikatowym cechom takim jak przezroczyste ciało, rozwój zewnętrzny oraz krótki cykl życiowy, dzięki czemu stanowi alternatywę dla innych organizmów powszechnie wykorzystywanych w badaniach naukowych takich jak myszy czy szczury, o czym świadczą rosnąca liczba publikacji naukowych opisujących ten model badawczy.

Artykuł powstał w ramach realizacji projektu Sonata 17, finansowanego przez NCN (2021/43/D/NZ4/00081).

Chcesz wiedzieć
więcej?

Elias M., Migocka-Patrzałek M., *Danio pręgowany jako przykład organizmu modelowego wykorzystywanego w badaniach naukowych*, 2019, www.researchgate.net/publication/336319012_Danio_pregowany_jako_przyklad_organizmu_modelowego_wykorzystywanego_w_badaniach_naukowych

Migocka-Patrzałek M., Kosieradzka A., Lewandowski D., Posyniak E., Dubińska-Magiera M., Dąbrowska M., *Choroba McArdle'a – patogeneza i perspektywy terapii*, „Postępy Biologii Komórki” 3/2015, www.pbkom.eu/sites/default/files/artykulydo2012/Choroba-McArdle-patogeneza-i-perspektywy-terapii.pdf

Adhish M., Manjubala I., *Effectiveness of zebrafish models in understanding human diseases – A review of models*, „Heliyon” 2023, vol. 9(3), doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14557, PMID: 36950605, PMCID: PMC10025926.



MEZZOTINT/SHUTTERSTOCK.COM

Moneta stojąca na rancie
wyobraża stan kwantowej
superpozycji

TYPOWE I ATYPOWE EWOLUCJE UKŁADÓW KWANTOWYCH

Wszystkie dane otrzymane z rozmaitych doświadczeń dotyczących fizyki mikroświata są zgodne z przewidywaniami teorii kwantowej. Czy są jeszcze obszary dotyczące mechaniki kwantowej, których nie znamy?

Karol Życzkowski

Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Jagielloński w Krakowie
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
w Warszawie

Ważnym zadaniem fizyki jest opis badanego układu oraz prognoza jego ewolucji w czasie. W przypadku układów klasycznych próbujemy wyznaczyć warunki początkowe układu, określić działające siły, a następnie podać równanie ruchu i znaleźć jego rozwiązanie. Jeśli układ nie jest chaotyczny, czyli dynamika nie zmienia się istotnie przy małej zmianie warunków początkowych, możemy opisać przybliżoną ewolucję układu w czasie.

Fizyka kwantowa opisuje układy w skali mikro, rzędu pojedynczego atomu lub jeszcze mniejszej skali cząstek elementarnych. W takim przypadku nie jesteśmy w stanie określić położenia ani pędu poszczególnych cząstek, a teoria pozwala jedynie analizować pytania o prawdopodobieństwo, że dana cząstka zostanie zarejestrowana w określonym obszarze przestrzeni. Podstawowym pojęciem jest stan kwantowy, rozumiany jako matematyczne narzędzie do wyliczania prawdopodobieństwa otrzymania danego wyniku pomiaru. Pomiar kwantowy zmienia stan układu, a wyniki pomiaru dwóch cząstek przygotowanych w tym samym stanie nie muszą być identyczne.

Świat gra

Klasyczna teoria prawdopodobieństwa przypisuje rzetelnej monecie wirującej w powietrzu stan $(1/2, 1/2)$, gdyż oba możliwe zdarzenia są równo prawdopodobne. Zdarzenie pewne O – jak „orzeł” – opisujemy wektorem $|0\rangle = (1, 0)$, a przeciwne zdarzenie R – jak „reszka” – oznaczamy wektorem $|1\rangle = (0, 1)$. Mechanika kwantowa dopuszcza istnienie stanu superpozycji, oznaczanego symbolem $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)$, który daje równe prawdopodobieństwa obu wyników, lecz można

go odwracalnie przekształcić w jedno z dwóch zdarzeń pewnych.

Rzucając dwoma rozróżnialnymi monetami, otrzymamy jeden z czterech możliwych wyników: OO, OR, RO, RR. Teoria kwantowa przewiduje znacznie większy zbiór możliwych stanów. Najciekawszym z nich jest stan Bella, zapisywany jako $(|00\rangle + |11\rangle)$. Jeśli dwie monety znalazłyby się w takim stanie kwantowym, to znając wynik rzutu jedną monetą, moglibyśmy dokładnie przewidzieć wynik drugiego rzutu, gdyż będzie on identyczny. Klasyczne monety nie wykazują takich cech, a takie niecodzienne korelacje wyników charakteryzują tzw. kwantowe stany splątane. Splątanie kwantowe, oznaczające silne nieklasyczne korelacje wyników pomiarów, jest wykorzystywane w protokołach kwantowej teleportacji, kwantowej

Przetwarzanie informacji kwantowej może być szybsze i efektywniejsze niż przetwarzanie informacji klasycznej.

dystrybucji klucza kryptograficznego oraz wielu algorytmach obliczeń kwantowych. Efekt kwantowego splątania nie jest sprzeczny z zasadami teorii względności, gdyż nie pozwala na przekazanie informacji z prędkością nadświatłą.

W pracy Rather i in. z 2022 roku przedstawiono konstrukcję nowego stanu kwantowego układu czterech podukładów o sześciu poziomach każdy. Gdyby cztery zwykłe kości do gry wprowadzić w taki stan, to pomiar przeprowadzony na dowolnie wybranej parze kości pozwoli na określenie wyniku pomiaru pozostałych dwóch. Taki stan umożliwia realizację nowego protokołu teleportacji kwantowej, generuje oryginalny kod kwantowej korekcji błędów oraz może być stosowany do testowania komputerów kwantowych. Pozwala też na rozwiązanie kwantowej wersji kombinatorycznego problemu 36 oficerów Eulera.



**prof. dr hab.
Karol Życzkowski**

Jest fizykiem, pracuje na Uniwersytecie Jagiellońskim i w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. Do jego zainteresowań należą mechanika kwantowa, informacja kwantowa, chaos i dynamika nieliniowa, a także matematyka stosowana i teoria wyborów. Od stycznia 2023 roku kieruje Oddziałem PAN w Krakowie.
karol@cft.edu.pl

K♦	Q♠	A♣
Q♣	A♦	K♠
A♠	K♣	Q♦

Kwadrat Eulera o boku 3: karty w każdym wierszu i kolumnie mają różny kolor i różną wartość

Zbiór stanów klasycznych C jest zawarty w zbiorze Q stanów kwantowych. Ten sam szkic przedstawia także klasyczne i kwantowe operacje oraz korelacje, a także algorytmy i technologie. Oś z wyznacza wybraną funkcję celu, a odległość x ilustruje quantum advantage

Biorąc do ręki 9 kart: po 3 asy, 3 króle oraz 3 damy w trzech kolorach, nietrudno jest ułożyć kwadrat tak, by w każdym wierszu i w każdej kolumnie znajdowała się tylko jedna karta danego koloru i danej wysokości. W 1779 roku Leonhard Euler zauważył, że takie układy istnieją dla 16 i 25 kart, lecz takiego kwadratu nie da się zbudować z 36 kart w 6 kolorach o 6 różnych wartościach. Motywacją był praktyczny problem optymalnego rozmieszczenia grupy 36 oficerów w czasie parady wojskowej w Petersburgu, po sześciu przedstawicieli różnych szarż dla każdego z sześciu rodzajów broni. Ścisły dowód twierdzenia o nieistnieniu takiego deseni kombinatorycznego podał Gaston Tarry w 1900 roku. Kwantowy stan układu czterech kości znaleziony 121 lat później stanowi rozwiązanie kwantowego problemu Eulera, w którym w każdym z 36 pól kwadratu dopuszcza się kwantowe stany splątane, reprezentowane przed układ kilku kart.

Kluczowym parametrem opisującym dany układ jest jego wymiar d , równy liczbie stanów rozróżnialnych. Przykładowo, dla jednej monety, dwóch monet, kostki oraz układu dwóch kostek wymiar d wynosi kolejno 2, 4, 6 i 36. Stan kwantowy opisujemy macierzą gęstości ρ o wymiarze d (dodatkowo półokreślona macierz hermitowska o śladzie jednostkowym). W najprostszym przypadku, $d = 2$, układ kwantowy jest nazywany kubitem, a zbiór Ω_2

wszystkich stanów kwantowych tworzy trójwymiarową kulę Blocha. Dla $d > 2$ zbiór Ω_d stanowi zwarty zbiór wypukły zanurzony w przestrzeni rzeczywistej o wymiarze $d^2 - 1$. Za typowy stan kwantowy uznajemy stan wylosowany według jednostajnej miary na całym zbiorze stanów Ω_d .

Przedstawiony stan kwantowy układu czterech cząstek jest nietypowy, gdyż stopień jego splątania jest znacznie większy od wartości odniesienia charakteryzującej typowe stany losowe. Takie stany o ekstremalnych własnościach i silnym stopniu kwantowego splątania, leżące na brzegu zbioru Ω , mogą być przydatne w przetwarzaniu informacji kwantowej.

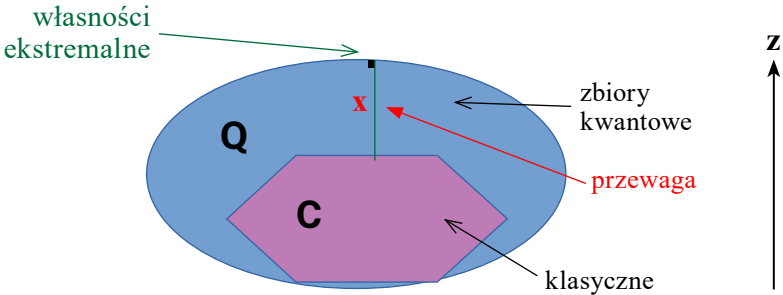
Fizyka opisuje przyszłość

Ewolucje układów kwantowych w czasie przedstawiamy, opisując, jak macierz gęstości ρ , a więc prawdopodobieństwa uzyskania danych wyników pomiarów, zmienia się w czasie. W przypadku układu kwantowego izolowanego od otoczenia jego unitarną ewolucję opisaną równaniem Heisenberga nietrudno sobie wyobrazić jako sztywny obrót zbioru Ω_d w przestrzeni o wymiarze $d^2 - 1$. W ogólniejszym przypadku układu oddziaływającego z otoczeniem dynamika nie jest odwracalna, a zbiór stanów Ω_d podlega kontrakcji.

W stroboskopowym opisie dynamiki układu porównujemy kolejne klatki filmu i czas odmierzamy w jednostkach dyskretnych, $t = 1, 2, 3, \dots$ W tym przypadku jednostkową ewolucję macierzy gęstości zadaje operacja kwantowa Φ (całkowicie dodatnie odwzorowanie zachowujące ślad macierzy) przez relację: $\rho_{t+1} = \Phi(\rho_t)$. W alternatywnym podejściu zwiększamy częstość próbkowania i w granicznym przypadku przechodzimy do opisu układu czasie ciągłym, $\rho(t) = e^{tL}\rho(0)$, gdzie t oznacza czas, a L to generator Lindblada, determinujący trajektorię w zbiorze Ω_d macierzy gęstości.

Warto podkreślić znaczny wkład polskiej szkoły Romana Stanisława Ingardena (1920–2011), nestora toruńskiej fizyki teoretycznej, w rozwój kwantowej teorii układów otwartych: praca Andrzeja Jamiołkowskiego z 1972 roku, dotycząca odwzorowań dodatnich, pozwoliła na konstrukcję często stosowanego dziś izomorfizmu Choi-Jamiołkowskiego, które przyporządkowuje operacji kwantowej Φ stan kwantowy σ w poszerzonym zbiorze Ω_{d^2} . Z kolei w 1976 roku Andrzej Kossakowski został współautorem fundamentalnej pracy, w której podano kompletny opis nieunitarnej ewolucji układu kwantowego w czasie ciągłym, niezależnie od równoległego artykułu G. Lindblada.

Zbiór operacji kwantowych Φ przekształcających zbiór stanów Ω_d w siebie tworzy zbiór wypukły o wymiarze $d^4 - d^2$. Podobnie jak w przypadku stanów można rozważać operacje typowe, generowane przy wykorzystaniu teorii macierzy losowych, a używając teorii operatorów – analizować ich widmo i zbiór sta-





Rozwiązanie kwantowej wersji problemu 36 oficerów Eulera zawiera w każdym polu kwadratu o boku 6 spletany stan 2 lub 4 kart. Każde pole odpowiada stanowi 4 kości, opisujących kolejno wiersz kwadratu, jego kolumnę, kolor karty i jej wartość

nów niezmienniczych. Uzyskane wyniki służą jako punkt odniesienia do badań operacji nietypowych, o bardzo szczególnych własnościach. Jeśli przestrzeń stanów Ω_d potraktujemy jako scenę, na której rozgrywa się akcja algorytmu kwantowego, to operacje kwantowe odgrywają rolę elementarnych epizodów, z których autor może komponować swoją sztukę.

Obliczenia klasyczne i kwantowe

Przetwarzanie informacji kwantowej może być szybsze i efektywniejsze niż przetwarzanie informacji klasycznej, gdyż zbiór stanów kwantowych, zawierający stany kwantowej superpozycji oraz stany splątane, jest znacznie większy niż zbiór stanów klasycznych. Analogicznie zbiór przekształceń stanów klasycznych stanowi jedynie mały fragment znacznie większego zbioru operacji kwantowych. Innymi słowy, autor sztuki pisanej wedle reguł mechaniki kwantowej ma do dyspozycji obszerniejszą scenę i więcej możliwości rozwijania akcji dramatu niż jego kolega tworzący algorytm klasyczny.

Jednakże praktyczna realizacja algorytmów kwantowych nie jest prosta: o ile obliczenia klasyczne są wykonywane deterministycznie i przeprowadzane poprawnie dadzą poszukiwany rezultat, to obliczenia kwantowe pozwolą uzyskać oczekiwany wynik jedynie z określonym pewnym prawdopodobieństwem, więc schemat obliczeniowy trzeba powtarzać.

Nieuniknione oddziaływanie procesora kwantowego z otoczeniem powoduje błędy w obliczeniach oraz zanik kwantowych własności układu i jego przejście do stanu klasycznego. Taki efekt, zwany dekoherencją układu, zachodzi stosunkowo szybko. Obecnie opracowane realizacje doświadczalne procesorów kwantowych umożliwiają wykonanie jedynie kilkudziesięciu operacji na kilkudziesięciu kubitach, co nie pozwoli na skomplikowane rachunki.

Nie wiemy jeszcze, czy i kiedy zostanie przekroczony magiczny próg kwantowej przewagi obliczeniowej, kiedy to komputer kwantowy rozwiąże konkretne pożyteczne zadanie obliczeniowe szybciej niż komputery klasyczne. Za to teoria informacji kwantowej, stanowiąca pomost między fizyką teoretyczną i doświadczalną, informatyką oraz wieloma działami matematyki, jest szybko rozwijającą się dziedziną nauki o coraz większym znaczeniu praktycznym.

W roku 2024 European Research Council postanowił przyznać ERC Advanced Grant na realizację projektu autora zatytułowanego „Typical and Atypical structures in quantum theory” (tytuł zainspirowany działalnością Fundacji Atypowa, wspierającej osoby w spektrum autyzmu). Projekt badawczy będzie wykonywany w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Jego głównym celem będzie zbadanie własności typowych stanów i operacji kwantowych, a także identyfikacja wyróżnionych struktur o ekstremalnych własnościach, przydatnych do przetwarzania informacji kwantowej oraz tworzenia nowych technologii kwantowych.

Chcesz wiedzieć
więcej?

Chruściński D., Pascasio S., *A brief history of the GKLS equation*, „Open Systems & Information Dynamics” 2017.

Gorini V., Kossakowski A., Sudarshan E.C.G., *Completely positive dynamical semigroups of N-level systems*, „Journal of Mathematical Physics” 1976.

Jamiołkowski A., *Linear transformations which preserve trace and positive semidefiniteness of operators*, „Reports on Mathematical Physics” 1972.

Kukulski R., Nechita I., Paweł Ł.,
Puchała Z., Życzkowski K.,
*Generating random quantum
channels*, „Journal of
Mathematical Physics” 2021.

Lindblad G., *On the generators of quantum dynamical semigroups*, „Communications in Mathematical Physics” 1976.

Rajchel-Mieldzió G., Bruzda W.,
Burchardt A., Życzkowski K.,
*36 splełtanych oficerów
z Petersburga*, „Delta” 3/2023.

Rather S.A., Burchardt A.,
Bruzda W., Rajchel-Mieldzić G.,
Lakshminarayan A.,
Życzkowski K., *Thirty-six
entangled officers of Euler*,
„Physical Review Letters” 2022.



**dr inż.
Natalia Kartawik**

Pracuje na stanowisku
asystentki w Katedrze
Entomologii
i Fitopatologii
Leśnej UPP. Zajmuje się
badaniem zbiorowisk
grzybów zasiedlających
rozkładane drewno
i ich wpływem
na drzewostany
gospodarcze.
natalia.kartawik
@up.poznan.pl

NAJSTARSI KOLONIZATORZY ZIEMI

Grzyby – organizmy, które jako pierwsze
pojawily się na lądzie – wciąż pozostają mało poznane.
Co wiemy na temat ich historii i ewolucji?

Próchnilec maczugowaty
(*Xylaria polymorpha*)



Różnorodność i liczebność organizmów żywych na Ziemi jest bardzo duża. Podzielono je więc na jednostki o różnicach na tyle istotnych, że można je nazwać królestwami. Klasyfikuje się do nich grupy organizmów (taksony) o udowodnionych wspólnych, unikatowych, ale pochodnych cechach adaptacyjnych. Obecnie wyróżnia się pięć królestw opisanych przez Roberta Whittakera w 1969 roku. Badania nad grzybami trwają stosunkowo krótko. Wiadomo jednak, że królestwo grzybów istnieje na Ziemi od milionów lat, a ich obecność wpływa na funkcjonowanie ekosystemów lądowych i ewolucję innych organizmów. Dotychczas podejmowano liczne próby zidentyfikowania synapomorfii i cech genetycznych, które definiują królestwo grzybów i oddzielają je od innych grup. W oparciu o analizy datowania molekularnego dotyczących względnego wieku ustalono, że królestwo grzybów ma morskie pochodzenie i jest starsze od skamieniałości fauny i flory lądowej.

Przodkiem wszystkich grzybów był prawdopodobnie parazytoidalny mikroalg, posiadający zdolności fagotrofizmu, wykazujący ruchliwość zarówno ameboidalną, jak i wiciową oraz chitynowe ściany komórkowe. Bez względu na to, jak definiujemy grzyby, zrozumienie zmian, które leżały u podstaw ich ewolucji, jest kluczowe dla lepszego poznania zależności panujących w ekosystemach ziemskich. Grzyby to cudzożywne, szeroko rozpowszechnione na Ziemi organizmy o silnym zróżnicowaniu zarówno filogenetycznym, jak i funkcjonalnym. Strzępki tworzące grzybnie wykazują zdolność do rozwoju w różnych środowiskach, trawienia zewnętrznego oraz wchłaniania i metabolizowania wielu różnych związków, w tym ligniny i celulozy. Możliwość zmian form życiowych pozwala niektórym grzybom na interakcje z wieloma żywicielami w różnych warunkach środowiskowych. Ponadto doskonale dostosowują się do zróżnicowanych – zarówno przestrzennie, jak i czasowo – zasobów pożywienia.

Szacuje się, że królestwo grzybów obejmuje około 5,1 mln taksonów grzybów właściwych, które można podzielić na dziewięć głównych typów: *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Blastocladiomycota*, *Chytridiomycota*, *Glomeromycota*, *Mucoromycota*, *Neocallimastigomycota*, *Opisthosporida*, *Zoopagomycota*. W porównaniu z grupami organizmów grzybobodobnych, np. *Corallochytrium* (Holozoa, *Opisthokonta*), *Hyphochytriomyces* (*Pseudofungi*) i *Oomycetes*, grzyby pojawiły się na lądzie jako pierwsze i skutecznie utrzymały nisze



Mączniak prawdziwy dębu (*Erysiphe alphitoides*) jest najbardziej niebezpieczny dla młodych drzewek

dzięki dalszym adaptacjom. Odkrycie skamieniałości w Grassy Bay w 2019 roku o charakterystycznej dla grzybów strukturze komórkowej sugeruje, że grzyby pojawiły się 600 mln lat wcześniej, niż sądzono do tej pory. Podkrólestwo *Dikarya* wyodrębniło się około 500 mln lat temu. *Ascomycota* i *Basidiomycota*, liczące ponad 1,5 mln taksonów, to dwa główne typy należące do *Dikarya*, będącą najbardziej zróżnicowaną i najlepiej zbadaną grupą grzybów. Charakteryzują się cyklem płciowym, który obejmuje łączenie strzępek bez procesu mejozy, przez co nowo powstałe komórki zawierają dwa niezależne jądra komórkowe (strzępki dikariotyczne).

Do rozdzielenia na *Ascomycota* i *Basidiomycota* doszło 1,2 mld lat temu. Z kolei dane zegara molekularnego dotyczące lęgniowców wskazują, że pojawiły się one na Ziemi około 250 mln lat temu. Obecność na lądzie pierwszych przedstawicieli *Peronosporales* datuje się na około 150 mln lat, czyli długo po tym, jak grzyby skolonizowały siedliska podobne do preferowanych przez rośliny. Jest więc wysoce prawdopodobne, że grzyby przez długi okres rozwijały cechy, które pozwoliły im na opanowanie nisz lądowych i utrzymywanie się w nich. Najważniejsze cechy ewolucyjne grzybów pozwalające na dostosowanie się do środowiska lądowego to utrata fagotrofii oraz wici, co jest związane z rozwojem strzępek. Zamiast utrzymywać elastyczną błonę, komórki grzybów zaczęły rozwijać sztywne i strukturalnie wzmocnione powierzchnie komórkowe. To z kolei chroni komórki przed wysokim ciśnieniem turgorowym i pozwala na wypełnienie cytoplazmy wysoko stężonymi substancjami, utrzymując szybkie tempo metabolizmu. Ewolucja sztywnych komórek umożliwia spolaryzowany wzrost na końcu rozgałęziającej się strzępki, które u większości grzybów posiadają organella składające się z licznych pęcherzyków pochodzących od aparatu Golgiego.



dr hab. Jolanta Behnke-Borowczyk, prof. UPP

Specjalizuję się w badaniu zbiorowisk grzybów ekosystemów leśnych ze szczególnym uwzględnieniem patogenów.
jolanta.behnke@up.poznan.pl



Skórnik szorstki
(*Stereum hirsutum*)

W komórkach grzybów są zawarte enzymy, lipidy i polisacharydy, niezbędne do syntezy błon i ściany komórkowej.

Mistrzowie adaptacji

Grzyby pośredniczą w powiązaniach między różnymi organizmami i ekosystemami, co wpływa na makroekologię i ewolucję tych organizmów. Odnalezione skamieniałości *Ascomycota*, *Blastocladiomycota*, *Chytridiomycota* i *Mucoromycota* na stanowisku paleontologicznym Rhynie Chert w Szkocji, pochodzące z wczesnego dewonu, są związane z najwcześniejszą znaną florą lądową. To niezbitý dowód na to, że interakcje między grzybami i roślinami są ekologiczną siłą napędową łączącą ich gospodarzy, konkurentów i antagonistów ze środowiskami.

Grzyby występują w niemal wszystkich ekosystemach lądowych, gdzie pełnią wiele funkcji. Począwszy od rozkładu materii organicznej i obiegu składników odżywczych, a na korzystnych i antagonistycznych związkach z roślinami i ze zwierzętami skończywszy. Wyróżnia się dwie główne strategie życia grzybów: biotrofię (zdolność rozwoju wyłącznie z żywymi organizmami) i nekrotrofię (zdolność życia w martwej materii organicznej). Strategie te nakładają radykalnie różne presje ewolucyjne, co znajduje odzwierciedlenie w charakterystyce ich genomu. Dowody kopalniane wskazują, że już w dewonie grzyby pełniły popularne do dziś funkcje troficzne, takie jakie cudzożywność, pasożytnictwo, a nawet mykoryza.

Obserwowany w przeszłości rozwój strzępek świadczy albo o konieczności przerastania znacznie większych organizmów, albo zwiększeniu powierzchni w ramach saprotroficznego (cudzożywczego) stylu życia. Co więcej, zdolność do wydzielania enzymów

trawiennych i pojawienie się licznych błon preferencyjnych na końcach strzępek można rozumieć jako bezpośrednią konsekwencję saprotroficznego lub pasożytniczego trybu życia. Oznacza to, że organizmy będące przodkami grzybów, by uzyskać składniki odżywcze, naruszały struktury jednokomórkowych eukariontów. Kolejna cecha ewolucyjna to przejście na zewnętrzne trawienie złożonych związków chemicznych, połączone z aktywnym transportem przetworzonych metabolitów do wnętrza komórki.

