

# SCIENTIFIC AMERICAN

Sierpień 2025 nr 8 (408)

Cena 16 zł 99 gr (w tym 8% VAT)

Niestrawność  
czarnych dziur

Włączajmy do diety  
słonorośla

Jak chronić Ziemię  
przed uderzeniem  
planetoidy

## Czy Wszechświat może zniknąć?

Owszem – w wyniku  
rozpadu próżni

ŚWIAT NAUKI 8/2025



**KLIMAT**  
Kiedy Grenlandia  
była zielona  
i jak odbudowywać  
arktyczny lód

# OJCZYZNA DON KICHOTA



KUP TERAZ



W sprzedaży



148  
stron

Wydanie papierowe – w punktach sprzedaży prasy i na [sklep.polityka.pl](https://sklep.polityka.pl)

Wydanie cyfrowe – subskrypcja [polityka.pl/cyfrowa](https://polityka.pl/cyfrowa)

Wydanie audio – [sklep.polityka.pl](https://sklep.polityka.pl) i [polityka.pl/cyfrowa](https://polityka.pl/cyfrowa)

Podkast POLITYKA o historii – [polityka.pl/podkasty](https://polityka.pl/podkasty)

Na [sklep.polityka.pl](https://sklep.polityka.pl) znajdziesz ponad 60 tytułów z serii Pomocnik Historyczny



40

#### FIZYKA KWANTOWA

### 26 KWANTOWY BĄBEL, KTÓRY MOŻE ZNISZCZYĆ WSZECHŚWIAT

Dziwaczny proces fizyki cząstek elementarnych może zniszczyć wszystkie galaktyki i życie – choć jest to niezwykle mało prawdopodobne.

MATTHEW VON HIPPEL

#### ŚRODOWISKO

### 32 POLUBMY ROŚLINY SŁONOLUBNE

Zasolenie gleb na świecie postępuje. Halofity, które je tolerują, mogą stanowić pożywienie zarówno dla zwierząt, jak i ludzi.

RACHEL PARSONS

#### KLIMAT

### 40 SEKRETY GRENLANDII

Rozpad drugiej co do wielkości czaszy lodowej na świecie zatopiłby miasta na całym globie. Czy grenlandzki lód jest bardziej wrażliwy, niż nam się wydaje?

JEFFERY DELVISCIO

#### ASTRONOMIA

### 54 CZARNE DZIUR CIERPIĄ NA NIESTRAWNOŚĆ

Czarne dziury pochłaniające gwiazdy czasami zwracają swój „pokarm”.

YVETTE CENDES

#### KLIMAT

### 64 ARKTYKA DO PONOWNEGO ZMROŻENIA

Naukowcy próbują odbudować lód morski w Arktyce, aby odbijał w kosmos więcej promieniowana słonecznego.

ALEC LUHN

**6 WOKÓŁ NAUKI**

Edukacja w USA potrzebuje faktów,  
a nie ideologii

REDAKCJA „SCIENTIFIC AMERICAN”

**7 FORUM**

Chatboty i dystopijny koszmar

ASMELASH TEKA HADGU I TIMNIT GEBRU

**10 SKANER**

Czym zastąpić plastik? ♦ Badanie plemników  
bez mikroskopu ♦ Wystarczy etykieta ♦ Jak odrzeć  
z tajemnic liczby pierwsze ♦ Modele matematyczne  
robótek ♦ Co decyduje o wielkości nasion?

**17 SIŁA MYŚLI**

Siła opowieści

RON SHACHAR

**18 SZTUKA RODZICIELSTWA**

Język wpływa na zainteresowanie nauką

RYAN F. LEI

**19 Q&A**

Myślenie bez słów

GARY STIX

**22 ZDROWIE**

Gorączka letniej nocy

LYDIA DENWORTH

**23 METRUM**

Modlitwa do świetlików

GENEVIEVE PFEIFFER

**72 MATEMATKA**

Osobliwa historia diagramów Venna

JACK MURTAGH

**74 UMYSŁ GIĘTKI**

Od figur do mebli

MAREK PENSZKO

**78 FAKTOGRAF**

Zmiana planów?

ANDY REISINGER, ANGELA MORELLI,

TOM GABRIEL, JOHANSEN/INFODESIGNLAB

**OKŁADKA**



Mało kto poza fizykami słyszał o rozpadzie próżni, ale gdyby do niego doszło, byłaby to największa naturalna katastrofa. Jednak możliwość pojawienia się apokaliptycznej bańki kwantowej jest tak mało prawdopodobna, że nie powinna nas niepokoić.

ILUSTRACJA MONDOLITHIC STUDIOS

Polska wersja okładki Jolanta Kotas



6

Merini Gae



19

Mathe Müller



22

Jay Bend

# PRENUMERATA „ŚWIATA NAUKI”

ŚWIAT NAUKI  
**SCIENTIFIC  
AMERICAN**

## Prenumeruj **druk**



**KUP TERAZ**



Prenumerata roczna

**169 zł**

Prenumerata półroczna

**89 zł**

Polska edycja renomowanego amerykańskiego pisma „Scientific American” z bezpłatną dostawą do wybranego przez Ciebie InPost Paczkomat 24/7 lub pocztą wprost pod Twoje drzwi.

## Prenumeruj **druk i serwis Pulsar**



**KUP TERAZ**



Prenumerata roczna

**259 zł**

Prenumerata półroczna

**139 zł**

Oprócz wydania drukowanego otrzymujesz wydanie cyfrowe „Świata Nauki” i „Wiedzy i Życia” w ramach dostępu do codziennego serwisu naukowego Pulsar.

## Prenumeruj **w pakiecie z „Wiedzą i Życiem”**



**KUP TERAZ**



Prenumerata roczna

**259 zł**

Prenumerata półroczna

**139 zł**

Dwa pisma popularnonaukowe w klasycznej papierowej odświeżeniu. Co miesiąc 160 stron potężnej dawki wiedzy ze świata nauki.



**Darmowa dostawa**  
co miesiąc pod  
wskazany adres



**Gwarancja**  
stałej ceny

**MASZ  
PYTANIA?**



**+48 22 336 75 60**

(pon.-pt. w godz. 8:00-17:00)

**@ prenumerata@swiatnauki.pl**

**sklep.polityka.pl**

**Zapraszamy na wygodne zakupy!**

Dla siebie i bliskich. Kupuj dla szkoły, firmy, instytucji.

www.projektpulsar.pl

**Prenumerata**

www.sklep.polityka.pl/sn  
e-mail: prenumerata@swiatnauki.pl  
tel. 22 336 75 60

**Redaktor naczelny**

Elżbieta Wieteska  
e-mail: ewieteska@swiatnauki.pl  
tel. 605 435 405

**Kontakt z redakcją**

redakcja@swiatnauki.pl

**Korekta**

Mariola Będkowska

**Redakcja techniczna, skład i łamanie**

Jolanta Kotas  
e-mail: j.kotas@swiatnauki.pl

**Wydawca**

POLITYKA Sp. z o.o. SKA  
ul. Słupecka 6, 02-309 Warszawa  
tel. 22 451 61 33/34; faks 22 451 61 35  
www.polityka.pl; e-mail: polityka@polityka.pl

**Prezes zarządu**

Jerzy Baczyński

**Dyrektor wydawniczy**

Piotr Zmelonek  
tel. 22 451 61 33/34

**Dyrektor biura reklamy**

Izabela Kowalczyk-Dudek  
tel. 22 451 61 36  
e-mail: reklama@polityka.pl

**Dział Dystrybucji**

Marcin Paśnicki, kierownik  
e-mail: dystrybucja@polityka.pl

Druk **Quad**

Copyright © **POLITYKA** Sp. z o.o. SKA 2025

Wszelkie prawa zastrzeżone (łącznie z tłumaczeniem na języki obce). Żaden fragment niniejszego wydania nie może być wykorzystany w jakiegokolwiek formie – fotokopii, mikrofilmu czy innych reprodukcji – ani przekładany na język mechaniczny bez pisemnej zgody wydawcy. SCIENTIFIC AMERICAN jest zastrzeżoną nazwą handlową należącą do Scientific American, Inc. w Nowym Jorku i używaną przez firmę Polityka Sp. z o.o. SKA na podstawie umowy licencyjnej.

**SCIENTIFIC AMERICAN**

**Interim Editor In Chief** Jeanna Bryner

Copy Director **Maria-Christina Keller**

Creative Director **Michael Mrak**

Chief Features Editor **Seth Fletcher**

Chief News Editor **Dean Visser**

Chief Opinion Editor **Megha Satyanarayana**

**President** Kimberly Lau

Publisher and Vice President **Jeremy A. Abbate**

Vice President, Product and Technology **Dan Benjamin**

Vice President, Commercial **Andrew Douglas**

Vice President, Content Services **Stephen Pinock**

**Scientific American, 1 New York Plaza, Suite 4600,  
New York, NY 10004-1562**

## Drodzy Państwo,

fizycy kwantowi twierdzą, że nasz świat mógłby zniknąć – i to tak zupełnie. Nie pozostałby po tej kosmicznej katastrofie żaden pył czy gaz, z którego mogłoby ponownie coś powstać. Wprawdzie dla nas, ludzi, jest w zasadzie obojętne, czy zniknęłoby tylko życie, czy cały Wszechświat, jednak wizja takiej apokaliptycznej zagłady jest wyjątkowo przerażająca. Na szczęście prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska tzw. rozpadu próżni, które miałyby za ten kataklizm odpowiadać, jest bardzo, bardzo małe (s. 26).

Dużo bardziej realne są za to problemy będące wynikiem zmian klimatu. Jeden z nich to rozpad pokrywy lodowej Grenlandii. Gdyby całkowicie stopniała, poziom mórz podniósłby się o ponad 7 m. I choć niektórzy cieszą się, że znikanie lodu ułatwi eksploatację naturalnych bogactw wyspy, to zagrożenia przewyższają ewentualne korzyści. Dodatkowo niewiele wiemy o tym, kiedy Grenlandia była ostatnio zielona i w jakim tempie topnienie mogłoby zachodzić (s. 40).

Rozmraża się też Arktyka. Proces ten sam się napędza, bo odsłonięta ciekła woda pochłania więcej ciepła niż lodowa tafla. Rodzą się różne pomysły zapobiegania temu procesowi – jeden z nich to ponowne zmrażanie Arktyki. Czy mają sens i czy taka geoinżynieria jest bezpieczna? (s. 62)

Zmiany klimatu są również przyczyną postępującego zasolenia gleb. Większość roślin uprawnych go nie toleruje, są jednak takie, które na zasolonej ziemi mogą, a nawet „lubią” rosnąć. Te tzw. halofity nadają się i na paszę dla zwierząt, i na żywność dla ludzi. Zaslugują na upowszechnienie – pomogłyby zwiększyć bezpieczeństwo żywnościowe i pomóc zwalczać głód. W dodatku niektóre są bardzo smaczne (s. 32).

Czarne dziury są niewątpliwie jednym z najciekawszych obiektów we Wszechświecie i długo jeszcze będą stanowić źródło nowych odkryć. Ostatnio zaobserwowano, że „cierpią na niestrawność” – po pożarciu gwiazdy po pewnym czasie część jej materii zwracają (s. 54).

Miłej lektury,

Elżbieta Wieteska

Zapraszamy na nasz portal popularnonaukowy **pulsar** ([www.projektpulsar.pl](http://www.projektpulsar.pl)). Znajdą w nim Państwo



dużą porcję naukowych aktualności (w tym tłumaczenia tekstów ze strony internetowej „Scientific American”), pogłębionych artykułów, ciekawych rozmów z naukowcami, podcastów, a także bieżące i archiwalne wydania „Świata Nauki” oraz „Wiedzy i Życia”.

### TŁUMACZE, AUTORZY I KONSULTANCI BIEŻĄCEGO NUMERU

mgr Joanna Burek

Katedra Matematyki Stosowanej  
Politechnika Lubelska

dr Michał Czerny

dr n. med. Ewa Grabowska

Andrzej Holdys

mgr Marek Krośniak  
Biblioteka Jagiellońska

Marek Penszko

dr Marcin Ryszkiewicz

Za treść ogłoszeń redakcja ponosi odpowiedzialność w granicach wskazanych w ust. 2 art. 42 ustawy Prawo prasowe.

Informujemy, że przesłanie listu do redakcji jest równoznaczne z udzieleniem zgody na jego publikację w czasopiśmie wraz z podaniem imienia i nazwiska jego autora, chyba że autor zastrzegł wyraźnie anonimową publikację.

Sprzedż aktualnych i archiwalnych numerów czasopisma po cenie innej niż wydrukowana na okładce jest działaniem na szkodę wydawcy i skutkuje odpowiedzialnością sądową.

# Iluzje paranauk – o „jasnowidzeniu” w procesie karnym

**Czy metody paranaukowe mogą dostarczać dowodów, które da się wykorzystać podczas procesu karnego? M.in. na to pytanie odpowiedzi poszukiwali prof. Paweł Waszkiewicz i dr Piotr Lewulis z Wydziału Prawa i Administracji Uniwersytetu Warszawskiego.**

**T**ajemnicza zbrodnia, skomplikowane śledztwo, brak rozstrzygających dowodów na winę oskarżonego/oskarżonej. I wtedy wchodzi on. Cichym głosem opowiada zgromadzonym (funkcjonariuszom, przedstawicielom wymiaru sprawiedliwości itd.), jaki rzeczywiście był przebieg zdarzeń, które doprowadziły do zbrodni. Skąd to wszystko wie? Ponieważ jest... jasnowidzem. Sprawa zostaje rozwiązana, winny ukarany.

Czy taka „hollywoodzka” sytuacja – w świetle polskiego prawa – jest możliwa? Ostatecznie jasnowidzenie w XXI w. ma się całkiem dobrze, o czym zaświadczyły liczne publikacje w wysokonakładowej prasie. Udział jasnowidzów (lub innych form parapsychologii) w postępowaniu karnym bywał niekiedy odnotowywany, również za aprobatą pojedynczych przedstawicieli środowiska prawniczego. Są to jednak przypadki incydentalne, szeroko krytykowane i – jak podkreślają badacze Uniwersytetu Warszawskiego – niezgodne z zasadami procesu karnego.

## Jak jest/jak być powinno?

Jakie argumenty mogłyby bowiem przemawiać za dopuszczeniem udziału „jasnowidza” w procesie karnym? Kluczowe byłoby założenie, że parapsychologii nie można „z góry” wykluczyć z narzędzi śledczych i dowodowych, ponieważ nie nakazuje tego ustawa. Dotychczas nie wypracowano przy tym jednolitych stanowisk dotyczących wykorzystania narzędzi paranaukowych w procesie karnym. Wreszcie – w przeszłości zwracano się już o pomoc do „jasnowidzów”. Czy takie argumenty są przekonujące?

Badacze z Uniwersytetu Warszawskiego nie mają wątpliwości, że nie: – *Parapsychologia i „jasnowidzenie” są niedopuszczalnymi metodami dowodowymi w procesie karnym, a „jasnowidz” nie może zostać formalnie powołany do roli biegłego. Źródłem tej niedopuszczalności jest zaś nie tyle brak naukowego potwierdzenia skuteczności tych metod, ile ich naukowo potwierdzona nieskuteczność.* Prof. Waszkiewicz i dr Lewulis podkreślają, że podjęte niegdyś decyzje o wykorzystaniu parapsychologii w śledztwie nie mogą stanowić racji za akceptowaniem tej praktyki oraz jej kontynuowaniem.

– *Organom wymiaru sprawiedliwości zdarza się działać nieprawidłowo, a nawet nielegalnie. Fakt ten bywa dla niektórych szokujący, jednak tak naprawdę jest to sytuacja stosunkowo przewidywalna. Rzeczywistość postępowań karnych jest bardzo złożona, a funkcjonariusze i pracownicy instytucji wymiaru sprawiedliwości mogą popełniać błędy – stwierdzają naukowcy. – Punktem wyjścia powinno być*

*ustalenie, jaka jest rzeczywista wartość samego „jasnowidzenia” w praktyce, podkreślają.*

## (Dez)iluzje iluzji

Najważniejsze badania w tej sprawie przeprowadzono w USA, w II połowie XX wieku. W pierwszym z nich udział wzięło kilkunastu „jasnowidzów”, których zadaniem było odpowiedzieć na pytania znajdujące się w zapieczętowanych kopertach. Wyniki nie były zbyt imponujące. Na 21 pytań średnia trafnych odpowiedzi wynosiła... 4 (w drugiej „rundzie: 31 pytań, średnio 1,9 trafień, głównie w kwestiach dotyczących np. płci pokrzywdzonych i sprawców). Późniejsze, udoskonalone metodologicznie próby nie przyniosły zasadniczo innych rezultatów.

Czy jednak „sztuczność” takich badań nie zaburza ewentualnego „daru” jasnowidzów? Sprawę zbadano na rzeczywistych przypadkach. Dwie takie analizy zostały przeprowadzone np. w Holandii po głównych medialnie uprowadzeniach. I znów z podobnymi rezultatami. Warto też dodać, że według raportu Biura Koordynacji Służby Kryminalnej Komendy Głównej przy śledztwach w sprawie zaginięć (1994-1999) wykorzystano informacje od „jasnowidzów” w 440 przypadkach. Liczba względnie pomocnych wskazówek to... 14.

Przeciwko udziałowi jasnowidzów w procesach przemawiają też względy formalne: jasnowidzenie nie należy bowiem do katalogu wiadomości specjalnych (o których obowiązkowo „zasięga się” opinii) według art. 193 § 1 k.p.k. ocenianego w świetle art. 7 k.p.k. – *Jasnowidzenie to metoda niespełniająca kryteriów stawianych dowodom w postępowaniu karnym. Podobnie będzie też w przypadku innych metod, których nieskuteczność została naukowo udowodniona, stwierdzają prof. Waszkiewicz i dr Lewulis. – O ile oglądanie przebiegu „wizji jasnowidza” w konkretnej sprawie może dla niektórych odbiorców ograniczać się do swoistej egotyki postępowania karnego, to potencjalne efekty oparcia działań o taki fundament są zdecydowanie pozbawione elementów komicznych. Zwłaszcza dla osób pośrednio i bezpośrednio nimi dotkniętych – ostrzegają badacze UW.*



Fot. Pexels

Artykuł ten jest częścią cyklu poświęconego wynikom badań realizowanych przez naukowców Uniwersytetu Warszawskiego.





## Edukacja w USA potrzebuje faktów, a nie ideologii

Sto lat po procesie Johna Scopesa ideolodzy religijni nadal próbują zastąpić oparte na dowodach programy nauczania mitami, ze szkodą dla poziomu wykształcenia społeczeństwa

**W**LIPCU 1925 ROKU setki reporterów i gapiów tłoczyły się w dusznej sali sądowej w Dayton w stanie Tennessee, aby obserwować proces, który szybko zyskał miano procesu stulecia. Na tle społecznych niepokojów związanych z przemianami kulturowymi „małpi proces” Scopesa, jak ochrzciła go prasa, stał się starciem autorytetu Biblii z dowodami naukowymi na rzecz ewolucji. W centrum uwagi znalazł się John Scopes, 24-letni nauczyciel oskarżony o nauczanie teorii ewolucji człowieka w szkole publicznej, co stanowiło naruszenie motywowanego religijnie prawa stanowego.

Opinie na temat tego, który wygrał sprawę, różnią się w zależności od tego, kogo o to zapytać. Technicznie rzecz biorąc, obrona przegrała – ława przysięgłych uznała Scopesa za winnego złamania prawa, a sędzia nakazał mu zapłacić grzywnę w wysokości 100 dolarów (wyrok ten został później uchylony z przyczyn formalnych). Niemniej argumenty adwokata Clarence’a Darrowa zwróciły uwagę opinii publicznej na dowody potwierdzające

ewolucję oraz zagrożenie, jakie dogmaty religijne stanowią dla edukacji, wolności akademickiej i wolności jednostki. Mimo to przez następne kilkadziesiąt lat tematyka ewolucji w podręcznikach do szkoły średniej była omawiana szczerze, a w wielu przypadkach pomijana całkowicie.

Sto lat po tym słynnym procesie edukacja w USA nadal jest atakowana przez te same antynaukowe czynniki polityczne, które nieustannie wykorzystują sądy stanowe i federalne do podważania roli krytycznego myślenia, docieklowości i ciekawości w szkołach na rzecz nauczania treści religijnych. Ci, którzy doceniają wartość edukacji publicznej, muszą podwoić wysiłki, by się tym siłom skutecznie przeciwstawić.

W teorii nauczanie religii w szkołach publicznych nie powinno być w ogóle przedmiotem debaty. Rozdział kościoła od państwa jest jednym z filarów amerykańskiej demokracji. Klauzula ustanawiająca ten rozdział, zawarta w Pierwszej Poprawce do Konstytucji Stanów

Zjednoczonych, zabrania rządowi faworyzowania któregośkolwiek z wyznań religijnych i od dawna interpretowana jest przez sądy jako zakaz narzucania konkretnej religii w instytucjach finansowanych ze środków publicznych, w tym w szkołach. A jednak w zeszłym roku w Zachodniej Wirginii uchwalono ustawę, która według jej zwolenników pozwala nauczycielom szkół publicznych omawiać pojęcia oparte na wierze religijnej, takie jak inteligentny projekt (będący innym określeniem kreacjonizmu, konserwatywnej chrześcijańskiej idei, jakoby Bóg stworzył wszystkie gatunki w ich obecnej formie, a ludzie nie wyewoluowali z innych gatunków), jako teorie naukowe. Tennessee, Luizjana i Missisipi uchwały podobne ustawy.

Niektóre z podjętych ostatnio prób wprowadzenia religijnych koncepcji dotyczących pochodzenia życia do programów nauczania przedmiotów przyrodniczych w szkołach publicznych zakończyły się niepowodzeniem. W lutym tego roku projekt ustawy nr 2355 Senatu Dakoty Północnej, która nakładałaby na kuratora oświaty stanu obowiązek włączenia inteligentnego projektu do stanowych programów nauczania przedmiotów przyrodniczych, przepadł w głosowaniu senackim. W kwietniu projekt ustawy w Minnesocie, który wymagałby od okręgów szkolnych stanu przekazywania uczniom wiedzy o „Stwórcy”, został odrzucony na szczeblu komisji.

Nie powinniśmy jednak być zbyt optymistyczni, co do tych wyników, ponieważ inne działania mające na celu osłabienie podziału między kościołem a państwem okazały się niepokojąco skuteczne. W kwietniu gubernator stanu Arkansas Sarah Huckabee Sanders podpisała ustawę nakazującą umieszczenie w salach lekcyjnych plakatu z dziesięcioma przykazaniami i napisem „In God We Trust” (W Bogu pokładamy ufność). Podobna ustawa została uchwalona w zeszłym roku w Luizjanie, lecz została później zablokowana przez sędziego federalnego, który uznał ją za „jawnie religijną” i „niezgodną z konstytucją”. W momencie publikacji tego artykułu w organach legislacyjnych Teksasu trwały prace nad ustawą nakładającą na szkoły publiczne obowiązek prezentowania w widocznym miejscu dziesięciu przykazań, jak również nad ustawą zezwalającą na modlitwę i czytanie Biblii w szkołach publicznych.

Nie chodzi tylko o plakaty i modlitwy. Sąd Najwyższy Stanów Zjednoczonych

rozpatruje sprawę dotyczącą tego, czy pieniądze z podatków mogą być wykorzystywane do finansowania szkół religijnych, a niektórzy sędziowie wykorzystują tę sprawę do propagowania idei, że rozdział kościoła od państwa jest rzeczą niedopuszczalną. Kościół katolicki zwraca się do stanu Oklahoma o uznanie katolickiej szkoły wirtualnej św. Izydora z Sewilli za szkołę religijną typu charter, czyli finansowaną ze środków publicznych. Pisząc o tej sprawie w artykule w „New Yorkerze”, Ruth Marcus zauważyła, że w szkole św. Izydora „podstawowy program nauczania przedmiotów przyrodniczych w liceum miałby na celu »ukazywanie celowego stworzenia świata przez Boga«, a fizjologia miałaby opierać się na »podejściu religijnym do wartości życia ludzkiego od momentu powstania pierwszej komórki«. Szkoła przyjmowałaby wszystkich chętnych, niezależnie od wyznania, lecz uczniowie mieliby obowiązek uczestniczenia we mszy”. Jeśli szkoła św. Izydora wygra sprawę, podatnicy będą zmuszeni do subsydiowania edukacji religijnej uczniów, która może nie być zgodna z ich przekonaniami, a fundusze zostaną przekierowane z integracyjnych szkół świeckich do szkół wyznaniowych, które dyskryminują osoby niepodzielające ich wiary.

Inna klauzula Pierwszej Poprawki, tzw. klauzula swobody wyznania, chroni prawo do praktykowania religii (lub niepraktykowania) bez ingerencji rządu. Wiele nowych prób wprowadzenia religii do szkół publicznych usiłuje się prezentować jako działania zmierzające do tego celu, argumentując, że wykluczenie nauczania religii z finansowania publicznego jest równoważne z dyskryminacją. Nie wolno nam dać się nabrać na ten argument. Dzieci chodzą do szkoły, aby zdobywać wiedzę. Owszem, muszą uczyć się faktów i liczb, ale być może ważniejsze jest, aby posiadły umiejętność oceniania dowodów i argumentów, zamiast bezkrytycznej akceptacji nauczania któregośkolwiek z wyznań.

Wolność religijna wymaga niedopuszczenia do szkół publicznych wszelkich przekonań religijnych, niezależnie od tego, czy są one zamaskowane jako alternatywne teorie naukowe, czy też stanowią nachalną ewangelizację. Musimy chronić prawo każdego dziecka do edukacji publicznej, wolnej od indoktrynacji religijnej, która przygotowuje je do radzenia sobie z wyzwaniem rzeczywistego świata, tak jak przedstawia je współczesna nauka. ■

# Chatboty i dystopijny koszmar

Administracja Trumpa postrzega federalną siłę roboczą napędzaną przez sztuczną inteligencję jako efektywniejszą. W rzeczywistości jednak chatboty nieradzące sobie z kluczowymi zadaniami doprowadziłyby do chaosu  
ASMEŁASH TEKA HADGU I TIMNIT GEBRU

**W**YOBRAŹ SOBIE, że dzwonisz do amerykańskiego Urzędu Ubezpieczeń Społecznych i pytasz: „Gdzie jest moja wypłata za lipiec?”, a chatbot odpowiada: „Anulowano wszystkie przyszłe wypłaty”. Twój przelew właśnie padł ofiarą „halucynacji” — zjawiska, w którym system automatycznego rozpoznawania mowy generuje tekst mający niewiele wspólnego z tym, co rzeczywiście zostało powiedziane.

Halucynacje to tylko jeden z wielu problemów nękających tzw. generatywne systemy sztucznej inteligencji, takie jak ChatGPT od OpenAI, Grok od xAI, Claude od Anthropic czy Llama od firmy Meta. Problemy te wynikają z błędów projektowych w architekturze tych systemów, które czynią je zawodnymi. Mimo to właśnie tego typu narzędzia generatywnej SI administracja Trumpa oraz jej Departament Efektywności Rządu (Department of Government Efficiency, DOGE) chcą wykorzystywać, by — jak powiedział jeden z urzędników — „zastąpić ludzką siłę roboczą maszynami”.

Ta propozycja jest przerażająca. Nie istnieje żaden „cudowny sposób” na usunięcie ekspertów i zastąpienie ich maszynami, które rzekomo potrafią wszystko robić lepiej niż ludzie. Perspektywa zastąpienia pracowników federalnych — osób odpowiedzialnych za kluczowe zadania, od których mogą zależeć życie i zdrowie setek milionów ludzi — przez systemy automatyczne, które nie są w stanie nawet poprawnie przekształcić mowy na tekst, to katastrofa. Skoro te systemy nie potrafią nawet wiarygodnie powtórzyć informacji, które im podano, to wyniki ich działania będą pełne błędów, prowadząc do niewłaściwych, a nawet

niebezpiecznych działań. Systemom automatycznym nie można powierzyć podejmowania decyzji tak, jak prawdziwym ludziom — pracownikom federalnym.

W przeszłości halucynacje nie stanowiły poważnego problemu w systemach rozpoznawania mowy. Starsze systemy popełniały błędy w transkrypcji konkretnych słów lub fraz, mogły coś przekręcić lub źle zapisać, ale nie tworzyły całych spójnych i poprawnych gramatycznie zdań, których nie było w oryginalnym nagraniu.

Tymczasem analizy wykazują, że nowsze systemy rozpoznawania mowy, takie jak Whisper od OpenAI, mogą generować całkowicie zmyślane transkrypcje. Whisper to model, który został zintegrowany z niektórymi wersjami ChatGPT, słynnego chatbota OpenAI. Naukowcy z czterech uniwersytetów przeanalizowali fragmenty dźwięków transkrybowanych przez Whisper i odkryli całkowicie wymyślone zdania. W niektórych przypadkach AI dopisywała rasę osób, o których była mowa, a w innych nawet przypisywała im morderstwa. W jednym nagraniu ktoś mówił: „On, chłopiec, miał zamiar, nie jestem pewien dokładnie, wziąć parasolkę”, a transkrypcja zawierała dodatkowe treści, w tym: „Zabrał dużą część krzyża, maleńką część... Jestem pewien, że nie miał noża do terroru, więc zabił wiele osób.” W innym przykładzie wyrażenie „dwie inne dziewczyny i jedna kobieta” zostało zapisane jako „dwie inne dziewczyny i jedna kobieta, hmmm, które były czarnoskóre.”

W erze nieokiełznanego szumu medialnego, gdy przedsiębiorca Elon Musk twierdzi, że stworzył „najintensywniej poszukującą prawdy sztuczną inteligencję”, jak to się stało, że mamy dziś bardziej zawodne

## Asmelash Teka Hadgu

jest współzałożycielem i dyrektorem ds. technologii w Lesan AI oraz stipendystą w Distributed AI Research Institute (DAIR). Specjalizuje się w tworzeniu zaawansowanych systemów rozpoznawania mowy i tłumaczenia maszynowego dla języków niedostatecznie reprezentowanych.

## Timnit Gebru

jest założycielką i dyrektorką wykonawczą DAIR oraz autorką mającej się wkrótce ukazać książki *The View from Somewhere* (One Signal Publishers), w której wspomina swoją karierę i opowiada się za rozwojem techniki prospołecznej, a nie takiej, która służy wyłącznie przemysłowi i rządowi.

systemy rozpoznawania mowy niż kiedyś? Odpowiedź brzmi: choć naukowcy pracują nad ulepszeniem tych systemów, wykorzystując wiedzę kontekstową do tworzenia modeli dopasowanych do konkretnych zadań, firmy takie, jak OpenAI czy xAI, twierdzą, że budują coś na kształt „jednego modelu do wszystkiego” – systemu zdolnego do wykonywania wielu zadań, w tym, według OpenAI, „rozwiązywania złożonych problemów w nauce, programowaniu, matematyce i dziedzinach pokrewnych”.

Firmy te używają architektur modeli, które – ich zdaniem – mogą sprawdzić się w różnych zastosowaniach, i trenują je na ogromnych ilościach chaotycznych, nieselekcjonowanych danych. Nie stosują natomiast architektur, metod treningu ani zestawów testowych dopasowanych do konkretnego zadania. Narzędzie, które ma rzekomo robić wszystko, w rzeczywistości nie będzie robić niczego dobrze.

Dominująca obecnie metoda budowania narzędzi takich, jak ChatGPT czy Grok – reklamowanych jako „modele do wszystkiego” – opiera się na dużych modelach językowych (large language models, LLM), które uczą się przewidywać najbardziej prawdopodobne sekwencje słów. Whisper jednocześnie przekształca mowę na tekst i przewiduje, co powinno się pojawić dalej – generując tzw. token, czyli podstawową jednostkę tekstu (np. słowo, liczbę, znak interpunkcyjny lub fragment wyrazu), która służy do analizy danych tekstowych. To połączenie dwóch zupełnie różnych zadań

## Nie możemy sobie pozwolić na zastępowanie kluczowych zadań pracowników państwowych modelami, które po prostu zmyślają informacje.

– transkrypcji mowy i przewidywania kolejnych tokenów – w połączeniu z ogromnymi, nieuporządkowanymi zbiorami danych używanymi podczas treningu, znacząco zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia halucynacji.

Jak wiele projektów OpenAI, rozwój Whispera był oparty na koncepcji, którą dobrze określił były główny naukowiec firmy: „jeśli masz duży zbiór danych i wytrenujesz bardzo dużą sieć neuronową, to będzie działać lepiej”. Można jednak argumentować, że Whisper nie działa lepiej. Ponieważ jego dekodery odpowiada zarówno za transkrypcję, jak i przewidywanie kolejnych tokenów, a model nie był trenowany z precyzyjnym dopasowaniem pomiędzy dźwiękiem a tekstem, może on priorytetowo traktować tworzenie płynnego tekstu kosztem wiernego odwzorowania treści audio. W przeciwieństwie do literówek czy drobnych błędów, spójny tekst nie daje użytkownikowi żadnych sygnałów ostrzegawczych, że transkrypcja może być niedokładna, co może prowadzić do ślepego zaufania do wyników SI w sytuacjach wysokiego ryzyka – i w rezultacie do różnych nieodwracalnych skutków.

Badacze z OpenAI twierdzą, że Whisper zbliża się do „dokładności i niezawodności człowieka” – ale to twierdzenie jest niewątpliwie fałszywe. Większość ludzi nie transkrybuje mowy, wymyślając całe fragmenty tekstu, których nigdy nie usłyszeli. W przeszłości osoby pracujące nad automatycznym rozpoznawaniem mowy trenowały swoje systemy na starannie dobranych danych – parach dźwięk-tekst, w których tekst wiernie odzwierciedlał mowę. Tymczasem OpenAI postawiło na „uniwersalną” architekturę modelu zamiast takiej, która byłaby dostosowana do transkrypcji mowy – omijając tym samym czasochłonne i kosztowne procesy selekcji danych oraz uczciwego wynagradzania pracowników i twórców danych. Efekt to system rozpoznawania mowy, który jest niebezpiecznie zawodny.

Jeśli obecny paradygmat „jednego modelu do wszystkiego” zawodzi przy tak podstawowym zadaniu jak transkrypcja mowy w języku angielskim – które większość anglojęzycznych osób potrafi wykonać bez żadnego dodatkowego przeszkolenia – to jak sobie poradzimy, jeśli DOGE realizuje swój plan zastąpienia wykwalifikowanych pracowników federalnych generatywną SI? W przeciwieństwie do generatywnych systemów SI, które mają pomagać pracownikom federalnym w tworzeniu materiałów, punktów do przemówień czy pisaniu kodu, automatyczne systemy rozpoznawania mowy działają w znacznie bardziej jednoznacznym kontekście – przekształcania mowy w tekst.

Nie możemy sobie pozwolić na zastępowanie kluczowych zadań pracowników państwowych modelami, które po prostu zmyślają informacje. Nie istnieje żaden zamiennik ich wiedzy i doświadczenia w obsłudze informacji wrażliwych i pracy w krytycznych sektorach – od opieki zdrowotnej po imigrację. Musimy jak najszybciej sprzeciwić się – również na drodze sądowej, jeśli będzie to konieczne – działaniom DOGE zmierzającym do „zastąpienia ludzkiej siły roboczej maszynami”, zanim doprowadzą one do poważnych szkód. ■



# ..... POSZERZAMY HORYZONTY .....



**Sierpniowy numer już w punktach sprzedaży prasy**

**KUP TERAZ**



Od bieżącego wydania  
możecie kupić  
nasz miesięcznik  
także we wszystkich  
sklepach sieci Lidl.

Prenumerata cyfrowa:  
[projektpulsar.pl](http://projektpulsar.pl)



Prenumerata papierowa:  
[sklep.polityka.pl/wiz](http://sklep.polityka.pl/wiz)



Prenumerata także z bezpłatną  
dostawą do wybranego przez Ciebie

**InPost Paczkomat 24/7**

# SKANER

MATERIAŁOZNAWSTWO

## Atak śluzem

Niezwykła śluzowa wydzielina pewnych bezkręgowców może stanowić klucz do opracowania nowej kategorii tworzyw sztucznych

**PAZURNICA** (Onychophora), drapieźnik o miękkim, rozciągliwym ciele przypominający wydłużoną gąsienicę, ma dość osobliwe metody działania: zabija ofiary czymś podobnym do Silly String [coś w rodzaju serpentyny w sprayu – przyp. red.]. Pazurnice polują nocą w ściółce leśnej lasów stref umiarkowanej i tropikalnej, poruszając się na dziesiątkach krótkich nóżek. Ten niewielki drapieźnik – którego przedstawiciele mogą mierzyć od niecałego centymetra do ponad 20 cm długości – jest niemal ślepy, więc porusza się po omacku, licząc, że wpadnie na jadalnego owada, na przykład świerszcza czy stonogę. Gdy już natrafi na ofiarę, z „dysz” po obu stronach głowy wyrzuca lepką maź.

„Dzieje się to tak szybko, że wygląda niemal jak kichnięcie” – mówi Matthew Harrington, biochemik z McGill University, który od dekady bada pazurnice. Początkowo śluz jest wodnisty, ale w powietrzu zamienia się w śluzowate włókna, które oplatają zdobycz i przytwierdzają ją do podłoża. Gdy ofiara się szamocze, śluz przekształca się w włóknistą sieć, a następnie w ciągu kilku sekund twardnieje do postaci przypominającej szkło.

Właściwości tej klejącej wydzieliny fascynują naukowców od ponad 100 lat. (W latach 70. XIX wieku badacze próbowali ustalić, co odpowiada za lepkość cieczy, próbując... jej smaku. Werdykt: gorzka.) Najnowsze odkrycia Harringtona i jego zespołu, opublikowane w „Proceedings of the National Academy of Sciences USA”, wskazują, że ta zmieniająca stan skupienia substancja może być inspiracją do opracowania nowej generacji bioplastików nadających się do recyklingu.

Wcześniejsze eksperymenty wykazały, że po namoczeniu stwardniałe włókna wracają do stanu ciekłego – a po roztarciu tej mazi w palcach można z niej ponownie uformować włókna tak wytrzymałe, jak nylon. „To oznacza, że wszystkie informacje potrzebne do wytworzenia tych włókien są zapisane w samych białkach” – mówi Harrington.

Ale wyizolowanie tych białek okazało się trudniejsze, niż sądzono. Śluz jest tak wrażliwy na dotyk, że nawet podstawowe techniki laboratoryjne, jak pipetowanie, potrafią aktywować jego przemianę. Aby tego uniknąć, badacze zsekwenjonowali RNA kodujące białka ze śluzu pazurnic z Barbadosu, Singapuru i Australii. Następnie dane te wprowadzili do AlphaFold3 – programu wykorzystującego sztuczną inteligencję do przewidywania struktur białek. Dla wszystkich trzech gatunków program „wypluł



DONIESIENIA Z LABORATORIÓW



Pazurnice, jak ta na zdjęciu,  
wyrzeliwiają w kierunku ofiary  
lepką ciecz o intrygujących  
właściwościach.

NICKY BAY

ten sam kształt podkowy”, bogaty w aminokwas leucynę, mówi Harrington.

Choć ta struktura to nowość dla naukowców zajmujących się materiałami, ewolucyjnie to stary znajomy. Podobne białko, tzw. receptor toll-podobny, jest elementem starego ewolucyjnie układu odpornościowego spotykanego u roślin, bezkręgowców i kręgowców. Receptory te znajdują się na powierzchni komórek odpornościowych i silnie, ale odwracalnie, wiążą fragmenty patogenów. Harrington i jego zespół sugerują, że białko o kształcie podkowy może działać podobnie, „chwytając” inne białka w śluzie i tworząc z nimi silne, ale odwracalne wiązania, które odpowiadają za tworzenie wytrzymałych włókien. To magiczne słowa dla naukowców zajmujących się poszukiwaniem materiałów, którymi można by zastąpić tworzywa sztuczne – takich, jakie dałoby się łatwo rozkładać i formować na nowo.

To ważne odkrycie, komentuje Yendry Corrales Ureña, badaczka z Laboratorium Nacional de Nanotecnología w Kostaryce, która również bada śluz pazurnic, ale nie była zaangażowana w to konkretne badanie. Zastrzega jednak, że wspomniane białka nie tłumaczą wszystkich właściwości śluzu, takich jak jego wytrzymałość czy elastyczność. „To tylko element większej układanki.”

Julian Monge Najera, ekolog z Universidad de Costa Rica zajmujący się ewolucją bezkręgowców, podkreśla, że fakt znalezienia tego samego białka u trzech gatunków pazurnic z różnych kontynentów świadczy o ich ogromnym ewolucyjnym stażu. Te chemiczne „patenty” musiały powstać bardzo dawno temu.

Zresztą zapis kopalny pokazuje, że pazurnice istnieją w niemal niezmięnionej formie od co najmniej 300 mln lat – żyły już z dinozaurami i zanim uformowały się współczesne kontynenty. „Gdybym mógł przenieść się w czasie, to pazurnice, które złapałbym tuż po kambrze, wyglądałyby identycznie, jak te żyjące dziś w mglistych lasach Kostaryki – mówi Monge Najera – łącznie z ich zmiennofazowym śluzem”.

Harrington i jego zespół pracują obecnie nad oczyszczeniem białka w kształcie podkowy i potwierdzeniem jego struktury za pomocą mikroskopii elektronowej. „Nie będziemy doić pazurnic, by ich wydzielina zastąpić plastik – mówi Harrington. – Ale mamy nadzieję nauczyć się od nich chemicznych sztuczek.”

*Elizabeth Anne Brown*

## ZDROWIE

# Fizyka płodności

## Domowy test jakości nasienia

**LUZKIE PLEMNIKI** muszą intensywnie się poruszać, aby dotrzeć do komórki jajowej. Ich ruchliwość stanowi klucz do nowego sprytnego badania oceniającego płodność. Nowa technika, szczegółowo opisana w „Advanced Materials Interfaces”, opiera się na prostej zależności fizycznej. W przyszłości może pomóc rozwiązywać niektóre problemy dotyczące płodności w zaciszu własnych domów.

„Aż 50% rodzin mierzy się z dużym wyzwaniem, jeśli chodzi o płodność – mówi Sushanta Mitra, inżynier mechaniki z University of Waterloo i jeden z autorów tego badania. – Naszym celem jest zwiększenie dostępności testów.”

Współczesne laboratoryjne testy do oceny męskiej płodności obejmują badanie próbki nasienia pod mikroskopem. Eksperci sprawdzają żywotność komórek nasienia, którą uważa się za dobry miernik płodności, ponieważ gamety muszą przepłynąć z dużą prędkością dystans przekraczający ponad 1000-krotnie ich własną długość, aby dotrzeć do komórki jajowej. Jednak badania laboratoryjne mogą być kosztowne i czasochłonne. Z kolei testy do użytku domowego są zwykle mniej dokładne, ponieważ często opierają się jedynie na wykrywaniu w spermie obecności określonych białek, nie oceniają natomiast ruchów komórek.

W opisaney ostatnio metodzie wykorzystuje się podstawy fizyki do pomiaru aktywności plemników bez wykorzystywania kosztownej aparatury. Naukowcy umieszczali kropelki nasienia

na elastycznym plastikowym pasku, zawieszonym obok wodoodpornej powierzchni. Następnie przybliżali tę powierzchnię do kropelki do momentu kontaktu i ponownie ją oddalali. Mierzili siłę, z jaką poszczególne kropelki nasienia przysysały się za pomocą słabych wiązań wodorowych do odsuwanej powierzchni. Kiedy w obrębie płynu poruszało się wiele bardzo aktywnych plemników, wiązania wodorowe pękały szybciej, co zaburzało adhezję powierzchniową kropelki i powodowało jej szybsze oderwanie. Im bardziej żywotne nasienie, tym mniej lepka jest jego kropka. „To ekscytujące, że można oceniać ilościowo ruchomość plemników w warunkach domowych” – mówi Tony Chen, urolog ze Stanford University, który nie brał udziału w tym badaniu.

Mitra i jego współpracownicy mają nadzieję opracować na podstawie tej metody tańszy, prostszy i dokładniejszy test do domowej oceny płodności. „Temat męskiej płodności jest mocno stygmatyzujący” – mówi Mitra. Prostsze testy zapewniające prywatność mogą zachęcić ludzi do częstszego badania nasienia i sprawdzania efektów zmian stylu życia podejmowanych w celu pobudzenia ospałych plemników, na przykład rzucenia palenia czy większej aktywności fizycznej. Takie badania mogą być także potencjalnie przydatne w rozmnazaniu zwierząt hodowlanych.

Kolejnym krokiem, jaki planują naukowcy, będzie standaryzacja tych testów i określenie wartości porównawczych dla różnych typów nasienia, m.in. dla ludzi i dla bydła. Chen uważa, że będą również konieczne badania porównujące kropelki pozyskane od wielu różnych pacjentów dla weryfikacji skuteczności testu w przypadku próbek o różnym wartościach pH, liczebności białych krwinek i stężeniu fruktozy. „Nasienie to nie tylko plemniki” – mówi.

*Joanna Thompson*



# Obowiązek ostrzegania

Konieczność oznaczania na etykietach niebezpiecznych związków chemicznych skłania producentów do zmian składu środków czystości

**WYMÓG ETYKIET** ostrzegawczych na produktach zawierających potencjalnie toksyczne składniki może przyczynić się do tego, że ostrożni konsumenci nie sięgną po te produkty. Najnowsze badanie dowodzi jednak, że takie przepisy mogą również przynosić efekty na długo przed tym, zanim takie produkty trafią na półki sklepowe. Mogą nawet chronić mieszkańców obszarów, na których te przepisy nie obowiązują.

Zgodnie z jedną z najistotniejszych amerykańskich regulacji prawnych tego typu – obowiązującym w Kalifornii aktem prawnym Proposition 65 – firmy muszą umieszczać odpowiednie ostrzeżenie, jeśli ekspozycja na związek chemiczny przekracza standardy bezpieczeństwa. W ramach badania, którego wyniki opublikowano w „Environmental Science & Technology”, naukowcy przeprowadzili wywiady z przedstawicielami wiodących firm. Stwierdzili, że prawo obowiązujące w Kalifornii doprowadziło do zmiany składu produktów wielu marek, w tym do zmniejszenia zawartości oznaczanych składników albo całkowitej z nich rezygnacji.

Wywiady prowadzono z przedstawicielami kilkudziesięciu branż przemysłu, takich jak środki czystości, elektronika czy produkty do domu. Objęto nimi marki o największych obrotach, a także wiodące marki wytwarzające ekologiczne środki czystości – mówi główna autorka badania Jennifer Ohayon, zajmująca się badaniami naukowymi dla organizacji non profit Silent Spring Institute.

Ohayon i jej współpracownicy stwierdzili, że firmy często rezygnowały z używania składników wymagających ostrzeżenia na rzecz innych związków. Jedną z przyczyn była chęć uniknięcia potencjalnych pozwów. Michael Freund jest prawnikiem. Od dziesięcioleci reprezentuje grupy działające na rzecz zaprzestania emisji toksycznych związków chemicznych. Jego zdaniem korzyści wynikające z regulacji obowiązujących w Kalifornii mogą pomóc w domknięciu kluczowej luki.

Chociaż regulacje z 1986 roku obowiązują wyłącznie w Kalifornii, wyniki badania wskazują, że ich skutki sięgają poza granice stanu, ponieważ firmy zmieniają swoich produktów na poziomie całego kraju. Inne badanie, którego wyniki opublikował w ub.r. Silent Spring Institute, dostarcza danych potwierdzających tę tezę. W badaniu tym oceniano poziom 37 związków chemicznych w próbkach krwi i moczu mieszkańców kilku stanów USA, w tym Kalifornii. Spośród tych związków 26 zostało uwzględnionych w ustawie Prop 65. Dla 11 związków z tej grupy dostępne były próbki sprzed wprowadzenia regulacji prawnych i późniejsze, co umożliwiło porównanie ich poziomów. Poziom większości związków chemicznych w organizmach ludzkich po ich umieszczeniu w wykazie spadł.