Do głównych czynników adaptacyjnych należą stres, zakłócenia, występowanie konkurentów lub ich kombinacje. Grzyby stale przekształcają zasoby organiczne, w których rosną i żerują. Po dotarciu do materii, którą będą rozkładać, siła ich konkurencji decyduje o tym, czy odniosą sukces w kolonizacji i jak długo utrzymają terytorium. Nie jest zaskakujące, że grzyby wyewoluowały w różne grupy troficzne, by przetrwać w różnorodnych środowiskach. Obecnie na tempo adaptacji grzybów do nowych warunków może wpływać działalność człowieka, np. przez stosowanie fungicydów. Presja selekcyjna wywierana przez fungicydy powoduje, że w środowisku pozostają najsilniejsze i najbardziej odporne populacje. Grzyby są uważane za jedno z najważniejszych saprotrofów dzięki zdolności do rozkładania martwej materii organicznej na proste związki, które są łatwo przyswajalne przez rośliny. Gleba i rozkładające się drewno stanowią wielkie bogactwo grzybów saprotroficznych w środowisku leśnym, stale wykorzystujących związki organiczne, w których rosną i którymi się żywią.

W ekosystemach lądowych materia nie jest równomiernie rozłożona w czasie i przestrzeni. Przybiera bardzo zróżnicowane rozmiary – od drobnych fragmentów, takich jak łuski pączków, po ogromne pnie drzew. Enzymatyczny rozkład związków ligniny wyewoluował w biosferze raz, w klasie *Agaricomycetes*, około 290 mln lat temu. Pierwszy jednoznaczny

Zgnilizna brunatna



kopalny dowód na obecność białej zgnilizny pojawił się dopiero około 260 mln lat temu. Brak możliwości rozkładu ligniny wśród organizmów występujących na Ziemi w okresie karbonu pozwolił na zdeponowanie większości światowych złóż węgla i obniżenie poziomu atmosferycznego CO₂. Właśnie ta zdolność, której nabycie koreluje się z tworzeniem bardzo złożonych owocników, zapewniła *Agaricomycetes* wielki sukces ewolucyjny i ekologiczny. Grzyby rozkładające drewno, które nie mają tej zdolności, są nazywane grzybami brunatnej zgnilizny. Należy jednak dodać, że to rozróżnienie jest jedynie ogólnym przybliżeniem, ponieważ są znane taksony wykazujące zdolność do częściowej degradacji ligniny.

Interakcje międzygatunkowe

Symbioza to wzajemne, korzystne połączenie dwóch lub więcej organizmów. Grzyby i rośliny lądowe łączy jedna z najdłużej trwających i najbardziej bliskich relacji w biosferze. Kolonizacja lądu przez eukarionty była prawdopodobnie możliwa przez symbiozę między organizmem fotosyntetyzującym (fototrofem) a grzybem. Endotrofizm to słabo poznana nisza grzybów charakteryzująca się imponującą różnorodnością biologiczną. Skamieniałość *Glomeromycota* jest jednym z pierwszych bezpośrednich dowodów na istnienie lądowego życia grzybów. Ponadto do kilku odrębnych taksonów *Dikarya* również należą gatunki będące endotrofami korzeniowymi. Oznacza to, że korzenie szybko stały się ważną niszą dla grzybów. Dowody kopalne z Rhynie Chert wskazują, że już 400 mln lat temu występowały zespoły mykoryzowe. To odkrycie dodatkowo potwierdza, że interakcje roślin z grzybami były niezbędne w procesie opanowania lądu przez rośliny. Pierwotne związki mykoryzowe są często nazywane paramykoryzami, ponieważ rośliny nie miały prawdziwych korzeni. Sposób kolonizacji różnych organów przypomina tę obserwowaną u współczesnych wątrobowców. Endotrofy to grzyby, które żyją wewnątrz tkanek roślinnych, nie wyrządzając im szkód. Te grzyby nie cieszyły się tak dużym zainteresowaniem naukowców jak mykoryzy, w związku z czym nadal brakuje dokładnych szacunków ich liczebności, znaczenia i różnorodności. Sugeruje się, że obecność grzybów endotroficznych chroni roślinę przed grzybami chorobotwórczymi, stymulując mechanizmy obronne roślin i pełniąc funkcję niszowego konkurenta. Wytwarzając metabolity wtórne, pomagają roślinie w walce z roślinożercami lub stymulują jej wzrost. Niektóre taksony grzybów są pasożytami innych organizmów, takich jak owady, nicienie, a nawet innych grzybów. Organizmy prowadzące parazytoidalny tryb życia rzadko występują w środowisku w dużych ilościach, co zmniejsza prawdopodobieństwo ich zachowania w zapisie kopalnym. Grzyby są w stanie atakować i trawić praktycz-



nie każdy rodzaj żywej struktury, w tym inne grzyby. Zdolność do zasiedlania innych grzybów pojawiła się bardzo wcześnie. Zespoły mykopasożytów znaleziono już w najstarszych jednoznacznych skamielinach grzybów, we wczesnym dewońskim osadzie powstałym około 410 mln lat temu. Z ewolucyjnego punktu widzenia wydaje się, że mykopasożyty mogą ułatwiać transfer genów (HGT), przekazując DNA bezpośrednio do swojego żywiciela lub usuwając jego ścianę komórkową. W ten sposób eliminują fizyczną barierę w pozyskiwaniu DNA od innych gatunków.

Badania nadal trwają

Grzyby są kluczowym elementem ewolucji życia na Ziemi. Dziś znacznie częściej i z dużo większą świadomością zwraca się uwagę na ich obecność i funkcje, które pełnią w ekosystemach, dlatego wiele z nich podlega ochronie. Od dawna grzyby mają zastosowanie w medycynie, a w ostatnim czasie również w nauce. Pierwsza kompletna sekwencja genomu eukariota, opublikowana w 1996 roku, która zrewolucjonizowała świat nauki, należy właśnie do grzyba (*Saccharomyces cerevisiae*). Nadal wiele taksonów pozostaje niepoznanych ze względu na trudności związane z identyfikacją. Jednak wciąż dynamicznie postępujący rozwój metod i narzędzi badawczych pozwala na coraz lepsze poznanie niepozornych, często niewidocznych gołym okiem organizmów. Zdobyta wiedza może pomóc nie tylko w ochronie, lecz także zastosowaniu czy znalezieniu odpowiedzi na inne pytania badawcze związane z mniej lub bardziej pokrewnymi organizmami. Jest to szczególnie istotne w aspekcie ocieplającego się klimatu i związanych z tym zmian stężenia CO₂ czy wzrostu temperatury, których szybkie tempo jest bardzo niepokojące. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Naranjo-Ortiz M.A., Gabaldón T., *Fungal evolution: diversity, taxonomy and phylogeny of the Fungi*, „Biological Reviews of the Cambridge Philosophy Society” 2019, doi: 10.1111/brv.12550, PMID: 31659870, PMCID: PMC6899921.

Richards T.A., Leonard G., Wideman J.G., *What Defines the „Kingdom” Fungi?*, „Microbiology Spectrum” 2017, doi: 10.1128/microbiolspec.FUNK-0044-2017, PMID: 28643626.

WYKUĆ PRZYSZŁOŚĆ



Opracy inżyniera w obszarze
ciekłego metalu, o tym,
co w tej pracy jest najważniejsze,
opowiada **prof. dr hab. inż.
Natalia Sobczak, wiceprezeska
Polskiej Akademii Nauk.**



SYLWIA PIWOWAR

Czym zajmuje się naukowiec pracujący w odlewnictwie?

NATALIA SOBCZAK: Odlewnictwo to rzemiosło o starożytnych korzeniach. Człowiek już od dawna wytwarzał stopy i wyroby z metali, co jest istotnym elementem naszej cywilizacji. Tradycyjnie kunszt wytwarzania opierał się na metodzie prób i błędów, co było zarówno kosztowne, jak i czasochłonne. Dzięki nauce możemy podejść do tego procesu bardziej świadomie, skracając czas produkcji i zmniejszając jej koszty. Odlewnictwo polega więc na przetwarzaniu i wytwarzaniu wyrobów przez wykorzystanie specyfiki stanu ciekłego metalu. Doprowadzamy metal do stanu ciekłego i go kształtujemy, dodajemy do niego różne składniki – to wygląda trochę jak przyprowadzanie zupy. Dodatki stopowe zmieniają charakterystyki metalu, co pozwala uzyskać pożądane właściwości już gotowego materiału i wyrobu.

Moje badania skupiają się na tym, jak kontrolować te procesy w powiązaniu z oddziaływaniem otoczenia zewnętrznego. Szukamy optymalnych składników i warunków, by uzyskać materiały o najlepszych właściwościach. Dzięki temu możemy tworzyć wyroby metalowe o wysokiej wytrzymałości, odporne na korozję lub posiadające inne specyficzne właściwości.

Jakie są główne zastosowania wyników pani pracy?

Nasze badania stanowią podstawę dla teoretyków z różnych interdyscyplinarnych dziedzin – od inżynierii materiałowej po geologię i astronomię. Najlepsze materiały znajdują zastosowanie w przemyśle, w rozmaitych branżach. Jednym z kluczowych wyzwań są rosnące problemy z surowcami krytycznymi oraz nowe regulacje prawne, które wymuszają eliminację pierwiastków tradycyjnie stosowanych przez tysiąclecia, a teraz uznanych (na podstawie wyników badań) za toksyczne i szkodliwe.

W efekcie konieczne jest opracowanie nowych stopów lub modyfikacja składu chemicznego już istniejących. Taki proces wymusza zmianę technologii produkcji lub konstrukcji końcowego produktu, co prowadzi do tzw. kompleksowej konwersji materiałowo-konstrukcyjno-technologicznej.

Co spowodowało, że wybrała pani właśnie ten zawód i ścieżkę kariery? Czy to była przypadkowa decyzja, czy też od początku była to pani pasja?

W mojej rodzinie kładziono duży nacisk na edukację i rozwój osobowości. Kluczową rolę w moich wyborach odegrała nauczycielka matematyki w szkole podstawowej. Miałam ogromne szczęście, że spotkałam ją na swojej drodze. Była wyjątkowa, miała niesamowitą zdolność dostrzegania i rozwijania talentów w każdym uczniu. Dzięki jej sugestiom i pomocy uczyłam się jednocześnie w dwóch szkołach – z moimi rówieśnikami i dodatkowo w specjalnej szkole fizyko-



SYLWIA PIWOWAR (2)

Odlewy artystyczne

matematycznej. Wtedy rozumiałam, że nauki ścisłe stanowią moją pasję. Początkowo chciałam studiować modną wtedy fizykę jądrową, jednak mój ojciec przekonał mnie do zmiany kierunku zainteresowań. W mieście – w którym dorastałam, funkcjonowało wiele zakładów metalurgicznych, więc wybór był naturalny, studia na wydziale fizyko-metalurgicznym. Ta decyzja okazała się w konsekwencji strzałem w dziesiątkę.

Czy od razu zdecydowała się pani na doktorat po studiach?

To było raczej marzenie, bo w tamtych czasach nie było łatwo dostać się na studia doktoranckie. Będąc studentką, zamiar pracy w sferze nauki realizowałam przez udział w studenckim kole naukowym, mając jednocześnie ogromne szczęście brać udział w realizacji projektów badawczych wybitnych naukowców. To ostatecznie przekonało mnie, że mój wybór jest właściwy i warto dalej walczyć o kontynuację pracy naukowej. Droga, którą pokonałam, nauczyła mnie pokory i cierpliwości, co później okazało się bardzo przydatne w życiu i pracy.

Jak przebiegała pani dalsza praca badawcza?

Po obronie doktoratu w 1984 roku moim pragnieniem było pracować w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego PAN (IMIM PAN). Zamiast tego przyjąłm okresową propozycję pracy „na próbę” w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie, którą złożył mi ówczesny dyrektor, prof. Zbigniew Górny. Ta decyzja okazała się kluczowa, ponieważ zamiast trzech miesięcy pozostałam tam na prawie 35 lat, prowadząc badania nad odlewami metalowymi materiałami kompozytowymi, które wówczas były nowością w Polsce.

W 1989 roku uzyskałam z programu UNIDO pierwszy międzynarodowy projekt dla Instytutu Odlewnictwa, co było ogromnym sukcesem, ponieważ nie mieliśmy wtedy żadnego doświadczenia w przygotowywaniu wniosków międzynarodowych. Otrzymane

finansowanie pozwoliło na przeszkolenie w kraju ponad 20 osób przez ekspertów UNIDO, a część z nich w zagranicznych ośrodkach naukowych i zakładach przemysłowych. Ten projekt nie tylko wprowadził nas w świat zaawansowanych badań i technologii, lecz także umożliwił utworzenie własnego zespołu badawczego oraz modernizację sprzętu. Najważniejszym rezultatem było jednak nawiązanie współpracy z naukowcami światowej klasy, co przyspieszyło rozwój naszego Zespołu Materiałów Kompozytowych.

Profesor Pradeep Rohatgi, kierownik Centrum Materiałów Kompozytowych na Uniwersytecie Stanu Wisconsin w Milwaukee i uznany przez Amerykańskie Stowarzyszenie Odlewników za ojca kompozytów odlewanych, zaproponował nam współpracę w ramach funduszu US-Poland Joint Fund (finansowaną przez amerykański National Institute of Standards and Technology – NIST). Projekt skupiał się na badaniu termofizycznych właściwości ciekłych stopów aluminium z wykorzystaniem naszej aparatury. W kolejnych latach współpraca ta zaowocowała stypendiami naukowymi w USA pod kierunkiem prof. Rohatgiego dla mnie i mojego męża, dzięki czemu włączyliśmy się w badania tam prowadzone. Owocem tych działań były kolejne projekty, w tym trzyletni projekt NIST, który tym razem prowadził mój mąż i skupiał się na zastosowaniu technologii *squeeze casting* w produkcji kompozytów metalowych. Ta technologia wykorzystuje ciśnienie nie tylko do infiltracji ciekłym metalem porowatego zbrojenia, lecz także jako czynnik termodynamiczny kształtujący odlewy.

Stworzyła pani Szkołę Inżynierii Ciekłego Metalu.

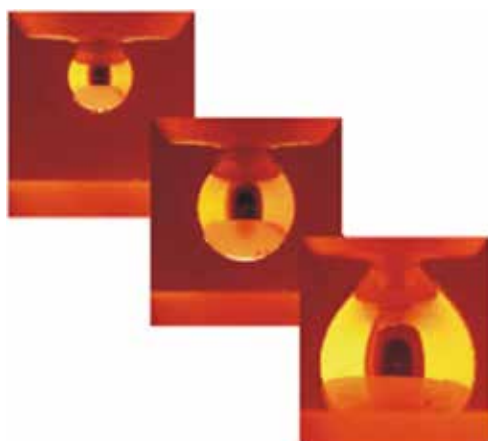
Czy może pani powiedzieć, jak do tego doszło?

Podczas projektu UNIDO poznałam prof. Nicolasa Eushathopoulou z Politechniki w Grenoble, z którym rozwijaliśmy metody badań ciekłych metali. Profesor zaplanował pierwszą międzynarodową konferencję na temat zjawisk wysokotemperaturowych w materiałach w stanie ciekłym, co doprowadziło do zaproszenia nas do uczestnictwa i propozycji założenia Międzynarodowego Komitetu High Temperature Capillarity (HTC) wraz z czołowymi ekspertami w tej dziedzinie.

Powstanie Międzynarodowego Komitetu HTC oraz organizacja jego seryjnych konferencji miały ogromne znaczenie dla rozwoju na świecie tego bardzo ważnego obszaru nauki, który obecnie coraz częściej nazywamy inżynierią ciekłego metalu (*liquid metal engineering* – LME), traktując ją jako istotny kierunek badań w dziedzinie inżynierii materiałowej.

Jakie były największe wyzwania i sukcesy związane z organizacją Międzynarodowego Komitetu HTC i seryjnych konferencji w tej dziedzinie?

Badania zjawisk wysokotemperaturowych w ciekłych metalach i stopach mają swoją specyfikę, ponieważ w wysokiej temperaturze wszystko reaguje z wszyst-



Test wykraplania ciekłego metalu na podłożu

kim. To wymaga specjalistycznej aparatury, która nie jest dostępna komercyjnie. Ponadto brak jest odpowiednich standardów. Współpraca ze środowiskiem HTC umożliwiła nam doskonalenie i rozwój metod i procedur badawczych oraz opracowanie własnych urządzeń, których oryginalność potwierdzono patentami i nagrodami. Nasze badania pozwoliły na odkrycie i zrozumienie takich fenomenalnych zjawisk, jak wysokotemperaturowa liquofobowość, „pamięć” cieczy metalowej, dziedziczność jej struktury, zjawisko „tańczącej kropli metalu” oraz mechanizmy whiskerowania powierzchni stałych w kontakcie z ciekłym metalem. Uzyskane wyniki znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu, od lotnictwa po energetykę jądrową.

Może to nieskromnie zabrzmieć, ale nie znam innego zespołu na świecie, który mógłby równać się z naszymi osiągnięciami w tworzeniu aparatury do badań ciekłego metalu. Dzięki niej przeprowadziliśmy zaawansowane badania wielu metali i stopów, a wyznaczone charakterystyki służą jako referencyjne „geny materiałowe” (*NIST Materials Genome Initiative*, *NASA Astrophysics Data System*, adswwww.harvard.edu) w modelowaniu i optymalizacji procesów ciekło-fazowych, a także w pracach związanych ze sztuczną inteligencją.

Nasza filozofia „zobaczyć niewidzialne” pozwoliła nam opracować kluczowe wytyczne dla procesów łączenia materiałów przy użyciu wysokotemperaturowej fazy ciekłej, takich jak lutowanie, spawanie czy druk przestrzenny. Obecnie te badania prowadzimy w nowo utworzonym Laboratorium Inżynierii Ciekłego Metalu na Wydziale Odlewnictwa AGH, działającym w ścisłej współpracy z IMIM PAN.

Jak przebiegała pani praca badawcza w USA?

Z perspektywy czasu mogę powiedzieć, że pierwszy wyjazd do Stanów Zjednoczonych i praca na amerykańskiej uczelni były najważniejszym etapem w rozwoju mojego zespołu i mojej karierze, pozwolił zdobyć cenne doświadczenie i nawiązać międzynarodowe kontakty, które owocowały kolejnymi projektami, wspólnymi publikacjami i nowymi pomysłami. Na początku obawiałam się, czy sobie poradzę, ale na miejscu okazało się, że cała organizacja pracy na uczelni jest oparta na zaufaniu i zapewnieniu każdemu naukowcowi komfortu twórczej pracy przy minimalnym obciążeniu go procedurami biurowymi. Miałam pełny dostęp do laboratoriów, aparatury, materiałów pomocniczych, bibliotek i programów komputerowych – mogłam pracować o każdej porze. Był to dla mnie prawdziwy szok kulturowy, ale też swoiste – znowu – spełnienie marzeń.

Dlatego teraz mocno wspieram mobilność młodych naukowców – jak najwcześniej powinni jechać za granicę, zobaczyć, jak wygląda nauka na najwyższym poziomie, i zdecydować, czy chcą się w niej dalej rozwijać.

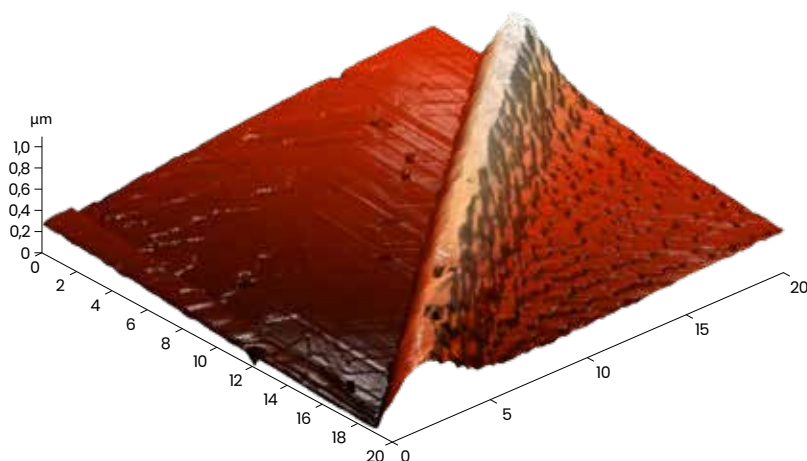


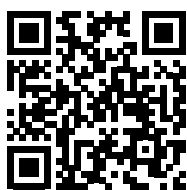
Pracowała też pani w Japonii. Jak pani z perspektywy czasu wspomina pracę w tym kraju?

Warunki mojego rocznego kontraktu w Japonii różniły się od tych w USA. Otrzymałam stanowisko profesora na podstawie mojego dorobku i doświadczenia. Podczas pierwszego spotkania z prof. Kiyosim Nogim usłyszałam: „Just enjoy your stay in Japan”. Moje obowiązki obejmowały badania, doradztwo, pracę z doktorantami i wykłady na wiodących uniwersytetach Japonii, co pozwoliło mi zwiedzić wiele miejsc. Miałam możliwość samodzielnej pracy na stanowiskach wysokotemperaturowych, co dało mi szansę na naukę nowych technik badawczych i operowanie specjalistycznym oprogramowaniem, znacznie skracającym czas analiz danych. Umożliwiło mi to również realizację badań dla projektów krajowych i polsko-amerykańskich, co przyczyniło się do zdobycia habilitacji po powrocie do kraju.

Kompleks aparaturowy

Zjawisko zmiany topografii powierzchni (surface ridge)





QR kod dostępu do filmu ilustrującego w czasie rzeczywistym zjawisko tańczącej kropli podczas oddziaływania w wysokiej temperaturze kropli żeliwa z podłożami z tlenku cyrkonu zawierające różne dodatki: po lewej – tlenku itru, po prawej – tlenku magnezu, <https://youtu.be/5-FYDtrW8dE>

Czy może pani opowiedzieć, jak badania nad ciekłymi metalami mogą być wykorzystywane w gospodarce?

W 2007 roku w Instytucie Odlewnictwa założyłam Centrum Badań Wysokotemperaturowych Ciekłych Metali i Stopów, którego funkcjonowanie okazało się niezwykle istotne, wręcz przełomowe. Zainspirowana światowymi laboratoriami, zaprojektowałam kompleks aparaturowy do badań metali i stopów o temperaturze do 2000 st. C, co umożliwiło rozwijanie nowych metodologii. Dzięki finansowaniu i wsparciu dyirekcji zbudowaliśmy unikatowy kompleks, który nie ma odpowiednika na świecie.

Zamiast tradycyjnego patentowania przedstawiliśmy nasze wyniki na konferencji HTC-2007 oraz w czasopiśmie „Materials Science and Engineering”, co szybko zaowocowało propozycjami współpracy od światowych grup badawczych i przemysłowych. Współpraca z krakowską firmą MeasLine zaowocowała mobilną aparaturą nowej generacji o nowych możliwościach badawczych, nagrodzoną Złotym Medalem na Targach ITM Industry Europe 2021 w kategorii Nauka dla Gospodarki.

Z której ze swoich publikacji jest pani najbardziej dumna?

Z pracy, która pokazuje istotną rolę badań podstawowych dla rozwoju nowych materiałów i technologii, zatytułowaną tajemniczo *The Mystery of Molten Metal*. Została ona uznana za najlepszą publikację na 70. Światowym Kongresie Odlewnictwa w chińskim Hanzou w 2010 roku i uzyskała nagrodę międzynarodową firmy Foseco. Był to jednocześnie pierwszy w historii polskiego odlewnictwa otwierający plenarny referat narodowy wygłoszony na Światowym Kongresie Odlewnictwa. Później ta sama publikacja została

wybrana przez Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society za jedną z najlepszych w dziedzinie badań podstawowych dla odlewnictwa w dziesięcioleciu 2004-2014.

Czy widzi pani zastosowanie sztucznej inteligencji w swojej dziedzinie?

Pracując jako redaktor wydawniczy w kilku czasopiśmie naukowych, w tym dla Springer – International Publisher, już kilka lat temu zauważyłam, że niektóre publikacje wydawały się podejrzanie zunifikowane i przez to niekompletne, pozbawione naukowego nerwu. Czasem używana w tekstach terminologia była miejscami zupełnie inna niż ta, którą zwykle stosujemy w nauce. Zachodziło uzasadnione podejrzenie, że te artykuły nie mogły być pisane przez naukowców.

Po wprowadzeniu w czasopiśmie specjalistycznego oprogramowania i sprawdzeniu tych artykułów okazało się, że w ich tworzeniu brała udział sztuczna inteligencja. Obecnie są czasopisma, które akceptują takie artykuły, a na niektórych uczelniach dopuszcza się również wykorzystanie AI do analizy literaturowej badanego zagadnienia w pracach magisterskich czy doktorskich. AI może wykonać taką analizę bez interpretacji wyników, co jest bardzo przydatne w opisach patentowych, opartych tylko na danych testowych. Sztuczna inteligencja będzie użyteczna, kiedy nauczy się „czytać” myśli twórców i uwzględnić wyniki wszystkich naszych eksperymentalnych doświadczeń i symulacji mentalnych. AI musi jeszcze nauczyć się rozumieć kontekst i niuanse, które my, naukowcy, dostrzegamy i wykorzystujemy do analizy wyników dzięki wieloletniemu doświadczeniu, wiedzy i intuicji.

Niewątpliwie komunikacja z AI wymaga stosowania odpowiedniego języka, inaczej nieuniknione będą błędy. Dlatego wymagam od swoich młodych pracowników stosowania w naszych publikacjach precyzyjnej terminologii i jednoznacznych stwierdzeń. Dla przykładu zapytałam AI: „Jakie stopy zwilża ciekły magnez?” – po długim namyśle pojawiła się odpowiedź: „Jesteś zabawna”. Umysłowiliśmy wówczas sobie, że swoiste zakłopotanie AI wynikało z tego, że miała ona na myśli stopy jako część nóg, a nie stopy jako tworzywa.

Dalej było jeszcze trudniej, bo AI nie wiedziała, że definicja stopów jako materiałów inżynierskich bardzo uległa zmianie przez ostatnie 100 lat i obecnie są do nich zaliczane nie tylko tworzywa *stricto* metalowe, lecz także kombinacje z pierwiastkami należących do niemetalu, związków międzymetalicznych i nawet tlenków, azotków, węglików czy gazów. Co więcej, wbrew szeroko stosowanej definicji stopów stopienie składników już nie jest koniecznym warunkiem wytwarzania odpowiedniego stopu i można to zrobić np. przez stopowanie mechaniczne (*mechanical alloying*).

Z młodymi naukowcami Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN



SYLWIA PIWOWAR

Widzę ogromny potencjał w zastosowaniu sztucznej inteligencji. Gdybyśmy mieli do niej dostęp 30–40 lat temu, postęp w badaniach mógłby być wprost niesamowity. W mojej dziedzinie zastosowanie sztucznej inteligencji jest możliwe wtedy, gdy mamy szczegółowo opisane poszczególne etapy eksperymentu. Bez dokładnych informacji otrzymywane wyniki mogą być mylące, dalekie od rzeczywistości.

Ile trzeba zrobić eksperymentów, żeby osiągnąć sukces?

Wszystko jest kwestią doświadczenia, wcześniejszych porażek, odpowiedniego podejścia do własnych badań, badań koleżanek i kolegów. Tak jak w medycynie trzeba nieustannie czytać, śledzić, analizować, kto co zrobił, kto co zmienił, kto co udoskonalił w samym sposobie pomiaru. Mam wiele przykładów na to, że kiedy coś nie wychodziło, przyczyną niepowodzenia był drobiazg.

Kiedy pracowałam nad projektem amerykańskim i część badań robiłam w Japonii, kolega przygotował próbki w NASA, używając przez pomyłkę tygla z tlenku glinu zamiast z tlenku magnezu, bo wyglądają one wizualnie niemalże identycznie. Badania próbek, które otrzymałam, były nieprawidłowe, a ich zachowanie w trakcie badań wysokotemperaturowych było absolutnie niezgodne z przewidywaniami.

Wyjaśnienie anomalii zajęło nam naprawdę sporo czasu. Dzięki przestrzeganiu zaawansowanych procedur badawczych, zwłaszcza dokładnym opisom każdego etapu przygotowania i prowadzenia eksperymentu odkryliśmy, że przyczyną naszych problemów był niewłaściwy materiał tygla. Podczas topienia w nim badanego metalu zaszły reakcje chemiczne między tymi materiałami, co wpłynęło na wyniki eksperymentów w Japonii. I takie właśnie drobne, „nieistotne” szczegóły są niekiedy kluczowe. Dlatego trzeba naprawdę przeprowadzić osobiście wiele prób i dokonać bardzo szczegółowych opisów, by osiągnąć sukces i zrozumieć, co wpływa na rzetelność i prawidłowość wyników.

Ale nie zawsze liczba przeprowadzonych testów zapewni dobrą jakość i wiarygodność uzyskiwanych wyników. W naszych badaniach niekiedy większe znaczenie mają takie cechy naukowca jak kreatywność, staranność i zwracanie uwagi na najdrobniejsze szczegóły, czego na danym etapie trudno oczekiwać od sztucznej inteligencji.

Jakie trudności napotykają naukowcy w swojej pracy badawczej?

W odniesieniu do obecnej sytuacji bez wątpienia są to konflikty zbrojne, zawirowania polityczne i niedofinansowanie nauki, które zmuszają naukowców do wyjazdu, niechcianej zmiany zatrudnienia lub rezygnacji z pracy dla nauki.

Obecnie pracuję w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego PAN



SYLWIA PIWOWAR

prof. dr hab. inż. Natalia Sobczak, wiceprezesa PAN

Zajmuje się naukowymi, metodologicznymi i praktycznymi aspektami zjawisk wysokotemperaturowych w obszarze inżynierii ciekłego metalu, w tym opracowaniem nowej generacji materiałów dla energetyki, magazynowania energii i przemysłu samochodowego, tworzyw ultralekkich dla potrzeb medycyny i przestrzeni kosmicznej oraz problematyką łączenia różnorodnych materiałów.

Kieruje Pracownią Teorii Procesów Metalurgicznych w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej im. Aleksandra Krupkowskiego PAN. Wykładowczyni Krakowskiej Interdyscyplinarnej Szkoły Doktorskiej.

Wiceprezesa Polskiej Akademii Nauk w kadencji 2023–2026.

natalia.sobczak@pan.pl

– więc spełniło się moje marzenie z młodości. Ale świadomość aktualnie ogromnych ograniczeń badań i problemów funkcjonowania instytutów naukowych PAN, wynikających z braku należytego finansowania nauki, napawa mnie smutkiem. Obawiam się, że wielu młodych utalentowanych naukowców nie wytrzyma tej presji i albo wyjedzie uprawiać naukę za granicą, albo zmieni zawód.

Zapewne – w co wierzę głęboko – nikogo nie trzeba zbyt wiele przekonywać, że nie ma rozwoju cywilizacji bez systemowego stosowania innowacji. Ale jak z kolei przekonać rządzących, że nie ma innowacji bez prowadzenia badań podstawowych?

ROZMAWIALI JOLANTA IWAŃCZUK, DANIEL SAX



**prof. dr hab.
Marek Lewandowski**

Zajmuje się historią ziemskiego pola magnetycznego, utrwaloną w skałach skorupy ziemskiej, a także historią całego geosystemu, starając się zrozumieć mechanizmy przyrodnicze, które wpływały na historię naturalnego środowiska planety. Uczestnik wypraw polarnych do Arktyki i na Antarktydę.
leamar@igf.edu.pl

HISTORIA ZŁODOWACEN GLOBALNYCH

*Najbardziej niezwykła rzecz we Wszechświecie
kryje się w twojej głowie.*

Bill Bryson

Marek Lewandowski

Instytut Geofizyki PAN w Warszawie

Według nieformalnej definicji zlodowacenie globalne występuje wtedy, gdy oba bieguny Ziemi są pokryte lodem. W historii geologicznej zlodowacenia globalne były epizodami buntu Ziemi przeciwko Słońcu, które przez kilka miliardów lat zapewniało naszej planecie, przy wsparciu szklarniowej atmosfery i oceanicznego bufora ciepła, temperaturę powyżej 0 st. C. Mimo to trzykrotnie bieguny Ziemi przełamywały temperaturę zamarzania wody: 2,2 mld lat temu (zlodowacenie hurońskie), następnie 0,6 mld lat temu (zlodowacenie kriogeńskie) i w neogenie (zlodowacenie neogeńskie)

– 23 mln lat temu do dziś. Co prawda w karbonie (około 360–300 mln lat temu) pokrywy lodowe obejmowały polarną, południową część superkontynentu Gondwany, brak jednak dowodów na istnienie w tym czasie pokrywy lodowej w strefie północnej. Z wyjątkiem wymienionych powyżej paroksyzmów zimna, temperatura na Ziemi była dość stabilna, w miarę jak rosło Słońce i spadała koncentracja gazów cieplarnianych.

Każde zlodowacenie globalne to niebotyczny stres środowiskowy i zarazem impuls ewolucyjny. Po pierwszym takim zlodowaceniu na Ziemi pojawiły się organizmy korzystające z tlenu do przemiany materii w energię (metabolizm tlenowy), po drugim biosfera zapelniła się organizmami wielokomórkowymi. Trzecie globalne zlodowacenie przyniosło Ziemi *Homo sapiens*, którego mózg ma efektywność superkomputera z praktycznie nieskończoną pamięcią operacyjną. Dzięki niemu człowiek jako jedyny spośród istot ży-



MAREK LEWANDOWSKI

wych posiadał wiedzę o tajemnicy prokreacji, a także polecał na Księżyc. Ewolucja przeszła samą siebie, kreując system biocybernetyczny, zdolny do zrozumienia jej samej. Jak to się stało, że coś tak osobliwego powstało w przyrodzie?

Narodziny Ziemi

Dzisiejsze środowisko naturalne jest wynikiem długiej historii wzajemnego oddziaływania lito-, hydro-, atmo- i biosfery. Trzy pierwsze powstały bezpośrednio po kolizji dwóch planet (pra-Ziemi i Thei), która zrodziła Ziemię i Księżyc około 4,5 mld lat temu. Wkrótce potem Ziemia miała już strukturę podobną do dzisiejszej. W środku znajdowało się płynne, żelazne jądro wielkości Marsa, generujące pole geomagnetyczne. Jądro było otoczone płaszczem umiarkowanie ciężkich skał, a najlżejsze skały, w tym skały skorupy kontynentalnej, tworzyły zewnętrzną litosferę. Po ochłodzeniu planety pierwotny ocean magmy został zastąpiony oceanem wody, w całości pokrywającym Ziemię. Wczesna Ziemia była więc planetą wodną, wyprzedzającą o ponad 4 mld lat Waterworld w rozumieniu Hollywood.

Biosfera rodziła się w pierwotnym oceanie. Kiedy dokładnie, tego nie wiemy, jednak najwcześniejsze znane dziś mikroskamieniałości są wieku archaicznego (3,5 mld lat temu), a znajduwane w cyrkonach inkluzje „lekkiego” grafitu (znamiennego dla materii organicznej) są datowane na mniej więcej 3,8 mld lat, a nawet (w pojedynczych kryształach) na 4,1 mld lat. Pierwsze organizmy zdolne do samopowielania mogły więc powstawać już w późnym hadeiku (4,55–4 mld lat temu). Powstanie kolejnych gatunków to historia ewolucyjnych przypadków, których sukces zależał od zdolności przetrwania w otaczającym środowisku.

Atmosfera Ziemi w hadeiku była gęsta i składała się głównie z pary wodnej, amoniaku, dwutlenku węgla, tlenków siarki, metanu oraz niewielkiej ilości gazów szlachetnych. Wolnego tlenu nie było. Planeta była okryta chmurami, ciśnienie na powierzchni wynosiło około 60 barów. Dzisiejsze ciśnienie to mniej więcej 1 bar.

W paleoarchaiku (3,6–3,2 mld lat temu) organizmy jednokomórkowe (prokaryoty) były chemotrofami. Przetwarzały (metabolizowały) związki chemiczne ze swojego bezpośredniego otoczenia na energię, potrzebną do podziału na komórki potomne. W mezoarchaiku (3,2–2,8 mld lat temu) pojawiły się jednak bakterie z efektywniejszym metabolizmem. Mogły przetwarzać atmosferyczny CO_2 , przy okazji wydalając CH_4 (metan) jako produkt uboczny (metanogeneza). Te prymitywne bakterie przekształciły atmosferę ziemską na swoją modłę, zmieniając jej skład z bogatej w CO_2 w bogatą w CH_4 . Przy młodym jeszcze Słońcu metanowa atmosfera zapewniała temperaturę powyżej zera na powierzchni Ziemi.

Jednak w tym samym czasie pojawiają się organizmy uzbrojone w związek organiczny, który zmienił świat – chlorofil. Dzięki niemu sinice zaczynają fotosyntetyzować CO_2 , wydzielając przy tym tlen jako produkt uboczny. Płytkowodne maty sinicowe (stromatolity) zwiastują wynurzenie się skorupy ponad poziom oceanu. To było ważne wydarzenie. Od tego czasu litosfera weszła w kontakt z atmosferą nie bez skutków dla globalnego klimatu.

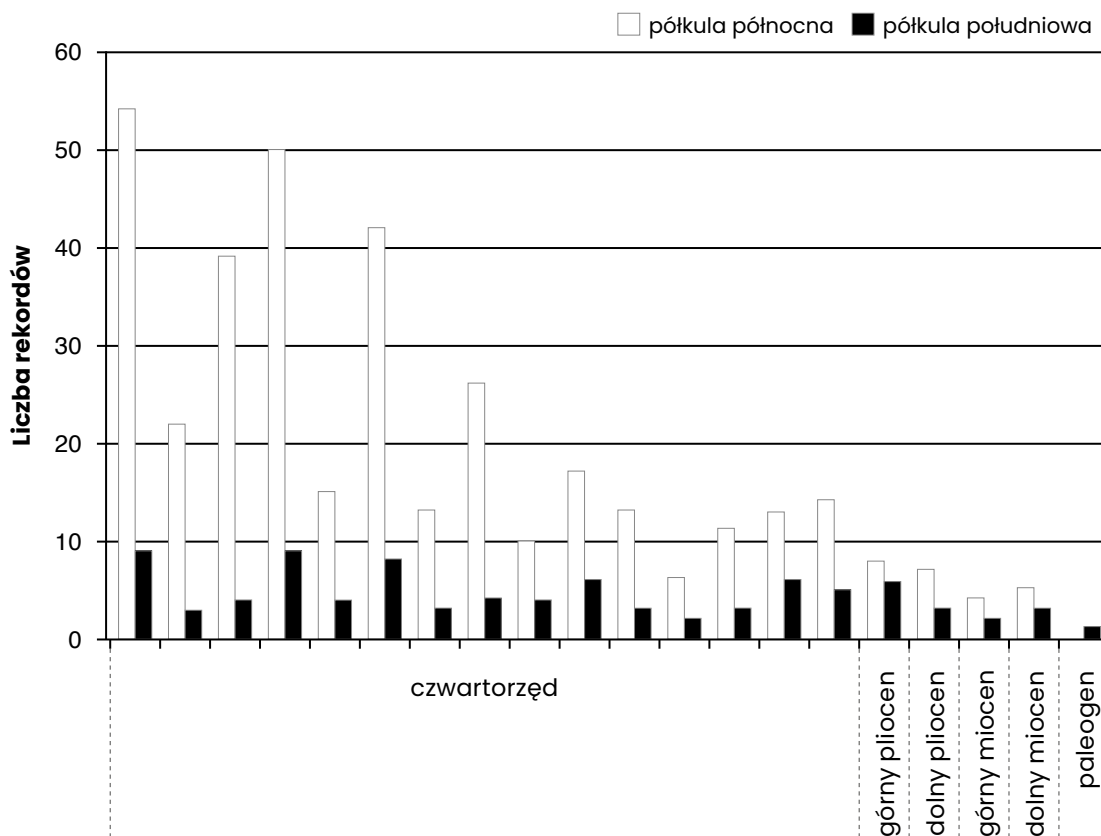
Zachód słońca u wybrzeży Gondwany w karbonie (ok. 300 mln lat temu). Analog z Zatoki Thala, Antarktyda Wschodnia

Oaza Bungere (ang. *Bunger Hills*, Antarktyda Wschodnia) jako analog Ziemi z czasów zlodowacenia hurońskiego (2,2–2,1 mld lat temu)



ADAM NAWROT

Frekwencja glaciałów antarktycznych (czarne słupki) i arktycznych (białe słupki) od miocenu (ok. 23 mln lat temu, prawa strona osi poziomej) do dziś. Widać narastające ochłodzenie globalne, wyrażone zwiększoną liczbą glaciałów zamarzającej Arktyki (za: Ehlers & Gibbard 2007)



Początkowo tlen pozostawał w toni wodnej, wiążąc głównie jony żelaza. Dopiero kiedy ich zabrakło, tlen zaczął się przedostawać do metanowej atmosfery. Efekt był piorunujący. Około 2,2 mld lat temu atmosferyczny metan szybko utlenił się do dwutlenku węgla, który jest znacznie słabszym gazem cieplarnianym. Słońce w tym czasie dostarczało kilku procent energii mniej niż dziś, więc spadek koncentracji metanu na rzecz CO₂ wywołał wielki mróz. Ziemia zamarzła aż do głębokiej litosfery, doświadczając pierwszego globalnego zlodowacenia, zwanego zlodowaceniem hurońskim. Dziś analogiem ówczesnej powierzchni Ziemi jest Antarktyda Wschodnia.

Około 2,1 mld lat temu lody puściły (zapewne wskutek gromadzonego w litosferze ciepła z wnętrza Ziemi oraz rozwijającej się aktywności tektonicznej i wulkanicznej). Przez kolejny miliard lat trwał okres „wielkiej geologicznej nudy”. Organizmy fotosyntetyzujące jednak nie próżnowały, systematycznie ściągając CO₂ z atmosfery i wzbogacając ją w tlen, jednocześnie tworząc coraz bardziej złożone struktury wielokomórkowe.

Chlorofil miał swój ogromny wkład w ściąganiu (sekwestracji) CO₂ z atmosfery. Jednak wraz z dynamizującą się tektoniką globalną, kolizjami kontynentów i wypiętrzaniem gór (orogenezą), coraz więcej skał wchodziło w reakcje chemiczne z atmosferą. W wyniku erozji i procesu zwanego karbonatyzacją (uwęglanowaniem) duża część atmosferycznego

CO₂ była nieodwracalnie wiązana w nieorganiczne węglany, prowadząc do dalszego spadku koncentracji CO₂. W późnym proterozoiku (1–0,541 mld lat temu), po rozpadzie superkontynentu Rodinii i następczych zderzeniach kontynentów, doszło do orogenezy kadmowskiej (0,7–0,55 mld lat temu) i wypiętrzania kolejnych pasm górskich, których erozja wzmacniała sekwestracyjne efekty karbonatyzacji.

Fotosynteza i karbonatyzacja zmniejszały efekt cieplarniany. Jednak sama atmosfera z biegiem geologicznego czasu stawała się coraz rzadsza z winy wiatru słonecznego, który przez miliardy lat wybijał cząstki atmosferycznych gazów w przestrzeń kosmiczną. Proces ten musiał być szczególnie silny w późnym proterozoiku, kiedy przez 200 mln lat natężenie ziemskiego pola magnetycznego przejściowo spadło (zapewne z powodu krystalizacji jądra wewnętrznego) i wynosiło zaledwie 10 proc. dzisiejszego. Szalejący wiatr słoneczny mógł rozrzedzić atmosferę, zmniejszając znacząco jej efekt cieplarniany (bez atmosfery temperatura na Ziemi wynosiłaby dziś około –15 st. C). W sumie zbieg tych trzech czynników spowodował drugie globalne zlodowacenie (w istocie serię następujących po sobie zlodowaceń), zwane zlodowaceniem kriogeńskim (0,85–0,635 mld lat). Nie było ono jednak tak rozległe jak hurońskie, gdyż rosnące Słońce dostarczało już więcej energii (choć jeszcze nie tak dużo jak dziś). Dobrym analogiem ówczesnej Ziemi mogą być skaliste oazy Antarktydy.



Gdy lody puściły

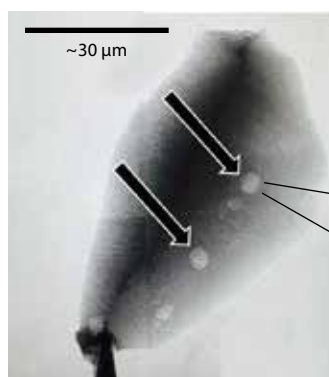
Koniec zlodowacenia kriogeńskiego wyznacza ważną granicę w ewolucji materii ożywionej. Zimny, a przez to dobrze natleniony ocean (kłania się prawo Henry’ego, mówiące o odwrotnie proporcjonalnej rozpuszczalności gazów w cieczach w funkcji temperatury) był matecznikiem powstawania złożonych organizmów wielokomórkowych, a z początkiem kambru także organizmów szkieletowych. Wśród nich pojawiły się formy cudzożywne, które metabolizowały pokarm, wykorzystując tlen. Tak powstał świat zwierząt, które najpierw pożerały glony, a potem siebie nawzajem. Dziś zwierzęta stanowią niewielki (niecałe 0,5 proc.) odsetek biomasy. Dominują rośliny (80 proc. biomasy), pozostałą część tworzą bakterie, grzyby, archeony i protisty. Udział człowieka w globalnej biomasie ocenia się na mniej więcej 0,01 proc.

W sylurze (około 443–419 mln lat temu) na lądzie pojawiają się pierwsze rośliny, przez co potencjał sekwestracji atmosferycznego CO_2 znacząco rośnie, osiągając apogeum w karbonie (359–299 mln lat temu). W tym czasie koncentracja CO_2 spada do najniższego poziomu od początku istnienia atmosfery, za to tlenu było dwa razy więcej niż dziś. Jednocześnie dochodzi do wypiętrzania orogenów waryscyjskich i nasilenia karbonatyzacji. Dwutlenek węgla prawie znika z atmosfery, co doprowadziło do rozwoju pokryw lodowych na ogromnych obszarach paleokonty-

nentu Gondwany. Przechwycony przez karbońskie rośliny węgiel Ziemia odłożyła w depozycie na 300 mln lat. Dziś przejął go człowiek.

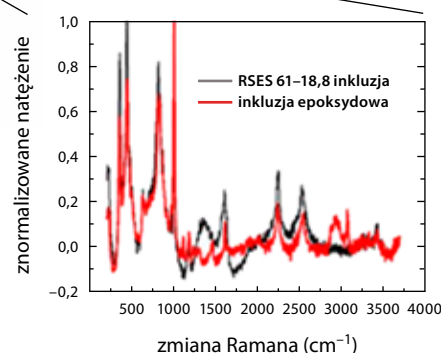
Okres permo-triasowy (299–201 mln lat temu) był czasem wielkich wymierań, również roślin. Atmosfera mogła więc odnowić zasoby CO_2 , głównie dzięki aktywności wulkanicznej. Rośliny lądowe powoli wracają do gry jako konsumenci CO_2 . Rozwinęły się

Antarktyczny analog strefy równikowej z czasów zlodowacenia kriogeńskiego (0,85–0,635 mld lat temu)

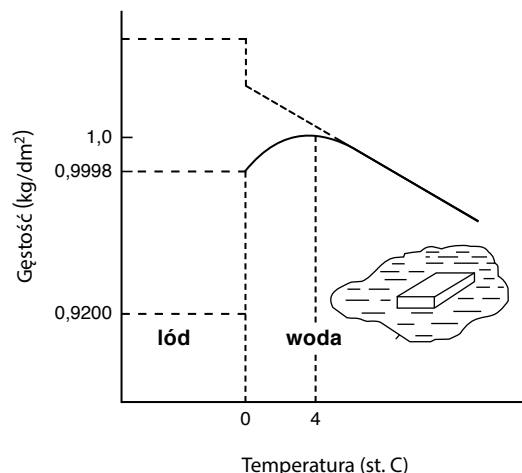
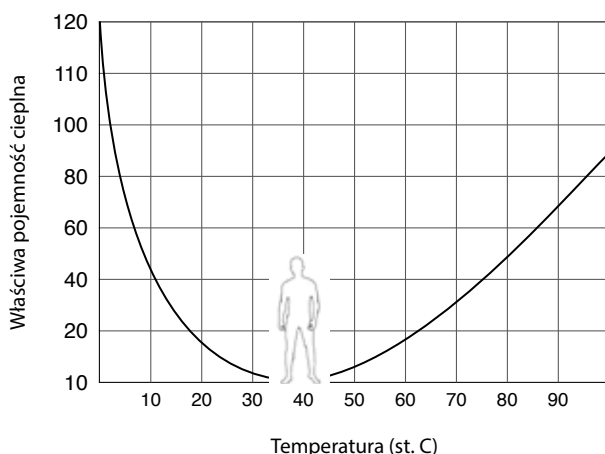


Wstawka: widma Ramana dla górnej inkluzji i „inkluzji” epoksydowej z innego kryształu cyrkonu, wskazujące na odmienny charakter widm dla grafitu i żywicy epoksydowej (za: Bell et al. 2015)

Transmisyjny obraz rentgenowski próbki cyrkonu (ok. 4,1 mld lat, odsłonięcie Jack Hills, Australia) z zaznaczonym grafitem.



Diagramy ilustrujące wybrane właściwości wody: zmienność właściwej pojemności cieplnej (P_c , z lewej) oraz gęstości (z prawej). Sylwetka człowieka wskazuje na wartość optymalną z punktu widzenia kinetyki reakcji enzymatycznych (za: Filin 2017)



trawy i lasy, a w eocenie (około 50 mln lat temu) zarodniki paproci *Azolla* pokrywały Ocean Arktyczny. Na początku miocenu (23 mln lat temu) dęby i sekwoje porastały jeszcze Spitsbergen. Ziemia była ciepła i zielona, grzejąc się w promieniach coraz większego Słońca. Co się więc stało, że w ciągu kilku ostatnich milionów lat bieguny Ziemi znów pokryły się lodem, a temperatura na nich spadła o blisko 60 st. C?

Jeżeli w grę nie wchodzi nieznane czynniki astro-nomiczne (*notabene* cykle Milankovicia nie miały znaczenia dla neogeńskiego spadku temperatury, na co wskazują wyniki badań rdzeni lodowych z Antarktydy i Grenlandii), to winą za najniższą w historii koncentrację CO_2 należy obarczyć zarówno fotosyntezę, jak i karbonatyzację, a także cienką już atmosferę. W sumie wymuszenie radiacyjne stało się krytycznie niskie i nic dziwnego, że każda zmiana ilości CO_2 w atmosferze ma dziś znaczenie dla klimatu naszej planety.

wody i źródła energii (pożywienia). Fundamentalne znaczenie w mojej opinii miała jednak temperatura otoczenia, pozwalającą na efektywną pracę całego organizmu. Pracuje on najlepiej, gdy ma temperaturę 36,6 st. C. Jest to temperatura zdrowego człowieka, bliska jego komfortu termicznego w wersji bez ubrania.