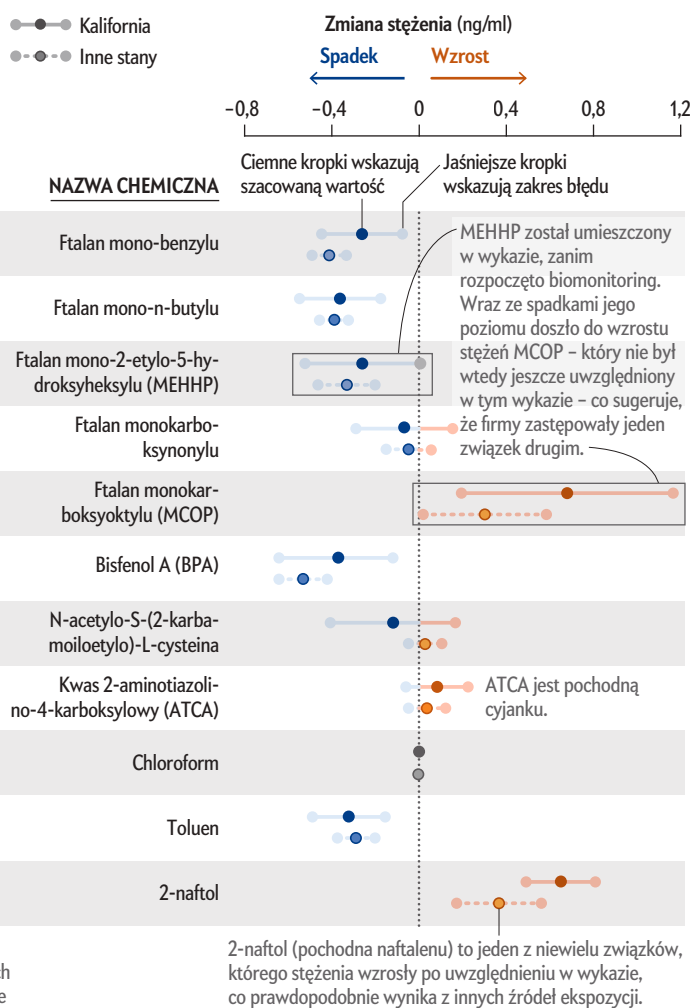
Megan Schwarzman, badaczka która była zaangażowana w oba projekty naukowe, mówi, że dostępne są dane jedynie dla niewielkiego odsetka spośród 900 związków chemicznych uwzględnionych w Prop 65. „Wyszukanie dostępnych publicznie danych, które mogłyby zostać wykorzystane do analizy skutków ustawy Prop 65, wymagało od badaczy prawdziwej ekwilibrystyki, ponieważ nie zbierano informacji pod tym kątem” – mówi Schwarzman.

Badacze zwrócili też uwagę na to, że mieszkańcy Kalifornii są „zbyt mocno ostrzegani”, a „zbyt słabo informowani”. Jednak dotychczasowe badania wskazują, że rozwiązanie to przynajmniej częściowo znajduje odbicie w decyzjach przemysłu, co podnosi poprzeczkę. Ripley Cleghorn

## Śledzenie ekspozycji na związki chemiczne poprzez biomonitoring

Naukowcy wykorzystali dane z amerykańskiego badania NHANES (National Health and Nutrition Examination Survey), w którym ocenia się stężenie związków chemicznych w próbkach krwi i moczu, do oceny wpływu wprowadzonej w Kalifornii ustawy Proposition 65 na wykorzystywanie przez firmy toksycznych związków chemicznych, obecnych w popularnych produktach gospodarstwa domowego. Na rycinie przedstawiono zmiany stwierdzone u osób w grupie o stosunkowo wysokiej ekspozycji (75. centyl).

Kropki wskazują zmiany poziomu poszczególnych związków chemicznych w organizmach mieszkańców Kalifornii i innych stanów USA.



ŹRÓDŁO: Trends in NHANES Biomonitoring Exposures in California and the United States following Enactment of California's Proposition 65, Kévin E. Knox i in., „Environmental Health Perspectives”, tom 132, nr 10, październik 2024 (dane)

## MATEMATYKA

## Detektyw pierwszości

### Sondowanie granicy poszukiwań liczb pierwszych

**LICZBY PIERWSZE** od wieków fascynują matematyków nieprzewidywalnym, pozornie losowym rozkładem. Opublikowany ostatnio w Internecie preprint zawiera opis nowej, przełomowej metody, która ułatwia poszukiwanie kolejnych liczb, a także określa granice możliwości ich wykrywania.

Każda liczba pierwsza podzielna jest tylko przez 1 i samą siebie. Takie liczby to jakby „atomy” matematyki, powstające w wyniku rozkładu na czynniki pierwsze liczb złożonych (np.  $12=2 \times 2 \times 3$ ). Im liczby są większe, tym trudniej ustalać ich pierwszość, próbując je rozkładać. A jak szukać odpowiedzi na pytania w rodzaju: „Ile liczb pierwszych jest między 1 a 1000?”

Punktem wyjścia może być klasyczne sito Eratostenesa. Ta starożytna metoda umożliwia systematyczną eliminację wielokrotności liczb pierwszych, a same liczby pozostają na sicie. Matematycy określają eliminowane wielokrotności jako „informację typu I”, dzięki której można przewidzieć, ile jest liczb pierwszych w danym zakresie. Ale ta informacja ma ograniczenia. „Czasem informacja typu I jest najlepszą, jaką można uzyskać, a mimo to nie udaje się wykryć ani jednej liczby pierwszej” – wyjaśnia współautor preprintu Kevin Ford, matematyk z University of Illinois w Urbana-Champaign.

Ford oraz matematyk z University of Oxford James Maynard opisują skuteczną metodę

szukania liczb pierwszych w dużych zakresach poprzez możliwie dokładne szacowanie w nich ich liczby. Praca łączy dwa komplementarne podejścia: informacje typu I, dotyczące eliminowanych liczb (usuwanie wielokrotności 2, potem 3 itd.) oraz informacje typu II, uwzględniające liczby usuwane wielokrotnie (np. 6 jako wielokrotność 2 i 3).

Matematycy mogą regulować udział każdego typu informacji, aby uzyskać jak najdokładniejszy wynik – liczbę liczb pierwszych w danym zakresie. Staranne dostrajanie tych dwu „pokręteł” umożliwiło także odkrycie fundamentalnych ograniczeń – ścisłego matematycznego limitu, niepozwalającego na poprawę dokładności zliczania mimo dowolnie precyzyjnej regulacji, co wiąże się ze skomplikowanym rozkładem liczb pierwszych na osi liczbowej. Badacze porównują dokładność tych szacunków w przypadku zbioru liczb i „siły informacji” do wielkości oczek w sicie: jeśli są za małe, złapie się za dużo liczb; jeśli za duże, niektóre liczby pierwsze się prześlizgną. W pracy znajduje się „precyzyjna odpowiedź na pytanie o wystarczająco dobrą informację, zapewniającą ujawnianie liczb pierwszych” – mówi zajmująca się tymi liczbami matematyczka Kaisa Matomäki z University of Turku w Finlandii. „Zrozumienie ograniczeń podczas projektowania sita jest kluczowe dla opracowania kompletnej teorii liczb pierwszych” – uważa matematyk z Princeton University Peter Sarnak, ekspert w dziedzinie teorii sit liczb pierwszych. I dodaje: „Ustalenie tego, co jest niemożliwe, także wydaje się fundamentalne”.

Zdaniem Forda opisana metoda ułatwi badania niewyjaśnionych od dawna problemów. „Liczby pierwsze rozmieszczone są w bardzo tajemniczy sposób, więc uzasadnione są próby pozbawienia ich choćby odrobiny tej tajemniczości”.

Max Springer

## FIZYKA

## Nowy poziom dziewiarstwa

Nowe matematyczne podejście do tradycyjnej czynności

**W RDZENIU MASZYNY** dziewiarskiej lub w rękach osoby robiącej na drutach pasmo włókien może zostać przekształcone w dowolną dzianinę – od delikatnego szalika po kamizelkę kuloodporną. Jednak różne ścięgi dziewiarskie mają tendencję do skręcania się w różnych kierunkach (przykładem może być podwijająca się tkana na okrągło koszulka po obciążeniu jej dolnego brzegu). Naprężenia powodowane przez ścięg mogą nadawać dwuwymiarowej tkaninie złożony przestrzenny kształt, a przewidywanie ostatecznej struktury dzianiny stanowi wyzwanie zarówno w dziewiarstwie ręcznym, jak i maszynowym. Model matematyczny opublikowany w „Proceedings of the National Academy of Sciences USA” wykorzystuje fizykę do radzenia sobie z tym problemem.

Celem fizyków jest szukanie reguł, które decydują o zachowaniu się materiałów



Krzywizna testowych dzianin bywa zawila.

LAUREN NIJ



– wyjaśnia Lauren Niu, kierująca badaniami fizyk z Drexel University. Po odkryciu reguł zaczyna się magia – możliwe staje się przewidywanie. Niu współpracowała z fizykiem z University of Pennsylvania Randallem D. Kamieniem oraz z Genevieve Dion, dyrektorką i założycielką Drexel University's Center for Functional Fabrics, nad modelem matematycznym, umożliwiającym prognozowanie złożonych kształtów w zależności od zastosowanych rodzajów ściegu.

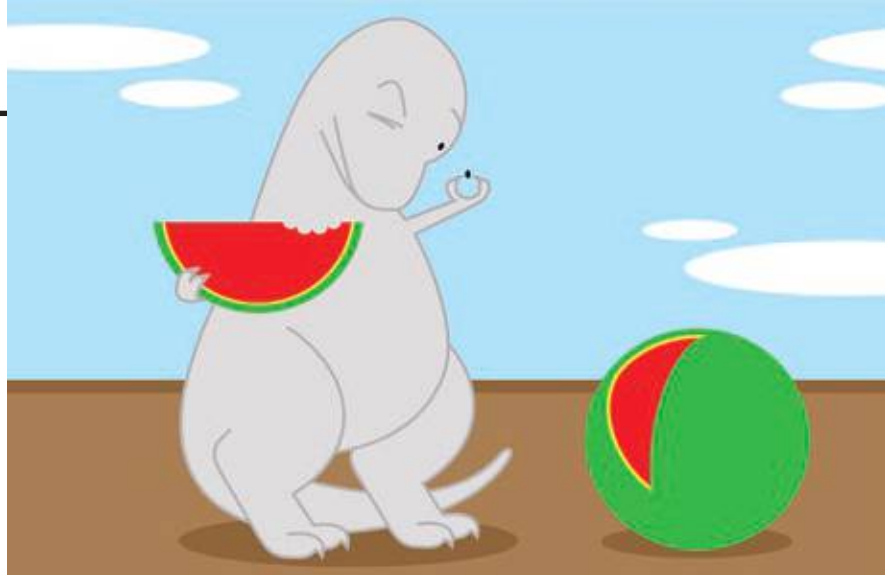
Prace badawcze zaczęto od dziania złożonych wzorów – m.in. krzywizn, wypukłości oraz dzianiny odwzorowującej kształt twarzy – a następnie przeprowadzono inżynierię wsteczną geometrii dzianin. Ustalono, że nie trzeba uwzględniać kształtu i rozciągłości każdego ściegu (wymagałoby to przy danej skali zbyt dużej mocy obliczeniowej), aby przewidzieć ostateczną formę tkaniny. Wystarczy tylko wiedzieć, jaką tendencję do wyginania tkaniny ma każdy rodzaj ściegu.

Nowy model uwzględnia informacje o tym, jak ściegi wytwarzają napięcie, bazując na skomplikowanej zależności matematycznej zwanej równaniem Föpplavon Kármána, które opisuje zachowanie się cienkich, elastycznych materiałów – na przykład ścian komórek lub kadłubów okrętów podwodnych – pod wpływem sił wewnętrznych i zewnętrznych. Mapowanie ściegów stosowanych w określony sposób umożliwia eksperymentowanie z projektami tekstyliów, zanim dojdzie do ich praktycznego dziania – wyjaśnia Kamien. Jest szansa, że takie wirtualne testy doprowadzą do wyrobu specjalistycznych tekstyliów lepiej dostosowanych do określonych obiektów, choćby urządzeń typu wearable.

Możliwość dysponowania takimi tekstyliami różnych rozmiarów wydaje się obiecująca, uważa Cosima du Pasquier, inżynier mechanik ze Stanford University. Du Pasquier, która zajmuje się miękką robotyką, korzystającą z funkcjonalnych tekstyliów, interesującą efekty stosowania modelu w postaci konkretnej tkaniny oraz wpływ na te efekty zmiennych czynników – takich jak rodzaj i grubość przędzy.

Zdaniem badaczy nawet bez udoskonalania modelu oferuje możliwość wypróbowywania nowych wzorów. „Nie można wykorzystać wszystkich możliwości dzianiarstwa, opierając się tylko na próbach i błędach; zaczynamy eksperymentować w środowisku wirtualnym” – mówi Dion.

*K. R. Callaway*



## PALEONTOLOGIA

# Mezozoiczni leśnicy Dinozaury ograniczyły wielkość nasion w owocach – nasz wpływ może być podobny

**CO ŁĄCZY LUDZI Z DINOZAUARAMI**, które tratowały pradawne lasy? Okazuje się, że wpływ na wielkość nasion w owocach rosnących wokół roślin. Kiedy naukowcy zbadali relacje między wielkością nasion a rozmiarami zwierząt, zaobserwowali, że wraz ze wzrostem zwierząt lądowych, zwiększały się również nasiona owoców – z kilkoma znamienymi wyjątkami. Niedawno opublikowana praca w czasopiśmie „Palaeontology” pokazuje, jak w historii życia na Ziemi szczególnie wielkie zwierzęta, takie jak dinozaury, ograniczały wzrost wielkości nasion poprzez naruszenie fizycznych cech ekosystemu, a zwłaszcza dostępności światła w lesie. Obecnie tę rolę może pełnić znacznie mniejszy gatunek: ludzie.

Myśl, że zwierzęta lądowe mogą wpływać na cechy swego środowiska, „nie jest już kontrowersyjna i znajduje potwierdzenie w przypadku bardzo wielu różnych grup zwierząt”, wyjaśnia Clive G. Jones, ekolog z Cary Institute of Ecosystem Studies w Millbrook w stanie Nowy Jork, niezwiązany z omawianą pracą. Na przykład słonie sawannowe powalają drzewa i tratują krzewy, gruntownie przekształcając krajobraz. Ale wpływ ten błędnie w porównaniu ze zmianami, jakie powodowały znacznie starsze od nich stworzenia.

Zaprezentowany teraz nowy model sugeruje, że dinozaury spowodowały taki poziom dewastacji lasów, że odwróciło to ewolucyjną tendencję nasion do powiększania rozmiarów, mówi główny autor pracy Christopher E. Doughty, geolog i ekolog na Northern Arizona University. Większe nasiona przyciągają zwykle większe zwierzęta, dzięki którym szerzej się rozsiewają, a zrodzone z nich rośliny osiągają większe rozmiary, wyjaśnia Doughty; oba te czynniki mogą zapewnić roślinom lepszy dostęp do światła słonecznego w warunkach znacznego zagęszczenia. Ale taki opis nie pasuje

do czasów dinozaurów, których wielkie ciała dokonywały spustoszeń i przerzedzały gęste lasy.

Zagłada dinozaurów spowodowała, że podszyc w lasach pograżył się w cieniu, a rośliny i pozostałe zwierzęta musiały się dostosować, mówi Doughty. „W tym czasie korony drzew zbliżyły się do siebie, tworząc zamknięte sklepienia” – zauważa Brian Atkinson, paleobotanik z University of Kansas, niezwiązany z omawianym zespołem. Wywarło to presję ewolucyjną na nasiona, aby znów mogły powiększyć swoje rozmiary, mówi Atkinson, co znajduje również odzwierciedlenie w materiale kopalnym. Kolejny spadek wielkości nasion nastąpił wraz z pojawieniem się wczesnych olbrzymich ssaków i utrzymywał się aż do ich wymarcia.

Choć człowiek z pewnością nie jest zaliczany do megafauny, to jego wpływ na lasy – szczególnie poprzez wycinkę – przypomina oddziaływanie tych dawno wymarłych gigantów, mówi Doughty. Jeśli będzie to postępować, nasz wpływ na nasiona owoców zacznie przypominać to, co działo się w czasach dinozaurów.

Ale ludzie, jak zauważa Jones, wpływają na życie roślin również na wiele innych sposobów. „Jednym z oczywistych przykładów jest rolnictwo – mowy, innymi – introdukcja obcych gatunków, wycinanie drzew pod nowe budownictwo itd.”

Te różniczne zależności powodują, że model nasz nie może zbyt dobrze przewidzieć przyszłych rozmiarów nasion owoców, mówi Doughty. Innym ważnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę, jest szybkie tempo, w jakim ludzka technika rozwija się w takich dziedzinach, jak rolnictwo. Chociaż model ten nie może opisywać zmian zagęszczenia lasów wywołanych przez megafaunę i ludzi, to zmiany powodowane przez nowoczesne rolnictwo oznaczają, że „normalne zasady ekologiczne przestają w istocie obowiązywać”. *Gayoung Lee*

## PSYCHOLOGIA

# Pokonać stereotyp

Okazuje się, że mężczyznom bardziej zależy na romantycznych relacjach niż kobietom

**CZY UWAŻASZ, ŻE KOBIETY** są bardziej zaangażowane w romanse niż mężczyźni? Komedie romantyczne, reklamy telewizyjne i magazyny kobiece mogą utrwalać ten stereotyp, ale coraz więcej badań psychologicznych wskazuje coś zupełnie innego: z wielu analiz wynika, że to mężczyźni mogą przywiązywać większą wagę do związków romantycznych. Ostatnio naukowcy zidentyfikowali kluczowy czynnik behawioralny, który może wyjaśniać tę zaskakującą różnicę.

Na podstawie ponad 50 badań nad relacjami heteroseksualnymi, naukowcy z Humboldt-Universität zu Berlin, University of Minnesota oraz Vrije Universiteit Amsterdam stwierdzili, że mężczyźni – w porównaniu z kobietami – spodziewają się więcej zyskać dzięki pozostawaniu w związku romantycznym, a więc są bardziej zmotywowani do znalezienia partnerki. Jak napisali autorzy artykułu w „Behavioral and Brain Sciences”, z licznych anonimowych ankiet wynika także, że mężczyźni częściej czerpią większe korzyści dla zdrowia psychicznego i fizycznego z bycia w związku, rzadziej inicjują rozstania oraz gorzej znoszą emocjonalne skutki zerwania.

Elaine Hoan, psycholożka społeczna z University of Toronto, mówi, że obserwacje te pokrywają się z tendencjami, które zaobserwowała we własnych badaniach: „Samotni mężczyźni są zazwyczaj



mniej zadowoleni z bycia singlami niż samotne kobiety, i to niezależnie od tego, czy mówimy o kulturach zachodnich, czy wschodnich”.

Autorzy nowej pracy sugerują, że większa zależność mężczyzn od relacji romantycznych wynika z różnic w sposobie wyrażania emocji, które często mają swoje źródło już w dzieciństwie. Jedno z analizowanych badań wykazało, że dorośli w USA oceniają trzyletnich chłopców opisanych jako wrażliwi i emocjonalni jako mniej lubianych niż chłopców o stereotypowo „męskich” cechach.

Inne badania pokazały, że rodzice częściej używają języka związanego z emocjami wobec córek i nagradzają je za wyrażanie smutku lub strachu, podczas gdy chłopców za to samo karzą. „Od najmłodszych lat chłopcy są zniechęcani do okazywania wrażliwości – mówi Iris Wahrung, psycholożka rozwojowa i społeczna z Humboldt-Universität

zu Berlin, współautorka badania. – I ta norma społeczna utrzymuje się również w dorosłości”.

Ten kulturowy standard sprawia, że mężczyźni rzadziej niż kobiety szukają wsparcia emocjonalnego u przyjaciół czy rodziny. W rezultacie bardziej polegają na swoich partnerkach, by zaspokajać te potrzeby. Kobiety natomiast częściej korzystają z szerszej sieci wsparcia społecznego, co sprawia, że są mniej zależne emocjonalnie od związków romantycznych.

Mariko Visserman, psycholożka z University of Sussex w Anglii, mówi, że przegląd „doskonale wyjaśnia, jak normy płciowe i doświadczenia z wczesnych lat życia mogą kształtować różnice w korzyściach i podatności emocjonalnej w związkach między kobietami a mężczyznami”.

Według Visserman z badań można wyciągnąć konkluzję, że potrzebujemy poczucia przynależności do wspierającej nas sieci relacji. Dodaje, że warto inwestować również w relacje poza związkiem romantycznym, aby mieć system wsparcia, gdy w relacji pojawi się kryzys lub dojdzie do jej końca, a także by zaspokajać różne potrzeby emocjonalne.

Hoan podkreśla, że ważnym wnioskiem z tych odkryć jest potrzeba tworzenia kultury, w której mężczyźni będą zachęceni do budowania silnych, emocjonalnie wspierających przyjaźni poza sferą romantyczną. Zauważa, że „oznacza to konieczność kwestionowania tradycyjnych norm płciowych, które stygmatyzują męską wrażliwość, oraz promowania wartości głębokich, znaczących przyjaźni wśród mężczyzn”.

Clarissa Brincat

Thomas Barwick/Getty Images (na górze); Spectrum der Wissenschaft (na dole)

## ZAGADKA MATEMATYCZNA

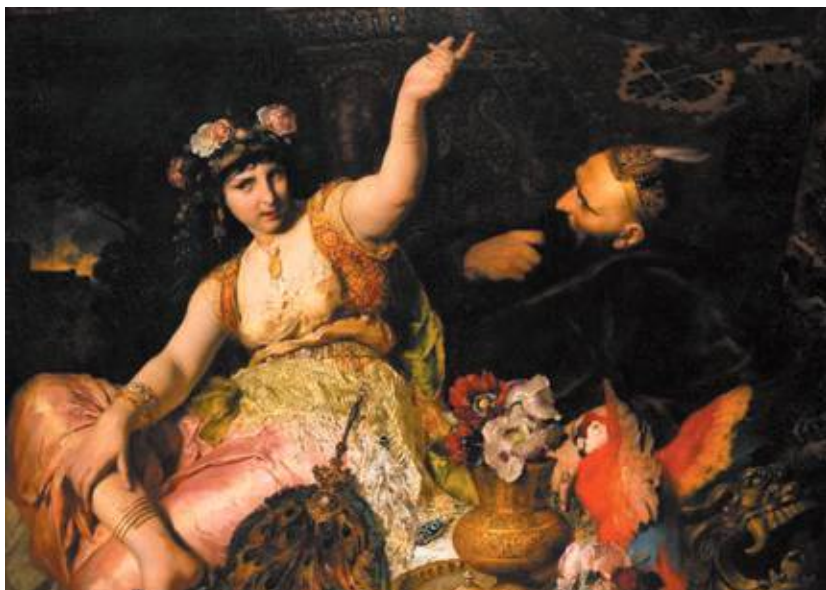
## Uzpełnij wielokąt

Hans-Karl Eder

JAKĄ LICZBA należy zastąpić znak zapytania?



Rozwiązanie na stronie 77



## Siła opowieści

Dobrych opowiadaczy wyróżnia silne poczucie sensu życia i stosowanie szerszej perspektywy **RON SHACHAR**

**S**ULTAN SZACHRIJAR, zdradzony przez żonę, postanawia poślubić ciągle inną kobietę, a po nocy poślubnej ją uśmiercać – by nigdy więcej nie zostać oszukany. Gdy jako kandydatka na żonę zgłasza się Szeherazada, przechytrza władcę. Każdej nocy zaczyna opowieść, ale przerywa ją o świcie, pozostawiając sultana spragnionym dalszego ciągu. Wciąga go w kolejne historie, aż przez tysiąc i jedną noc sultan zakochuje się w niej i porzuca okrutne zamiary.