Dlaczego akurat tyle? Odpowiedź znajdujemy w kinetyce reakcji biochemicznych. Enzymy, katalizatory tych reakcji, są najefektywniejsze w zakresie temperatur 35–42 st. C. Praktycznym przykładem są enzymatyczne proszki do prania, których stosowanie w temperaturach powyżej 42 st. C nie miało sensu, bo enzymy ulegały wtedy denaturacji. Z kolei w temperaturach poniżej 35 st. C enzymy mają zbyt niską energię kinetyczną, by efektywnie brać udział w reakcjach chemicznych.

Optymalne warunki dla reakcji enzymatycznych są pochodną właściwości wody, która cechuje się nieliniową zmiennością właściwej pojemności cieplnej i posiada minimum przy temperaturze około 37 st. C. Właśnie w tej temperaturze reakcje enzymatyczne przebiegają z największą intensywnością, a organizm jest najbardziej wydajny.

Nie zmienimy ani właściwości wody, która stanowi 60 proc. naszego ciała, ani białek, które nas budują. Ze względu na cechy fizykochemiczne ludzkiego organizmu jesteśmy w temperaturowej pułapce. Nasz superkomputer działa sprawnie tylko w wąskim zakresie temperatur. Nastąpił on dopiero z nadejściem trzeciego zlodowacenia globalnego.

Jesteśmy więc dziećmi chłodu. Jeśli ktoś ma wątpliwości, proszę po przeczytaniu tego eseju wyłączyć lodówkę i wyobrazić sobie, że świat dookoła ma stałe temperaturę powyżej 0 st. C. Tak jak z reguły bywało na Ziemi przez miliony lat. ■

Homo sapiens – dziecko chłodu

Apogeum spadku temperatury na Ziemi przypada na ostatnie pięć milionów lat. W tym samym czasie następuje ewolucyjny rozkwit naczelnych. Badania DNA wskazują na możliwość pojawienia się u *Homo erectus* zmutowanego genu o nazwie ARHGAP11B, który około 300 tys. lat temu miałby zmienić bieg ewolucji hominidalnego mózgu przez znaczący wzrost jego objętości.

Liczba mutacji zachodzących codziennie w naszym organizmie jest ogromna, jednak zmutowane komórki są z reguły niszczone przez ciała odpornościowe. Jeżeli sugestie biochemików co do roli genu ARHGAP11B są poprawne, to pierwszy osobnik ze zmutowanym genem przetrwał najpierw inspekcję własnego systemu odpornościowego, a następnie zdołał przeżyć na afrykańskiej sawannie (co w tamtym czasie nie było takie pewne...) do czasu uzyskania dojrzałości płciowej. Kolejne pokolenia naszego mutantu mogły rozwijać się w optymalnym dla rosnącego mózgu środowisku naturalnym, które zapewniało mu dostęp do tlenu,

Chcesz wiedzieć więcej?

Bell E.A., Boehne P., Harrison T.M., Mao W.L., *Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 2015.

Ehlers J., Gibbard P.L., *The extent and chronology of Cenozoic Global Glaciation*, „Quaternary International” 2007.

Filin S., *Niezwykłe właściwości zwykłej wody*, „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna” 2017.

Bryson B., *Gało*, 2022.

Gee H., (Bardzo) *krótka historia życia na Ziemi*, 2023.

Kump L.R., Kasting J.J.F., Crane R.G., *The Earth System*, 2009.

Artykuł powstał na podstawie wykładów autora z ostatnich 10 lat, prowadzonych na Wydziale „Artes Liberales” UW, interdyscyplinarnych studiach doktoranckich PAN oraz uniwersytetach III wieku.

O PRZEMIANACH FORM W PRZYRODZIE

Ewolucję rozumiemy jako swego rodzaju wyścig zbrojeń,
a jest to szczególny przypadek możliwych oddziaływań.

Nikodem Zieliński

Centrum Nauki i Techniki – EC1 Łódź
Centrum Badań nad Cyberkomunikacją
i Sztuczną Inteligencją, Uniwersytet Łódzki

Zasady ewolucji opisują, jak w populacjach zachodzą zmiany między pokoleniami. Zakładają wspólne pochodzenie i budowę organizmów, łącząc je związkami pokrewieństwa. To podstawy modeli rozwoju gatunków, popularnie znanych pod postacią drzewa, bukietu czy wieńca. Zastępując pojęcie transmutacji, opis ewolucyjny rozważa rozwój

na tle doskonałości cech takich jak atrakcyjność czy adaptacyjność. Równolegle rozwinięte teorie elektromagnetyzmu i termodynamiki stworzyły podwaliny epokowych zmian technologicznych.

Termodynamika oferuje też szerszą perspektywę do interpretacji procesów ewolucyjnych, uwzględniając energie wyróżniające organizmy oraz jej przemiany w relacjach organizmów ze środowiskiem. Publikacja *Natural Selection for Least Action* autorstwa Ville Kaili i Arto Annili z Uniwersytetu w Helsinkach opisuje, jak w procesach doboru są eksplorowane szlaki, na których organizmy ewoluują w sposób minimalizujący różnice w rozkładzie energii. Ukazuje to proces ewolucyjny jako faworyzujący adaptacje, które pozwalają organizmom najszybciej rozpraszać i przekazywać energię. Badanie pokazuje również, jak trajektorie



mgr Nikodem Zieliński

Biolog ze specjalnością w neurobiologii. Jego zainteresowania badawcze koncentrują się wokół relacji środowiska, ciała i zachowania, a szczególnie fizjologii procesów uczenia się i powstawania pamięci. W przeszłości związany z Uniwersytetem Amsterdamskim, Centrum Psychiatrii i Neurobiologii INSERM w Paryżu oraz Instytutem Biologii Doświadczalnej im. Marcelego Nenckiego PAN w Warszawie. Współpracował z Centrum Nauki Kopernik, obecnie z Centrum Badań nad Cyberkomunikacją i Sztuczną Inteligencją Uniwersytetu Łódzkiego oraz EC1 Łódź – Miasto Kultury.
niko.zielinski@outlook.com



WIRESTOCK CREATORS/SHUTTERSTOCK.COM

procesów ewolucyjnych zależą od czynników selekcji – czynniki te ustanawiają bariery oporu, w ramach których rozwój może przebiegać.

Dobór naturalny i konkurencja

Początki badań nad zasadami przemian giną na horyzoncie starożytności. Wyodrębnienie ewolucji i termodynamiki ziściło marzenie Arystotelesa, by rozpatrywać przemiany i adaptacje w kontekście praw fizyki. Jako kluczowe czynniki wpływające na rozkład cech w populacji teoria ewolucji wskazuje dobór naturalny i konkurencję. To obserwacja przeniesiona z polityki ekonomicznej, opisującej eksponencyjny charakter wzrostu populacji i arytmetyczny charakter wzrost zasobów żywności – utrzymanie tych trendów prowadzi do ograniczenia zasobów i „walki o przetrwanie”, która utrwała „korzystne warianty”.

Ograniczone zasoby pokarmowe prowadzą do intensywnej konkurencji o ich zdobycie. Przykładem jest zwiększona konkurencja o zasoby w okresach suszy. Zwiększona nadmiernie populacja nasila rywalizację o przestrzeń, pokarm, wodę i inne zasoby – jest to widoczne choćby w obszarach miejskich, gdzie liczba gołębi jest wysoka. Szybkie zmiany środowiskowe, takie jak zmiany klimatyczne czy degradacja siedlisk, mogą zmniejszyć dostępność zasobów i zwiększyć konkurencję. Dlatego wycinanie lasów zmusza wiele gatunków do konkurowania o zmniejszające się terytoria. Wprowadzenie nowych gatunków, zwłaszcza jeśli mają podobne nisze ekologiczne,

może dodatkowo zwiększać konkurencję. Inwazyjne gatunki roślin konkurują z rodzimymi o światło, wodę i składniki odżywcze. W populacjach przystosowanych do warunków konkurencyjnych mogą wykształcić się specyficzne cechy adaptacyjne, faworyzujące określone strategie życiowe (zmiany w stylu reprodukcji, np. liczbie i zasadach odchowywania potomstwa, doborze partnerów, zmiany w zachowaniach terytorialnych, strategiach zdobywania pożywienia). Postępuje specjalizacja i różnicowanie się podgrup działających w coraz węższych niszach, co wpływa na dynamikę i przeżywalność w ramach populacji. W dalszej perspektywie może to prowadzić do rozwoju nowych zachowań i form interakcji, powodując dynamiczne i nieliniowe zmiany w populacjach oraz ekosystemach. Długofalowe oddziaływanie konkurencji jest jednak kosztowne także dla zwycięzców.

Modelowanie wpływu konkurencji na populację wskazuje, że prowadzi ona do zmniejszenia różnorodności genetycznej i ogranicza zdolności adaptacyjne. Efekt ten jest obserwowany również w ekosystemach i uprawach o niskiej różnorodności gatunków. Warto tu podkreślić, że procesy ewolucyjne nie są celowe, lecz są wynikiem określonych warunków środowiskowych. Zmiana warunków może przesuwac równowagę między konkurencją a współpracą, adaptacjami defensywnymi a ofensywnymi oraz innymi formami interakcji biologicznych. Każda zmiana środowiska może otworzyć nowe ścieżki ewolucji, prowadząc do różnorodności form życia i strategii przetrwania. Interpretacja procesów ewolucyjnych wymaga też



FACEBORN/SHUTTERSTOCK.COM



uwzględnienia mechanizmów funkcjonowania organizmów, które są plastyczne i zdolne do adaptacji już w toku życia osobniczego.

Korelacje procesów ewolucyjnych

Organizmy utrzymują określony porządek struktury ciała i środowiska wewnętrznego, a utrata tej zdolności kończy ich życie. Podtrzymywanie życia jest rozumiane jako wymiana materii, energii i informacji ze środowiskiem, co prowadzi do działania, ruchu, wydzielania substancji *et consortes*. Reakcje jednego organizmu stają się informacyjne dla pozostałych. Na gruncie termodynamiki informacje te można opisać jako stany układów zgodne z zajściem zdarzenia. Interpretacja sensów może odbywać się za pomocą klucza porządkującego znaczenie sygnałów, takich jak kod genetyczny, hormonalne i komórkowe szlaki sygnalizacyjne czy mechanizmy poznawcze.

Proponuję, by to właśnie atrybut posiadania takiego klucza określać jako inteligencję. Rolę przekazywania informacji o budowie i funkcjonowaniu organizmu przypisuje się DNA. Jako nośnik informacji koduje ono precyzyjne instrukcje realizowane przez komórki. Popularnie jest traktowane jako przekazywany między pokoleniami kod źródłowy, współcześnie można jednak spojrzeć na DNA jako dynamiczny rdzeń, wokół którego zachodzą złożone procesy systemowe, pozwalające organizmom na adaptację do zmieniających się warunków środowiskowych.

Oprócz DNA także RNA odgrywa istotną rolę w procesach adaptacyjnych. Może działać na różnych poziomach – od regulacji ekspresji genów po modyfikacje tych procesów (nie zmieniając samego DNA,

ale wpływając na to, jak jest ono odczytywane). Ponownie wraca do łask pierwotna teoria dziedziczenia zmian, teoria gemmul, czyli pęcherzyków pochodzących od tkanek, które miałyby akumulować się w gametach w ciągu życia organizmu. Sugeruje to mechanizmy przekazywania informacji o adaptacjach nabytych w ciągu życia organizmu do następnych pokoleń. Wykształcenie układu nerwowego jeszcze pogłębiło wymiar plastyczności fenotypowej. Układ nerwowy umożliwia organizmom uczenie się, zapamiętywanie i elastyczne adaptacje zachowań, które są szybsze i bardziej złożone niż zmiany na poziomie DNA, RNA czy białek.

Ta plastyczność zachowań, wynikająca z interakcji układu nerwowego z otoczeniem, nie jest łatwo odwzorowywana w tradycyjnym rozumieniu dziedziczności genetycznej. Bazując na ujęciu termodynamicznym, Antoni Kępiński zaproponował model metabolizmu energetyczno-informacyjnego, w ramach którego organizmy zachowują strukturę i tożsamość. Kępiński wyróżnił biologiczny, emocjonalny i społeczno-kulturowy aspekt procesów psychofizycznych oraz zaproponował rozumienie chorób psychicznych jako zaburzenie porządku ich procesowania. Na przykład zakłócenia w aspekcie biologicznym mogą prowadzić do depresji lub psychozy, wyrazu zmian funkcjonowania układu nerwowego i hormonalnego. Mogą być one także wyrazem zmian plastycznych, które mają chronić jednostkę, ale w dłuższej perspektywie stają się nieprzystosowawcze. Rozumienie zmienności cech organizmów wymaga uwzględnienia zarówno genetycznych, fizjologicznych, jak i środowiskowych mechanizmów adaptacyjnych. Przyszłe badania mogą jeszcze bardziej rozszerzyć naszą wiedzę na temat tego, jak różnorodne formy życia adaptują się do świata, który nieustannie się zmienia. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Kandel E.R., *In search of memory*, 2007.

Kępiński A., *Melancholia*, 1974.

Weiner J., *Życie i ewolucja biosfery*, 2020.



**dr Aneta
Duda-Jaśkiewicz**

Pedagożka pracy
ze specjalizacją
doradztwa
zawodowego.
Jest związana
z edukacją od 2004 roku.
Tworzyła i prowadziła
warsztaty dla dzieci
i młodzieży w duchu
edukacji
konstruktywistycznej.
Wieloletnia
kierowniczka działu
laboratoriów w Centrum
Nauki Kopernik.
Zajmuje się badaniem,
projektowaniem,
wdrażaniem
i skalowaniem nowych
rozwiązań i technologii
dla edukacji.
Prowadzi zajęcia
dydaktyczne i jest
promotorem
wdrożeńowym prac
licencjackich
na kierunku
School of Ideas
na Uniwersytecie SWPS.
aduda@swps.edu.pl

NAUCZYCIEL – (R)EWOLUCJONISTA SYSTEMU EDUKACJI

Edukacją szkolną od lat wstrząsają kolejne rewolucje.
Tymczasem prawdziwa zmiana dzieje się oddolnie.
Warto ją wspierać umiejętnością myślenia projektowego,
które rozwija odwagę i sprawczość nauczycieli.



Nowe technologie, w tym ostatnia ekspansja sztucznej inteligencji, zmieniają sposób, w jaki pracujemy, spędzamy czas, a nawet myślimy. Skala i tempo zmian są niebywałe, a oczekiwanie natychmiastowego przystosowania się do nich może powodować niepokój. O ile zmiany i innowacje technologiczne bywają konieczne i możliwe do sprawnego wdrożenia w przedsiębiorstwach, o tyle w „przedsiębiorstwach szkolnych” bywa to trudne. Dlaczego? Problem w tym, że często nasze myślenie o szkole jest zwrócone wstecz, a nie do przodu. Skupiamy się na radykalnych zmianach systemowych, zapominając o tym, co wydaje się jednym z kluczy do sukcesu

– kompleksowym wsparciu edukatorów. Od wielu lat współpracuję z nauczycielami i obserwuję trudności, z którymi muszą mierzyć się na co dzień. Jestem zdania, że zmiana w edukacji jest możliwa dzięki wsparciu ich i dodaniu im odwagi. Nie spektakularne przewroty, lecz spokojna ewolucja tego zawodu może przynieść realną zmianę edukacji szkolnej.

Karuzela zmian

Jedną stałą charakteryzuje polski system oświaty. Jest nią nieustanna zmiana i trwająca od lat (z mniejszym lub większym natężeniem) rewolucja. Na początek przywołajmy utworzenie gimnazjów w 1999 roku, czyli wprowadzenie trzystopniowego systemu edukacji: szkoły podstawowe (6 lat), gimnazja (3 lata) i szkoły średnie (3 lata). Celem tej rewolucji było wyrównanie szans edukacyjnych, podniesienie jakości nauczania oraz lepsze przygotowanie uczniów do życia zawodowego i społecznego. Kolejny przewrót to wydanie

Jestem zdania, że zmiana w edukacji jest możliwa dzięki kompleksowemu wsparciu nauczycieli i dodaniu im odwagi.

nowej podstawy programowej w 2009 roku. Dzięki reformie zmieniono program nauczania, kładąc większy nacisk na rozwój umiejętności kluczowych, takich jak krytyczne myślenie, kreatywność i kompetencje cyfrowe, ale co najważniejsze – wprowadzono nowe egzaminy zewnętrzne dostosowane do nowej podstawy. Jak powołaliśmy gimnazja w 1999 roku, tak po 18 latach (czyli w 2017 roku), postanowiliśmy je zlikwidować. Celem było uproszczenie systemu edukacyjnego oraz oczywiście poprawa jakości kształcenia. Dalej mamy nową maturę, zmiany w egzaminie ósmoklasisty w 2019 roku i reformę w edukacji zawodowej (zastosowano model dualnego kształcenia, łączący naukę w szkole z praktycznym szkoleniem w przedsiębiorstwach).

Pandemia COVID-19 wywołała rewolucję i wprowadzenie nauczania zdalnego. Szybka adaptacja do nowego sposobu nauczania wymusiła inwestycje w infrastrukturę technologiczną. Na koniec – rewolucja z 2024 roku i likwidacja prac domowych.

Co łączy te wszystkie szkolne rewolucje? Każda z tych reform stawiała sobie ambitne cele: wdrożenie istotnych zmian strukturalnych, programowych lub



GORODENKOFF/SHUTTERSTOCK.COM



STANISLAV PHOTOGRAPHER/SHUTTERSTOCK.COM

organizacyjnych, które miały na celu lepsze przygotowanie uczniów do wyzwań współczesnego świata. Jednocześnie każda z tych zmian wywołała kontrowersje i wymagała przeprowadzenia wielu logistycznych, często kosztownych operacji w placówkach edukacyjnych.

Oddolny zwrot w edukacji

Niektórzy nauczyciele przyjęli każdą z tych odgórnych propozycji z trudnością. Część wolniej lub szybciej zaadaptowała się do zmian. Inni z kolei, niezależnie od rewolucyjnych reform, kontynuowali swoją oddolną (r)ewolucję. To właśnie ci nauczyciele są cichymi bohaterami zmian, które zachodzą w edukacji. Powoli, we własnym tempie realizują misję podniesienia jakości nauczania i przygotowania uczniów do wyzwań współczesnego świata – tworzą oddolny zwrot w edukacji.

W artykule opublikowanym w 2008 roku w „e-flux Journal” Irit Rogoff proponuje redefinicję edukacji w kontekście sztuki i humanistyki. Rogoff przedstawia koncepcję edukacji jako procesu, który wykracza poza tradycyjne ramy instytucjonalne i pedagogiczne. Podkreśla, że edukacja powinna być rozumiana jako aktywny proces zaangażowania i uczestnictwa, który nie tylko przekazuje wiedzę, lecz także inspiruje

do krytycznego myślenia, twórczości i transformacji społecznej. Rogoff sugeruje, że edukacja powinna być przestrzenią eksperymentu, gdzie wiedza nie jest jedynie przekazywana w sposób jednostronny, ale tworzona wspólnie przez nauczycieli i uczniów. Podkreśla znaczenie dialogu, interakcji i wzajemnego wpływu jako kluczowych elementów procesu edukacyjnego. W swojej definicji edukacji Rogoff kładzie nacisk na dynamikę i zmienność, zachęcając do ciągłego przemyślenia i przekształcania tradycyjnych metod nauczania i uczenia się. Według Irit Rogoff edukacja to nie tylko transfer wiedzy, ale przede wszystkim proces twórczego zaangażowania i krytycznej refleksji, który ma potencjał do przekształcania jednostek i społeczeństw. Właśnie taką oddolną ewolucją prowadzącą do zmiany szkoły i przystosowania jej do zmieniającego się świata jest postawa nauczyciela. Nauczyciela, który nie jest już tak bardzo przywiązany do tradycji i tradycyjnych metod prowadzenia zajęć. Który dostrzega ucznia i umie dostosować materiał do jego potrzeb, talentów i ograniczeń. Który nie boi się wyjść poza podstawę programową i ma odwagę eksperymentować z materiałem. Nauczyciela, który ma chęć wyjść z uczniami poza mury szkoły, nie zraża się negatywnymi opiniami rodziców czy kolegów po fachu, bo w centrum zainteresowań stawia wyłącznie dobro swoich uczniów.

Myślenie projektowe

Wszyscy szukamy idealnego przepisu na edukację – metody, która będzie wspierać zarówno uczniów, jak i nauczycieli. Prawda jest taka, że sposobów jest wiele, bo wiele jest wyzwań i indywidualnych potrzeb. Jednak wśród wielu stosowanych metod pracy warto przyrzeć się *design thinking*. Nie bez powodu ta metoda stała się wszechobecna w ostatnich latach. Okazuje się, że doskonale sprawdza się podczas rozwiązywania złożonych i niejednoznacznych problemów, kiedy istnieje możliwość stworzenia wielu rozwiązań jednego zadania. Tim Brown, współtwórca firmy konsultingowej Ideo i popularyzator *design thinking*, nazywa tę metodę „człowiekocentrycznym” podejściem do innowacji, ponieważ stawia ona odbiorcę i jego potrzeby w centrum procesu projektowania. Metoda *design thinking* składa się z sześciu etapów:

- 1) empatyzacji,
- 2) definiowania problemu,
- 3) generowania idei,
- 4) prototypowania,
- 5) testowania,
- 6) wdrażania.

Metoda narodziła się podczas zajęć w Hasso Plattner Institute of Design. Prowadzący stwierdzili, że nie ma potrzeby budowania w ludziach kreatywności od podstaw. Wystarczy im pomóc odkryć to, co już posiadają – wyobraźnię i zdolność snucia nowych pomysłów. Profesor psychologii edukacji Paul Kirschner wśród kompetencji, których wymaga się od nauczycieli, wyróżnia trzy podstawowe:

1. nauczyciel powinien być specjalistą z obszaru wiedzy, w którym naucza,
2. nauczyciel powinien być specjalistą w dziedzinie metod pedagogicznych, czyli mieć wiedzę na temat prawidłowości uczenia się w różnych kontekstach,
3. nauczyciel powinien być specjalistą w projektowaniu doświadczeń edukacyjnych.

A zatem nauczyciel powinien wiedzieć, czego i jak chce nauczać, oraz posiadać kompetencje w praktycznym wdrożeniu procedur. Są to aktywności zbliżone do typowej pracy projektanta. Dlatego metoda *design thinking* dobrze nadaje się do pracy w szkole.

Kreatywna odwaga

Nauczyciel jest idealnym projektantem sytuacji sprzyjających uczeniu się, może stworzyć warunki zachęcające do podejmowania przez uczniów wysiłku. Czy nauczyciel może przearanżować klasę szkolną? Przyszan, że większość uczestników moich warsztatów *design thinking* przedstawia problem przestrzeni jako najczęstszy do rozwiązania. Marzeniem niemalże każdego edukatora jest zmiana scenografii, w której pracuje – nauczyciele projektują prototypy sal, kory-

tarzy szkolnych, pokoi nauczycielskich. Pojawiają się jednak przeszkody: brak funduszy, konieczność zgody dyrekcji lub rodziców, obawa przed krytyką ze strony innych nauczycieli. Metoda myślenia projektowego wyposaża nauczyciela w kompetencję, którą twórcy metody nazywają „kreatywną odwagą” – przeświadczenie o własnej zdolności do wprowadzania zmian w otaczającym świecie.

Jedna z nauczycielek biorących udział w moim projekcie postanowiła wraz z uczniami całkowicie przearanżować przestrzeń uczenia się. Mając finalny prototyp, zorganizowała kilka spotkań prezentujących pomysły jej i uczniów. Były to spotkania z rodzicami, innymi nauczycielami, dyrekcją, wójtem i lokalnymi firmami. Część mebli udało się przerobić dzięki uprzejmości ojca jednego z uczniów, który okazał się stolarzem. Lokalna firma przekazała kilka niemalże nowych, wygodnych kanap i pufów. Wójt zaś zgodził się, by podczas pikniku rodzinnego nauczycielka wraz z uczniami zbierała brakujące środki na wymarzoną klasę.

Myślenie projektowe wyposaża nauczyciela w kompetencję zwaną „kreatywną odwagą” – przeświadczenie o zdolności wprowadzania zmian.

Zmiana przestrzeni to tylko jeden ze sposobów użycia metody projektowej. Nauczyciele, z którymi pracowałam, zmieniali także sposoby prowadzenia zajęć. Jedna z nauczycielek edukacji wczesnoszkolnej w wiejskiej szkole postanowiła podczas swoich lekcji całkowicie zlikwidować dzwonki. Przerwy są wtedy, gdy uczniowie tego potrzebują. Część nauczycieli w tej szkole podchwyciła ten pomysł i realizuje go w swoich klasach. Inna nauczycielka postanowiła wykorzystać w procesie edukacji teren nie tylko klasy, lecz także całą szkoły. Wraz z uczniami trzeciej klasy przygotowała grę typu *escape room* dla uczniów pierwszej klasy. Po drodze były zadania i zagadki, a w tę nietypową lekcję zaangażowała się cała społeczność szkoły wraz z dyrekcją i pracownikami technicznymi. Czy metoda *design thinking* to odpowiedź na wszystkie problemy w systemie edukacji? Nie. Jednak skutecznie wspiera ona nauczycieli (a pośrednio – uczniów) w rozwoju kompetencji potrzebnych im do wprowadzania istotnych zmian. Jest to na tyle uniwersalny sposób, że może przyczynić się do wprowadzenia trwałych modyfikacji w sposobach uczenia się i podejściu do edukacji. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Kelly T., Kelly D., *Twórcza odwaga. Otwórz się na design thinking*, 2019.

Okraj Z., *Design thinking, inspiracje dla dydaktyki*, 2020.



dr hab.
Anna Karnkowska,
prof. UW

Jest badaczką różnorodności, ekologii i ewolucji mikroorganizmów eukariotycznych. Próbuje lepiej zrozumieć ewolucję organizmów eukariotycznych i udział endosymbioz w powstaniu i różnicowaniu *Eukaryota*. Obecnie koncentruje się na badaniach relacji endosymbiotycznych mikroorganizmów eukariotycznych i bakterii w środowiskach słodkowodnych.
a.karnkowska@uw.edu.pl

Głony ze zbiornika słodkowodnego (w tym eugleniny i zielenice) z chloroplastami powstałymi w wyniku endosymbiozy pierwotnej i wtórnej

CZY WSPÓŁPRACA SIĘ OPŁACA?

Historia komórki eukariotycznej.

Anna Karnkowska

Instytut Biologii Ewolucyjnej, Wydział Biologii
Uniwersytet Warszawski

Wszystkie organizmy są zbudowane z komórek, niektóre – tak jak my, inne zwierzęta czy rośliny – z wielu komórek, ale większość to organizmy jednokomórkowe. Zarówno nasze komórki, jak i komórki innych jedno- i wielokomórkowych organizmów eukariotycznych są bardzo złożone. Mają one liczne przedziały komórkowe – czyli tzw. organelle, w tym jądro (gr. *karyon*), od którego wzięła się nazwa tej grupy. Jądro zawiera w sobie materiał genetyczny w postaci DNA, czyli genom jądrowy. Ponadto są obecne mitochondria – czyli elektrownie komórkowe, a także w przypadku roślin

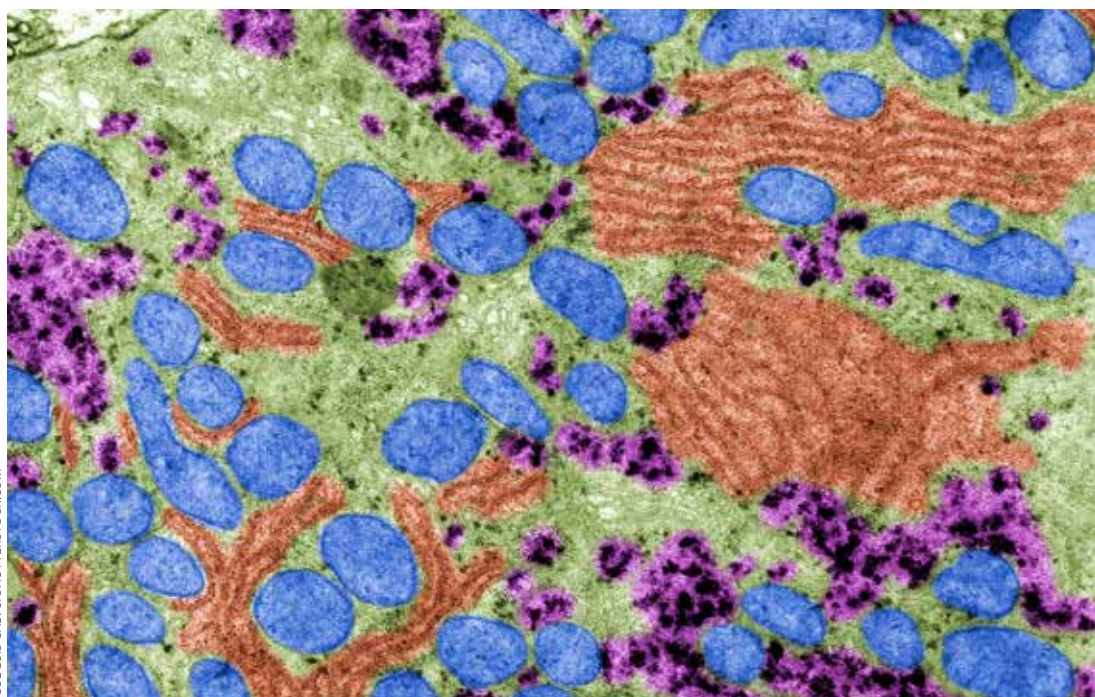
i glonów – chloroplasty, które umożliwiają im produkcję związków będących źródłem energii ze światła i z prostych związków chemicznych. W obu wspomnianych organellach również znajduje się DNA, kodujące informację genetyczną, czyli zawierają one odpowiednio genom mitochondrialny i chloroplastowy. Jednak większość organizmów jednokomórkowych ma komórki o znacznie prostszej budowie. Nie zawierają one jądra komórkowego ani organeli. Organizmy te nazywamy *Prokaryota* i zaliczamy do bakterii i archeonów.

Endosymbioza

Pytanie o powstanie i ewolucję komórek eukariotycznych (inaczej *Eukaryota*) nie jest łatwe. To bardzo dawne zdarzenia ewolucyjne, których bezpośrednie dowody się nie zachowały. Dzięki badaniom różnorodności współcześnie żyjących przedstawicieli *Eukaryota* i analizie ich genomów możemy się jednak sporo



PROF. BOŻENA ZAKRYS



Zdjęcie mikroskopowe przedstawiające komórkę wątroby (hepatocyt). Mitochondria zaznaczono na kolor niebieski

dowiedzieć o ich ewolucyjnej historii i roli procesu zwanego endosymbiozą.

Powstanie złożonych komórek eukariotycznych było jednym z najważniejszych wydarzeń w ewolucji życia na Ziemi. Jak jednak doszło do powstania takich komórek, czyli do eukariogenezy? Wiemy, że *Eukaryota* powstały później niż bakterie i archeony. Obecnie uważamy, że *Eukaryota* wyewoluowały z przedstawicieli jednej z linii archeonów, ale bakterie również miały swój znaczący udział w eukariogenezie i dalszej ewolucji organizmów eukariotycznych. Najbardziej spektakularnym procesem, do którego doszło w trakcie ewolucji komórek eukariotycznych, są endosymbiozy bakterii. Pod tą nazwą kryje się ścisła współpraca między dwoma komórkami. Jedna z nich zostaje wchłonięta przez drugą. Zamiast zostać strawiona, zaczyna współpracować ze swoim gospodarzem. W wyniku takiej relacji stopniowo z wchłoniętych komórek powstały organelle – mitochondria i chloroplasty.

Mitochondria i chloroplasty faktycznie mają wiele cech komórek bakteryjnych. Między innymi są otoczone błoną komórkową bakteryjnego pochodzenia, mają też własny materiał genetyczny. Odziedziczyły go również po swoich bakteryjnych przodkach. Jednak w porównaniu do genomów bakteryjnych znajduje się w nich mniej informacji. W toku ewolucji i coraz silniejszej współpracy między gospodarzem i endosymbiontem doszło do utraty wielu genów, które stały się zbędne podczas życia w nowych warunkach. Endosymbiont może przecież korzystać z produktów metabolizmu gospodarza, więc utrzymywanie jego pełnego genomu nie jest konieczne do funkcjonowa-

nia. Część genów endosymbiontów w toku ewolucji została przeniesiona z genomu symbionta do genomu gospodarza. Produkty białkowe produkowane na ich bazie przez komórkę gospodarza są następnie kierowane do organelli, gdzie pełnią swoje funkcje. Taki proces przenoszenia genów z endosymbiontów (tzw. endosymbiotyczny transfer genów) sprzyjał dalszej integracji partnerów i ściślejszej kontroli symbionta przez gospodarza. Jedną z hipotez mówi, że endosymbionty zachowują tylko te geny, które pozwalają szybko reagować na zmiany w środowisku i precyzyjną kontrolę ich metabolizmu. W szczególności chodzi o regulację kluczowych procesów zachodzących w organellach. Są to m.in. reakcje, w których następuje przetrzymywanie elektronów wzdłuż molekularnego łańcucha przenośników zlokalizowanych w obrębie błony organelli. Taka reakcja odgrywa kluczową rolę w trakcie produkcji paliwa komórkowego przez mitochondria i w procesie fotosyntezy.

Odkąd powszechnie zaakceptowano, że mitochondria i chloroplasty powstały w wyniku endosymbiozy, nie ustają wysiłki dążące do zrozumienia szczegółów tego procesu. W tym ewolucyjnym śledztwie możemy skorzystać z informacji genetycznej. Genomy endosymbiontów, choć mocno zredukowane, zawierają kilkanaście do kilkuset genów. Ich analiza dostarczyła niezbitych dowodów na pochodzenie mitochondrium od alfa-proteobakterii, a chloroplastów od cyjanobakterii. A wśród różnorodnych bakterii możliwa jest również identyfikacja żyjących krewnych przodków organelli. W przypadku mitochondriów jest kilku kandydatów, a w przypadku chloroplastów ich najbliższym obecnie żyjącym krewnym

jest niedawno opisana słodkowodna cyjanobakteria *Gleomargarita litophora*.

Ewolucja nie stoi w miejscu

Chloroplasty i mitochondria poza wspomnianymi już utratami genów zmieniały się w trakcie ewolucji także w inny sposób. Najbardziej spektakularnymi przykładami są te, w których doszło do utraty typowych funkcji tych organelli. Mitochondria kojarzymy przede wszystkim z produkcją paliwa komórkowego (ATP) w procesie oddychania komórkowego. Kluczową rolę w tych przemianach odgrywa cząsteczka tlenu. Ale nie wszystkie organizmy eukariotyczne żyją w środowiskach tlenowych. U wielu beztlenowych eukariontów doszło do daleko posuniętych zmian w funkcjonowaniu mitochondriów. W skrajnych przypadkach beztlenowe mitochondria są tak bardzo zredukowane, że przez długi czas były niewykrywalne. Nie mają one genomu mitochondrialnego i krist mitochondrialnych



Paramecium bursaria
z symbiotycznymi algami (zielone)

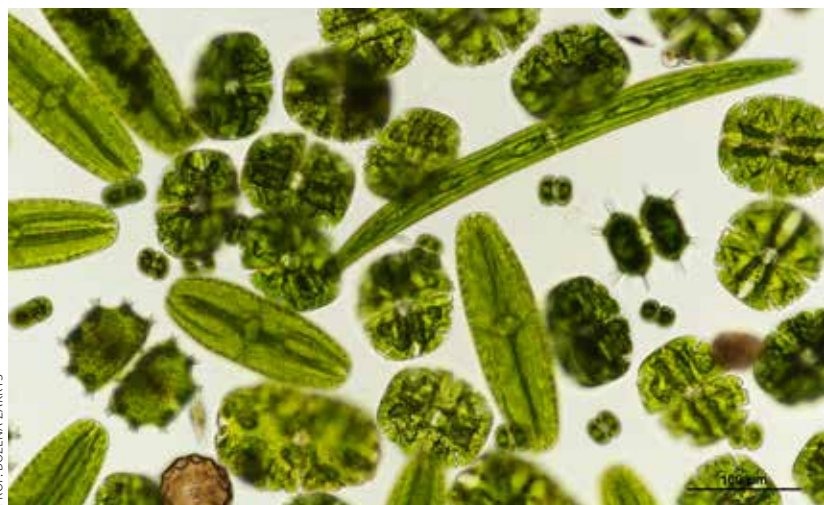
LEBENDKULTUREN.DE/SHUTTERSTOCK.COM

mórek z innych organizmów które mają zdolność tworzenia centrów Fe-S. To przykład tzw. horyzontalnego transferu genów, który jest bardzo ważnym sposobem wymiany materiału genetycznego między organizmami, a więc także narzędziem ewolucji. Centra takie powstają wówczas już nie w zredukowanych mitochondriach, ale w cytozolu komórki. W takim przypadku mitochondrium staje się zbędne i może zaniknąć. Do tej pory całkowitą utratę mitochondriów wykryto jedynie w jednej grupie beztlenowych eukariontów – w organizmie *Monocercomonoides exilis*, protistów żyjących w jelicie niektórych kręgowców.

Redukcję można także zaobserwować w przypadku chloroplastów. Prawie we wszystkich liniach organizmów zawierających te organelle doszło w toku ewolucji do utraty funkcji fotosyntetycznej. Z zielonych chloroplastów powstały bezbarwne organelle. Taka radykalna zmiana organelli jest obserwowana np. u niektórych roślin, ale najczęściej spotyka się ją u jednokomórkowych pasożytów, np. u zarodźca malarii. Ten groźny pasożyt człowieka ma zredukowane chloroplasty, w których jednak zachodzą kluczowe szlaki metaboliczne. Nie jest to jedynie ciekawostka, ale kluczowa wiedza do opracowania terapii antymalarycznych, w których celem mogą być bezbarwne plastidy i ich białka, nieobecne w komórkach gospodarzy, którzy nie mają chloroplastów.

Nic dwa razy się nie zdarza?

W przeciwieństwie do mitochondriów chloroplasty są obecne tylko w niektórych liniach ewolucyjnych *Eukaryota*. Poza roślinami znajduje się je w wielu różnych, często niespokrewnionych grupach eukariotycznych glonów. Wspominana wcześniej endosymbioza cyjanobakterii i komórki eukariotycznej, nazywana endosymbiozą pierwotną, doprowadziła do powstania chloroplastów u przodka zielenic i roślin wyższych, krasnorostów, oraz mniej znanych glaukocystofitów. Następnie jednokomórkowe zielenice i krasnorosty wielokrotnie stały się endosymbiontami innych eukariontów w procesie nazywanym endosymbiozą wtórną, która zachodziła analogicznie do pierwotnej.



Jednokomórkowe glony (desmidie) z chloroplastami powstałymi w wyniku endosymbiozy pierwotnej z cyjanobakterią

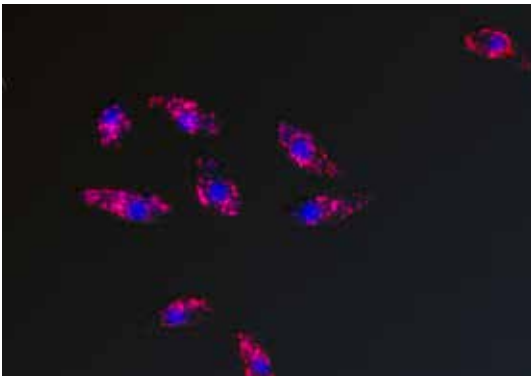
(które przypominają skierowane do środka grzebienie). Nie są także zaangażowane w produkcję ATP. Ich główną funkcją, która jest również bardzo istotna w mitochondriach tlenowych, jest składanie pewnych stosunkowo prostych cząsteczek, tzw. centrów Fe-S (centrów żelazowo-siarkowych). Są one niezbędnymi składnikami wielu kluczowych dla komórki białek. Ważna rola centrów polega na wiązaniu i uwalnianiu elektronów, czyli procesie, który zachodzi w najistotniejszych reakcjach komórkowych.

Proces składania centrów Fe-S mitochondria zawdzięczają swoim bakteryjnym przodkom, a komórki eukariotyczne wykorzystują do tego maszynę mitochondrialną. Proces ten nie zawsze zachodzi w mitochondriach. Bardzo rzadko beztlenowe eukarionty mają alternatywne rozwiązania. Powstały one na drodze przeniesienia materiału genetycznego do ich ko-

Doprowadziło to do nabycia chloroplastów u wielu niespokrewnionych grup jednokomórkowych mikroorganizmów.

Całkiem niedawno odkryto niewielką grupę ameb domkowych. Są to jednokomórkowe organizmy, które od znanych wszystkim ze szkoły ameb wyróżniają się skorupką otaczającą komórkę. Niektóre z nich, należące do rodzaju *Paulinella*, podobnie jak rośliny mają chloroplasty cyjanobakteryjnego pochodzenia. Jednak ameby nabyły je niezależnie od roślin. Do endosymbiozy u tych skorupkowych jednokomórkowców doszło zaledwie około 60–200 mln lat temu, czyli całkiem niedawno, zwłaszcza w kontekście omawianych endosymbioz chloroplastów i mitochondriów, które miały miejsce ponad 1,5 mld lat temu. Odkrycie to rewolucjonizowało nasze spojrzenie na endosymbiozę. Badania porównawcze wykazały bardzo długą listę podobieństw między tymi dwoma endosymbiozami, włączając w to utratę i przeniesienie genów z genomu endosymbionta do genomu gospodarza oraz rozbudowaną kontrolę endosymbionta przez gospodarza, w tym na drodze kierowanych do niego białek, które są kodowane w genomie jądrowym. Nie ma zatem powodu, żeby nie uznać endosymbionta ameb za pełnoprawną organelę.

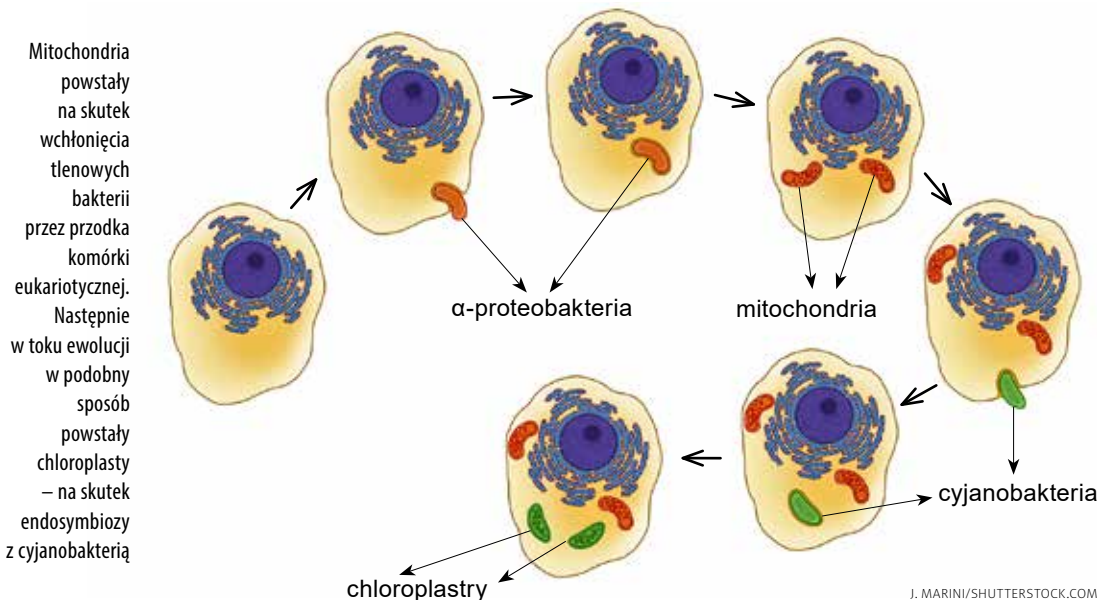
Świat, na który patrzymy, to przede wszystkim świat dużych organizmów eukariotycznych – zwierząt, roślin i grzybów. Te wielokomórkowe organizmy mają swoich przodków wśród ogromnej różnorodności mikroorganizmów eukariotycznych. Ich różnorodność odkrywamy dzięki nowoczesnym technikom sekwencjonowania i obrazowania, choć oczywiście wiele z głównych grup mikroorganizmów eukariotycznych znany już od czasów pierwszych mikroskopów świetlnych. Organizmy te zbiorczo nazywamy protistami (dawniej również pierwotniakami, choć jest to na-



Protist *Diplonema japonicum* z bakteryjnymi endosymbiontami wyznakowanymi na purpurowo z wykorzystaniem sondy fluorescencyjnej. Jądro komórkowe wybarwione barwnikiem fluorescencyjnym DAPI (niebieskie)

zwa zarezerwowana dla heterotroficznych protistów, a wiele z nich przeprowadza fotosyntezę i wtedy nazywamy je często glonami). Badania protistów wykazały, że dość często wchodzą one w interakcje z bakteriami, które mogą być ich endosymbiontami. Badanie tych układów może nam zatem pomóc zrozumieć, jak przebiega zawiązanie współpracy między gospodarzem i jego symbiontem, a dzięki temu lepiej zrozumieć również zamierzchle endosymbiozy, których efektem było powstanie organelli. Zaledwie kilka miesięcy temu opisano nową organelę endosymbiotycznego pochodzenia i nazwano ją nitroplastem. Jak sama nazwa wskazuje, jest to organela zaangażowana w proces wiązania azotu cząsteczkowego. Na razie jej występowanie potwierdzono jedynie u niewielkiej grupy morskich glonów, ale być może nitroplast występuje też u innych organizmów, a może inne, nieznane nam jeszcze organelle czekają wciąż na odkrycie. ■

Artykuł powstał w ramach realizacji grantu Sonata BIS przyznanego przez Narodowe Centrum Nauki (2023/50/E/NZ8/00470).



Chcesz wiedzieć więcej?

Archibald J.M., *Endosymbiosis and Eukaryotic Cell Evolution*, 2015, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982215008891?via%3Dihub

Burki F., *Mitochondrial Evolution: Going, Going, Gone*, 2016, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982216303542?via%3Dihub

Husnik F. et al., *Bacterial and archaeal symbioses with protists*, 2021, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096098221007478?via%3Dihub

Karmkowska A., Maciszewski K., *Should I stay or should I go? Retention and loss of components in vestigial endosymbiotic organelles*, 2019, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959437X19300425?via%3Dihub

Massana R., *The nitroplast: A nitrogen-fixing organelle*, 2024, www.science.org/doi/full/10.1126/science.ado8571

**dr Dorota Łagodźka**

Historyczka sztuki,
kulturoznawczyni,
adiunkta na Wydziale
„Artes Liberales” UW,
współautorka
i koordynatorka
kierunku
antropozoologia.
Autorka licznych
publikacji z obszaru
kulturowych studiów
nad zwierzętami
i sztuki współczesnej.
Była kuratorką czterech
wystaw, m.in. *Ecce
Animalia* w Centrum
Rzeźby Polskiej
w Orońsku.
dorota.lagodзка@al.uw.edu.pl

Czy zwierzę może zostać artystą?

MALARSTWO MAŁP

Jedne wolą mocne kolory
i zamaszyste ruchy pędzla,
inne subtelne plamy
i zygzaki. Sztuka nieludzka
ma jeszcze przed nami wiele
do odkrycia. Czy uznanie
małp za artystów pogłębi
nasz szacunek do nich,
czy też narazi zwierzęta
na większy wyzysk?

Dorota Łagodźka

Wydział „Artes Liberales”, Uniwersytet Warszawski

W sztukach wizualnych od połowy XX wieku artyści zaczęli tworzyć prace z udziałem zwierząt, wykorzystując na większą niż dotychczas skalę zwierzęce ciała – nie tylko jako składnik klejów, podobrazy lub barwników, lecz także martwe zwierzęta jako materiał prac artystycznych. Jednocześnie rozwijała się tendencja włączania do sztuki żywych zwierząt jako uczestników, współtwórców lub nawet jako autorów dzieł. W tym czasie również pojawiło się malarstwo małp – trzymane w ludzkim środowisku naczelnie tworzyły obrazy. Zjawisko to sytuowało się nie tyle w obrębie sztuki funkcjonującej w obiegu instytucji kulturalnych i krytyki artystycznej, ile raczej w ramach badań dotyczących zdolności poznawczych naczelników, psychologii percepcji i zoolo-psychologii oraz ewolucyjnych korzeni sztuki i zmysłu estetycznego. Twórcza aktywność małp stała się



KATARZYNA WEJCHERT

Szympanśca Lucy z zoo
w Warszawie
(za udostępnienie fotografii
dziękujemy Miejskiemu
Ogrodowi Zoologicznemu
im. Antoniny i Jana
Zabińskich w Warszawie)

też popkulturową ciekawostką i narzędziem promocji ogrodów zoologicznych. Niekiedy służyła również dyskredytowaniu sztuki współczesnej, np. abstrakcyjnego ekspresjonizmu, przez porównanie z obrazami zwierząt.

Estetyka zwierzęca

Estetyka ewolucyjna wskazuje na źródła estetyki przed pojawieniem się sztuki i poza nią, głównie w pięknie ciała i krajobrazu. Wolfgang Welsch, filozof i historyk sztuki, w artykule *Animal Aesthetics* z 2004 roku uzupełnił braki takiego podejścia, stawiając pytanie o moment wyłonienia się w toku ewolucji czysto estetycznego postrzegania. Powołując się na Darwina, zaznaczył, że nie można redukować zmysłu estetycznego zwierząt do funkcji użytkowej. Stwierdził, że u zwierząt istnieje rodzaj czystej estetyki, a zatem takiej, której źródłem jest piękno *per se*, opartej na przyjemności czerpanej z jego doznawania. Richard O. Prum, biolog ewolucyjny i ornitolog, w *Ewolucji piękna* z 2017 roku również przeciwstawił się podporządkowywaniu estetycznego zmysłu u zwierząt procesom adaptacyjnym, podkreślając, że może być on od nich niezależny, a nawet zachodzić wbrew nim.