To właśnie ta historia stanowi ramę narracyjną *Księgi tysiąca i jednej nocy* – średniowiecznego zbioru ludowych opowieści Bliskiego Wschodu, w którym znajdziemy m.in. baśnie o Aladynie, Ali Babie i Sindbadzie. Wszystkie podkreślają siłę opowiadania. Ale czy umiejętność snucia opowieści naprawdę może ratować życie?

Rezultaty najnowszych badań, które prowadziliśmy, jeszcze tego nie potwierdzają – ale wyraźnie wskazują, że duże zdolności narracyjne znacząco poprawiają dobrostan psychiczny. Wynika z tego, że, owszem – zdolni opowiadacze mogą żyć dłużej. Jak to możliwe? Odpowiedź poznać dopiero na końcu tego artykułu.

Nasza podróż zaczyna się od rozległych badań nad tożsamością narracyjną, które pokazują, że ludzie nadają sens swojemu istnieniu, układając doświadczenia

w opowieść. Chodzi o to, że łącząc je w spójną narrację, możemy dostrzec siłę przewodnią, która kształtuje naszą drogę i w ten sposób odnaleźć cel oraz sens życia.

W naszych badaniach skupiamy się nie tyle na samej treści opowieści, ile na umiejętności ich opowiadania. Uważamy, że osoby, które potrafią dobrze snuć opowieść, silniej odczuwają sens życia i częściej działają, opierając się na tzw. nastawieniu (mindset) „dlaczego” – czyli koncentrują się na powodach swoich działań, a nie tylko sposobach ich wykonania.

Nasza hipoteza opiera się na samej naturze opowieści. Typowa narracja opisuje bohatera, który dąży do celu (np. zdobycia pracy albo serca ukochanej), pokonując po drodze różne przeszkody. Aby dobrze opowiadać, trzeba więc opanować dwie kluczowe umiejętności. Po pierwsze, umieć połączyć fakty i wydarzenia w spójną całość. Po drugie, nauczyć się patrzeć na świat oczami bohaterów, rozumieć, co nimi kieruje – poznać ich „dlaczego”. Zdolni narratorzy stosują te umiejętności także we własnym życiu: pierwsza pomaga im znaleźć i realizować to, co nadaje ich życiu sens, a druga pozwala działać w zgodzie z własną motywacją – zorientowaną na „dlaczego”, a nie tylko na „jak”.

Dla zobrazowania naszej koncepcji, przyjrzyjmy się dwóm osobom: Rachel i Monice. Obie przeszły tę samą ścieżkę zawodową i obie pracowały w bardzo różnych branżach – od sportu przez medycynę aż po bankowość. Często działały impulsywnie. Ale Rachel to zdolna opowiadaczka, a Monica nie. I ta różnica staje się bardzo wyraźna, gdy obie wspominają swoje kariery. Monica ma tendencję do zagubienia i poczucia braku jasnego celu, bo nie patrzy na swoje życie przez pryzmat „dlaczego”, lecz tylko „jak coś zrobiła”. Rachel natomiast potrafi dostrzec wzorce i sens: zauważa, że pełniąc w swojej karierze role kierownicze, wspierała kobiety. To spostrzeżenie daje jej poczucie celu i lepsze zrozumienie własnej motywacji – swojego „dlaczego”.

Ale to tylko hipotetyczny przykład. Czy potwierdza się w rzeczywistości?

Aby to sprawdzić, przeprowadziliśmy pięć badań z udziałem około 800 osób. Chcąc rzetelnie zmierzyć ich zdolność do opowiadania, zastosowaliśmy wielowymiarowe podejście. Po pierwsze, stworzyliśmy kwestionariusz, w którym pytaliśmy uczestników, w jakim stopniu zgadzają się ze stwierdzeniami typu „moje opowieści zwykle ciekawią słuchaczy”. Po drugie, rozmawialiśmy z ich bliskimi przyjaciółmi, pytając o umiejętności narracyjne badanych. Po trzecie, zaprosiliśmy trójki nieznanymi do laboratorium, by opowiadali sobie historie. Każdy miał opowiedzieć: jedną o jakiejś swojej cesze, a drugą z uwzględnieniem trzech losowo dobranych słów.

To podejście znacznie różni się od wcześniejszych badań nad opowieściami życiowymi – tu skupiamy się na czystej sztuce narracji. Po każdej sesji uczestnicy oceniali nawzajem swoje opowieści w ramach trzyosobowych zespołów, a później nagrania z eksperymentu analizowali niezależni eksperci. Mieliśmy więc cztery źródła danych: (1) samoocenę uczestników, (2) opinie ich bliskich, (3) oceny współpracowników eksperymentu i (4) oceny ekspertów. Dodatkowo zadaliśmy uczestnikom pytania o sens życia oraz o to, czy podejmując decyzje, kierują się raczej „dlaczego” niż „jak”.

Wyniki były spójne: osoby z wyższymi umiejętnościami narracyjnymi częściej odczuwały sens życia i kierowały się nastawieniem „dlaczego”.

Sprawdziliśmy też, czy takie rezultaty mogą wynikać z cech osobowości – ale okazało się, że

**Ron Shachar** jest profesorem ekonomii i biznesu na Uniwersytecie Reichmana w Izraelu. Zajmuje się badaniem opowiadania historii, myślenia strategicznego, budowania marki, reklamy oraz kampanii politycznych.

nie. Choć osobowość wnosi ciekawe niuanse. Na przykład ludzie otwarci na nowe doświadczenia częściej są dobrymi opowiadaczami. Ma to sens – takie osoby przeżywają więcej nietypowych sytuacji, które stają się materiałem na interesujące opowieści. A im więcej opowiadają, tym bardziej szlifują swoje umiejętności.

Ciekawie też wypadają różnice między introwertykami a ekstrawertykami. Choć ekstrawertycy generalnie częściej odczuwają sens życia, to u introwertyków dobre zdolności narracyjne mogą ten brak wyrównywać. Bo choć jedno i drugie – ekstrawersja i storytelling – wiąże się z ekspresją, to działają one inaczej: ekstrawersja to potrzeba wyrażania siebie w kontaktach społecznych, a storytelling to umiejętność czynienia tego za pomocą opowieści. I okazuje się, że wystarczy jedno z tych dwóch, by poczuć sens i cel.

Z naszych badań płynie kilka ważnych wniosków. Po pierwsze, osoby z nastawieniem „dlaczego” lepiej dostrzegają szerszy kontekst. A nasze dane świadczą, że zdolność tworzenia opowieści i „widzenia całości” są ze sobą ściśle powiązane.

Ta zdolność do ujmowania całości – choć sama w sobie cenna – może być też jedną z przewag człowieka nad sztuczną inteligencją, która świetnie radzi sobie z zadaniami szczegółowymi, ale gorzej z szeroką perspektywą. Dlatego w obliczu niepewnej przyszłości umiejętność opowiadania historii to coś, co warto pielęgnować.

Nasze badania wskazują też, że popularne dziś warsztaty storytellingowe mają wpływ nie tylko na lepszą komunikację czy skuteczniejszą perswazję. Mogą wzmacniać siły napędowe naszej egzystencji i poczucie kierunku w życiu.

A korzyści z rozwijania poczucia sensu są liczne – i czasem zaskakujące.

Weześniejsze badania wykazały, że silne poczucie sensu wiąże się z wieloma korzyściami zdrowotnymi, w tym z dłuższym życiem. W połączeniu z naszymi wynikami można wnioskować, że storytelling również może sprzyjać lepszemu zdrowiu i obniżyć ryzyko przedwczesnej śmierci. Co więcej – opowiadanie historii zbliża ludzi, poszerza krąg znajomych. A silne więzi społeczne, jak wiadomo, poprawiają zdrowie, więc mogą wpływać na długowieczność.

Zatem nie jest wykluczone, że nie warto lekceważyć przesłania *Księgi tysiąca i jednej nocy* – opowieść naprawdę może ratować życie. ■

## Język wpływa na zainteresowanie nauką

W miarę jak dzieci dorastają, ich rozumienie nauki i bycia naukowcem się zmienia. Słowa używane przez dorosłych są krytyczne dla podtrzymania chęci dokonywania odkryć przez najmłodszych  
RYAN F. LEI

**J**EDNĄ Z NAJLEPSZYCH RZECZY w byciu rodzicem jest przyglądanie się, jak dzieci eksplorują otaczający je świat. Ciekawość dzieci nie ma granic i nie ma większej przyjemności niż obserwowanie zachwyty na ich twarzach, gdy odkrywają najprostsze przedmioty i zjawiska. „Co masz w ręce? Czy to... piłka? Myślisz, że stoczy się z tej góry?” – możesz spytać swojego malucha, a potem cieszyć się jego okrzykami radości, gdy sam to sprawdzi. To właśnie nauka w praktyce – obserwacja, testowanie pomysłu, sprawdzanie, co się stanie, i zadawanie kolejnych pytań.

A jednak z czasem rodzice niekiedy zauważają, że ich dziecko przestaje interesować się otaczającym je światem i rzadziej zastanawia się nad tym, dlaczego coś działa tak, a nie inaczej – innymi słowy, traci naukową ciekawość. Dlaczego dochodzi do tej zmiany?

Oczywiście, decyduje o tym wiele czynników, ale badania, które prowadziłam wraz ze współpracownikami, ujawniają coś, co może niektórych zaskoczyć: za spadek zainteresowania nauką mogą częściowo odpowiadać subtelne sygnały językowe. I nie chodzi tylko o słowa rodziców – takie sygnały mogą też pochodzić z mediów czy podręczników albo od nauczycieli, kojarząc naukę bardziej z tożsamością (identity) niż procesem.

Wszystkie dzieci potrafią uprawiać naukę, ale z czasem zaczynają myśleć, że bycie naukowcem to coś zarezerwowanego tylko dla pewnych typów ludzi. Na podstawie tego, co zaobserwowaliśmy w badaniach, można jednak wskazać kilka sposobów podtrzymywania dziecięcej ciekawości i naturalnego zapału do odkrywania.

W rozmowach z dziećmi wielu dorosłych mówi na przykład: „Pobawmy się dziś w naukowców!” (żeby skłonić do eksperymentowania) albo:

„Jesteś świetnym naukowcem!” (żeby pochwalić dziecko). Tego rodzaju komunikaty, które łączą naukę z tożsamością, a nie działaniami, mogą działać zniechęcająco. W jednym z badań wykazano, że dziewczynki (ale już nie chłopcy) w wieku zaledwie czterech lat wytrwale uczestniczyły w zajęciach naukowych, gdy zachęcano je słowami „Pobawmy się w naukę” zamiast „Pobawmy się w naukowców”.

Możliwym wyjaśnieniem jest to, że gdy dzieci słyszą słowo naukowiec, mogą wyobrażać sobie (białego) mężczyznę. Jeśli same nie identyfikują się z tym obrazem, mogą poczuć, że takie zajęcia nie są dla nich. Co więcej, mogą uwierzyć, że bycie naukowcem wymaga szczególnych predyspozycji intelektualnych – takich, które przypisują tylko pewnym grupom ludzi (na przykład białym mężczyznom).

To stereotypowe przekonanie, że nauka jest zarezerwowana tylko dla określonego typu ludzi, pojawia się zaskakująco wcześnie. Już w pierwszej klasie dziewczynki deklarują mniejsze zainteresowanie informatyką i techniką. Co więcej, gdy dzieci są prośzone o narysowanie naukowca, najczęściej rysują mężczyznę – choć z biegiem lat ten trend słabnie.

Tego rodzaju stereotypy z czasem się kumulują. W rezultacie w szkole średniej dziewczynki, które znajdują się w 80. percentylu zdolności naukowych (mierzonym na podstawie wyników testów standardyzowanych i ocen z tzw. przedmiotów STEM –

nauk ścisłych, przyrodniczych i technicznych), wykazują taki sam poziom zainteresowania kierunkami STEM, jak chłopcy w najniższym percentylu.

Dobłą wiadomością jest jednak to, że subtelne sygnały językowe mogą działać również w drugą stronę – i zaskakująco skutecznie wspierać zaangażowanie dzieci w naukę. Przedstawianie nauki jako

**Ryan F. Lei** jest profesorem nadzwyczajnym psychologii na Haverford College. Uzyskał licencjat na University of North Carolina w Chapel Hill oraz doktorat z psychologii społecznej na Northwestern University. Odbył staż podoktorski z psychologii rozwojowej na New York University. Można go śledzić na Bluesky: @ryanlei.bsky.social.

# Myślenie bez słów

Okazuje się, że percepcja nie wymaga języka GARY STIX

**N**AUKOWCY OD DAWNA zastanawiają się nad związkiem pomiędzy językiem a myśleniem, pytając, czy język jest niezbędnym wstępnym warunkiem myślenia.

Brytyjski filozof i matematyk Bertrand Russell odpowiedział na to pytanie twierdząco, mówiąc, że głównym celem języka jest „powstanie myśli, które bez niego nie mogłyby zaistnieć”. Ale nawet pobieżne spojrzenie na świat przyrody wskazuje, że Russell raczej nie miał racji: słowa nie są potrzebne zwierzętom do rozwiązywania problemów, które wymagają wysoko rozwiniętych umiejętności poznawczych. Szympansy potrafią pokonać człowieka w grze strategicznej, a wrony brodate zamieszkuje Nową Kaledonię wytwarzają narzędzia, które umożliwiają im chwytanie zdobyczy.

Faktem jest jednak, że ludzie wykonują zadania poznawcze na poziomie wyrafinowania niespotykanym u szympansov – potrafimy rozwiązywać równania różniczkowe lub komponować symfonie. Czy język jest w jakimś stopniu niezbędny naszemu gatunkowi, by był on zdolny do takich wyczynów? Czy potrzebujemy słów lub składni do konstruowania rzeczy, o których myślimy? Lub czy regiony poznawcze naszego mózgu formują w pełni rozwinięte myśli, które następnie możemy przekazać za pomocą słów jako środka komunikacji?

Evelina Fedorenko, neurobadaczka z McGovern Institute for Brain Research w Massachusetts Institute of Technology, przez wiele lat próbuje odpowiedzieć na te pytania. Pamięta, że gdy na początku XXI wieku była studentką Harvard University, hipoteza „język rodzi myśl” była wciąż bardzo popularna w środowisku akademickim. Sama była jej wyznawczynią.

Kiedy Fedorenko rozpoczęła swoje badania 15 lat temu – w czasie, gdy powszechnie dostępne stały się nowe techniki obrazowania pracy mózgu – postanowiła zweryfikować tę koncepcję z rygiorem właściwym nauce. Ostatnio razem ze współpracownikami opublikowała



działań, które podejmujemy, wydaje się chronić dziecięcą ciekawość i motywację do dalszego zgłębiania wiedzy. Okazuje się też, że uczniowie, których nauczyciele używają języka opartego na działaniach (np. „Pobawmy się w naukę”), potrafią dłużej utrzymać zainteresowanie nową grą edukacyjną niż ci, których nauczyciele posługują się językiem opartym na tożsamości (np. „Pobawmy się w naukowców”).

Być może teraz myślisz: „Świetnie, po prostu będę skupiać się na działaniach naukowych i elementach procesu badawczego!” I faktycznie, u młodszych dzieci to zazwyczaj bardzo skuteczna strategia, która sprawdza się również w okresie dorastania i wczesnej dorosłości.

Ale prawdą jest też, że w okresie dojrzewania dzieci intensywnie testują różne role i zaczynają budować własną tożsamość. Dlatego – inaczej niż w przypadku młodszych dzieci – u nastolatków język oparty na tożsamości może już wspierać zainteresowanie nauką. W jednym z badań zasugerowanie uczniom gimnazjum przyszłej tożsamości opartej na nauce (np. „naukowiec” albo „lekarz”)

motywowało ich do systematyczniejszego odrabiania prac domowych i wiązało się z lepszymi ocenami. Może to wynikać z faktu, że jeśli nastolatki zaczną postrzegać siebie jako naukowców, będą bardziej skłonne do podejmowania działań, które przybliżają je do tego celu.

Ostatecznie każdy rodzic pragnie, aby jego dziecko czerpało radość z nauki, odkrywania i samodzielnego dochodzenia do odpowiedzi. A przecież właśnie te działania stanowią podstawę procesu naukowego. Skupianie się na działaniach w młodszych latach może pomóc dzieciom wytrwać w wykonywaniu trudnych zadań czy na lekcjach. Z kolei wtedy, gdy starsze dzieci zaczynają nabierać doświadczenia i tworzyć obraz siebie w przyszłości, akcentowanie tożsamości związanych z nauką może dodatkowo wzmacniać ich zainteresowanie tą dziedziną.

Jak dokładnie te dwa rodzaje subtelnych komunikatów językowych – o działaniach i tożsamości – mogą ze sobą współgrać (albo się wzajemnie blokować), nie zostało jeszcze zbadane. Może zajmie się tym problemem... twój przyszły naukowiec. ■



w „Nature” przeglądnę artykuł, w którym podsumowała swoje prace. Wniosek z nich jest jednoznaczny: język i myślenie są odrębnymi „tworami”, które mózg przetwarza oddzielnie. Poznanie na najwyższym poziomie – od umiejętności kreatywnego rozwiązywania problemów po inteligencję społeczną – może przebiegać bez pomocy słów lub struktur językowych.

Język działa trochę jak telepatia, pozwalając nam komunikować nasze myśli innym i przekazywać następnemu pokoleniu wiedzę i umiejętności niezbędne do rozkwitu naszego hiperspołecznego gatunku. Zarazem osoby z afazją, które czasami nie są w stanie wypowiedzieć nawet jednego słowa, mogą angażować się w wiele zadań poznawczych o fundamentalnym znaczeniu dla myślenia. „Scientific American” rozmawiał z Fedorenko o niezależności myślenia od języka oraz o perspektywach badań nad interakcjami zachodzącymi pomiędzy tymi dwiema podstawowymi ludzkimi aktywnościami.

*Poniżej przedstawiamy zredagowany zapis rozmowy.*

### Jak to się stało, że zdecydowałaś się zadać pytanie, czy język i myśl są odrębnymi bytami?

Szczerze mówiąc, byłam bardzo mocno przekonana, że język ma kluczowe

znaczenie dla złożonego myślenia. Na początku XXI wieku mocno pociągała mnie hipoteza mówiąca, że ludzie mogą mieć jakiś specjalny mechanizm doskonale dopasowany do hierarchicznych struktur. A język jest doskonałym przykładem systemu opartego na strukturach hierarchicznych: słowa łączą się we frazy, a frazy w zdania.

Wiele złożonych myśli również opiera się na strukturach hierarchicznych. Pomyślałam więc: „Ok, w takim razie znajdę obszar mózgu, który przetwarza hierarchiczne struktury języka”. W tamtym czasie pewne poszlaki wskazywały, że tą strukturą mogą być niektóre obszary lewej koryzowej.

Jednak metody, których ludzie używali do badania, jak obszary odpowiedzialne za język i inne umiejętności nakładają się na siebie w mózgu, nie były zbyt dobre. Chciałam to zrobić lepiej. A potem – tak często bywa w nauce – okazało się, że pewne rzeczy nie działają tak, jak sobie wyobrażaliśmy. Szukałam dowodów na istnienie takiego miejsca mózgu, a jego po prostu nie było.

Struktury mózgu odpowiedzialne za obróbkę hierarchicznych struktur języka są wyraźnie oddzielone od tych obszarów, które uczestniczą w podobnych

operacjach, ale dotyczących matematyki czy muzyki. W nauce często jest tak, że na początku mamy pewne hipotezy opierające się na intuicji lub wcześniejszym przekonaniu.

Moja akademicka edukacja odbywała się w tradycji lingwisty Noama Chomsky’ego, w której dogmatem od zawsze było to, że używamy języka do myślenia: język wyewoluował, bo był nam niezbędny do myślenia. Tak uważałam, kończąc studia. Lecz kiedy zaczynasz zajmować się nauką, dowiadujesz się często, że tkwisz w błędzie – i to jest wspaniałe, bo dopiero wtedy sobie uświadamiasz, jak sprawy mają się w rzeczywistości.

### Jakie znalazłaś dowody na to, że myśl i język są odrębnymi systemami?

Dowody pochodzą z dwóch różnych metod. Jedna z nich jest w zasadzie bardzo stara; naukowcy stosują ją od wieków. To przyglądanie się deficytom w zakresie różnych zdolności, na przykład u osób z uszkodzeniem mózgu.

Korzystając z tego podejścia, możemy przyjrzeć się ludziom, którzy mają zaburzenia językowe – jakąś postać afazji. Jest ona badana od stuleci. Pod względem weryfikowania związków języka z myśleniem najbardziej pouczające są przypadki poważnych upośledzeń, na przykład afazji globalnej, gdy ktoś całkowicie traci zdolność rozumienia i tworzenia mowy w wyniku rozległego uszkodzenia lewej półkuli mózgu. Pytanie brzmi, czy osoba mająca poważne zaburzenia językowe potrafi wykonywać zadania wymagające myślenia. Można ją poprosić o rozwiązanie problemów matematycznych lub wykonanie testu inteligencji społecznej, przy czym wszystkie instrukcje muszą być oczywiście niewerbalne, ponieważ taki człowiek nie rozumie lingwistycznego komunikatu.

Naukowcy mają spore doświadczenie w pracy z grupami, które nie posługują się językiem – niemowłętami i zwierzętami. Zdecydowanie jest możliwe przekazanie odpowiednich instrukcji w sposób niewerbalny. Kluczowy wniosek z takich badań jest taki, że są osoby z poważnymi zaburzeniami językowymi, radzące sobie ze wszystkimi zadaniami poznawczymi, jakie daliśmy im do rozwiązania.

Są osoby, na których przetestowano zadania wielu rodzajów, w tym takie, które obejmują to, co można nazwać myśleniem, na przykład rozwiązywanie pro-

**Gary Stix**, jest starszym redaktorem „Scientific American”; zajmuje się tematami związanymi z neuronauką.

blemów matematycznych i zagadek logicznych czy też wyciąganie wniosków na temat świata fizycznego lub przekonań innych ludzi. I to jest jeden zbiór dowodów – pochodzących z badań z udziałem ludzi z afazją.

### **Jaka jest druga metoda?**

Bardzo dobrym podejściem uzupełniającym, zapoczątkowanym w latach 80. i 90., jest obrazowanie mózgu. Możemy monitorować zmiany w przepływie krwi u ludzi angażujących się w różne zadania i sprawdzać w ten sposób, czy oba systemy działają odrębnie, czy też nakładają się na siebie – na przykład czy istnieje połączenie między obszarami mózgu odpowiedzialnymi za język i tymi uczestniczącymi w rozwiązywaniu zadań matematycznych. Obrazowanie mózgu może się bardzo przydać w szukaniu odpowiedzi na takie pytania, ale zanim je zadałam, musiałam w sposób pewny i wiarygodny zidentyfikować obszary odpowiadające za język w poszczególnych mózgach. Spędziłam pierwszych kilka lat badań na opracowywaniu odpowiednich narzędzi.

Gdy wiemy już, jak odnajdować takie obszary językowe, i wiemy też, że są to regiony, których uszkodzenie w wieku dorosłym prowadzi do stanów takich, jak afazja, możemy sprawdzić, czy te regiony językowe aktywizują się u ludzi zaangażowanych w różne zadania poznawcze. Możesz zatem przyjść do mojego laboratorium, a ja dzięki obrazowaniu zidentyfikuję w twoim mózgu obszary odpowiedzialne za język, prosząc cię o wykonanie zabierającego kilka minut zadania; następnie poproszę cię o rozwiązanie kilku łamigłówek logicznych albo wykonanie złożonych zadań angażujących pamięć roboczą lub o planowanie i podejmowanie decyzji. I wtedy mogę zobaczyć, czy obszary przetwarzające język uaktywniają się, gdy angażujesz się w rozmaite rodzaje zadań umysłowych. Przeprowadziliśmy dziesiątki badań, w których analizowaliśmy rozmaite niejęzykowe bodźce i problemy, w tym także rozliczne zadania związane z myśleniem. Za każdym razem stwierdzaliśmy, że obszary odpowiedzialne za język były praktycznie nieme, kiedy ludzie angażowali się w te wszystkie czynności myślowe.