Najbardziej znanym badaczem malarstwa naczelných innych niż *Homo sapiens* jest zoolog i artysta Desmond Morris, który w książce *The Biology of Art* opisał eksperyment z udziałem młodego szympansa Congo, proponując – jak wskazuje tytuł – teorię biologii sztuki opartą na ewolucyjnym pochodzeniu ludzkiej sztuki. W późniejszej książce *The Artistic Ape* przedstawił z kolei Congo w kontekście historii badań nad psychologią percepcji wizualnej u zwierząt oraz plastyczną twórczością małp i słoni, określając to zjawisko mianem „sztuki nie-ludzkiej” (*non-human art*). Zestawił ją ze sztuką dzieci, sztuką plemienną i prehistoryczną, udowadniając, że zwierzęca sztuka nie jest radykalnie inna i wpisuje się w ewolucyjny proces rozwoju zdolności poznawczych, twórczych i kulturowych. Do tego zestawienia można dodać *art brut* i szerzej – sztukę nieprofesjonalną. Inaczej do tego zjawiska podchodzi historyk sztuki Thierry Lenain, który w książce *Monkey Painting* odmawia obrazom małp statusu dzieł sztuki. Uważa, że proces twórczy w przypadku zwierząt sprowadza się do satysfakcji czerpanej z „zakłócenia pola obrazowego”, czyli do zainteresowania procesem zamazywania czystej powierzchni. Jane Desmond z kolei dostrzegła istotne różnice między malarstwem naczelných i innych gatunków zwierząt oraz zajęła się tymi zjawiskami w kontekście rynku sztuki zwierząt. Na gruncie polskim Monika Bakke w książce *Bio-transfiguracje. Sztuka i estetyka posthumanizmu* stwierdziła, że artefakty nazywane sztuką zwierząt, choć wytworzone przez zwierzęta, powstają z ludzkiej inicjatywy i jedynie przypominają powszechnie rozpoznawalne obiek-



Obraz autorstwa jednego szympansa z Leintalzo Schwaigern, Niemcy

ty sztuki. Mnie najbliższa jest perspektywa Morrisa, uzupełniona o koncepcję estetyki zwierzęcej Welscha i teorię ewolucji piękna Pruma, którzy jednak jako przykład przywoływali altanniki. Ornamentalna twórczość tych ptaków jest warta osobnego artykułu.

Historia badań nad malarstwem małp

Już w 1913 roku Nadieżda Ładygina-Kots rozpoczęła trwający trzy lata eksperyment z udziałem młodego szympansa płci męskiej imieniem Joni. Gdy dała mu kartkę papieru i ołówek, okazało się, że z przyjemnością zaczął rysować. Jak pisze Desmond Morris w książce *The Artistic Ape*, jest to pierwszy znany w historii przypadek tworzenia obrazów przez zwierzę. Obserwując porównawczo rozwój Joniego i swojego syna Rudiego, Kots zauważyła, że szympanś w przeciwieństwie do ludzkiego dziecka nigdy nie przeszedł do stadium prób odwzorowania rzeczywistości. Dostrzegła jednak, że z czasem Joni czynił postępy w rysowaniu form abstrakcyjnych. Ponadto rysował bardziej entuzjastycznie niż jej syn, często domagał się ołówka i był niezadowolony, gdy mu go odbierano.

Przez wiele lat badania te nie znalazły kontynuatorów – aż do 1951 roku, kiedy amerykański psycholog Paul Schiller rozpoczął eksperyment ze starszą szympanśicą Alphą w Yerkes Primate Research Center na Florydzie. Zaobserwował nie tylko rozwój, jeśli chodzi o zmianę stylu rysowanych kształtów i linii, lecz także pewne powtarzające się motywy. Dając szympanśom kartki z różnymi zaznaczonymi wcześniej figurami, sprawdzał jej reakcje na nie w odniesieniu do pola obrazowego. Alpha m.in. ograniczała swoje rysunki do kartki papieru, zaznaczała narożniki czystej kartki, próbowała uzupełniać niepełną figurę, równoważyć asymetrycznie rozłożone w polu

obrazowym kształty lub zaznaczała figurę centralną, np. symetrycznie wszystkie boki trójkąta. Choć celem badań Schillera była psychologia percepcji, jego metoda stała się podstawą projektów Bernharda Renscha i Desmond Morrisa, którzy w latach 1954–1958 badali malarstwo naczelnych pod względem estetycznym, zapoczątkowując teorię biologii sztuki.

Medium malarskie zostało jednak zaproponowane małpom nieco wcześniej, bo w 1953 roku na marginesie badań naukowych w Stanach Zjednoczonych. Fotograf Lilo Hess miał pod opieką młodą szympansicę Christine, którą zachęcał do rysowania na ścianie kredą. Okazało się jednak, że najbardziej entuzjastycznie zareagowała ona na farby. Uwielbiała malować, rozprowadzając je dłońmi na kartce. Mniej więcej w tym samym czasie podobną możliwość dano dwóm szympansom w zoo w Baltimore: samicy Betsy i samcowi imieniem Doktor Tom. Pokazy ich malowania dłońmi stały się atrakcją telewizyjną.

Niedługo później badania naukowe rozpoczął Rensch w Niemczech i Morris w Wielkiej Brytanii. Rensch w 1954 roku w Instytucie Zoologii na Uniwersytecie w Münster podjął badania pasywnych

Rozpoczął projekt w 1956 roku, kiedy Congo miał dwa lata, i prowadził do czasu, kiedy szympans zaczął dojrzewać i stał się zbyt silny i energiczny, by kontynuacja badań tą samą metodą była możliwa i bezpieczna. Morris sadzał młodego szympansa w foteliku do karmienia dzieci, lecz z powiększonym blatem do rysowania. Usytuowanie kartki zawsze w tej samej pozycji w stosunku do zwierzęcia umożliwiało sprawdzanie jego reakcji na pole obrazowe z zachowaniem kierunków: dół, góra, prawa, lewa strona. Morris podobnie jak Kots asystował szympansowi, podczas gdy w wypadku dorosłej szympansicy Alphy eksperymentator przebywał poza klatką, w której ona rysowała. Congo szybko nauczył się trzymać ołówek i kredkę podobnie jak człowiek, w sposób umożliwiający największy zakres ruchów. Zaczynał entuzjastycznie rysować, gdy tylko otrzymywał kredkę i papier. Denerwował się, gdy próbowano mu zabrać przybory, zanim skończył, ale też gdy skończył, odmawiał kontynuowania i domagał się nowej kartki. Co ważne, nie otrzymywał za aktywności twórcze nagród w postaci smakołyków, dzięki czemu wiadomo było, że samo malowanie sprawia mu przyjemność i jest dla niego ciekawe.

Morris podobnie jak Rensch poszerzył badania prowadzone przez Schillera dotyczące reakcji na figury i linie umieszczone w polu obrazowym. Zauważył też, że Congo od początku był dużo bardziej zafascynowany efektem, który uzyskiwał za pomocą pędzla i farb, niż tym, który umożliwiały ołówek i kredka. Morris opisał kolejne fazy rozwoju malarskiego młodego szympansa, w tym okres, kiedy złożoność malowanych przez niego form abstrakcyjnych osiągnęła apogeum. Zaobserwował u niego podstawowy zmysł kompozycji, potrzebę symetrycznego zrównoważenia pola obrazowego oraz obecność motywów, z których najtrwalszym i najbardziej złożonym był wzór nazwany przez Morrisa wachlarzem (ang. *fan pattern*). Reakcje Congo na wcześniej zaznaczone figury zasadniczo były podobne do reakcji Alphy.

Między rokiem 1957 a 1959, pięć lat po pierwszym malującym gorylu w zoo w Bazylei, w Rotterdamie duża gorylica Sophie tworzyła rysunki z subtelnych plam i zygzaków, które – jak pisze Thierry Lenain – są do tego stopnia charakterystyczne, że bez trudu można je zidentyfikować jako wykonane przez nią. Z kolei w 1958 roku w zoo w Amsterdamie było kilka malujących małp, w tym delikatna szympansica Bella, która malowała w absolutnym skupieniu. Miała łagodny charakter i nigdy nie popadała w złość, nawet gdy odbierano jej smakołyki, dopóki opiekun nie spróbował zabrać jej malunku w nieodpowiednim momencie. Malowanie zaczęło coraz powszechniej wprowadzać w ogrodach zoologicznych jako formę urozmaicenia spędzania czasu (ang. *enrichment*), która przy okazji dobrze służyła promocji instytucji.

Posługująca się Amerykańskim Językiem Migowym (ASL) szympansica Moja namalowała obrazy

Z pewnością zwierząt jako kreatywnych sprawców nie można już pominąć na mapie postmodernistycznych przemian w sztuce od drugiej połowy XX wieku do dziś.

i aktywnych zdolności estetycznych kapucynki imieniem Pablo, dostrzegając związki swoich obserwacji z przedkulturową genezą sztuki. Później rozszerzył projekt na badanie preferencji wizualnych kapucynki, małpy z rodziny koczodanowatych, i szympansa, a także ptaków krukowatych i ryb. Preferencje dotyczyły symetrycznych, rytmicznych kompozycji z powtarzającym się motywem.

Pablo sam odkrył, że kawałek kredy wtarty w ścianę jego celi zostawiał widoczny ślad. Później udostępnił mu także kredki oraz pędzel i farby. Kapucynka podejmowała próby malowania pędzlem za pomocą różnych ruchów: m.in. linii równoległych, zakręconych, a także rytmicznych kształtów powstających w wyniku ruchów do przodu i do tyłu. Znałe są przykłady jej reakcji na wcześniej zaznaczone figury. Jedno z tych zachowań wyglądało na próbę niezdarne manualnie powtórzenia kształtu okręgu.

W tym samym czasie Morris w Londyńskim Towarzystwie Zoologicznym prowadził badania szympansa płci męskiej imieniem Congo z tamtejszego zoo.

abstrakcyjne składające się z kilku plam i linii, które opisała jako przedstawienie ptaka i czereśni. Obrazy malowały także znające zmodyfikowaną wersję ASL goryle Koko i Michael. Koko preferowała malowanie na stole lub sztalugach, Michael wolał kłaść kartkę na podłodze. Z informacji na stronie The Gorilla Foundation wynika, że ich obrazy często przedstawiały rzeczy z otoczenia lub emocje. Mając dostępną pełną paletę barw, Koko wybrała róż i pomarańcz, by przedstawić miłość, a po obejrzeniu zdjęcia przedstawiającego dolinę ze strumieniem otoczonym kwiatami namalowała obraz w kolorach zieleni, czerni, różu i niebieskiego, określając go jako „pink pink stink nice drink”, przy czym goryle używały znaku „stink” na określenie kwiatu, a „drink” oznaczało dla nich wodę. Gdy Michaelowi zaprezentowano bukiet kwiatów, namalował obraz pełny kolorowych plam, określając go „stink gorilla more”.

Choć obrazy prezentowane na stronie fundacji nie są wynikiem obserwacji naukowej, to powstały na marginesie projektu naukowego Francine Patterson, psycholożki badającej zdolności komunikacyjne małp w ludzkim języku migowym. Relacja między badaczką a gorylicą przekształciła się w głęboką więź na całe życie, która nie sprowadzała się tylko do badań naukowych. Mimo zgłaszanych niekiedy kontrowersji dotyczących metody Patterson nie można odmówić Koko zdolności do dostrzegania powiązań między wizualnymi i językowymi znakami, a także między tymi znakami i ich materialnymi lub abstrakcyjnymi desygnatami. Nawet Lenain, odmawiający przyznania malarstwu małp statusu sztuki, zaznacza, że trening być może mógłby rozwinąć u małp zdolność do graficznej symbolizacji. Badacz odnosi się jednak tylko do przypadku Moji, nie wspominając o Koko i Michaelu ani o Kanzim i Panbanishy – bonobo, które nauczyły się łączyć słyszane słowa z ich symbolami graficznymi w ramach badań prowadzonych przez Susan Savage-Rumbaugh.

Współcześnie w większości azylów dla małp, w których przebywają zwierzęta po przejściach, np. wykorzystywane wcześniej w laboratoriach lub cyrkach, regularnie daje się szympansom możliwość malowania. Nie wszystkie z nich wykazują zainteresowanie taką aktywnością twórczą i czerpią z niego przyjemność w takim samym stopniu. Podobnie jak u ludzi jest to kwestia indywidualnych upodobań. Z dostępnych w internecie filmów z takich instytucji oraz relacji opiekunów zwierząt wynika, że małpy mają różne malarskie temperamenty i style. Cheetah z azylu Save the Chimps w Fort Pierce w USA maluje zamasyście, wypełniając zazwyczaj większą część pola obrazowego i często szorując pędzlem mocno po płótnie, a także z upodobaniem pokrywa farbą meble i ściany lub rozbryzguje po nich farbę. Brent z azylu Chimp Haven w Keithville w USA malował językiem, tworząc stosunkowo regularne, rytmiczne



CHIMPANZEE CONGO, PUBLIC DOMAIN, VIA WIKIMEDIA COMMONS

kompozycje. Jamie z Chimpanzee Sanctuary Northwest lubi malować na niestandardowych powierzchniach, takich jak ściany lub zabawki, i wklejać do obrazów różne elementy, np. pestki słonecznika, tworząc tym samym kolaże. Santino z Furuvik Zoo w Szwecji maluje powoli i w skupieniu, wyciskając samodzielnie farby z tubki na papier, po czym delikatnie je rozsmarowuje. Chiffon z Chimfunshi Orphanage w Zambii często nabiera na pędzel więcej niż jeden kolor. W Polsce malowidła tworzyła szympansica Lucy w warszawskim ogrodzie zoologicznym. W 2018 roku zostały one pokazane w Muzeum Warszawskiej Pragi. Z kolei w gdańskim zoo mieszka orangutanica Raja, która lubi rysować kredkami, a wystawę jej prac można obejrzeć w pawilonie małp.

Obraz autorstwa szympansa Congo

Współpraca artystyczna ludzi i szympansów

Innym kontekstem dla malarstwa szympansów są wspomniane zmiany występujące w samej sztuce, przesunięcia jej granic i poszerzanie definicji, które zachodziły przez cały XX wiek w kolejnych ruchach awangardowych. Szczególne znaczenie dla włączania zwierząt pozaludzkich w procesy tworzenia ludzkiej sztuki miały konceptualizm, dadaizm, abstrakcyjny ekspresjonizm i postmodernizm, w tym zwrot audio-wizualny i performatywny, *land art* i *bio art*. Zmiany te sprawiły, że malarstwa małp nie da się już jednoznacznie i bezdyskusyjnie wykluczyć z pola sztuki. Szczególnie że profesjonalni ludzcy twórcy podejmowali wobec nich inkluzyjne działania artystyczne.

Obrazy autorstwa
szympanów z Leintalzo
Schwaigern, Niemcy



HEINZ HACHEL (KUNSTBÜRO DÜSSELDORF), CC BY-SA 4.0, VIA WIKIMEDIA COMMONS (2)



Na początku lat 80. austriacki malarz Arnulf Rainer skontaktował się z Wernerem Müllerem, właścicielem teatru-cyruku z udziałem szympanów jeżdżących na łyżwach, które również malowały w ramach aktywności wzbogacających – dla zabicia nudy. Rainer obserwował malujące szympanse Müllera, wypożyczył kilka ich obrazów i próbował je naśladować z intencją nauczania się czegoś od zwierząt. Według Lenaina porównanie prac Rainera i szympanów ukazuje niezdolność człowieka do stworzenia czystego śladu pędzla, wolnego od konceptu. Rainerowskie interpretacje obrazów małp wraz z oryginałami zostały niedawno pokazane z Kunsthalle Darmstadt na wystawie *Animalia*.

W 1987 roku malarz Lucien Tassarolo podjął artystyczną współpracę z 14-letnią szympanisą Kundą z ogrodu zoologicznego we francuskim Fréjus. Malowali razem na powieszonym pionowo dużym kartonie. Tassarolo zostawiał zwierzęciu inicjatywę,

pozwalając mu tworzyć swobodnie, a w międzyczasie uzupełniał obraz drobnymi elementami. W ten sposób powstał np. ptak przystrojony wzorem wachlarza namalowanym przez Kundę, charakterystycznym dla szympanów motywem, który Morris opisywał jako ulubiony kształt Congo. Kunda miała wyjątkowo rozwiniętą inteligencję, uważność i zdolność do skupienia. Tassarolo wspominał, że często z entuzjazmem przyjmowała jego interwencje, innym razem zamalowywała je, domagając się, by domalował coś innego. Oboje podpisali gotowe obrazy – człowiek swoim podpisem, a szympanica odciskiem dłoni.

Antropomorfizacja czy upodmiotowienie?

Artyści w połowie XX wieku uczynili przyrodę wraz z jej estetycznymi właściwościami częścią sztuki. Wartość estetyczna wytworów zwierząt nadal – a nawet coraz częściej – doceniają artyści współcześni. Granica między wytworami przyrody i sztuki, człowieka i zwierząt pozaludzkich zaciera się. Współcześni ludzcy twórcy coraz częściej sytuują zwierzęta w roli uczestników i współautorów prac.

Można się jednak zastanawiać, w jakim stopniu takie działanie jest antropomorfizacją lub symboliczną instrumentalizacją zwierząt. Czy pozostają one tylko tworzywem konceptualnej pracy ludzkiego artysty przez samo wprowadzenie ich do sztuki? Jaki status w kontekście płynnych i nieustannie poszerzanych granic sztuki ma malarstwo małp?

Z pewnością zwierząt jako kreatywnych sprawców nie można już pominąć na mapie postmodernistycznych przemian w sztuce od drugiej połowy XX wieku do dziś. Postrzeganie sztuki jako radykalnie oddzielnej od natury, jako aktywności czysto ludzkiej, a tym samym sytuowanie człowieka i jego kultury poza naturą, jest nie tylko artystycznie i intelektualnie ograniczające, lecz także nieprawdziwe w świetle dostępnych świadectw twórczej działalności ludzi i zwierząt.

Z punktu widzenia badań nad kulturą wizualną obrazy małp okazują się estetycznie fascynującą dokumentacją wizualnej różnorodności śladów ruchów pędzla. Im więcej przyglądam się malarstwu człokształtnych, tym mniej widzę powodów, by nie porównywać go z twórczością ludzkich dzieci, z *art brut* i sztuką abstrakcyjną. Nie stawiając jednoznacznej tezy, coraz bardziej skłaniam się ku nazywaniu twórczości rysunkowej i malarskiej małp sztuką bez cudzysłowu i znaku zapytania. Nie przestaje mnie jednak dręczyć pytanie, czy status małp jako artystów ma szansę przełożyć się na większy szacunek do nich i bardziej podmiotowe traktowanie, czy może tylko naraża je na ryzyko naukowej lub komercyjnej eksploatacji. ■

Chcesz wiedzieć
więcej?

Lenain T., *Monkey Painting*, 1997.

Morris D., *The Artistic Ape*, 2013.

Morris D., *The Biology of Art*, 1966.

Welsch W., *Animal Aesthetics*,
„Contemporary Aesthetics”,
tom 2, 2004, hdl.handle.
net/2027/spo.7523862.0002.015



PEXELS – URFRIENDLYPHOTO

OD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI DO GWIAZD

Rzeczywistość naukowo-techniczna nie jest neutralna ideologicznie. Napędza go nie tylko pragnienie poznania rzeczywistości, lecz także chęć zrealizowania za pomocą nowych technologii konkretnych wizji ideowych.

Filip Biały

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
Uniwersytet w Manchesterze

Dziś wybitnie zideologizowane zdają się badania nad sztuczną inteligencją, w której reprezentanci tescrealizmu – nowej filozofii Doliny Krzemowej – upatrują szansy na dokonanie przez ludzkość skoku ewolucyjnego.

„Z San Francisco najszybciej można dostrzec przyszłość” – tak brzmi pierwsze zdanie eseju *Situational Awareness* z 2024 roku. Jego autor, Leopold Aschenbrenner, były pracownik OpenAI, przekonuje, że już

w 2027 roku dojdzie do przełomu w badaniach nad sztuczną inteligencją (SI). Opierając się na ekstrapolacji trendów z ostatnich kilku lat, powinniśmy spodziewać się, że SI osiągnie wkrótce poziom ponadludzki. „Nie trzeba wierzyć w science fiction, wystarczy wierzyć w prostą linię na wykresie” – pisze Aschenbrenner, skrupulatnie dołączając rzeczony wykres, na którym jest przedstawiony rosnący liniowo poziom zdolności poznawczych kolejnych wersji modelu językowego GPT. Jeżeli w ciągu czterech lat udało się dojść od modelu GPT-2 (poziom przedszkolaka) do GPT-4 (poziom mądrego licealisty), to w 2027 roku model ten osiągnie poziom osoby z dyplomem albo „automatycznego badacza/inżyniera SI”.

Debatę wokół SI jest pełna podobnych enuncjacji, zapewniających, że wiedzę o przełomowej technice posiada co najwyżej kilkaset osób, pracujących



dr Filip Biały

Pracownik naukowy
Uniwersytetu
im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu
oraz Uniwersytetu
w Manchesterze,
wykładowca
European New School
of Digital Studies.
Jego badania skupiają
się na konsekwencjach
politycznych procesów
transformacji cyfrowej.
filip.bialy@amu.edu.pl

w OpenAI czy innym z laboratoriów SI. Autorów tych rewelacji – zdecydowana większość z nich to mężczyźni – charakteryzuje quasi-religijna wiara w rychłe nadejście tzw. ogólnej sztucznej inteligencji (ang. *artificial general intelligence* – AGI) bądź superinteligencji (ang. *artificial superintelligence* – ASI). Mowa o technice zdolnej wykonywać wszelkie zadania na poziomie ludzkim bądź wyższym. Jak zobaczymy, intensywne prace nad AGI/ASI są jednak zarówno przedmiotem nadziei, jak i zasadniczych obaw.

Ścieżka do transhumanizmu

Jeszcze dekadę temu liderom technologicznym z okolic San Francisco przypisywano tzw. ideologię kalifornijską, łączącą kontrkulturowe wartości hippisów z kalkulacją finansową kapitalistycznych yuppies. Dziś Elon Musk, Mark Zuckerberg, Sam Altman i wielu innych pozostają pod wpływem innego koktajlu ideologicznego. Określa go zaproponowany w 2023 roku przez Timnit Gebru i Émile’a P. Torresa akronim TESCREAL. Składają się na niego nietożsame, lecz

nazwiska, a także wiele powiązań instytucjonalnych i politycznych.

Akronim TESCREAL w zamierzeniu Timnit Gebru i Émile’a P. Torresa, twórców tego pojęcia, odzwierciedla chronologiczne pojawianie się kolejnych nurtów. Pierwszy był transhumanizm. Pojęcie to zdefiniował w 1957 roku Julian Huxley, jednak jego obecne rozumienie zawdzięczamy filozofowi Maxowi More’owi. Pisał on w końcu lat 80. XX wieku o dążeniu do kondycji postludzkiej: radykalnej zmiany naszej natury przy wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki.

More był współzałożycielem Extropy Institute, emanacji ekstropianizmu. Nurt ten głosi dążenie do osiągnięcia nieśmiertelności i nieograniczonej ekspansji przez użycie inteligentnej techniki. Wiara w zaistnienie niezbędnego przełomu technicznego łączy ekstropian z syngularytystami, takimi jak Ray Kurzweil. Kurzweil upowszechnił 20 lat temu koncepcję osobliwości technologicznej (*singularity*), przez którą rozumie połączenie człowieka ze SI. W książce *The Singularity is Nearer* (2024) Kurzweil powtarza swoje przewidywania, wskazując 2029 rok jako moment osiągnięcia przez SI poziomu ludzkiej inteligencji oraz 2045 rok jako perspektywę integracji ludzi z maszynami.

Połączenie SI z człowiekiem jest jedną z centralnych idei kosmizmu, którego antecedence sięgają filozofii rosyjskiej z przełomu XIX i XX wieku. Dziś kosmizm jest reprezentowany m.in. przez Bena Goertzela, który spopularyzował pojęcie ogólnej sztucznej inteligencji (AGI). Elementami jego wizji jest możliwość załadowania ludzkiego umysłu do komputera oraz kolonizacja przestrzeni kosmicznej.

Przez osobliwość technologiczną można także rozumieć osiągnięcie przez SI poziomu, który doprowadzi do „eksplozji inteligencji”. Zamiast podporządkować się człowiekowi, zacznie ona tworzyć doskonalsze wersje samej siebie. Koncepcję tę współcześnie opisał filozof Nick Bostrom, autor wpływowej *Superinteligencji* z 2014 roku. Zagłady grożącej ze strony SI obawia się Eliezer Yudkowsky, określany z tego względu mianem doomera. Yudkowsky stworzył platformę LessWrong, skupiającą przedstawicieli tescrealistycznej wersji racjonalizmu, dążącego do ulepszenia ludzkiego rozumowania i decydowania. Ma temu służyć zaawansowana SI, pod warunkiem że nie wymknie się spod kontroli, co jest największą troską Yudkowsky’ego i założonego przez niego Machine Intelligence Research Institute.

Racjonalistom blisko do dwóch ostatnich nurtów tescrealizmu: efektywnego altruizmu i longtermizmu. Efektywny altruizm (EA) jest najnowszą, doskonale zorganizowaną odsłoną etyki utilitarystycznej. Filozoficznymi ojcami EA byli Peter Singer oraz Derek Parfit, uczący, że priorytetowe traktowanie w naszych decyzjach etycznych ludzi przestrzennie bądź czasowo nam bliskich jest błędne. Powinniśmy

Przez osobliwość technologiczną można także rozumieć osiągnięcie przez SI poziomu, który doprowadzi do „eksplozji inteligencji”.

bliskie sobie i nierzadko wyznawane łącznie przez te same osoby nurty ideowe: transhumanizm, ekstropianizm, syngularytyzm, kosmizm, racjonalizm, efektywny altruizm i longtermizm.

Choć wymienione określenia mogą się wydawać dziwacznymi neologizmami, odnoszą się do idei rozwijanych od wielu dekad. Ich wspólnym genealogicznym poprzednikiem jest eugenika. W początkach XX wieku eugenicy mówili o metodach selektywnego rozmnażania się ludzi, by ulepszać kolejne pokolenia. Wraz z nadejściem inżynierii genetycznej eugenika zmieniła swój charakter, odcinając się od rasistowskich korzeni, a skupiając się na możliwości eliminacji wad i chorób genetycznych. Eugenika trzeciej generacji, istota tescrealizmu, jest jeszcze ambitniejsza. Chodzi o przejście na kolejne stadium ewolucyjne, którym ma być digitalizacja ludzkiej świadomości, a następnie ekspansja cyfrowych ludzi we wszechświecie.

Tescrealizm nie jest jednolitym ruchem i prawie nikt nie nazwałby siebie tescrealistą. A jednak przyglądając się temu, kto wyznaje idee należące do tej rodziny ideologicznej, dostrzeżemy powtarzające się

stosować uniwersalne reguły wobec każdego człowieka, nawet tego, który znajduje się na drugim końcu świata, bądź – tu EA łączy się z longtermizmem – jeśli człowiek ten narodzi się miliony lat po nas. Współtwórca EA, William MacAskill, pisał w książce *What Do We Owe the Future* (2022), że ponieważ w perspektywie milionów lat ludzkość, która zasiedli przestrzeń kosmiczną, będzie wielokrotnie liczniejsza od współczesnej (wedle wyliczeń Bostroma ma to być nawet 10^{58} istnień), te właśnie przyszłe pokolenia muszą być podstawowym czynnikiem w naszych kalkulacjach etycznych.

W odniesieniu do żyjących tu i teraz EA nawołuje do wyboru takich ścieżek kariery, które będą wieść do osiągnięcia szczęścia jak największej liczby przyszłych ludzi. Prowadzi to pozornie do paradoksów, takich jak wyższe cenie tych, którzy zajmują się rozwojem SI, od tych, którzy chcieliby zapobiec katastrofie klimatycznej. Jest tak dlatego, że EA i longtermizm opierają się na kategorii ryzyka egzystencjalnego. Chodzi o takie wydarzenia, które mogłyby uniemożliwić zrealizowanie długofalowych wizji podboju kosmosu przez zdigitalizowaną ludzkość. Kryzys klimatyczny może być dla miliardów dramatyczny w skutkach, jednak tak jak pandemia, wojny czy brak sprawiedliwości społecznej najprawdopodobniej nie doprowadzi do całkowitej zagłady człowieka. Dlatego też nie są to dla EA problemy priorytetowe.

Elegia dla bogaczy

Pierwsze przykazanie EA brzmi: „Zarabiam, by dawać”. Jego wyznawcą był sponsor idei EA i bliski znajomy MacAskill, Sam Bankman-Fried, skazany za defraudację miliardów dolarów z założonej przez siebie giełdy kryptowalut FTX. Choć może wydawać się niesprawiedliwe, by idee EA rozliczać skrajnym przykładem oszusta finansowego, przypadek ten doskonale obrazuje przenikanie się ideologii tescrealistycznych oraz praktyk korporacyjnych Doliny Krzemowej.

Gdyby tescrealizm był bowiem jedynie osobliwą filozofią garstki ekscentrycznych entuzjastów postępu technicznego, można by pewnie potraktować go jako intelektualny odprysk epoki cyfryzacji. Jest to dziś jednak środowisko wpływowe, bardzo dobrze zinstytucjonalizowane, a jeszcze lepiej finansowane. Sam tylko Future Fund założony przez Bankmana-Frieda przeznaczył 160 mln dolarów na cele wspierane przez EA.

Tescrealiści uważają, że najlepiej rokującym środkiem realizacji ich wizji jest ogólna SI. Za główne ryzyko egzystencjalne uznają pojawienie się autonomicznej SI niedopasowanej do ludzkich wartości. Jeśli będzie ona dążyć do maksymalizacji ustalonych przez siebie celów, czynnik ludzki może zostać uznany za przeszkodę, którą trzeba wyeliminować. Dlatego tak ważne są prace nad bezpieczeństwem sztucznej inteligencji, czyli nad metodami dopasowania SI do pożądaných

wartości. W tej perspektywie staje się zrozumiałe, dlaczego ci sami ludzie, tacy jak Elon Musk, jedną ręką podpisują wezwania do moratorium na badania nad SI, drugą zaś hojnie wspierają badania nad rozwojem „bezpiecznej” ogólnej SI.

Na pierwszy rzut oka ten aspekt tescrealizmu wydaje się pozytywny. Chyba dobrze, że tak dużą wagę przywiązuje on do bezpiecznego rozwoju techniki? Problem w tym, że przeznaczając miliardy na bezpieczeństwo wciąż nieistniejącej i być może niemożliwej do zbudowania ogólnej SI, nie kieruje się podobnych środków na zapobieganie szkodom wyrządzanym przez już działające systemy wąskiej SI. A to właśnie zastosowanie SI w decydowaniu o przyznawaniu świadczeń socjalnych, w prowadzeniu działań zbrojnych, w kontroli i inwigilacji mniejszości etnicznych i rasowych są palącym problemami ludzi żyjących dziś na Ziemi, a nie przyszłych, międzygwiazdnych pokoleń.

Rolą ideologii jest dostarczanie swoim wyznawcom pojęć strukturyzujących świat społeczny, motywujące wizji przyszłości oraz praktycznych uzasadnień podejmowanych działań. Nie ulega wątpliwości, że tescrealizm taką rolę odgrywa, wkraczając coraz wyraźniej w główny nurt polityki. Jeśli ktoś w to wątpi, powinien przyrzeć się uważniej drodze politycznej J.D. Vance’a, którego Donald Trump wybrał jako kandydata na wiceprezydenta.

J.D. Vance został senatorem dzięki finansowemu wsparciu udzielonemu przez Petera Thiela, sponsora EA i innych inicjatyw tescrealistycznych. Thiel, jeden z najważniejszych technologicznych *venture capitalists*, poznał Vance’a w 2011 roku, kilka lat później dał mu pracę w jednym ze swoich funduszy inwestycyjnych. Donald Trump przekonał się do Vance’a po serii rozmów z Muskiem i Thielem.

Po co tescrealistom Vance? Jak pisał „The Washington Post”, chodzi o to, by w Białym Domu znalazł się ktoś, kto rozumie, że rozwijanie nowych technologii nie jest rolą rządu, jak było to w czasach Projektu Manhattan, lecz należy w tym względzie pozostawić wolną rękę „geniuszom” z Doliny Krzemowej.

Być może zatem ostatecznie tescrealizm jest przede wszystkim narzędziem realizacji ekonomicznego interesu miliarderów z Doliny Krzemowej, dostarczając obietnicy rozwiązania wszelkich ludzkich problemów nieskrępowanym rozwojem technicznym. Kiedy przestanie być do tego przydatny, podzieli losy klasycznej ideologii kalifornijskiej i zostanie zastąpiony inną filozofią. Zanim to jednak nastąpi, tescrealizm musi stać się przedmiotem krytycznej uwagi nie tylko badaczy ideologii, lecz także opinii publicznej. Szczególnie jeśli pragniemy, by rozwój techniczny był poddany demokratycznej kontroli i dopasowany do wartości sprzyjających dobrobytowi całych społeczeństw, a nie tylko korzyści wąskich elit kapitalizmu cyfrowego. ■

**dr Michael Pleyer**

Jest adiunktem w Centrum Badań nad Ewolucją Języka Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (UMK) oraz stypendystą programu Polonez BIS, współfinansowanego przez Komisję Europejską i Narodowe Centrum Nauki (NCN) w ramach grantu Marie Skłodowska-Curie COFUND. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na zagadnieniach z pogranicza lingwistyki kognitywnej i badań nad ewolucją języka.

pleyer@umk.pl

**dr hab. Sławomir Waciewicz, prof. UMK**

Kieruje Centrum Badań nad Ewolucją Języka (CLES NCU, cles.umk.pl). Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół ewolucji poznania i komunikacji, ostatnio ze szczególnym uwzględnieniem komunikacyjnej funkcji wyglądu ludzkich oczu.

waciewicz@umk.pl

JAK POWSTAŁ JĘZYK

Nauka o ewolucji języka to obecnie dynamiczna, nowoczesna i interdyscyplinarna dziedzina badań naukowych.

**Michael Pleyer
Sławomir Waciewicz**

Centrum Badań nad Ewolucją Języka
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

gatka wschodnia i tymal dwubarwny) wytwarzają złożone zawołania, których różne połączenia tworzą nowe znaczenia. Małpy z rodziny człowiekowatych, takie jak szympany, komunikują się za pomocą złożonych wokalizacji i dużej liczby gestów.

Ludzka komunikacja

Niemniej jednak w toku rozwoju językoznawstwa wykazano, że język ludzki pod wieloma względami pozostaje wyjątkowy. Człowiek dysponuje zasobem słownictwa liczącym dziesiątki tysięcy jednostek, co znacznie przekracza rozmiar jakiegokolwiek systemu komunikacji zwierząt. Język wydaje się również jedynym systemem komunikacji cechującym się kompozycjonalnością, czyli możliwością łączenia z sobą słów w taki sposób, by uzyskać złożone i coraz to nowe znaczenia. Ponadto język ludzki jest nieograniczony i może być używany do rozmów na dowolne tematy: wczorajsze śniadanie, przewidywania dotyczące nadchodzących wyborów czy znaczenie wolności w społeczeństwie. Z kolei zwierzęce systemy komunikacji – mimo ich złożoności – cechują się poważnymi ograniczeniami dotyczącymi tego, co można wyrazić za ich pomocą.

W ostatnich latach w naukach zajmujących się badaniami nad językiem coraz częściej podkreśla się również znaczenie aspektów ludzkiej komunikacji, którym w przeszłości nie poświęcano wystarczającej uwagi. Jedynym z nich jest wielomodalność komunikacji językowej. Polega ona na tym, że komunikacja językowa nie ogranicza się do mowy, lecz może wykorzystywać różne modalności, czyli kanały. Dotyczy to zwłaszcza gestów i mimiki, które prawie zawsze towarzyszą wypowiedziom mówionym. Co więcej, języki migowe – chociaż mają charakter wizualny, nie wokalny – są pełnoprawnymi, złożonymi systemami ję-

Ludzi od zawsze fascynowały kwestie związane z pochodzeniem i rozwojem języka. Na skutek tego zainteresowania były one w przeszłości przedmiotem różnorodnych spekulacji, które przybrały tak ogromną skalę, że w 1866 roku Société de Linguistique de Paris, francuskie towarzystwo naukowe zajmujące się badaniami z dziedziny językoznawstwa, zabroniło debat na temat glottogenezy.

Mimo tego niesławnego zakazu nie zaprzestano badań nad ewolucją języka. Ich status zmienił się jednak diametralnie dopiero dzięki postępowi, który dokonał się w ciągu ostatnich 30 lat, a właściwa nauka o ewolucji języka powstała w latach 90. XX wieku. Obecnie badania nad ewolucją języka to dynamiczna, interdyscyplinarna i nowoczesna dziedzina, a odkrycia w kognitywistyce, komunikacji zwierząt, biologii, genetyce, antropologii, archeologii i paleoantropologii, neuronauce, psychologii, językoznawstwie, informatyce oraz wielu innych dyscyplinach znacząco zmieniły naszą wiedzę na temat przebiegu ewolucji języka i przyczynach jej szczególnego charakteru.

Z badań nad komunikacją zwierząt innych niż człowiek wynika, że wiele z nich posługuje się zaskakująco złożonymi systemami komunikacyjnymi. To wskazuje, że systemy komunikacji zwierząt i ludzki język mają z sobą o wiele więcej wspólnego, niż wcześniej sądzono. Niektóre gatunki małp (np. koczokodan białonosy i koczokodan liberyjski) oraz ptaków (np. bo-



PATRICK ROLANDS/SHUTTERSTOCK.COM

zykowymi, które nie są pod żadnym względem gorsze od języków mówionych. Wszystkie języki, zarówno mówione, jak i migowe, są złożonymi, symbolicznymi i ustrukturyzowanymi systemami komunikacji, które wykorzystuje się w interakcjach do przedstawiania punktów widzenia i wspólnego tworzenia znaczeń.

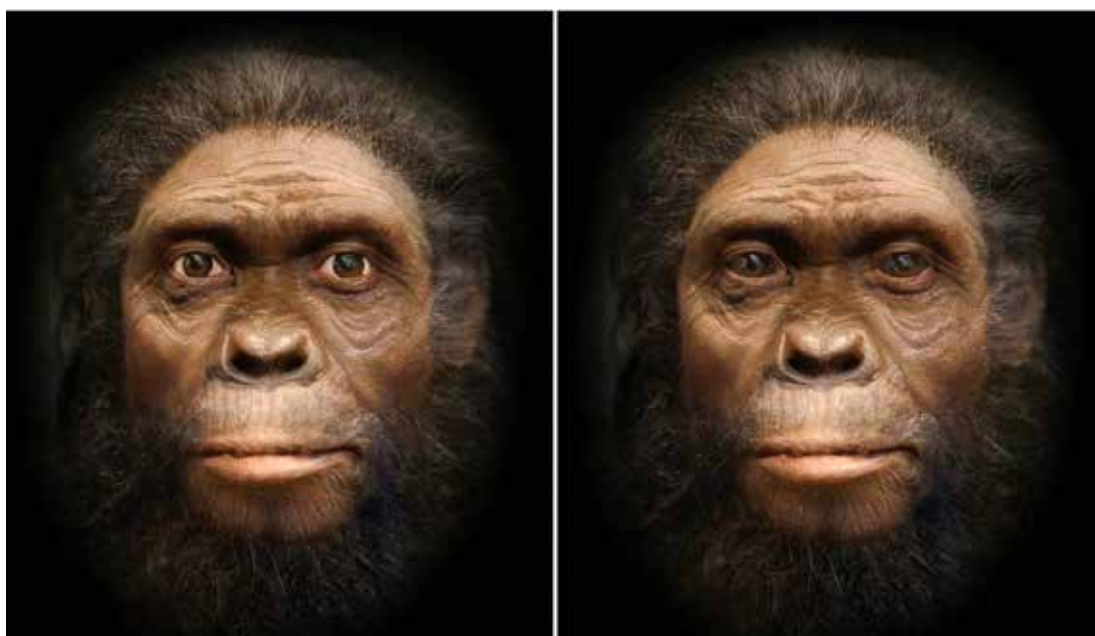
Lingwistyka i psychologia potrafią coraz lepiej wyjaśnić zdolności poznawcze, które leżą u podstaw języka. Zaliczają się do nich zdolność do wyodrębniania statystycznych prawidłowości i wzorców ze złożonych sekwencji oraz społeczna zdolność do przyjmowania perspektyw innych osób, czyli stawiania się w cudzej sytuacji. Pomagają nam one rozpoznać intencje kryjące się za słowami rozmówców (np. możemy powiedzieć: „Ale tu duszno”, gdy tak naprawdę chcemy, by ktoś otworzył okno). Ta nieustannie rozwijana wiedza pomaga nam określać czynniki, które umożliwiły powstanie języka w przebiegu ewolucji człowieka. Ogromny postęp, który dokonał się w neuronauce dzięki technice funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI), również przyczynił się do odkrycia tzw. sieci językowej w mózgu, czyli elementów i obszarów odpowiedzialnych za przechowywanie wiedzy o języku oraz wykonywanie operacji językowych.

Badania w genetyce i paleoantropologii sugerują, że wiele elementów wspierających język może być ewolucyjnie znacznie starszych, niż wcześniej zakładano. W przeszłości wielu badaczy przyjmowało, że język powstał stosunkowo późno w toku ewolucji człowieka, bo 50–100 tys. lat temu. Coraz więcej badań wskazuje jednak na znacznie bardziej stopniową, powolną i długą ewolucję, którą zapoczątkowało pojawienie się naszego przodka *Homo erectus* około dwóch milionów lat temu. Według podejścia wyłaniającego się na gruncie najnowszych badań z obszaru genetyki, archeologii i paleoantropologii wiele ważnych podstaw języka i mowy było już obecnych u ostatniego wspólnego przodka współczesnych ludzi i neandertalczyków około 500 tys. lat temu, co wskazuje, że język mógł istnieć już wtedy w pewnej praformie.

Nauki zajmujące się językiem, kognitywistyka, a także antropologia ewolucyjna i antropologia lingwistyczna uzupełniają ten obraz szczegółowymi opisami społecznego otoczenia i społecznych procesów wspomagających powstawanie języka w społecznościach, których członkowie wchodzi z sobą w interakcje. Tu napotykamy kolejną właściwość, która jest domeną wyłącznie lub prawie wyłącznie ludzi (przynajmniej

Wiele zwierząt, w tym szympany, ma systemy komunikacji, które są zaskakująco złożone. Szympany np. używają zarówno wokalizacji, jak i gestów do komunikacji

Badania wskazują fundamentalnie multimodalny charakter ludzkiej komunikacji. Na przykład porównanie jasnych, ludzkich twarówek z ciemnymi, małpimi pokazuje, że jaśniejsze zwiększają widoczność spojrzenia. To wspomaga śledzenie wzroku i percepcję społeczną, co jest kluczowe dla komunikacji niewerbalnej i prawdopodobnie wspierało ewolucję ludzkiego języka



WACEWICZ I IN., „SCIENTIFIC REPORTS” 2022

wśród naczelnych), a mianowicie udzielanie prawdziwych informacji (ang. *information donation*). Inne gatunki małp, również człekokształtnych, nie przekazują sobie nawzajem cennych informacji, podobnie jak nie dają sobie nawzajem jedzenia. Ewolucyjnie ma to sens: po co dawać jedzenie lub informacje innym i tym samym zwiększać ich dostosowanie ewolucyjne, zamiast skupiać się na swoim? A nawet: zamiast manipulować innymi dla własnej korzyści? Pod tymi kluczowymi względami ludzie wyróżniają się w zaskakujący sposób. Lubimy dzielić się jedzeniem, tak jak lubimy dzielić się informacjami – nie tylko nie zachowujemy przydatnej wiedzy dla siebie, lecz także często rywalizujemy o to, kto pierwszy przekaze innym sensacyjne wiadomości.

Szybki rozwój

Jednym z najbardziej fascynujących odkryć w ostatnich badaniach nad ewolucją języka jest koncepcja ewolucji kulturowej, według której złożone systemy komunikacyjne o kluczowych właściwościach ludzkiego języka mogą powstać w relatywnie krótkim czasie kilku pokoleń osób wchodzących w interakcje. Słowa i struktury rywalizują z sobą, podobnie jak robią to żywe istoty: te najbardziej przydatne i prestiżowe lub najłatwiejsze do zapamiętania zyskują popularność i są promowane, a pozostałe wymierają. Z tej perspektywy ewolucja języka jest porównywana do ewolucji „pożytecznych pasożytów”, które muszą dostosować się do swoich żywicieli – w przypadku języków są nimi mózgi ich użytkowników.

Dowody na poparcie tej tezy pochodzą z licznych dyscyplin, m.in. językoznawstwa historycznego, które bada zmiany językowe powstałe z upływem czasu.

Z badań nad gramatyzacją wynika, że wiele elementów gramatyki może powstawać na przestrzeni dziejów, a zmiany te da się prześledzić na różnych etapach historii języka. Klasycznym przykładem jest współczesna forma czasu przyszłego *going to* w języku angielskim. W średnioangielskim (ang. *Middle English*, 1150–1500) *going to* używano tylko w dosłownym, fizycznym znaczeniu („iść”). Z czasem nabierało jednak funkcji gramatycznej i we wczesnym nowoangielskim (ang. *Early Modern English*, 1500–1700) zaczęło być używane w bardziej abstrakcyjnym znaczeniu przyszłych planów i zamiarów, jak np. w zdaniu *I am going to read this book* (Mam zamiar przeczytać tę książkę). W nowoangielskim (ang. *Modern English*, od 1700 roku) *going to* (w języku mówionym często skracane do formy *gonna*) uległo pełnej gramatyzacji jako forma czasu przyszłego używana do oznaczania planowanych lub nieuchronnych działań i wydarzeń, jak np. w zdaniu *It's going to rain* (Będzie padać).

Nowsze odkrycia wskazują, że struktury językowe mogą powstawać w jeszcze krótszych okresach. Fascynującym przypadkiem są tzw. wyłaniające się języki migowe (ang. *emerging sign languages*), czyli złożone i ustrukturyzowane języki tworzone przez społeczności osób głuchych lub z relatywnie wysoką częstością występowania głuchoty. Takie języki powstają na całym świecie, jeśli tylko są spełnione odpowiednie warunki społeczne. Na przykład nikaraguański język migowy został stworzony w latach 70. i 80. XX wieku przez głuche dzieci, które zaczęły w ten sposób komunikować się z sobą w szkole, choć wcześniej nie uczyły się żadnego języka migowego. Z kolei beduiński język migowy używany przez mieszkańców wioski Al-Sajid rozwinął się około 75 lat temu w izraelskiej społecz-

ności Beduinów z wysoką częstością występowania głuchoty wrodzonej. Co istotne, rozwijające się języki migowe służą ludzkiej potrzebie komunikowania się i współtworzenia wspólnego znaczenia tak samo efektywnie jak języki mówione z długą historią, np. angielski, polski czy suahili.

Systemy komunikacji

Choć wiele procesów, które prowadzą do rozwijania się języków w tak krótkim czasie, nie zostało jeszcze do końca zrozumianych, coraz intensywniej bada się tworzenie ustrukturyzowanych systemów komunikacyjnych przez ludzi wchodzących z sobą w interakcje. W stosunkowo niedawno stworzonym paradygmacie tzw. semiotyki eksperymentalnej uczestnicy badania muszą się komunikować, ale nie mogą do tego celu używać ludzkiego języka. Zamiast niego mają ko-

rzystać z symboli i kształtów na ekranie komputera, rysunków, zaimprovizowanych słów i wokalizacji, różnych narzędzi (np. gwizdków), gestów i pantomimy. Tego typu badania, które wykorzystują wiele różnych kanałów i modalności komunikacji, pokazują, że uczestnicy współtworzą złożone systemy komunikacji, które w relatywnie krótkim czasie stają się coraz bardziej ustrukturyzowane i podobne do języka. Okazuje się również, że uczestnicy robią to niezależnie od środków i modalności, których mogą używać do komunikacji.

W Centrum Badań nad Ewolucją Języka na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu prowadzimy badania przy użyciu najnowocześniejszych metod i sprzętu (m.in. z wykorzystaniem technik przechwytywania ruchu i wirtualnej rzeczywistości), by lepiej zrozumieć procesy, dzięki którym ludzie wspólnie tworzą systemy komunikacyjne. Skupiamy się w szczególności na parach uczestników komunikujących się z sobą za pomocą pantomimy z wykorzystaniem całego ciała (jak w popularnych kalamburach). Ze względu na swój wizualny charakter pantomima nadaje się bowiem szczególnie dobrze do improwizowania znaczeń, gdy nie ma wspólnych znaków, które można wykorzystać do komunikacji.

Naszym zdaniem kluczową rolę odgrywa fakt, że pantomima obejmuje pracę całym ciałem. W innych badaniach nad podobną tematyką badano gesty manualne – co znaczy, że uczestnicy siedzieli i polegałi głównie na ruchach dłoni i ramion. Pojęcie chodzenia można co prawda pokazać odpowiednimi ruchami palców wskazującego i środkowego, a taka komunikacja może nawet być w pewnym stopniu udana, ale użycie całego ciała sprawia, że przekaz jest znacznie łatwiej zrozumieć. Z badań przeprowadzonych w naszej pracowni wynika, że uczestnicy na początku wykorzystują całe ciało i przestrzeń wokół siebie, by jak najlepiej pokazać dane znaczenie, a same gesty manualne są tak naprawdę tylko kolejnym etapem tego procesu. Wraz ze wzrostem powtarzalności i konwencjonalizacji pantomima staje się coraz bardziej ustrukturyzowana i stopniowo przechodzi w bardziej ekonomiczne gesty manualne.