### **Jaka jest więc rola języka, jeśli nie ma on nic wspólnego z myśleniem?**

To, co teraz robię, to dzielenie się z tobą moją wiedzą. Gdy przekażę ci ją

za pomocą języka, zaktualizujesz swoją wiedzę i wówczas będzie się ona znajdowała również w twoim umyśle. Można powiedzieć, że jest to taka telepatia na skróty. Nie możemy czytać sobie nawzajem w myślach. Ale możemy używać tego bardzo elastycznego narzędzia zwanego językiem do komunikowania naszych wewnętrznych stanów czy też przekazywania informacji.

To poprzez język, a nie bezpośrednie doświadczenie nauczyliśmy się większości informacji na temat otaczającego nas świata. Można sobie łatwo wyobrazić, jakie dało to korzyści ewolucyjne: wzmocnianie współpracy, transfer wiedzy o tym, jak budować narzędzia i utrzymywać kontakty. Gdy ludzie zaczęli żyć w większych grupach, ważne stało się nadawanie za różnymi relacjami społecznymi. Niezwykle trudne jest też przekazywanie wiedzy przyszłym pokoleniom, a język pozwala nam to robić bardzo skutecznie.

Ideę, że język jest głównie po to, abyśmy mogli się komunikować, potwierdza coraz więcej dowodów zebranych w ostatnich dekadach. Wskazują one, że rozmaite właściwości ludzkich języków – jest ich na świecie około 7000 – zostały zoptymalizowane tak, aby były one skutecznymi narzędziami przekazywania informacji. Mają ułatwiać postrzeganie, rozumienie i wytwarzanie różnych rzeczy oraz naukę dzieciom.

### **Czy język czyni ludzi wyjątkowymi?**

Z badań ewolucji mózgu wiemy, że wiele obszarów kory mózgowej znacznie się powiększyło u ludzi. Te obszary obejmują kilka systemów funkcjonalnych. Jednym z nich jest język. Ale jest też system, dzięki któremu możemy rozumować na temat innych umysłów. Inny z kolei wspomaga rozwiązywanie nowych problemów. Następny pozwala integrować informacje w kontekście czasowym, na przykład łączyć kilka zdarzeń w jeden łańcuch. Najprawdopodobniej to nie jeden wyjątkowy czynnik uczynił nas ludźmi. Nie ma konkretnej rzeczy, która o tym zdecydowała. Bardziej prawdopodobne jest to, że pewna grupa umiejętności stała się bardziej wyrafinowana, zajęła większe obszary kory mózgowej, otwierając drogę do bardziej złożonych myśli i zachowań.

### **Czy systemy językowe i myślowe wchodzą ze sobą w interakcje?**

W neuronaukach nie ma dobrych narzędzi do badania interakcji pomiędzy

językiem a myśleniem. Powstają jednak nowe interesujące możliwości związane z rozwojem sztucznej inteligencji, która dostarcza nam modelowego systemu do badania języka w postaci dużych modeli językowych, takich jak GPT-2 i jego następcy. Modele te doskonale radzą sobie z językiem, tworząc prawidłowe grammatycznie i sensowne zdania. Jednak w myśleniu nie są tak dobre, co byłoby zgodne z ideą, że to nie system językowy sprawia, że myślisz.

Jednakże my i inne grupy badaczy robimy coś takiego, że traktujemy pewną wersję modelu językowego sztucznej sieci neuronowej jako model ludzkiego systemu językowego. Następnie próbujemy połączyć go z jakimś systemem, który, jak sądzimy, przypomina systemy myślenia u ludzi. Może to być na przykład symboliczny system rozwiązywania problemów, powiedzmy, aplikacja matematyczna. Dzięki narzędziom sztucznej inteligencji możemy przynajmniej zapytać: „W jaki sposób system myślenia, system rozumowania, może wchodzić w interakcje z systemem przechowującym i wykorzystującym reprezentacje językowe?”

### **Co takiego robią duże modele językowe, że mogą nam pomóc w zrozumieniu, jak działa język?**

Są one w zasadzie pierwszym modelowym organizmem dla osób zajmujących się neurobiologią języka. Nie są to organizmy biologiczne, ale dopóki nie powstały te modele, mieliśmy tylko ludzki mózg tworzący język. To, co się teraz dzieje, jest niesamowicie ekscytujące. Na modelach można robić to, czego nie da się zrobić na rzeczywistych systemach biologicznych, które próbujemy zrozumieć. Jest mnóstwo pytań, które możemy teraz zadać, a które wcześniej były całkowicie poza naszym zasięgiem: na przykład pytania dotyczące rozwoju.

W przypadku ludzi nie możesz, rzecz jasna, manipulować rozwojem dyspozycji językowych. Nie możesz pozbawić dzieci języka lub w jakiś sposób ograniczyć z nim kontakt, a następnie obserwować efekty. Możesz jednak budować modele, które są trenowane tylko na określonym wkładzie językowym albo tylko na języku mówionym, z pominięciem języka pisanego. I zobaczyć, czy modele wytrenowane w określony sposób odzwierciedlają lepiej to, co widzimy u ludzi, jeśli chodzi o ich zachowania językowe, czy też reakcje mózgu na język. ■



## Gorączka letniej nocy

Utrzymujące się upały prowadzą do licznych hospitalizacji. Istnieją jednak sposoby zapobiegania przegrzaniu

LYDIA DENWORTH

**J**EŚLI LATO 2025 ROKU będzie choć trochę przypominało to w ubiegłym roku, przygotujmy się na zalew potu. Lipiec i sierpień 2024 roku należały do najgorętszych miesięcy zanotowanych w amerykańskim mieście Phoenix w stanie Arizona. W dzień temperatura przekraczała 38°C przez ponad 100 dni. Jednak obecnie wysoka temperatura utrzymuje się również w nocy, co jeszcze bardziej zagraża zdrowiu. Jeśli po zachodzie słońca nadal jest gorąco, wzrasta liczba zgonów. Zwiększa się liczba osób trafiających na ostry dyżur i przyjmowanych do szpitala. Rośnie częstość przedwczesnych porodów. Upał odbija się też na jakości snu i zdrowiu psychicznym. Istnieją jednak proste i praktyczne metody zapobiegania tym zagrożeniom niesprowadzające się wyłącznie do podkręcania kosztownej klimatyzacji.

„Ekspozycja na upały ma w większości przypadków charakter przewlekły” – mówi Ashley Ward, dyrektorka Heat Policy

Innovation Hub w Nicholas Institute na Duke University. Jest ona jedną z osób, które coraz mocniej koncentrują się na skumulowanym efekcie coraz cieplejszych nocy, następujących po coraz cieplejszych dniach. Temperatura w nocy rośnie dwukrotnie szybciej niż temperatura za dnia, ponieważ szczelniejsza pokrywa chmur nocą, spowodowana efektem cieplarnianym, zatrzymuje ciepło i zwraca je do gruntu. Na przykład w niektórych obszarach na południowym wschodzie USA obecnie przez ponad 30 dni w roku utrzymuje się nocą temperatura powyżej 24°C, mówi Ward. Miejskie wyspy ciepła, czyli fragmenty miast z mnóstwem betonu i małą liczbą dających cień drzew, pochłaniają ciepło i dodatkowo zwiększają ten problem. Dotyka on jednak również obszarów wiejskich.

„Jeśli nocą temperatura nie spada, temperatura głęboka ludzkiego ciała nie może

wrócić do normalności – mówi epidemiolożka Kristie Ebi z Center for Health and the Global Environment na University of Washington. – Kolejnego ranka zaczynamy od wyższego poziomu”. To dlatego wzrost częstości zgonów w okresie fali upałów rozpoczyna się po około 24 godzinach od jej początku. „Nie chodzi o chwilową ekspozycję, ale o przegrzanie w ciągu dnia i niemożność jego złagodzenia nocą. Zaczyna to wpływać na komórki i narządy” – mówi Ebi.

Temperatura głęboka ciała jest ważna, bo dotyczy poziomu temperatury narządów wewnętrznych, nie zaś tylko temperatury skóry. „Upały nazywamy cichym zabójcą, ponieważ ludzie niezbyt sobie radzą z rozpoznawaniem wzrostu temperatury głębokiej swojego ciała – mówi Ebi. – Ta temperatura musi utrzymywać się w wąskim zakresie, aby chronić nasze narządy”. Ten zakres to mniej więcej 36–37°C, jednak zmienia się w ciągu dnia i jest różny u poszczególnych osób.

Nasze organizmy są zaprojektowane tak, aby chłodzić się, wykorzystując na przykład rumieniec i pocenie. W upale czerwienimy się na twarzy, ponieważ organizm wypycha krew na powierzchnię, aby obniżyć jej temperaturę. Analogicznie pot, który paruje ze skóry, zabiera ze sobą ciepło z ciała. Ale te reakcje nie zawsze wystarczają. Proces termoregulacji może przeciążać serce, które, pompując krew, mocniej pracuje, a także uszkadzać nerki, którym szkodzi odwodnienie.

Jakość snu, kluczowa dla ogólnego stanu zdrowia, także pogarsza się podczas upałów. Ostatnie globalne badania, wykorzystujące dane ankietowe i miliardy pomiarów dokonywanych za pośrednictwem opasek sportowych na nadgarstek, wykazały, że wzrostowi temperatur towarzyszy pogorszenie jakości snu, mówi Nick Obradovich, kierownik badań nad środowiskowym zdrowiem psychicznym z Laureate Institute for Brain Research w Tulsie (Oklahoma). Upał powoduje, że ludzkiem trudniej jest zasnąć i że budzą się trochę wcześniej niż zwykle. „Zwiększa to prawdopodobieństwo krótkiego snu, czyli krótszego niż siedem godzin w ciągu jednej nocy” – mówi Obradovich. Ponadto im więcej gorących nocy wystą-

pi jedna po drugiej, tym gorzej będziemy spali. Niedobór snu szkodzi układowi odpornościowemu, wiąże się także z podwyższonym ryzykiem nowotworów i choroby Alzheimera.

**Lydia Denworth** jest nagradzaną dziennikarką naukową i redaktorką czasopisma „Scientific American”. Jest autorką książki *Friendship* (W. W. Norton, 2020).

Powiązano go również z gorszym stanem psychicznym.

Problemy emocjonalne i behawioralne, związane z rosnącymi temperaturami, obejmują podwyższone ryzyko samobójstw. Także w tym przypadku im dłużej utrzymują się te temperatury, tym konsekwencje psychiczne są poważniejsze. Co do zasady „ryzyko wystąpienia epizodu dotyczącego zdrowia psychicznego jest znacznie wyższe szóstego niż pierwszego dnia upałów”, wyjaśnia Obradovich.

Co gorsza, jak mówi Ward, rosnące temperatury zderzają się z ubóstwem, podeszłym wiekiem i innymi społecznymi wyznacznikami stanu zdrowia. Wiele osób mieszkających w domach najmniej wydajnych energetycznie nie może również pozwolić sobie na klimatyzację. Starsi dorośli częściej cierpią na współistniejące choroby serca lub naczyń tętniczych, cukrzycę oraz choroby układu oddechowego, co zwiększa ich wrażliwość na upał. Leki stosowane w leczeniu choroby Parkinsona oraz beta-blokery przepisywane chorym z nadciśnieniem tętniczym zmniejszają zdolność organizmu do termoregulacji.

Położenie geograficzne także ma znaczenie. Wysoka wilgotność, często występująca w południowo-wschodnich obszarach Stanów Zjednoczonych, jest szczególnie niebezpieczna, ponieważ utrudnia odparowywanie potu. Natomiast kiedy jest sucho i gorąco, tak jak na południowym zachodzie USA, pot szybko odparowuje, prowadząc do odwodnienia, zanim zdołamy to zauważyć.

Na szczęście możemy wspomagać swoje organizmy, wykorzystując naturalne strategie chłodzenia i potwierdzone naukowo taktyki. Zanurzenie dłoni i stóp w chłodnej – ale nie lodowatej – wodzie wywołuje reakcję ze strony specjalnego typu naczyń krwionośnych, uwalniających ciepło z wnętrza ciała na jego powierzchnię, gdzie może ono ulec szybkiemu rozproszeniu. Ta metoda jest regularnie stosowana w wojsku. A po upalnym dniu spędzonym na pracy w ogrodzie znacznie bardziej skuteczny będzie chłodny prysznic niż chłodne piwo. Prysznic obniży temperaturę ciała, podczas gdy piwo działa moczopędnie, mówi Ward. Utrzymanie odpowiedniego nawodnienia (poprzez picie wody!) zmniejsza obciążenie nerek. W przypadku ograniczonej możliwości użycia klimatyzacji warto skoncentrować się na obniżeniu temperatury w sypialni. Zwiększa to szanse na dobry wypoczynek i być może też na sny o nadejściu chłodniejszych nocy. ■



## MODLITWA DO ŚWIETLIKÓW

A potem: twoje pierwsze światło.  
Upiorna gwiazda pośród pociemniałych, metalicznych drzew.  
Twój świetlny brzęk żywy jak kończyzna. Jak ramię wyciągnięte,  
jak dłonie złożone w czarę dla nagiego, ulotnego promienia.  
Niemal żółte, a jednak pylistozielone niczym z innego świata.  
Trzepot czegoś jasnego, lecz miękkiego wśród gałęzi.

Wierny pozdrawiaczu księżycu, nadprzyrodzony popiele: świetliku.  
Twój blask – skupiona mgła gotowa do malowania.  
Dokąd wędrujesz gwiazdko, maleńki majsterkowiczu,  
w poszukiwaniu towarzyszkę? Świetlisty inżynierze,  
twoje ciało to jasność niepodobna do niczego ludzkiego.  
Dokonałszy niż nasze najlepsze lampy, choć czelowaliśmy je przez wieki.

Jak odmienna jest nasza energia. Jak przyjazny  
dom z ciepłym blaskiem okien. Nasza niespieszna śmiertelność,  
pomruk maszyn. Sposób, w jaki cię gasimy  
i ledwie zauważamy.

Rytmiczny owadzie, z głosem światła między gałęziami –  
Tyś moim Lucyferem i Wenus,  
Moim bogiem ziemi, nikłym ogniem roznieconym od wewnątrz.  
Pójdę za twoim subtelnym mrugnięciem  
w głąb lasu

za drzewa, po godzinie, gdy mój dom zatapia się w ciemności.

**Genevieve Pfeiffer** jest doktorantką programu Environmental Sciences, Studies and Policy na University of Oregon, gdzie bada rolę nowych technik w rozumieniu komunikacji innej niż ludzka. Uzyskała tytuł magistra nauk humanistycznych w zakresie humanistki eksperymentalnej na New York University oraz magistra sztuk pięknych (M.F.A.) w dziedzinie poezji na Sarah Lawrence College.



Krater Meteorowy  
w Winslow w Arizonie

## Czy w Ziemię uderzy planetoida?

Astronomowie zwracają szczególną uwagę na potencjalnie niebezpieczne kosmiczne skalne bryły  
PHIL PLAIT

**N**A PEWNO WIDZIELIŚCIE JUŻ nagłówki typu: „Astronomowie twierdzą, że w niedalekiej przyszłości w Ziemię może uderzyć skała z kosmosu!”. Zazwyczaj takie ostrzeżenia dotyczą jednego lub dwóch ciał kosmicznych w ciągu roku. Najnowsze z nich odnosiło się do planetoidy 2024 YR4, której średnica szacowana jest na nieco ponad 50 m. Przez pewien czas prawdopodobieństwo jej zderzenia z Ziemią podawano jako kilka procent, lecz po przeprowadzeniu kolejnych obserwacji pod koniec lutego 2025 roku kolizja została praktycznie wykluczona.

Ale skąd można to wiedzieć? Jak astronomowie znajdują te planetoidy, a następnie wyznaczają, gdzie będą się one znajdować za kilka lat?

Właściwie wiemy to już od stuleci dzięki niemieckiemu astronomowi Johannesowi Keplerowi, który w XVII wieku odkrył niezbędne prawa ruchu orbitalnego. Od tego czasu pojawienie się lepszych teleskopów, kamer cyfrowych i szybkich komputerów znacznie ułatwiło te przewidywania, choć nadal nie są one do końca niezawodne.

**Phil Plait** jest zawodowym astronomem i popularyzatorem nauki mieszkającym w Wirginii. Wydaje *Bad Astronomy Newsletter*. Można go śledzić na Beehiiv.

Obecnie działa kilkanaście obserwatoriów wyposażonych w teleskopy przeglądowe, które każdej nocy wykonują szerokokątne zdjęcia nieba i szukają nieodkrytych ciał mknących przez nasz Układ Słoneczny. Z perspektywy Ziemi ciała te wydają się poruszać względem znacznie bardziej odległych „stałych” gwiazd. We wcześniej astronomowie wypatrywali takich ruchów gołym okiem na kliszach, lecz obecnie zadanie to można wykonać znacznie szybciej i dokładniej dzięki automatyzacji.

Po zauważeniu nowego poruszającego się obiektu należy wyznaczyć jego orbitę. Czy krąży on po orbicie kołowej poza Marsem, czy też ma orbitę eliptyczną, dzięki czemu dociera w pobliże Ziemi? Tutaj do gry wkracza Kepler i jego prawa.

Odkrył on, że wszystkie orbity mają jeden z trzech kształtów – eliptyczny, paraboliczny lub hiperboliczny (okrąg to po prostu elipsa, której wielka i mała oś są równe, zatem okręgi zaliczamy do elips). Orbity paraboliczne i hiperboliczne nazywamy „otwartymi”, co oznacza, że poruszające się po nich ciało nie powraca w to samo miejsce. Ciało o takiej orbicie po prostu przemyka obok nas; porusza się wystarczająco szybko, aby przewyżyczyć

grawitację Słońca i zniknąć na zawsze w przestrzeni międzygwiazdowej. Większość komet, które przybywają w okolice Słońca spoza Neptuna, ma orbity zbliżone do parabolicznych. Dotychczas odkryto tylko dwa obiekty na orbitach ekstremalnie hiperbolicznych – 1I/'Oumuamua i kometę 2I/Borisov.

Natomiast ciało na orbicie eliptycznej jest trwale związane ze Słońcem i teoretycznie powinno obiegać je w nieskończoność (chyba że otrzyma impuls grawitacyjny, na przykład od jakiejś planety). Nasza zdolność do przewidywania przyszłej pozycji obiektu krążącego wokół Słońca zależy od tego, co wiemy o jego elipsie.

Podstawowymi cechami orbity eliptycznej są jej rozmiar (matematycznie rzecz biorąc, połowa długości jej osi wielkiej, zwana półosią wielką), mimośród (który stanowi zasadniczo miarę stopnia eliptyczności – 0 oznacza okrąg, a 1 oznacza nieskończone wydłużenie, czyli linię) oraz jej orientacja w przestrzeni. Orbita eliptyczna danego ciała może być na przykład nachylona względem orbity Ziemi, z wielką osią skierowaną w określonym kierunku. Gdy znamy wszystkie te parametry (zwane elementami orbitalnymi), możemy jednoznacznie wyznaczyć odpowiadającą im elipsę. Jeśli znamy również położenie planetoidy na tej elipsie, na przykład w momencie jej odkrycia lub podczas kolejnej obserwacji, równania Keplera podają nam, w którym punkcie orbity znajdzie się ona w określonym dniu – przynajmniej w teorii.

W praktyce nie jest to takie proste. Prognozujący potrzebują zazwyczaj co najmniej trzech dobrze rozdzielonych obserwacji planetoidy, by móc przystąpić do wyznaczenia wszystkich zmiennych rządzących kształtem elipsy. A obserwacje te nie są całkiem dokładne – planetoidy nie wyglądają na fotografiach jak idealne małe kropki, lecz są nieco rozmyte, co utrudnia określenie ich dokładnej pozycji, gdy przesuwają się względem gwiazd tła.

Takie niedokładności są wprawdzie niewielkie, lecz się kumulują. W rezultacie otrzymujemy zazwyczaj elipsę, która nie jest idealna, a obliczona trajektoria obciążona jest błędem; w rzeczywistości pozycja planetoidy może nieco odbiegać od przewidywanej. Im dalej w przyszłość (lub przeszłość) próbujemy obliczyć pozycję, tym mniej precyzyjna jest prognoza. To tak, jak gdyby faktyczna trajektoria planetoidy była stożkiem, którego wierzchołek znajduje się w obecnej pozycji,

rozwierającym się w kierunku, w którym próbujemy dokonać prognozy. Statystycznie bryła skalna może znajdować się w dowolnym miejscu wewnątrz tego stożka, co może odpowiadać dużej objętości przestrzennej.

Jedynym sposobem na zwiększenie precyzji trajektorii jest uzyskanie większej liczby obserwacji, albo wykonanych aktualnie z użyciem teleskopów, albo wydobytych z danych archiwalnych. Ponadto im dłużej obserwowany jest obiekt, tym pewniejsze stają się pomiary jego elementów orbitalnych.

To tak, jak w przypadku gracza w polu zewnętrznym w meczu baseballu. Wyobraźmy sobie, że miotacz rzuca piłkę, lecz w sekundę po uderzeniu przez pałkarza musi on zamknąć oczy i zgadnąć, gdzie będzie piłka, aby ją złapać. Nawet jeżeli dokona przyzwoitej oceny, nie będzie ona wystarczająco dokładna, aby odniósł sukces. Aby zmaksymalizować szanse na złapanie piłki, trzeba przez cały czas śledzić jej ruch.

Dlatego staramy się obserwować planetoidy tak długo, jak tylko się da, aby wydłużyć czasowy zakres obserwacji. Są jednak przeszkody – niektóre planetoidy są małe i szybko tracą jasność wraz ze wzrostem odległości. Tak jest w przypadku 2024 YR4, która obecnie oddala się od Ziemi i według prognoz zniknie z pola widzenia pod koniec kwietnia. Planetoidy mogą również uniknąć obserwacji, zbliżając się do Słońca na sferze niebieskiej tak bardzo, że nie sposób ich dostrzec przez kilka miesięcy.

Zakładając jednak, że orbita planetoidy jest dobrze określona i przewidywalna, skąd wiemy, jakie są szanse na jej uderzenie w Ziemię? Istnieje wiele metod obliczania tego prawdopodobieństwa; jednym ze sposobów jest symulacja orbity i odnotowanie dat, kiedy obiekt znajdzie się w pobliżu orbity Ziemi, a następnie ustalenie, czy nasza planeta będzie w tym samym czasie na jego drodze. Jeśli tak, no cóż, to fatalnie dla nas.

Ale niekoniecznie oznacza to, że dojdzie do katastrofy. Ziemia jest stosunkowo niewielkim celem, a statystyczna objętość przestrzeni, w której planetoida może się znajdować w danym dniu, jest zazwyczaj dość spora. Nawet w przypadku ewidentnie budzącej niepokój planetoidy istnieje tylko pewne ryzyko, że obiekt uderzy w Ziemię, i jest ono zazwyczaj bardzo małe, zwłaszcza im wcześniej próbujemy je przewidzieć. Z reguły prawdopodobieństwo

zderzenia z jakąkolwiek nowo odkrytą potencjalnie zagrażającą Ziemi skalą z kosmosu jest jak jeden do kilku tysięcy.

W większości przypadków dokładniejsze obserwacje pozwalają precyzyjniej ustalić trajektorię i wykazać, że przechodzi ona daleko od Ziemi; wówczas prawdopodobieństwo zderzenia spada praktycznie do zera. Irytujące bywa to, że statystyczna szansa zderzenia niekiedy najpierw wzrasta – tak właśnie było w przypadku 2024 YR4. Pamiętajmy, że planetoida znajduje się gdzieś w pobliżu wierzchołka wielkiego stożka, a my nie wiemy, gdzie dokładnie. Jeśli Ziemia znajduje się w pobliżu osi stożka, to w miarę zawężania się stożka w wyniku kolejnych obserwacji nadal pozostajemy w jego wnętrzu. Prawdopodobieństwo zderzenia wzrasta. Jednak prawie zawsze, gdy stożek zawęzi się jeszcze bardziej, ostatecznie wskazuje nieco inny kierunek, pozostawiając Ziemię bezpiecznie na zewnątrz, a my wszyscy możemy odetchnąć z ulgą.