Udało nam się wykazać to ilościowo za pomocą pomiarów wykonanych techniką przechwytywania ruchu. Pantomima z wykorzystaniem całego ciała, która wymaga dużego wysiłku pod względem ruchowym, stopniowo zajmuje mniejszą i bardziej ustrukturyzowaną przestrzeń komunikacyjną. Badania te pokazują, że takie zasady komunikacyjne jak konwencjonalizacja i minimalizacja wysiłku artykulacyjnego odzwierciedlają ważne procesy, które sprawiają, że systemy komunikacyjne są bardziej ustrukturyzowane. Wynika z nich również, że podejście eksperymentalne pozwala uzyskać szeroką wiedzę na temat zasad leżących u podstaw tworzenia złożonych systemów komunikacyjnych takich jak język. ■

Wyniki badań wskazują, że pantomima może być pierwotnym, właściwym wyłącznie ludziom systemem komunikacyjnym, poprzedzającym język. Podobnie jak język pantomima jest wysoco multimodalna i oferuje różne sposoby wyrażania tego samego pojęcia. Na przykład „uderzenie młotkiem” może być przedstawione za pomocą gestu z perspektywy pierwszej osoby lub gestu z perspektywy trzeciej osoby

Chcesz wiedzieć więcej?

Hurford J.R., *Origins of Language: A Slim Guide*, 2014.

Pleyer M., Hartmann S., *Cognitive Linguistics and Language Evolution*, 2024.

Żywczyński P., Waciewicz S., *Ewolucja języka: W stronę hipotez gesturalnych*, 2015.



**Agata Passent**

Dziennikarka,
felietonistka,
autorka książek.

Publikuje w tygodniku
„Polityka”, prowadzi
audycję *Motywy*
w radiowej Jedynce.
Mama dwóch synów,
emerytowana
tenisistka.
agata.passent
@okularnicy.org.pl

Agata Passent

Tygodnik „Polityka”, Program 1 Polskiego Radia

Każda felietonistka jako czujna obserwatorka dostrzega, że *Homo sapiens* ma całkiem różnorodny i bogaty zestaw cech, którymi stara się zwrócić na siebie uwagę.

Szesnastoletni syn moich znajomych uprawia jeden z rodzajów kitesurfingu, polegający nie tylko na ściganiu się na desce w wodzie i powietrzu z innymi zawodnikami, lecz także na wykonywaniu na niej skomplikowanych ewolucji. Zdumieni rodzice i pra-

cownicy firm ubezpieczeniowych na pewno dwoją się i troją, kombinując, jak ubezpiecza się przedstawicieli sportów ekstremalnych, a firmy produkujące modny sprzęt zacierają ręce, ciesząc się, że co parę lat ewoluuje jakiś nowy sport wodny, na którym można zarobić. Tymczasem ja na desce serwuję sery oraz siekam warzywa na ratatouille.

Swoją drogą zastanawiam się, czy poza nami, ludźmi, wśród licznych organizmów na naszej planecie są jeszcze inne, które tak jak my lubią ryzykować po to, by zostać dostrzeżone. Ostatnio dwaj polscy piloci pragnący zaspokoić swoją potrzebę adrenaliny, zabawy i bycia pierwszymi przelecieli szybowcem nad Karakorum. Ptaki zupełnie inaczej starają się zwracać na siebie uwagę: a to rozłożą ogon z kolorowych piór, a to pośpiewają, a to sprezentują wybrankom jakieś smaczne owocki. A taki karaluch tylko śmieje się z nas, tzw. naczelnych, dojadając resztki po mojej desce serów.

Termin „ewolucja” intriguje mnie bardzo nie tylko dlatego, że ewolucjonizm to fascynująca dziedzina nauki, której odkrycia i teorie staram się od dawna śledzić, lecz także z powodu konotacji językowych. Są nader inspirujące. Człowiek w odróżnieniu od szympansa czy krokodyla wykształcił aparat mowy, ale cóż z tego, jeśli wykorzystuje go do komunikowania kłamstw lub szerzenia wojennej propagandy?

Ewolucjoniści, paleontolodzy, biolodzy czy antropolodzy – wszyscy przedstawiciele tych nauk wzbudzają moją potworną zazdrość, gdyż posiadają jedną z cech, których natura mi poskąpiła. A mianowicie są ludźmi, którzy mają talent do układania i segregowania. W życiu podziwiałam wiele kolekcji skamieniałości i szkieletów w różnych muzeach historii naturalnej, czy to w Berlinie, czy w Waszyngtonie, a wszędzie tam widać równiutko poukładane muszle, kosteczki, zęby, czaszki i tysiące skamielin. A to z trylobitami, a to mięczakami, o roślinach nawet nie wspomnę. Tymczasem ja nie potrafiłam ani utrzymać porządku w zeszytach szkolnych, w których notorycznie „wychodziłam za linię”

Emil Goś, *Rudy lis*, 2021,
akryl i olej na płótnie,
Art in House



czy pisałam po marginesach, ani w szafie na ubrania. Jako osoba dorosła nie potrafiłam wiele lat nawet poukładać w segregatorach własnych dokumentów dotyczących zdrowia i finansów.

Wszyscy moi bliscy potomkowie byli bałaganiarzami. Gdyby ktoś nas wpuścił do laboratorium paleontologicznego, połowa organizmów zapewne byłaby ułożona do góry nogami, a czółki pomyliłibyśmy z odnóżami. Jest to jeden z powodów, dla których tak wiele radości czerpię z czytania dobrych esejów pióra znakomitych biologów i ewolucjonistów, np. Edwarda Wilsona czy Stephen’a Jaya Goulda. Ich prace, czy to o mrówkach, czy o dinozaurach – nie ma to znaczenia, szalenie mnie uspokajają. Są w ramach naszego gatunku przedstawiciele uporządkowani, którzy czuwają nad taksonomią i nie tworzą takiego chaosu i śmietnika jak my, ludzie, którym nawet nie przyszłoby do głowy, by pochylić się nad sprawą pasków u zebry. Czy zebra jest białym koniem w czarne paski, czy może czarnym osłem w białe paski?

Ewolucjoniści ze stoickim spokojem używają sformułowania „masowe wymieranie”. Może i masowe, ale dla planet jeszcze nieostateczne. Fale gwałtownego wyginięcia zdarzyły się już kilkakrotnie, a to Pangea trzasnęła jak guma, a to pył wulkaniczny zaburzył temperaturę na Ziemi. To wszystko się zdarzyło, zanim pojawił się nasz gatunek, tak okropny dla planety i siebie samego.

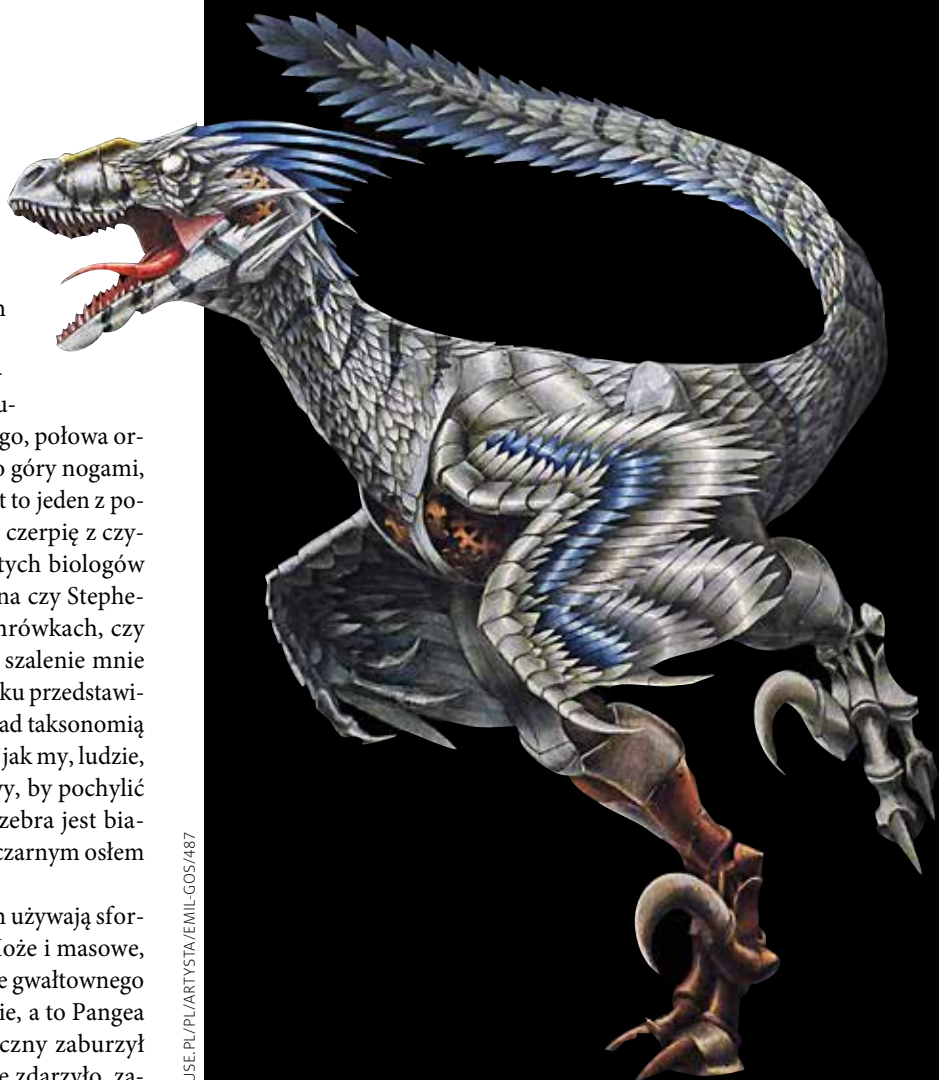
Rezultatem sporej liczby przeczytanych przeze mnie książek na temat ewolucji jest konkluzja dotycząca finansowego powodzenia mojego dentysty oraz mojej gastroenterolożki. Zęby, żuchwy, żołądki i odchody to bohaterowie niezliczonych studiów ewolucjonistów. Ewolucjonista podobnie jak archeolog bez przerwy pochyła się nad zębami, a nie od tak dawna również nad szklivem. Zęby, ich brak czy ścieranie się wiele o nas mówią. Nie tylko chciałabym, by moje zęby w razie badania ładnie wyglądały, lecz także wiem – i nie ma co się oszukiwać – że kto ma silne i zdrowe zęby, ten z głodu nie padnie. Żujmy dłużej, a będziemy dłużej żyć. Zdecydowanie lepiej odstawić mus jabłkowy na rzecz jabłka w całości.

W przyrodzie warto dbać o różnorodność gatunków, dlatego głęboko wierzę, że w naszym stadzie i rodzinie jest miejsce dla takich bałaganiarzy i „wychodzących poza ramkę” jak ja. Do podstawówki chodziłam bardzo dawno temu. Już wtedy część ludzi należała do grona tzw. kreacjonistów – dziś często wrzuca się ich do wspólnego worka z płaskoziemcami. Wprawdzie zawsze przekonywali mnie bardziej naukowcy niż kreacjoniści, to jednak nigdy nie podobał mi się wielki plakat wiszący w naszej sali do biologii, który przedstawiał liniową wersję ewolucji człowieka. Raził na nim zarówno brak płci poza

męską, jak i linia wskazująca na to, że jakoby ewolucja ma jakiś cel.

Moja chaotyczna natura zawsze pytała o to, co w tej ramce się nie zmieściło i wypadło poza kadr. Dziś wiemy, że bardzo wiele. Zawsze kwestionowałam zasadność naszej spionizowanej postawy jako tej, do której rzekomo mamy zmierzać, i uważałam, że bliżej mi do szimpansów niż ludzi. To, że niektóre małpiaste się wyprostowały, nie oznacza, że jest to jedyna i słuszna pozycja dla nas wszystkich. Nic tak nie męczy jak długie stanie czy korzystanie z tzw. narzędzi pracy, którymi są biurka i krzesła. Na starych plakatach szkolnych z pracowni biologii biały mężczyzna z narzędziem w ręce funkcjonował jako puenta jakiejś linearnej opowieści. Zawsze wiedziałam, że plakat ten wymaga udoskonalenia, a narzędzie może być bardziej zgrabną niż powodem do dumy. Niedawno wymyślono przenośne komputery i telefony, nazywając je mobilnymi. Tymczasem narzędzia te powodują, że nasze kręgosłupy, narządy trawienne i biodra cierpią – zamiast się mobilizować i ruszać, siedzą zgarbione nad ekranami. Nie mylmy ewolucji z postępem, nie żyjmy pod liniijkę i cieszymy się czasem z odrobiny chaosu i bałaganu. ■

Emil Goś, *Deinonychus*,
2020, akryl i olej na płótnie,
Art in House



ARTINHOUSE.PL/PL/ARTYSTA/EMIL-GOS/487

KRÓTKA HISTORIA ŻYCIA



FOTOGRAFIE SYLWIA PIWOWAR

W Muzeum Ewolucji Instytutu Paleobiologii PAN znajduje się jedna z najważniejszych wystaw przyrodniczych w Polsce. Ekspozycja jest głównie poświęcona paleobiologii kręgowców, ale stale są rozbudowywane części wystawy dotyczące ewolucji pozostałych grup organizmów żywych. Różnorodność wystawionych okazów odzwierciedla bogactwo zbiorów Instytutu Paleobiologii, który prowadzi swoją działalność od ponad 70 lat.



Ekspozycja
Ewolucja w morzu
– skamieniałości
oraz globusy
paleogeograficzne
przedstawiające
układ kontynentów
w przeszłości



Fot. 1

Centralna sala muzeum
z modelem szkieletu
Opisthocoelicaudia
skarzynskii,
kredowego zauropoda
z formacji Nemegt
w Mongolii

Fot. 2

Diorama przedstawiająca
środowisko triasu Krasiejowa
koło Opola: wczesny dinozaur
Silesaurus opolensis
na tle ówczesnej roślinności



Fot. 3

Modele szkieletów triasowych
gadów *Smok wawelski* (z tyłu)
i *Lisowicia bojani* (z przodu)



Głównym tematem wystaw Muzeum Ewolucji jest historia biosfery ze szczególnym uwzględnieniem procesów ewolucyjnych z nawiązaniem do naukowo najważniejszych wymarłych organizmów żywych z terenu Polski. Muzeum jest prowadzone przez Instytut Paleobiologii PAN, który w ten sposób realizuje powinność popularyzacji nauki w obszarze prowadzonych przez siebie badań. Zasadnicza część wystawianych materiałów pochodzi z prac naukowych instytutu, choć w przypadku unikatów na skalę światową są eksponowane ich modele.

W związku ze szczupłością miejsca w Muzeum Ewolucji znajduje się zaledwie ułamek zbiorów Instytutu Paleobiologii PAN. Ekspozycje pokazują faunę morską i lądową z terenu Polski oraz odkrycia dokonane podczas Polsko-Mongolskich Wypraw Paleontologicznych w latach 1963–1971.

Historia Muzeum Ewolucji zaczyna się w 1968 roku od otwarcia ekspozycji poświęconej wynikom Polsko-Mongolskich Wypraw Paleontologicznych, podczas których eksplorowano pustynię Gobi w Mongolii pod kątem geologicznym i paleontologicznym. W 1975 roku wystawa została przeniesiona do Muzeum Zoologicznego (obecnej lokalizacji muzeum). Obecna nazwa – Muzeum Ewolucji – została wprowadzona w 1985 roku.

Muzeum składa się z sześciu sal. Sala wejściowa przedstawia początki życia na Ziemi, wodne kręgowce z późnego triasu Krasiejowa oraz morskie gady mezozoiku. Sala dotycząca ewolucji w morzu jest poświęcona skamieniałościom ze środowisk morskich, w szczególności osadom dewońskim (około 420–358 mln lat temu, dalej Ma), jurajskim (około 201–145 Ma) i miocenijskim (około 23–5 Ma). Sala centralna przedstawia dinozaury roślinożerne, ssaki, żółwie i jaszczurki z Mongolii, pterozaurowe, ewolucję ptaków oraz rekonstrukcję późnotriasowego (około 228 Ma) środowiska Krasiejowa wraz ze znalezionymi tam skamieniałościami. Kolejna sala jest poświęcona dinozaurom z kredowej (około 70 Ma) formacji Nemegt w Mongolii, gdzie głównym eksponatem jest oryginalny szkielet młodocianego dinozaura drapieżnego *Tarbosaurus bataar*. Jego szkielet od 1968 roku był zmontowany w ówczynie przyjmowanej postawie z ogonem na ziemi. Rekonstrukcję tę według obecnego stanu wiedzy uważa się za błędną i od tego roku trwają prace nad aktualizacją ułożenia szkieletu. W sali tej znajdują się również skamieniałości z triasowego stanowiska Lisowice wraz z rekonstrukcjami szkieletów gadów *Smok wawelski* i *Lisowicia bojani*. Ostatnie dwie mniejsze sale przedstawiają ewolucję żółwi i ssaków.

DR JUSTYNA SŁOWIAK, DR HAB. ADAM HALAMSKI



Fot. 4
Rekonstrukcja przyżyciowa
młodocianych osobników
i dorosłego kredowego
dinozaura *Protoceratops
andrewsi*. Gatunek jest znany
z formacji Dżadochta
w Mongolii

Fot. 5
Model szkieletu dorosłego
kredowego dinozaura
Tarbosaurus bataar z formacji
Nemegt w Mongolii

Fot. 6
Rekonstrukcja przyżyciowa
plioceńskiego hominida
Australopithecus afarensis
o imieniu Lucy

Fot. 7

Szkielet zająca bielaka
Lepus timidus

Fot. 8

Szkielety i preparaty mokre
współczesnych płazów
i gadów

Fot. 9

Odlew szkieletu
z zachowanymi częściami
miękkimi jurajskiego
pterozaura
Rhamphorhynchus munsteri

Fot. 10–12

Choć najważniejsza część wystawy w Muzeum Ewolucji dotyczy ewolucji na lądach, równolegle jest rozbudowywana sala dokumentująca fascynującą ewolucję w morzach. Uderza różnorodność kształtów i przystosowań do życia zwierząt zamieszkujących dawne morza, np. spiralne odciski muszli amonitów (fot. 11), oraz barwy szkieletów i muszli dzisiejszych koralowców (fot. 10) i ślimaków (fot. 12). W przeszłości podobnie jak dziś największa różnorodność biologiczna w morzach koncentrowała się w strefie równikowej





Fot. 13
Odlew szkieletu
jaszczurki *Gilmoreteius*
(„*Macrocephalosaurus*”)
chulsanensis z kredowej
formacji Baruungoyot
w Mongolii

Fot. 14
Skamieniałości organizmów
z jurajskich mórz Polski. Nad
nimi globus z rekonstrukcją
ówczesnego położenia
oceanów i kontynentów

Fot. 15
Wejściowa sala muzeum
z wystawą o wyjściu
kręgowców na ląd.
W tle oryginalna drewniana
dekoracja Pałacu Kultury
i Nauki z lat 50. XX wieku



**mgr Joanna Borkowska**

Specjalistka
w Stacji Naukowej PAN
w Paryżu.
Z wykształcenia
romanistka i iberystka.
Zainteresowania
naukowe
to językoznawstwo
oraz literatura francuska
i latynoamerykańska.
joanna.borkowska
@paris.pan.pl

Ludwik Hirszfeld – zapomniany gigant bakteriologii i immunologii

28 maja 2024 roku w Stacji Naukowej PAN w Paryżu odbyło się niezwykle wydarzenie poświęcone Ludwikowi Hirszfeldowi – wybitnemu, choć nieco zapomnianemu polskiemu bakteriologowi i immunologowi.

W 1950 roku Hirszfeld został nominowany do Nagrody Nobla w dziedzinie medycyny za wyjaśnienie zjawiska konfliktu serologicznego między matką a płodem. Jego osiągnięcia obejmują m.in. stworzenie podstaw nauki o grupach krwi, ich oznaczenie, odkrycie przyczyny konfliktu serologicznego i stworzenie nowej dziedziny nauki – seroantropologii. Jego prace zapoczątkowały rozwój transfuzjologii i krwiodawstwa w Polsce.

Wydarzenie rozpoczęło się wykładem prof. Bogumiły Szponar z Instytutu Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN. Profesor Szponar przybliżyła publiczności najważniejsze dokonania Hirszfelda oraz ewolucję jego myśli naukowej, która wciąż inspiruje kolejne pokolenia badaczy.

Głównym punktem wieczoru był pokaz filmu *Mensch* – pierwszej pełnometrażowej opowieści o Ludwiku Hirszfeldzie. Film, oparty na niepublikowanych wcześniej materiałach archiwalnych, wywiadach

z naukowcami i inscenizacjach, ukazał życie i dokonania badacza. Jego historia, pełna poświęceń i nieustającej walki o rozwój nauki, wywarła ogromne wrażenie na zgromadzonej publiczności. Po projekcji filmu reżyser Paweł Wysoczański odsłonił kulisy jego powstawania oraz genezę pomysłu na tę produkcję. Szczególne zainteresowanie wzbudził wątek życia Hirszfelda w getcie warszawskim, gdzie mimo możliwości ucieczki postanowił pozostać, wspierać młodzież i pomagać potrzebującym. Wydarzenie wzbudziło wiele emocji, zarówno pozytywnych, jak i trudnych, przypominało o zapomnianych polskich naukowcach, których historie zasługują na ponowne odkrycie.

Wystawa *Ludwik Hirszfeld – polski badacz grup krwi* w Stacji Naukowej PAN w Paryżu zakończyła się 30 sierpnia 2024 roku. Dziękujemy wszystkim, którzy odwiedzili nas, by poznać historię tego wybitnego naukowca i jego nieoceniony wkład w rozwój medycyny. ■



ACADEMIA

Od ponad 20 lat tworzymy dla Was kwartalnik ACADEMIA – magazyn Polskiej Akademii Nauk.

Na jego łamach w przystępny sposób opowiadamy o osiągnięciach polskich badaczy.

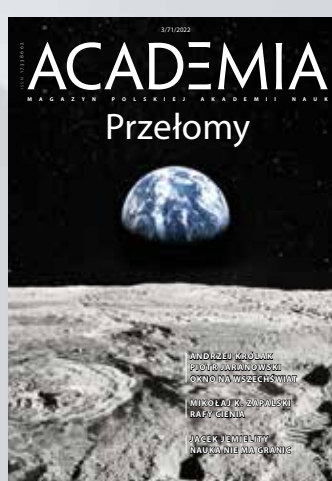
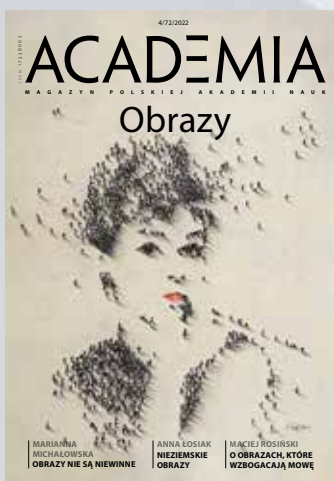
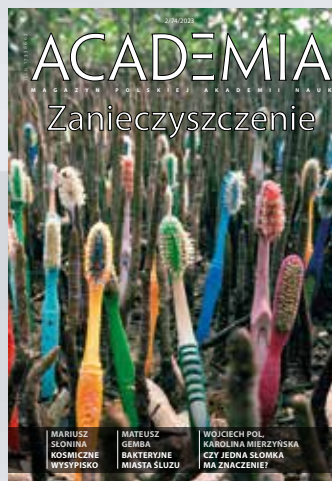
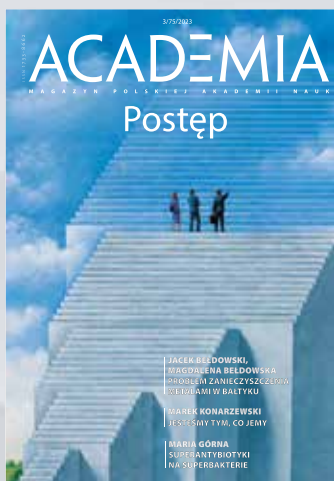
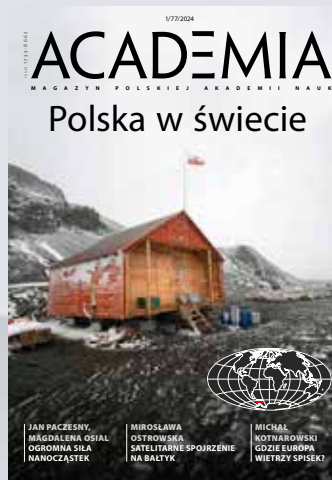
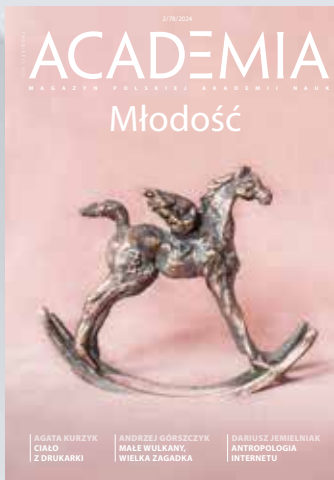
Artykuły piszą dla nas wybrani eksperci, którzy są autorytetami w swoich dziedzinach.

Tematy dobieramy pod względem ich uniwersalności i aktualności, zachęcając naukowców, by w ciekawy sposób opisywali swoje badania. ACADEMIA dostarcza pogłębionych analiz

i różnorodnych ekspertyz, jest czasopismem przekrojowym, multidyscyplinarnym, wydawanym w dwóch wersjach językowych (polskiej i angielskiej).

Pogłębiaj wiedzę – czytaj ACADEMIĘ online

academia.pan.pl





www.pan.pl