Nie oznacza to bynajmniej, że nigdy nie zostaniemy trafieni! Przykłady są liczne, takie jak planetoida Czelabińsk, która eksplodowała nad Rosją w 2013 roku, katastrofa tunguska na Syberii w 1908 roku oraz uderzenie, które 50 tys. lat temu utworzyło Krater Meteorowy w Arizonie. Każdego dnia Ziemia natrafia na swojej drodze na około 100 t materii międzyplanetarnej, z czego większość to drobne odłamki skalne, które kończą swój lot jako piękne meteory przecinające sferę niebieską. Czasami jednak fragmenty te są większe – i to znacznie. Im są większe, tym rzadziej się pojawiają, zatem naprawdę katastrofalne uderzenia są dużym ewenementem.

Niemniej jednak się zdarzają, zatem musimy bacznie obserwować niebo. Dobrą wiadomością jest to, że powstaje coraz więcej teleskopów, w tym ogromne Vera C. Rubin Observatory w Chile i zbudowany przez NASA NEO Surveyor (którego wystrzelenie planowane jest na 2027 rok). Pomogą nam one nie tylko w mapowaniu położenia tych obiektów i kierunku ich ruchu, lecz również w określeniu ich rozmiarów i składu. Jeśli jakaś planetoida wystarczająco duża, aby wyrządzić szkody na Ziemi, znajdzie się na naszej drodze, mamy nadzieję, że dowiemy się o tym jak najszybciej, co może dać nam wystarczająco dużo czasu, aby podjąć odpowiednie działania.

Im więcej będziemy mieli teleskopów, które będą w stanie w sposób ciągły obserwować jak największy obszar nieba, tym dla nas lepiej. ■



# KWANTOWY

Dziwaczny proces fizyki cząstek elementarnych może zniszczyć wszystkie galaktyki i życie - choć jest to niezwykle mało prawdopodobne

MATTHEW VON HIPPEL

Ilustracja MONDOLITHIC STUDIOS

# BĄBEL,

# KTÓRY

# MOŻE

# ZNISZCZYĆ

# WSZECHŚWIAT



# W

**WIĘKSZOŚĆ LUDZI NIGDY NIE SŁYSZAŁA** o rozpadzie próżni, ale gdyby do niego doszło, byłaby to największa katastrofa naturalna we Wszechświecie. Oczywiście, planetoida może zniszczyć miasto lub wymazać życie na Ziemi. Supernowa może usunąć warstwę ozonową. Gdyby podmuch energii z wirującej czarnej dziury uderzył w naszą planetę, mógłby rozerwać cały Układ Słoneczny. Choć katastrofy te są dramatyczne w skutkach, nadal pozostawiłyby po sobie skały, gaz i pył. Z czasem materia ta mogłaby się ponownie połączyć, tworząc nowe gwiazdy i planety, a może nawet i życie.

Rozpad próżni to coś innego. Ten kataklizm byłby wywołany przez zmianę w polu Higgsa – polu kwantowym, które przenika całą przestrzeń. Wydarzyłby się w wyniku czystego przypadku, tworząc bańkę, która rozszerzałaby się niemal z prędkością światła, przekształcając wszystko na swojej drodze. Wewnątrz tej bańki prawa fizyki, które uważamy za oczywiste, uległyby zmianie, co spowodowałoby, że materia, jaką znamy (a w konsekwencji i życie), nie mogłaby istnieć.

Zgodnie z najlepszymi oszacowaniami fizyków, rozpad próżni jest niezwykle mało prawdopodobny, a prawdopodobieństwo, że nastąpi tak blisko naszej części Wszechświata, by mieć na nas wpływ, jest wręcz niewyobrażalnie małe. Niemniej nie jest ono zerowe, a niektóre z najnowszych szacunków sugerują, że może być ono nie aż tak małe, jak zwykliśmy sądzić. Jednakże możliwość pojawienia się apokaliptycznej bańki kwantowej nie powinna powodować u nikogo problemów ze snem.

Mimo to naukowcy starają się zrozumieć, jak i dlaczego taki scenariusz może się zrealizować. Odpowiedzi na te pytania nie tylko ujawniają pewne fascynujące aspekty świata kwantowego – mogą one również odwrócić problem: zamiast martwić się zagrożeniem, jakie stanowi bańka próżniowa, można zastanawiać się, czy fakt, że Wszechświat tak długo bez niej

przetrwał, nie mówi nam czegoś o najgłębszych nierozwiązanych problemach fizyki.

SŁOWO „PRÓŻNIA” przywołuje na myśl pustą przestrzeń i takie rozumienie nie jest zbyt odległe od jego sensu w wyrażeniu „rozpad próżni”. Jednak dla fizyków sama „pustka” jest względna.

Wszystkie obiekty, które dobrze znamy – każde zwierzę, roślina i minerał – są zbudowane z atomów, a te atomy są z kolei stworzone ze zmarszczek w polach kwantowych. Każde pole przypomina pewien rodzaj uniwersalnego panelu sterowania. Gdybyśmy na panelu sterowania mogli poruszyć przełącznikiem elektronu, zobaczylibyśmy, że gdzieś pojawia się elektron. Większość z tych przełączników ma domyślną wartość zero: dla przykładu, w przeważającej liczbie miejsc elektronów nie ma. Te wartości domyślne są sztywne – aby przesunąć przełącznik z jego domyślnej pozycji, potrzebna jest energia. To, ile energii potrzeba, określa słynne równanie Alberta Einsteina  $E = mc^2$ , które definiuje związek między energią a masą: im masywniejsza cząstka, tym bardziej sztywna jest domyślna pozycja przełącznika jej pola.

Można by pomyśleć, że w prawdziwie pustej przestrzeni wszystkie te przełączniki są ustawione na zero. Jest to prawdą w przypadku większości pól

**Matthew von Hippel** jest fizykiem cząstek elementarnych i niezależnym autorem popularnonaukowym mieszkającym w Kopenhadze. Pisuje artykuły dla czasopism „Quanta”, „Ars Technica” i „Scientific American”, a także prowadzi blog pod adresem 4gravitons.com.

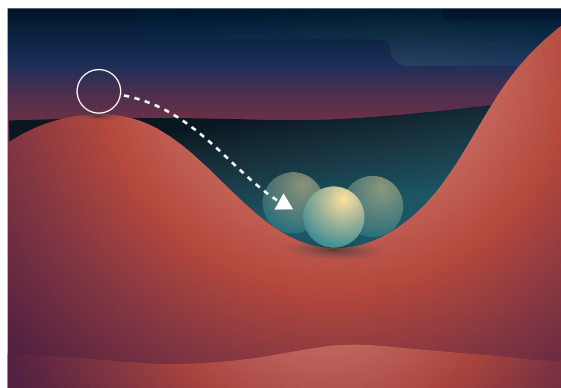
kwantowych, ale niektóre z nich mają inne ustawienia domyślne. Jednym z takich przypadków jest pole kwantowe postulowane w 1964 roku przez kilku fizyków, w tym Brytyjczyka Petera Higgsa, od nazwiska którego zostało później nazwane. Spróbujmy ustawić pole Higgsa na zero, a będzie stawiać opór. Wszelki świat „chce” mieć w sobie pewną ilość higgsowości, która to ilość domyślnie nazywana jest wartością oczekiwaną próżni. To właśnie ta ilość pola Higgsa, a nie zero, znajduje się w próżni pustej przestrzeni.

Wypchnięcie pola Higgsa z domyślnego ustawienia jest dosyć trudne. Naukowcom to się w końcu powiodło w 2012 roku, kiedy w eksperymencie przeprowadzonym w Wielkim Zderzaczu Hadronów (Large Hadron Collider; LHC) w pobliżu Genewy udało się zmierzyć najmniejszą, najkrótszą możliwą zmianę w polu Higgsa. Tak jak pstrykanie przełącznikiem elektronowym powoduje powstanie elektronu, tak pstrykanie przełącznikiem Higgsa powoduje powstanie cząstki zwanej bozonem Higgsa. Cząstki te po ich utworzeniu szybko znikają, a przełącznik Higgsa powraca do swojego domyślnego stanu, jednocześnie przedstawiając inne, łatwiejsze do zmiany ustawienia przełączniki, tworząc cząstki takie, jak elektrony czy fotony. Naukowcom z LHC udało się jednak stworzyć tak dużą liczbę bozonów Higgsa, aby można było je zarejestrować i udowodnić istnienie pola Higgsa.

Pole Higgsa jest szczególnie, ponieważ kontroluje masę wszystkich innych cząstek. W efekcie służy ono jako rodzaj głównego przełącznika, określającego, jak sztywne są domyślne ustawienia wszystkich innych przełączników. Gdybyśmy mogli chwycić przełącznik Higgsa i przeciągnąć go w kierunku zera, przekonalibyśmy się, że wszystkie inne przełączniki stałyby się znacznie łatwiejsze do przesunięcia. Innymi słowy, niższa wartość Higgsa oznaczałaby, że potrzeba mniej energii, aby stworzyć elektron lub kwark.

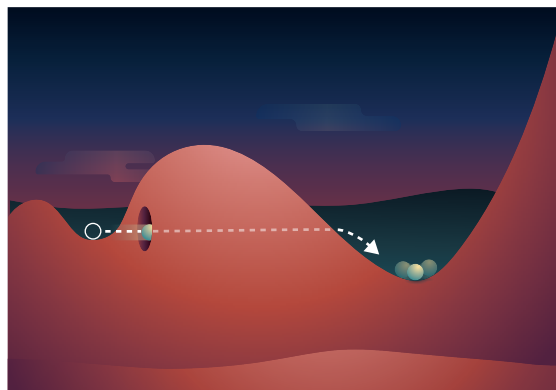
Fizycy uważają, że zadanie przesunięcia pola Higgsa z jego domyślnej wartości przypomina trochę toczenie głazu pod górę. Jeśli głaz spoczywa na dnie doliny, można spróbować popchnąć go w górę, ale jeśli go puścimy, po prostu stoczy się w dół.

ABY TEORIA HIGGSA DZIAŁAŁA, pole Higgsa musi mieć ustawienie, które trudno zmienić, w pobliżu dna metaforycznej doliny. Teoria nie mówi jednak zbyt wiele o świecie poza doliną.



Od lat 70. fizycy spekulują, że może gdzieś znajdować się dolina z niżej położonym dnem, odpowiadającą jeszcze wyższemu ustawieniu pola Higgsa. Jeśli taka dolina faktycznie istnieje, to ustawienie to byłoby prawdziwym ustawieniem domyślnym, a nasze byłoby jedynie „falszywą próżnią” – tymczasową wartością, która nie jest tą, jaką pole Higgsa naturalnie chciałoby przyjmować. W prawdziwej próżni pole Higgsa byłoby silniejsze, co sprawiłoby, że inne fundamentalne cząstki, takie jak elektrony, byłyby znacznie masywniejsze i trudniejsze do stworzenia, co zaburzałoby równowagę, która pozwala istnieć atomom.

Mogłoby się wydawać, że dotarcie do drugiej doliny jest prawie niemożliwe. Najpierw musielibyśmy stoczyć nasz metaforyczny głaz na wzgórze, z którego stoczyłby się po drugiej stronie do głębszej doliny. Ale fizyka kwantowa może sprawić, że niemożliwe staje się możliwe. Dzięki efektowi zwanemu tunelowaniem kwantowym pole może losowo przeskoczyć z ustawienia o wyższej energii do ustawienia o niższej energii, nawet jeśli brakuje mu energii, aby wspiąć się na wzgórze pomiędzy nimi. To tak, jakby przejechać przez tunel we wzgórze, zamiast podróżować po jego grzbiecie. Gdyby tak się stało z polem Higgsa, skończyłaby się nasza fałszywa próżnia i wyłoniłaby się próżnia prawdziwa.



Fizycy nie są do końca pewni, co by się stało, gdyby doszło do takiej zmiany, zwanej rozpadem próżni. Przewiduje się, że rozpoczęłaby się ona na niewielkim obszarze, tworząc bąbel, w którym pole Higgsa znajdowałoby się na wyższym poziomie, a wszystkie inne cząstki miałyby znacznie większą masę. Jeśli bąbel byłby relatywnie mały, zniknąłby, ściśnięty siłą podobną do napięcia powierzchniowego w kropli wody. Jeśli jednak bąbel byłby wystarczająco duży, ogromna różnica energii między wnętrzem a zewnątrz sprawiłaby, że zacząłby rosnąć. W pustej przestrzeni rozszerzałby się z prędkością światła, zmieniając ustawienie pola Higgsa w całym kosmosie. „Do czasu odkrycia bozonu Higgsa wszystko to było czystą teorią” – mówi Matthew D. Schwartz, profesor fizyki na Harvard University. Wcześniej nikt nie znał masy tej cząstki.

W rezultacie fizycy nie byli pewni, czy rozpad próżni jest w ogóle możliwy. Mieli wzór na oszacowanie prawdopodobieństwa jego wystąpienia, ale zależał on od trudności zmiany pola Higgsa z jego obecnego

ustawienia domyślnego, które było nieznanne. Wzór mówił, że jeśli przełącznik byłby bardzo sztywny, namnażona próżnia byłaby prawidłowym ustawieniem domyślnym, a nie próżnią fałszywą, i nigdy by się nie rozpadła. Gdyby przełącznik był łatwy do przestawienia, rozpad byłby znacznie bardziej prawdopodobny. Kiedy zespoły LHC ogłosiły odkrycie cząstki Higgsa, w końcu uzyskaliśmy wyraźny pomiar, jak trudno jest przesunąć pole Higgsa. Po raz pierwszy możliwe było obliczenie prawdopodobieństwa rozpadu próżni.

Wynik był uspokajający. W 2017 roku zespół, w skład którego wchodził Schwartz, obliczył, że prawdopodobieństwo, iż bąbel rozpadu próżni mógł do tej pory do nas dotrzeć, wynosi zaledwie jeden do  $10^{606}$ , co jest absurdalnie małą liczbą. Wyobraźmy sobie, że bierzemy każdy atom ze wszystkich gwiazd na niebie, przyznajemy każdemu z nich jego własny wszechświat gwiazd, a następnie robimy to jeszcze pięć razy. Teraz wyobraźmy sobie, że ktoś losowo wybiera jeden atom z końcowej sumy, a ty jesteś proszony o odgadnięcie, który to jest; bardziej prawdopodobne jest, że wybierzesz ten konkretny atom z tych wszystkich wszechświatów, niż że doświadczysz rozpadu próżni.

W obliczeniach istnieje jednak element niepewności, a fizycy nadal aktualizują swoje szacunki na podstawie nowych danych. Wzór stosowany do obliczania prawdopodobieństwa rozpadu próżni zależy nie tylko od trudności zmiany pola Higgsa, ale także od masy innych cząstek elementarnych, a także od siły oddziaływań działających na te cząstki. Obliczenia z 2024 roku oparte na bardziej precyzyjnych pomiarach jeszcze bardziej obniżyły to prawdopodobieństwo do około jednego na  $10^{868}$ .

ISTNIEJE JEDNAK MOŻLIWOŚĆ, że inne czynniki wpływają na prawdopodobieństwo rozpadu próżni. Aby zrozumieć, dlaczego tak jest, wyobraźmy sobie, że wrzucamy szczyptę soli do garnka z wodą tuż przed jej zagotowaniem. Kiedy sól trafia do wody, kilka pierwszych pęcherzyków, które dopiero zaczęły powstawać, mnoży się, tworząc pianę. Jeśli woda wcześniej nie była wrząca, teraz już jest. Fizycy twierdzą, że sól jest „zarodkiem” pęcherzyków. Każde ziarenko soli może służyć jako zarodek – małe jądro przemiany. Chropowata powierzchnia ziarenek soli ułatwia tworzenie się pęcherzyków. Wkrótce pęcherzyki rozprzestrzeniają się, aż cała woda w garnku zaczyna wrzeć.

Okazuje się, że to, co działa w przypadku pęcherzyków pary, działa również w przypadku bąbelków próżni. Potrzebna jest jednak bardziej wyrafinowana sól. A konkretnie czarne dziury.

W 2015 roku troje fizyków z Anglii – Ruth Gregory i Philipp Burda z Durham University oraz Ian Moss z Newcastle University – ustaliło, co jest do tego potrzebne. (Inni wcześniej spekulowali, że czarne dziury mogą wywołać rozpad próżni, ale obliczenia udało się w końcu przeprowadzić dzięki danym z LHC). Zespół z Wielkiej Brytanii odkrył, że czarne dziury mogą znacznie zwiększyć prawdopodobieństwo rozpadu próżni, tworząc pęcherzyki w taki sam sposób, jak sól robi to w gotującej się wodzie. Aby jednak czarne dziury mogły wywrzeć znaczący wpływ, muszą być niezwykle małe.

Większość czarnych dziur, które astronomowie obserwują we Wszechświecie, to umarłe gwiazdy. Kiedy największe gwiazdy docierają do końca swojego życia, eksplodują jako supernowe, tworząc czarne dziury. Jeśli czarna dziura pozostawi się samą, z czasem ona zanika. Stephen Hawking odkrył, że czarne dziury z czasem maleją, uwalniając cząstki zwane promieniowaniem Hawkinga. Promieniowanie to powstaje, ponieważ ekstremalna krzywizna przestrzeni i czasu wokół czarnej dziury zmienia sposób, w jaki pola kwantowe falują, powodując, że chwilowe drganie przełącznika zamienia się w długowieczną cząstkę. Parowanie czarnych dziur jest niezwykle powolne w przypadku dużych, delikatnie zakrzywionych czarnych dziur i trwa znacznie dłużej niż obecny wiek Wszechświata. W miarę jak czarna dziura się zmniejsza, jej krzywizna staje się ostrzejsza, co powoduje, że wytwarza ona coraz więcej cząstek i wyparowuje coraz szybciej. Najmniejsze czarne dziury wyparowują w mgnieniu oka.

Gregory i jej współpracownicy odkryli, że – właściwie z tego samego powodu – im bardziej zakrzywiona jest czasoprzestrzeń wokół czarnej dziury, tym większy ma ona wpływ na rozpad próżni: silnie zakrzywiona czasoprzestrzeń ułatwia zmiany pól kwantowych, w tym pola Higgsa. Czarne dziury powstałe z gwiazd są zbyt duże, a czasoprzestrzeń wokół nich jest za mało zakrzywiona, aby rozpad próżni stał się istotnie bardziej prawdopodobny. Bardzo małe czarne dziury również nie mają znaczenia, ponieważ wyparowują, zanim zdążą wywołać zjawisko. Jednak czarne dziury o masie kilkudziesięciu gramów, czyli pośrednie pod względem wielkości, mogą przyspieszać powstawanie pęcherzyków.

Stworzenie tak małej czarnej dziury wymagałoby ściśnięcia kilkudziesięciu gramów materii w przestrzeń wielokrotnie mniejszą od protonu, co obecnie nie jest możliwe ani technicznie, ani astrofizycznie. Jednak w czasie tuż po Wielkim Wybuchu czarne dziury mogły powstawać, zanim pojawiły się gwiazdy, gdy niezwykle gorąca, gęsta materia tworzyła zmarszczki i stygła. Te pierwotne czarne dziury mogły mieć odpowiednią wielkość, aby zapoczątkować powstawanie pęcherzyków rozpadu próżni, lub mogły skurczyć się do odpowiedniej wielkości później. Astronomowie poszukują dowodów na istnienie małych pierwotnych czarnych dziur, ponieważ mogłyby one również wyjaśniać tajemnicze zjawisko ciemnej materii. Dotąd nie znaleziono żadnych dowodów na ich istnienie.

W 2019 ROKU GREGORY połączyła siły z dwoma fizykami z USA, De-Chang Dai z Case Western Reserve University i Dejanem Stojkovicem z State University of New York w Buffalo. Razem obliczyli, ile małych czarnych dziur byłoby potrzebnych, żeby zniszczyć Wszechświat. Temat ten zafascynował Stojkovicę. „Nie lubię spekulować bez obliczeń, ale kiedy już one są, to nawet jeśli wydają się absurdalne, należy się z nimi zmierzyć – mówi. – Trzeba zacząć traktować to poważnie. A co, jeśli w pobliżu Ziemi znajduje się bąbel? I porusza się z prędkością światła? Lepiej szybko to obliczyć!”

Kiedy Stojkovic podczas spotkania na Florydzie przedstawiał wyniki badań zespołu dotyczących

rozpadu próżni, jeden z obecnych na sali malkontentów zapytał, dlaczego miałby się tym przejmować. Jeśli bąbel próżni rozszerza się z prędkością światła, jeden z nich uderzyłby w nas, zanim zdążylibyśmy zauważyć, że się zbliża. W takim razie po co nam taka wiedza?

To pytanie skłoniło Stojkovicę do głębszej analizy. Współpracując ponownie z Dai oraz Djordje Minicem z Virginia Tech odkrył, że chociaż bąbel próżni porusza się z prędkością światła w pustej przestrzeni, to spowalnia, gdy napotyka masywne obiekty, takie jak gwiazdy i planety. W tym roku Stojkovic, Dai i student Stojkovicę Amartya Sengupta opublikowali preprint zatytułowany „The Signals of the Doomsday” (Sygnały zagłady), w którym opisują, co astronomowie mogliby zobaczyć, gdyby taki bąbel znajdował się w pobliżu: byłby to wybuch światła o określonym widmie. A co, jeśli zobaczymy taki sygnał? „Wtedy trzeba będzie zdecydować, co robić – mówi Stojkovic. – Nie wiem – może po prostu pójść na plażę?”

Bardziej nieszablonoową opcję rozważał Ashoke Sen, fizyk z International Centre for Theoretical Sciences w Bangalurze w Indiach. W 2015 roku Sen opublikował esej, w którym zaproponował, że ludzkość może przetrwać rozpad próżni, wykorzystując ekspansję samej przestrzeni. Czasoprzestrzeń nieustannie się rozszerza, a ekspansja ta wydaje się przyspieszać z powodu tajemniczego zjawiska zwanego ciemną energią. W miarę jak przestrzeń rozszerza się coraz szybciej, odległe miejsca będą oddalać się od siebie z prędkością większą niż prędkość światła. Sen zasugerował, że gdyby ludzkość mogła rozmieścić się w odległych układach gwiazdnych wystarczająco wcześnie w czasie kosmicznym, to przynajmniej niektórzy ludzie uniknęliby śmierci w wyniku rozpadu próżni. Rozszerzający się Wszechświat rozdzieliłby ich szybciej niż jakikolwiek nadciągający bąbel zagłady, którego źródłem byłaby transformacja pola Higgsa. Artykuł pojawił się w internecie w prima aprilis, ale Sen rozwijał tę ideę w tym samym roku dalej, co sugeruje, że traktuje ją poważnie – przynajmniej do pewnego stopnia.

JEST WIELE RZECZY dotyczących rozpadu próżni, których fizycy nadal nie wiedzą. Lepsze pomiary ze zderzaczy cząstek mogłyby radykalnie zmienić obliczenia, podobnie jak znalezienie dowodów na istnienie małych czarnych dziur. Ale jest jeszcze większa tajemnica, której w najbliższym czasie prawdopodobnie nie uda nam się rozwikłać.

Obliczając prawdopodobieństwo rozpadu próżni, fizycy korzystają z teorii zwanej Modelem Standardowym fizyki cząstek elementarnych. Model Standardowy obejmuje wszystkie znane cząstki i z niezwykłą precyzją opisuje wyniki eksperymentów. Wiemy jednak, że jest on niekompletny. Model ten zawodzi, gdy fizycy próbują go użyć do opisanie cząstek o niezwykle wysokiej energii, zwanej energią Plancka. Gdybyśmy mogli zderzyć dwa protony o tej energii, która jest mniej więcej równa energii zawartej w pełnym zbiorniku paliwa typowego samochodu, nie byłibyśmy w stanie przewidzieć, co się stanie: Model Standardowy podałby nam nonsensowne wyniki.

Aby to naprawić, do Modelu Standardowego należy dodać coś nowego. Fizycy spodziewają się, że istnieją jeszcze inne pola: nowe ustawienia Wszechświata, których nie zauważyliśmy, ponieważ ich zmiana wymaga ogromnych ilości energii. Pola te odpowiadałyby niezwykle masywnym, nieodkrytym jeszcze cząstkom. Jeśli jednak te nowe pola wpływają na pole Higgsa, wszystko staje się niepewne. Istnienie takich pól i cząstek może zmienić prawdopodobieństwo rozpadu próżni, a nawet oznaczać, że nie ma drugiej doliny dla pola Higgsa.

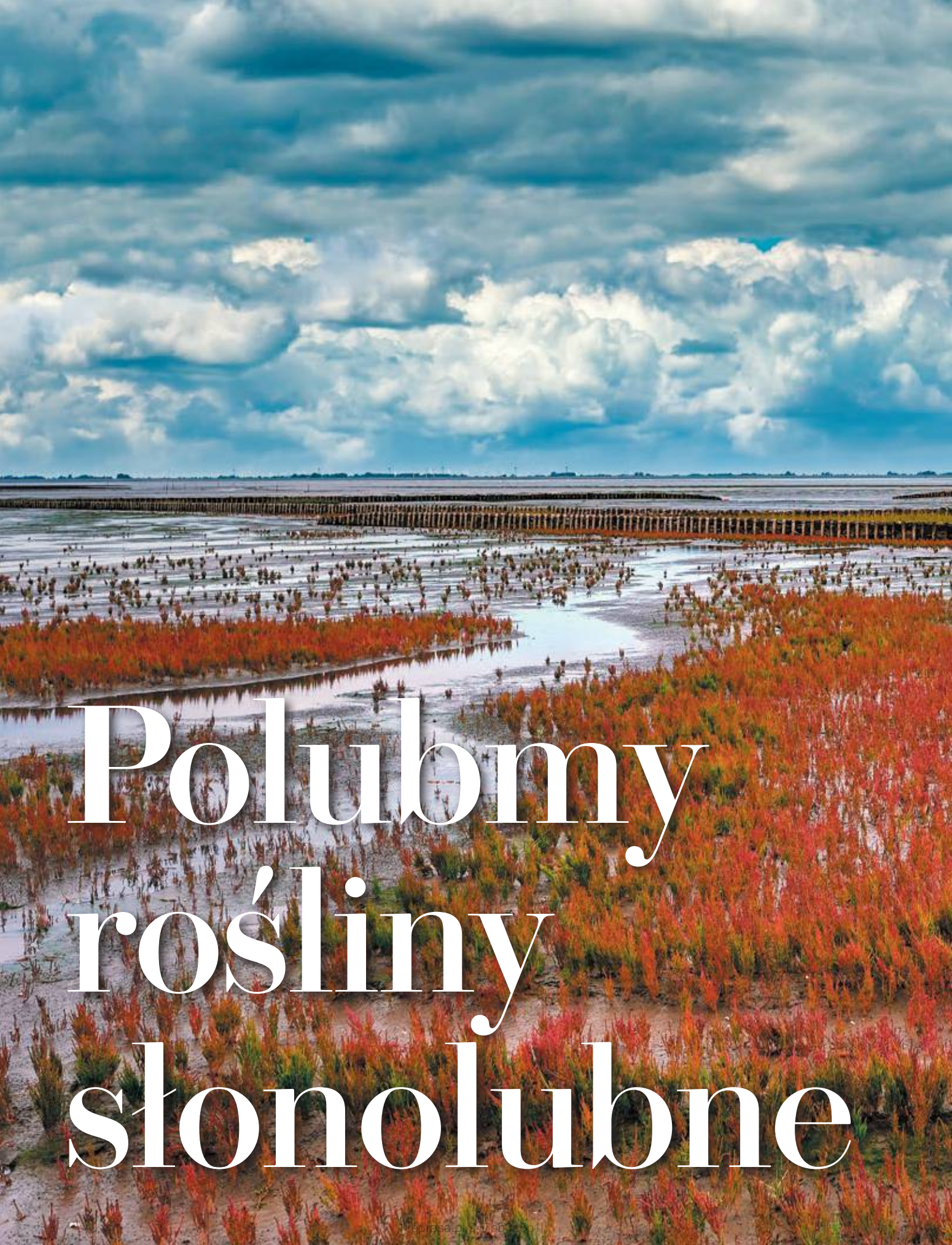
W tym momencie można by pomyśleć, że praktycznie nic nie wiemy o rozpadzie próżni. Jednak mamy



jeden kluczowy dowód, który mówi nam całkiem sporo: my żyjemy. Sam fakt, że rozpad próżni jeszcze nie nastąpił – że Wszechświat mógł istnieć przez 13,7 mld lat bez niszczącego go bąbla – nakłada ograniczenia na prawdopodobieństwo rozpadu próżni.

Założmy że fizycy, opierając się na Modelu Standardowym, obliczyli, iż istnieje 90-procentowe prawdopodobieństwo, że bąbel próżni dotarłby już do nas. Może to brzmieć przerażająco, ale zastanówmy się przez chwilę. Zasadniczo takie same prawdopodobieństwo obowiązywałoby również w przeszłości. Dla przykładu, tysiąc lat temu prawdopodobieństwo uderzenia przez bąbel próżni wynosiło już 89,999999% (wówczas prawdopodobieństwo było nieco niższe, ponieważ Wszechświat był trochę młodszy, co oznacza, że bąbel miałby znacznie mniej czasu, aby do nas dotrzeć). Oczywiście, nie zostaliśmy unicestwieni, więc obliczenia oparte na 90-procentowym prawdopodobieństwie musiałyby coś pomijać. „Wszechświat byłby niestabilny, a to oznaczałoby, że aby go ustabilizować, musiałaby istnieć nowa fizyka. W przeciwnym razie nie byłoby nas tutaj” – mówi Schwartz.

Sam fakt naszego istnienia może nam powiedzieć o prawach fizyki coś, co wykracza daleko poza możliwości naszych badań. Gdyby fizycy obliczyli wysokie prawdopodobieństwo rozpadu próżni, a mimo to rozpad próżni nadal nie nastąpił, niemal na pewno oznaczałoby to, że w odległej drugiej dolinie pola Higgsa znajduje się zbiór nowych pól kwantowych, których Model Standardowy nie uwzględnia. Nie jesteśmy w stanie zmierzyć tych pól obecnie i nie będziemy mogli zrobić tego wkrótce. Ale może się uda to w utopijnej przyszłości pośród gwiazd. A obliczenia, które wykonujemy teraz, mogą wskazać naszym potomkom, gdzie mają szukać. ■



# Polubomy rośliny słonolubne

Zasolenie gleb na świecie postępuje.  
Halofity, które je tolerują, mogą  
stanowić pożywienie zarówno  
dla zwierząt, jak i ludzi  
RACHEL PARSONS



Soliród zielny (*Salicornia europaea*), smaczna roślina halofilna, rośnie dziko wzdłuż wybrzeża Morza Północnego; rolnicy zaczynają ją również uprawiać jako pożywienie dla ludzi.

D

**WADZIEŚCIA LAT TEMU** holenderski rolnik Hubrecht Janse zdał sobie sprawę, że los jego trzypokoleniowego gospodarstwa rodzinnego wkrótce się odmieni. W 2004 roku rząd zainstalował śluzę w tamie oddzielającej błękitne jezioro Veere od Morza Północnego. Otwarcie śluzy miało umożliwić dopływ wody morskiej, co ograniczyłoby zakwity szkodliwych glonów, często występujące w stagnujących wodach jeziora. Jednak to połączenie z morzem oznaczało, że woda w jeziorze stanie się bardziej słona. „A dla nas – mówi Janse – to był problem.”

Farma Jansego to 65-hektarowe gospodarstwo, płaska mozaika pól uprawnych, gdzie rosną buraki cukrowe, cebula, ziemniaki, pszenica oraz trawa na nasiona. Leży tuż przy południowym brzegu jeziora Veere. Zasolenie gleby, spowodowane przenikaniem słonej wody, oznaczało, że pola położone najbliżej jeziora staną się bezużyteczne. Zasolenie od tysiącleci jest wrogiem rolnictwa, ponieważ, choć wiele roślin toleruje niskie lub umiarkowane stężenie soli w wodzie i glebie, jej wysoki poziom obniża plony lub całkowicie niszczy uprawy, zakłócając proces osmozy, który pozwala roślinom transportować wodę w tkankach.

Janse zastanawiał się, czy nie zacząć uprawiać solirodu (*Salicornia* L.), halofitu – rośliny przystosowanej do słonych środowisk. Przecież ta dziko rosnąca roślina pokrywała okoliczne tereny. Soliród ma bezlistny, mięsisty pęd, jest soczysty, chrupiący i słonawy. Tubyłcy od wieków jedli go na surowo lub po ugotowaniu. W 2006 roku Janse rozpoczął swoją pierwszą uprawę *Salicornia europaea*, solirodu zielonego, zwanego też morskim szparagiem. Dziś w jego gospodarstwie uprawia się również przypołudnik kryształkowy (*Mesembryanthemum crystallinum*, ang. *ice plant*), zatrwian morski (*Limonium* Mill., ang. *sea lavender*) i kowniatek nadmorski (fenkuł, koper morski, *Crithmum maritimum* L., ang. *sea fennel*) – wszystkie te rośliny to halofity – a także tradycyjne warzywa na dalszych polach. Janse mówi, że przypołudnik kryształkowy jest bardzo popularny – jego młode, delikatne liście są pikantne, kwaskowe. Zatrwian ma drobne, smukłe liście o ostrosłonym smaku, często wykorzystywane w salatkach. Z kolei kowniatek morski (*Crithmum maritimum* L.), zwany także fenkułem lub koprem morskim, charakteryzują mięsiste łodygi i liście, które zazwyczaj gotowane lub duszone podaje się jako dodatek do dań.

Na świecie występuje ponad 7 tys. jadalnych halofitów. Ze starożytnych tekstów wynika, że od tysięcy lat ludzie wykorzystywali te rośliny jako pożywienie, lekarstwo i opał. W zapisach historycznych pojawiają się jako gotowane, fermentowane, marynowane i surowe. Jednak dopiero w latach 60. naukowcy zaczęli

badać ich potencjał. Badania wykazały, że można je uprawiać na masową skalę, co może być nowatorskim sposobem zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego. Dodatkowo odkryto, że halofity są bogate w składniki odżywcze korzystne dla zdrowia człowieka. Zawierają przeciwutleniacze i substancje przeciwzapalne, a pewne ich gatunki wykazują działanie przeciwnowotworowe i przeciwbakteryjne. Niektóre mogą także obniżać poziom glukozy i lipidów we krwi, w tym cholesterolu.

Janse, a także inni rolnicy sprzedają halofity firmom spożywczym jako dodatki do żywności. Soliród z jego farmy trafia do musztardy, majonezu i karmelu jako niskosodowy zamiennik soli. Jest również składnikiem zielonego makaronu, musującej herbaty i ginu. Co więcej, wiele roślin spożywanych przez nas na co dzień wywodzi się od halofitów lub wciąż nimi jest. Burak liściowy (boćwina) i zwyczajny pochodzą od roślin, które pierwotnie rosły w słonych środowiskach basenu Morza Śródziemnego. Uprawa daktylowców i palm kokosowych dała początek przemysłowi wartemu miliardy dolarów. Quinoa, odporna na trudne warunki południowoamerykańska roślina halofityczna, zdobyła popularność ponad dekadę temu, a dziś można ją znaleźć w sklepach i restauracjach na całym świecie. Naukowcy twierdzą, że dodanie większej liczby roślin słonolubnych do codziennej diety to naturalny kolejny krok naprzód. „Halofity to przyszłość, bez dwóch zdań – mówi Giulia Mozzo, młodsza badaczka z Uniwersytetu degli Studi di Firenze we Włoszech. – Większość ludzi nie zdaje sobie sprawy, z jak wielkim problemem mamy do czynienia.”

TEN PROBLEM TO gwałtowny wzrost zasolenia gleby na rozległych obszarach planety, pogłębiany przez zmiany klimatu. Podnoszący się poziom mórz wypycha słoną wodę coraz dalej w głąb przybrzeżnych terenów rolniczych; według Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO), producenci żywności – od wschodniego wybrzeża USA po Bangladesz – ugorują lub całkowicie porzucą nadmorskie pola uprawne właśnie z powodu zasolenia.

Rachel Parsons to dziennikarka multimedialna z Los Angeles; pisze o klimacie, środowisku i ekologii.

Artykuł powstał we współpracy z Pulitzer Center.

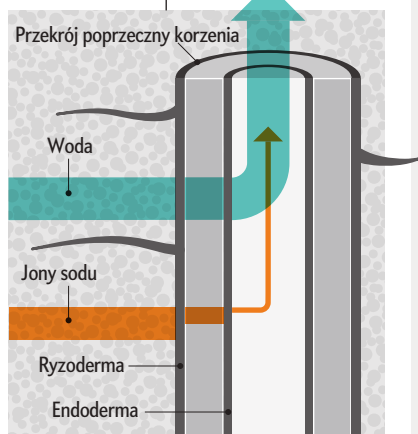
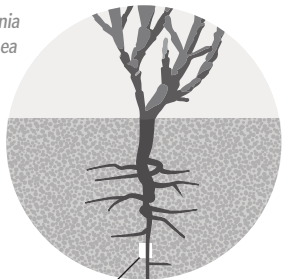
# Jak rośliny radzą sobie z zasoleniem gleby

Wiele roślin może tolerować pewną ilość soli w glebie, na przykład chlorku sodu, ale halofty radzą sobie z dużo wyższym poziomem zasolenia, który może wynikać z wtargnięcia wody morskiej, z suszy, a nawet z długotrwałego nawadniania. Halofty, takie, jak soliród i komosa ryżowa (quinoa), stosują jedną lub kilka strategii, aby poradzić sobie z nadmiarem soli: ograniczają przenikanie soli do korzeni; magazynują sól w ochronnych „kieszonkach” wewnątrz komórek liści, by nie gromadziła się w pozostałej części komórki, gdzie mogłaby działać toksycznie, lub wydzielają sól przez pęcherzyki albo gruczoły na górnej powierzchni liści. Za te działania odpowiadają białka znajdujące się w korzeniach, łądych i liściach.

## BLOKOWANIE

Korzenie solirodu mogą ograniczać przenikanie jonów tworzących sole, takich jak sód i jony chlorkowe. Zewnętrzna warstwa korzeni, czyli ryzoderma, może być niemal całkowicie nieprzepuszczalna dla soli, a wewnętrzna warstwa (endoderma) zawiera woski w ścianach komórkowych, które odpychają jony, jednocześnie przepuszczając wodę.

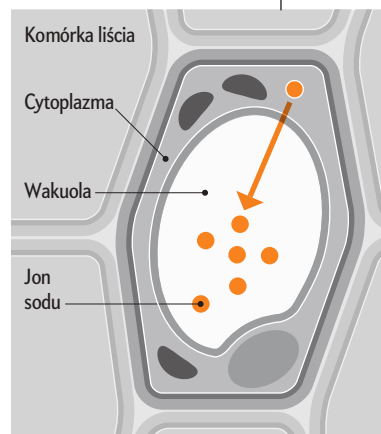
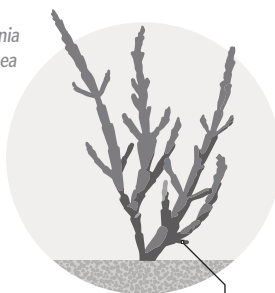
*Salicornia europaea*



## MAGAZYNOWANIE

Soliród i inne halofty potrafią przemieszczać nadmiar sodu i chlorków do ochronnych kieszonek zwanych wakuolami, znajdujących się wewnątrz komórek liści. Dzięki temu jony nie uszkadzają enzymów ani struktur roboczych w cytoplazmie.

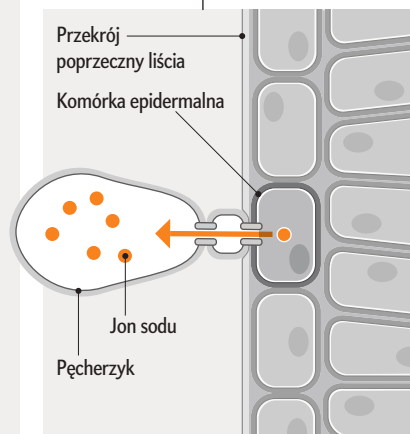
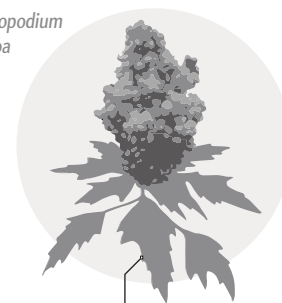
*Salicornia europaea*



## WYDALANIE

Komosa ryżowa przemieszcza jony soli do pęcherzyków na powierzchni liścia. Gdy taki pęcherzyk się wypelni, może pęknąć, uwalniając jony. Inne halofty mają gruczoły solne, które wydzielają jony na powierzchnię liścia, gdzie mogą one zostać spłukane przez deszcz lub zdmuchnięte przez wiatr.

*Chenopodium quinoa*



Problemem są również dłuższe i dotkliwsze susze, ponieważ przyspieszają parowanie, zostawiając w glebie większe stężenie soli mineralnych. Nawadnianie w rolnictwie również zwiększa zasolenie gleb na terenach śródlądowych na całym świecie. Woda używana do nawadniania zawiera naturalnie występujące pierwiastki – sód, magnez, wapń i potas – które tworzą sole i z czasem gromadzą się w glebie w miarę wielokrotnego odparowania tej wody. Według FAO, zasolenie eliminuje z produkcji nawet 1,5 mln hektarów ziemi uprawnej rocznie na całym świecie i obniża plony na niemal 46 mln hektarów.

Zasolenie dotyczy już 20% całkowitej powierzchni ziemi uprawnej na globie i 33% gruntów nawadnianych. Badacze przewidują, że problem ten będzie się pogłębiać do 2050 roku z powodu nasilających się susz – które eliminują deszcze mogące

rozcieńczać sole w glebie – oraz rosnących temperatur, które zwiększają parowanie. „Braki wody słodkiej będą jedną z najpoważniejszych konsekwencji zmian klimatu” – mówi Ed Barrett-Lennard, ekspert ds. zasolenia gleb z Murdoch University w Perth, w Australii.

Na polach o wysokim zasoleniu i przy ograniczonym dostępie do wody słodkiej uprawa haloftów (roślin słonolubnych) może być dla rolników jedynym rozwiązaniem dla rolników. Przykładem jest łoboda solniskowa (*Atriplex halimus* L., ang. saltbush, orache), krzew wykorzystywany jako pasza dla owiec w Australii Zachodniej, który rośnie w suchych, słonych środowiskach, takich jak pustynie, solniska, śródlądowe bagna, a co istotne – także na nawadnianych polach uprawnych. Pasza może składać się w jednej trzeciej, a nawet w połowie z łobody solniskowej, co znacząco zmniejsza



Mieszkańcy wioski Fiakor w Ghanie założyli staw rybny (po lewej), aby wspomóc wyżywienie lokalnej społeczności; na przyległym, zasolonym terenie będą uprawiać soliród krzaczasty jako paszę dla ryb. Odchody ryb posłużą do nawożenia roślin.

ilość słodkiej wody potrzebnej do wyprodukowania pożywienia dla owiec, mówi Barrett-Lennard.

Ekologowie widzą też szersze zastosowania halofitów, ponieważ te rośliny mogą rozwijać się w trudnych ekosystemach – od stref tropikalnych po umiarkowane – i oferują wiele korzyści. Na przykład na terenach podmokłych chronią łąd przed falami sztormowymi, huraganami i podnoszącym się poziomem mórz, a także mogą magazynować ogromne ilości węgla. Skala korzyści środowiskowych, jakie mogą dać halofity, będzie zależeć od tego, jak szeroko będą wykorzystywane – przez ludzi lub zwierzęta.

PEWNEGO JASNEGO, WIETRZNEGO POPOŁUDNIA w maju zeszłego roku Yanik Nyberg, dyrektor generalny NARA Climate Solutions – firmy wykorzystującej halofity do rewitalizacji zdegradowanych słonych mokradel w południowo-zachodniej Hiszpanii – poprowadził mnie wytężoną ścieżką przez rozległe tereny bagienne wzdłuż rzeki Gwadalkiwir. Dla mojego niewprawionego oka nie wyglądało to imponująco, ale Nyberg był wyraźnie zachwycony rosnącymi wszędzie wokół niskimi, kępiastymi roślinami. Zaledwie kilka miesięcy wcześniej, jak mi powiedział, ten obszar wyglądał jak pustynia.

Przykucnął, wyrwał z ziemi suchą, przypominającą chwast roślinę i poprosił, abym ją polizała. Poczulałam, jakby ktoś wsypał mi do ust zawartość solniczki. Sódówka nadmorska (*Suaeda maritima* (L.) Dumort., ang. *seepweed*) magazynuje pobraną sól w swojej

biomasie, wyjaśnił Nyberg. Bardzo słony smak nie ma większego znaczenia, ponieważ – podobnie jak inne halofity rosnące na tych dawniej jałowych mokradłach – „a na każdym 10 m<sup>2</sup> rośnie tu dziko siedem-osiem różnych gatunków”, mówił Nyberg – sódówka nadmorska nie jest przeznaczona do spożycia przez ludzi. NARA zbiera rośliny, rozdrabnia je i sprzedaje powstałą biomasę duńskiej firmie Halorefine, która pozyskuje z nich bogate w związki fenolowe substancje wykorzystywane w suplementach diety i kosmetykach. To, co zostaje po ekstrakcji, jest dalej przetwarzane na karmę dla ryb, którą kupują ich hodowcy – ostatecznie więc łąduje na naszych talerzach.

Do uprawy roślin paszowych są dziś wykorzystywane ogromne ilości słodkiej wody i ziemi. Naukowcy i rolnicy na całym świecie próbują uzupełniać paszę dla zwierząt halofitami uprawianymi na gruntach marginalnych – takich jak zdegradowane wybrzeża czy pustynie – które nie konkurują z najlepszymi gruntami rolnymi o wodę. W Stanach Zjednoczonych na przykład rolnicy karmią bydło trawą solną (*Distichlis spicata*).

Rośliny rosnące u naszych stóp, których lany ciągnęły się aż po horyzont, wyglądały jak lodygi pokryte setkami maleńkich zielonych kwiatów – bo zdążyły już wydać nasiona. Miesiąc wcześniej były zaledwie siewkami. „Tak szybko może nastąpić regeneracja, praktycznie bez naszego udziału – mówił Nyberg. – To w pewnym sensie najprostszy rodzaj rolnictwa: wystarczy zalać nieco ziemi i pozwolić naturze robić to, co potrafi najlepiej.

Ludzie na całym świecie wykorzystują naturalny wzrost halofitów w swoich regionach. Kilka tygodni po tym, jak próbowałam sodówki nadmorskiej w Hiszpanii, dotarłam do ghańskiej wioski Fiakor, aby odwiedzić jedno z takich gospodarstw – projekt odtworzenia środowiska prowadzony przez Seawater Solutions, firmę deweloperską i siostrzaną wobec NARA. Seawater Solutions inwestuje w projekty odtwarzania terenów podmokłych na zdegradowanych terenach przybrzeżnych. Fiakor leży na wewnętrznej krawędzi dużej słonowodnej laguny na południowo-wschodnim wybrzeżu Ghany. To małe miasteczko jest skupiskiem niskich betonowych budynków, rozciągających się na wąskim piaszczystym pasie, który wciną się w głąb laguny. Między ciasno ustawionymi domami, na błotnistych połaciach, kozy pigmejskie skubią niską trawę.

Około 300 mieszkańców Fiakor utrzymuje się z rybołówstwa, które stało się jednak bardzo niepewnym źródłem dochodu ze względu na przelowiecie i nadmierny rozrost glonów. Z tego powodu wielu młodych ludzi opuściło wioskę. Aby stworzyć nowe źródło dochodu, około 2004 roku wieś zezwoliła firmie wydobywającej sól na założenie salin na północno-wschodnim krańcu miejscowości. Liczono na to, że będzie można zbierać minerał i zarabiać na dzierżawie gruntu, korzystając z boomu na eksport soli w Ghanie – choć często wiąże się on z wysiłkiem. Proces ten jednak doprowadził do zniszczenia roślinności chroniącej wyspę, w tym namorzynów. Biznes upadł w 2014 roku, a Fiakor zostało z jałowym terenem, bardziej niż wcześniej narażonym na sztormy, powódzie i podnoszący się poziom morza.

Seawater Solutions rozpoczęło działalność pod koniec 2020 roku. Raphael Ahiakpe, dyrektor ghańskiego oddziału firmy, powiedział mi, że jednym z pierwszych pomysłów było szkolenie rolników w uprawie halofitów przeznaczonych do spożycia przez ludzi. Po czym uśmiechnął się i dodał, że mieszkańcy szybko wyjaśnili mu, że jego soliród krzaczasty (*Sarcocornia frutescens*) to jedzenie dla kóz, a nie dla człowieka. Zamiast próbować przekonywać ludzi do jedzenia czegoś, czego nie chcą, Fiakor włącza soliród krzaczasty – bardziej wytrzymały, wieloletni rodzaj solirodu – do czegoś, czego ludzie naprawdę potrzebują: pokarmu dla ryb.

Firma zatrudnia obecnie kilku mieszkańców Fiakor i zasadziła tysiące sadzonek namorzynów na terenie, który wcześniej był wdzierżawiony firmie solnej. Obok jednego z zagajników Ahiakpe oprowadził mnie po sztucznym stawie rybnym o powierzchni około 800 m<sup>2</sup>, w którym hodowano małe tilapie, aby wieś mogła je pozyskiwać, gdy połowy w słonowodnej lagunie zawiodą. Obok stawu, nad brzegiem laguny, *sarcocornia* miała zostać przesadzona z oddalonego o około pół godziny drogi polećka na terenie siedziby firmy, gdzie roślina się dobrze rozwijała.

Odchody rybne ze stawu będą nawozić halofity, a halofity będą żywić ryby – ich nasiona stanowią bogatą w białko i tłuszcz karmę. Wieś zarabia na dzierżawie gruntu firmie. Seawater Solutions otrzymało też akredytację organizacji zajmującej się handlem kredytami węglowymi, aby sprzedawać je za sekwestrację

dwutlenku węgla w korzeniach solirodu i namorzynów. Firma twierdzi, że dzieli się zyskami z wioską.

Doris Atitsogbui, kierowniczka terenu i mieszkaneczka Fiakor od urodzenia, powiedziała mi, że wieś była „szczęśliwa i podekscytowana”, kiedy Seawater Solutions przedstawiło swój projekt, bo w Fiakor nie było żadnych miejsc pracy. Chciałaby, by podobne projekty rozwinęły się w całym regionie delty Wolty, gdzie znajdują się setki innych wiosek rybackich. Słonorośla mogłyby pomóc w rozwiązaniu wielu problemów społecznych.

**N**AUKA O HALOFITACH znajduje również zastosowanie w uprawie tradycyjnych roślin. Naukowcy z Uniwersytetu Nauki i Techniki Króla Abdullaha w Arabii Saudyjskiej uprawiali odmiany pomidora porzeczkowego (*Solanum pimpinellifolium*), małego dzikiego krewnego zwykłego pomidora, który dobrze rośnie w Peru, i odkryli pięć odmian radzących sobie w silnie zasolonym środowisku. Badacze analizują geny tych odmian, aby wprowadzić je do innych pomidorów. Naukowcy z University of California w Davis pracują nad stworzeniem transgenicznej lucerny, prosa perłowego, orzeszków ziemnych i ryżu, które będą mogły rosnąć w zasolonej glebie.


Jednak nadal istnieje wiele przeszkód. Niektóre halofity wytwarzają kwas szczawiowy, toksyczny dla nerek, gdy spożywa się go w dużych ilościach. Wiele tych roślin to halofity „wciągające”, co oznacza, że absorbują sól ze swojego otoczenia. Ta cecha sprawia, że są bogate w sól, co może stanowić problem dla osób z nadciśnieniem. (Halofity „wykluczające” radzą sobie z zasolonym środowiskiem, blokując przedostawanie się sodu do korzeni.) Agronomowie odkryli jednak, że poziom sodu w wielu zbieranych roślinach można znacznie obniżyć przez gotowanie.

Uprawa tych roślin również bywa skomplikowana, ponieważ wiele z nich nadal wymaga pewnej ilości słodkiej wody. Soliród, na przykład, potrzebuje niższego poziomu zasolenia, aby wiosną wykiełkować. „Tłumacząc innym rolnikom w moim regionie – wyjaśnia Janse – że dostępność świeżej wody w odpowiednim momencie jest jeszcze ważniejsza niż w przypadku zwykłych upraw”.

Być może największym wyzwaniem dla rolników, według Jansego, jest to, że popyt na halofity jest niski poza regionami takimi, jak jego. Większość ludzi nigdy o nich nie słyszała. Jeśli już się je spotyka, to zazwyczaj pochodzi z małych farm i są oferowane w ekskluzywnych supermarketach lub restauracjach – ten paradoks nie umyka uwagi zwolenników halofitów, którzy twierdzą, że dodanie większej liczby tych roślin do globalnej diety mogłoby pomóc w walce z głodem i brakiem bezpieczeństwa żywnościowego w krajach o niskich dochodach.

Aby zwiększyć świadomość społeczną, niektórzy agronomowie stali się kucharzami testowymi, zdając sobie sprawę, że jeśli te warzywa mają się rozpowszechnić, ludzie muszą ich spróbować. Zwolennicy halofitów odkrywają, że im więcej konsumenci wiedzą o wpływie rolnictwa na środowisko, tym bardziej są otwarci na te rośliny. W marcu 2024 roku zespół z Università degli





Soliród gęsto porasta chronione słone bagno u wybrzeży Morza Śródziemnego w Hiszpanii. Jego mięsiste pędy można jeść na surowo lub po ugotowaniu.

Studi di Firenze przeprowadził małe, jakościowe badanie w celu oceny przydatności tetragonii czteroróżnej (*Tetragonia tetragonioides*, szpinak nowozelandzki), gatunku ciemnozielonego halofitu, jako alternatywnego warzywa dla szpinaku. Szpinak jest stosunkowo odporny na sól, ale tetragonia może być bez problemów uprawiana w szklarniach przy znacznie wyższym stężeniu soli – nawet dwukrotnym.

Uczestnicy badania nie zostali poinformowani, jak roślina była uprawiana. Niewielka ich część stwierdziła, że zapłaciłaby za tetragonię więcej niż za szpinak, po prostu dlatego, że bardziej im smakowała. Jednak odsetek ten niemal się potroił, gdy dowiedzieli się, że tetragonia jest uprawiana w sposób zrównoważony przy mniejszym zużyciu słodkiej wody. (Wyniki badania nie zostały jeszcze opublikowane.) „Ludziom łatwo jest zadeklarować, że postąpiłoby w określony sposób – mówi Mozzo, który pracował nad badaniem – jednak ten wynik potwierdza, że można ich do tych roślin przekonać”.

Zwolennicy halofitów przypominają, że przed 2010 rokiem niewielu konsumentów spoza Ameryki Południowej знаło komosę ryżową. Zmieniło się to wtedy, gdy w 2013 roku ONZ ogłosiła Międzynarodowy Rok Komosy Ryżowej i sfinansowała kampanię edukacyjną skierowaną do rolników i konsumentów.

Jednak polityka rolna może stwarzać „wąskie gardła i przeszkody” dla szerszego rozpowszechnienia uprawy halofitów, mówi Kate Negacz, badaczka polityki rolnictwa słonolubnego na Vrije Universiteit w Amsterdamie. W wielu krajach lub stanach władze dotują głównie tradycyjne uprawy; jeśli rolnik uprawiający kukurydzę na dotowanym polu chciałby przejść na uprawę przypołudnika kryształkowego z powodu zasolenia gleby, prawdopodobnie nie otrzymałby na to dotacji. W wielu miejscach zarządzanie wodą należy do lokalnych rad wodnych, które trzeba by przekonać, że halofity są realnym rozwiązaniem. Niektórzy pokładają nadzieję w Europie, gdzie rozmowy polityków na temat praktyk rolnictwa słonolubnego stają się coraz częstsze. „Coś drgnęło” – mówi Negacz.

W Ghanie, podobnie jak w Holandii i Hiszpanii, naukowcy, przedsiębiorcy i rolnicy uczą się, że halofity sprawdzają się wtedy, gdy pasują do lokalnych potrzeb kulturowych i ekonomicznych. W Holandii, jak mówi Janse, normalnym widokiem są halofity na talerzu. W Ghanie rośliny te odgrywają inną, ale równie ważną rolę, dostarczając pożywienia dla ryb i zapewniając dochód lokalnym mieszkańcom.

W coraz bardziej zasolonym świecie pilnie potrzebujemy zróżnicowanego wykorzystania tych roślin. Agronomowie, gleboznawcy i ekolodzy na niemal każdym kontynencie pracują nad problemem zasolenia gruntów rolnych, a halofity rosną już w bardzo zróżnicowanych strefach klimatycznych. Jak dowiedli uczestnicy testu smaku tetragonii na Università degli Studi di Firenze, ludzie mogą zaakceptować te rośliny – nawet jeśli jeszcze o tym nie wiedzą. ■

Bechell Parsons

Z NASZEGO ARCHIWUM

Więcej jedzenia, mniej odpadów. Chad Frischmann i Mamta Mehra; listopad 2021.



Maj 2024 roku. Członkowie ekspedycji Caleb Walcott-George i Arnar Pall Gíslason za pomocą przenośnej wiertnicy wydobywają rdzenie skalne z nunataka wystającego ponad powierzchnię lądolodu grenlandzkiego. Próbki skały mogą pomóc w rozwiązaniu ważnej zagadki klimatycznej: kiedy po raz ostatni Grenlandia była zielona?

# SEKRETY GRENLANDII

Rozpad drugiej co do wielkości  
czaszy lodowej na świecie  
zatopiłby miasta na całym globie.  
Czy grenlandzki lód jest bardziej  
wrażliwy, niż nam się wydaje?  
Tekst i zdjęcia JEFFERY DELVISCIO





**CZŁONKOWIE EKSPEDYJCJI** GreenDrill zgromadzili się wokół wiertnicy w namiocie rozbitym na powierzchni lodowej pokrywy Grenlandii. Maszyna pracowała, trzęsąc się i zawodząc. Od wielu dni przebijała powoli stary, zbity lód, aby dotrzeć do znajdującego się pod nim skalnego podłoża.

**Jeffery DelViscio** jest głównym redaktorem multimediów w „Scientific American”. Podczas miesięcznej ekspedycji towarzyszył zespołowi naukowemu GreenDrill w badaniu lądolodu grenlandzkiego, na którym spędził trzy tygodnie, przekonując się, jak to jest pracować cały czas w ujemnej temperaturze.

Na zewnątrz niebo było bezchmurne, świeciło słońce. Wiatr, który wiał od strony najwyższego punktu kopuły lodowej znajdującego się 1200 m wyżej i w odległości setek kilometrów na zachód, to słabł, to się wzmacniał. Pod wpływem jego podmuchów namiot trząsł się niczym dmuchany dziecięcy zamek zainstalowany przez jakiegoś szaleńca na krańcu świata. Dziewięciu członków ekspedycji – inżynierowie, naukowcy, specjaliści od przetrwania w warunkach polarnych – wiedziało, że już niedługo powinni dotrzeć do litej skały. Jednakże Forrest Harmon, wiertacz obsługujący pokrętło wiertnicy, twierdził, że wciąż nie czuje nadejścia tego kluczowego momentu, gdy metalowy chwytak głowicy wiertła odseparuje rdzeń skalny od podłoża.

Miejsce wierceń nazwane GreenDrill znajdowało się na zamrożonym skraju Strumienia Lodowego Północno-Wschodniej Grenlandii, w skrócie NEGIS (Northeast Greenland Ice Stream). Jest to ogromny, ruchomy jezioro lodu odprowadzający do oceanu od 12 do 16% całej pokrywy lodowej Grenlandii. Jeśliby przenieść go na wschodnie wybrzeże USA, wyglądałaby jak płynący powoli łańcuch górski osiągający w najwyższym miejscu wysokość prawie 2 km, mający od 30 do 50 km szerokości i rozciągający się od Bostonu po Waszyngton. Gdyby cała pokrywa lodowa Grenlandii stopniała, poziom mórz na Ziemi podniósłby się o około 7,3 m. Znaczna część tej powodzi wydostałaby się do oceanu za pośrednictwem NEGIS.

Oczywiście, tak wielki lądolód nie zniknie od razu, ale naukowcy coraz bardziej niepokoją się oznakami jego coraz szybszego topnienia. Niedawny raport wykazał, że co najmniej od 27 lat masa lodu co roku się zmniejsza. Według innych badań niemal wszystkie lodowce spływające z wnętrza wyspy w ostatnich dekadach schudły lub się cofnęły. Sam NEGIS w ciągu ostatnich 10 lat znacznie przyspieszył i zmniejszył swoją grubość.

Elliot Moravec, inżynier mechanik monitorujący wskaźnik ciśnienia płynu wiertniczego, uśmiechnął się, ale tylko lekko. Wyglądało na to, że wreszcie wszystko pójdzie tak, jak trzeba – zanim dotarli na lód, nic się nie udawało. Poprzedzające tygodnie obfitowały w porażki – spore opóźnienia logistyczne, odwoływane lądowania wojskowych samolotów transportowych. Ambitniejszy plan, zakładający wykonanie wierceń znacznie większym wiertłem w dwóch różnych miejscach, został porzucony. Dwaj główni liderzy naukowcy projektu musieli w ostatniej chwili zrezygnować

z wyprawy. Jeden z nich dotarł wprawdzie na Grenlandię, ale zaraz musiał wrócić. Drugi podjął bolesną decyzję, nawet nie próbując dotrzeć na lód. Reszta zespołu przez długie tygodnie była uwięziona w Kangerlussuaq – osadzie na południowo-zachodnim wybrzeżu Grenlandii oddalonej o około 1350 km od wybranego wcześniej miejsca wierceń. A potem nagle w ciągu siedmiu dni trzeba było wykonać ponad 10 lotów, by przetransportować ekipę i wiele ton sprzętu.

Dzisiaj jednak, zaledwie na dwa tygodnie przed końcem ekspedycji, wiertło w końcu dotarło do progu intrygującego odkrycia. Uczestnicy ekspedycji mieli poczucie, że głęboko pod ich stopami może się znajdować coś niezwykłego: zamrożony w skale świat z czasów, gdy na wyspie nie było lodu. Ustalenie, kiedy po raz ostatni ten region świata był zielony, pomogłoby naukowcom z całego świata w znalezieniu odpowiedzi na pytanie o znaczeniu fundamentalnym: czy lądolód Grenlandii może być jeszcze wrażliwszy, niż nam się do tej pory wydawało?

OD CZASU, GDY PREZYDENT Donald Trump ogłosił, że jego administracja pragnie „zdobyć” największą wyspę świata, Grenlandia stała się obiektem powszechnego zainteresowania. Zmiany klimatu odsłaniają tereny niegdyś pokryte lodem, zwiększając presję polityczną na mieszkańców wyspy – dotyczy to również oblewających ją wód, z których znika lód morski. Choć plan obecnej administracji USA mający na celu dobranie się do grenlandzkich zasobów naturalnych jest nowy, to amerykańskie pragnienie, by zająć zmrożoną wyspę i czerpać korzyści z jej eksploatacji, już takie nowe nie jest.

W latach 1956–1957 Korpus Inżynierijny Armii Stanów Zjednoczonych w ramach przedsięwzięcia, nazwanego Snow, Ice and Permafrost Research Establishment (SIPRE) pozyskał pierwsze dłuższe rdzenie lodowe z Grenlandii. Wcześniej Europejczycy i Amerykanie próbowali przez wiele dekad najpierw przebyć, a potem przewiercić pokrywę lodową wyspy. Wciąż spoczywa tu w lodzie Alfred Wegener, „ojciec hipotezy dryfu kontynentalnego”. Zorganizował on cztery ekspedycje, których celem było zbadanie grenlandzkiego lodu. Zginął podczas swojej ostatniej wyprawy w 1930 roku. Tuż przed tym, jak sam stał się częścią grenlandzkiej lodowej księgi, napisał: „Zbliżyliśmy się do nowej ery eksploatacji polarnej charakteryzującej się skutecznym i racjonalnym wykorzystaniem nowych technik. Wszystko, co chcemy i możemy zmierzyć, musi zostać zmierzone na miejscu.”

Artykuł powstał dzięki grantowi od Pulitzer Center.

Członkowie zespołu (od lewej) Tanner Kuhl, Forest Harmon i Elliot Moravec obsługują wiertnicę Winkie Drill ustawioną w jednym z namiotów obozu GreenDrill. Urządzenie zostało zaprojektowane do drążenia otworów zarówno w lodzie, jak i w skałach.



W 1956 roku amerykańscy naukowcy zrobili dokładnie to, o czym pisał Wegener, ale ich obecność na Grenlandii miała tyle samo wspólnego z zimnym lodem, ile z zimną wojną. Rzeczywistym powodem aktywności rządu USA było zwiększenie potencjału wojskowego w Arktyce, by móc szpiegować ZSRR ze znacznie bliższej odległości. Miejsce, z którego uczestnicy SIPRE wydobyli pierwsze głębokie rdzenie lodowe, nazwano Site 2 – oficjalnie było ono celem ekspedycji naukowej, ale równocześnie umieszczono tu tajną instalację radarową pracującą 24 godziny na dobę. Ta rywalizacja geopolityczna umożliwiła dokonanie odkryć naukowych, które wcześniej wydawały się nieosiągalne: wydobyte z lodu rdzenie dały początek międzynarodowemu wyścigowi – rywalizacji, kto głębiej nawierci łądolód. Te pierwsze rdzenie i wszystkie następne stały się czymś w rodzaju klimatologicznego fundamentu, na którym opiera się znaczna część naszej wiedzy na temat gwałtownych wahań ziemskiego klimatu.

Chociaż trudno jest policzyć, ile dokładnie rdzeni lodowych pozyskano, samo zsumowanie długości lodu przechowywanego w zamrażarkach należących do Danii (Grenlandia jest autonomicznym terytorium Królestwa Danii) i USA daje wartość ponad 34 km. Naukowcy przeprowadzili wiele badań, m.in. wydatowali te rdzenie, zmierzili ciśnienie uwięzionych w nich pęcherzyków powietrza, przeanalizowali strukturę śniegu, zidentyfikowali ślady pyłów pochodzących z dawnych erupcji wulkanicznych. Dzięki nim mogliśmy pośrednio

śledzić przebieg wielkich i nagłych zmian klimatu, cofając się o 123 tys. lat w przypadku lodu z Grenlandii i aż o 1,2 mln lat w przypadku lodu z Antarktydy. „Ten nieprzerwany i mający dużą dokładność zapis jest podstawą naszej wiedzy o dawnym klimacie” – mówi Joerg Schaefer, współlider projektu GreenDrill.

Ja sam mam osobiste doświadczenie z jednym z tych „fundamentów”. Przed 25 laty jako magistrant spędziłem miesiąc na statku badawczym unoszącym się u wybrzeży Półwyspu Kalifornijskiego. Celem misji było nawierzenie dna morskiego i wydobywanie z niego rdzeni. Godzinami wykonywałem pomiary – było ich łącznie ponad 30 tys. – wpatrzony w cuchnący, prześniaknięty metanem muł.

Podobnie jak rdzenie lodowe, również rdzenie z osadami dennymi mają liczne, widoczne gołym okiem, poziome warstewki. W lodzie odpowiadają one sezonowym zmianom w wielkości opadów śniegu; w osadach dennych inną barwę ma warstwa letnia, inną – zimowa. Wykonywałem pomiary, których celem było odczytanie sygnału klimatycznego z tych naprzemiennych jasnych i ciemnych pasm. Jednak aby potwierdzić, że te klimatyczne zapisy są zgodne z prawdą, musiałem zweryfikować moje dane z zapisami paleoklimatycznymi, co do których klimatolodzy mieli pewność, że mają związek z chłodnymi i ciepłymi epizodami – były to właśnie rdzenie lodowe z Grenlandii.

W 1999 roku, kiedy prowadziłem badania, złotym standardem były dwa takie rdzenie. Pierwszy uzyskano podczas projektu Greenland Ice Sheet Project 2 (GISP2), drugi pochodził z projektu Greenland Ice Core Project (GRIP). Oba były efektem przyjaznej rywalizacji pomiędzy dwoma zespołami – jednym kierowanym przez naukowców z USA (GISP2), drugim przez badaczy z Europy (GRIP). W tym przypadku obyło się bez tego zimnowojennego sztafazu. Rozpoczynając prawie w tym samym czasie (Amerykanie mieli przewagę jednego sezonu terenowego nad Europejczykami), oba zespoły oddalone od siebie o mniej niż 30 km i ulokowane blisko najwyższego punktu grenlandzkiego łądolodu, zaczęły się ścierać, który pierwszy dotrze do podłoża skalnego wyspy.

W lipcu 1992 roku wygrała Europa. Europejski zespół przewiercił lód grubości niemal 3000 m i zatrzymał się na skale. Gdy rok później swoją pracę zakończyła grupa amerykańska, okazało się, że jej rdzeń jest nie tylko dłuższy, ale poza lodem zawiera też pięciometrowej długości segment ze skalą znajdującą się bezpośrednio pod lodem – była to wyjątkowo rzadka zdobycz.

Te dwie długie i stare kroniki klimatyczne stały się punktami odniesienia dla pomiarów pochodzących z innych miejsc. Mój zapis utrwalaony w osadach dennych sięgał 52 tys. lat wstecz. Mogłem jego warstewki od jasnych (chłodniejsze okresy) do ciemnych (cieplejsze fazy) porównać z rdzeniami lodowymi i sprawdzić, czy zapisy wahań temperatury są ze sobą zgodne. Tak właśnie było.

To samo stwierdziło wielu innych badaczy klimatu. W ciągu trzech dekad, jakie upłynęły od wydobywania tych dwóch grenlandzkich rdzeni, zgrano z nimi dziesiątki zapisów paleoklimatycznych pozyskanych





ze słojuw drzew, koralowców, osadów jaskiniowych i innych naturalnych repozytoriów.

Jednakże przez te wszystkie lata, które badacze spędzili na badaniach lodu, w dużej mierze zaniedbano dokładne przyjrzenie się temu, na czym ów lód leży. To istotna luka w naszej wiedzy czekająca na wypełnienie. „Materiał z podłoża skalnego, niezależnie od tego, czy jest to miękki osad, czy twarda skała, jest niczym słowa opowiadające dzieje grenlandzkiego lądolodu – pod nim znajduje się jeszcze jedna księga informacji, którą chcemy przeczytać” – mówi mi Jason Briner z University of Buffalo, drugi współlider projektu GreenDrill. „Podłoże skalne lodowców to najslabiej zbadany fragment powierzchni skorupy ziemskiej – dodaje Schaefer. – To są nasze księżycowe skały, najrzadsze i najtrudniejsze do nawiercenia na powierzchni globu – praktycznie nie mamy żadnych bezpośrednich obserwacji z tej strefy”

Schaefer i Briner spędzili ponad dekadę, koncentrując swoje wysiłki na wypełnieniu tej wielkiej luki w wiedzy o dawnym klimacie Grenlandii. To, co już zdobyli, wygląda mocno niepokojąco. „Po raz pierwszy w karierze analizuję dane, przez które nie mogę spać po nocach – mówi Schaefer. – Mówią mi one, że lądolód grenlandzki znajduje się w poważnych tarapatach.”

Dane, które go tak przerażają, pochodzą ze skał wydobytych w 1993 roku w ramach GISP2. Podczas gdy rdzeń lodowy stał się bohaterem tysięcy publikacji

naukowych i zwornikiem wiedzy o klimacie globu, rdzeń skalny spod lodu trafił do amerykańskiej przechowalni w stanie Kolorado, gdzie przeleżał w zapomnieniu ponad dwie dekady. Dopiero w 2016 roku Schaefer, Briner i ich współpracownicy ekshumowali go i odczytali niczym odkopaną przez archeologów kronikę dawnych dziejów. Niedługo potem opublikowali w „Nature” artykuł pod tytułem: „Grenlandia w plejstocenie była przez długie okresy niemal pozbawiona lodu.”

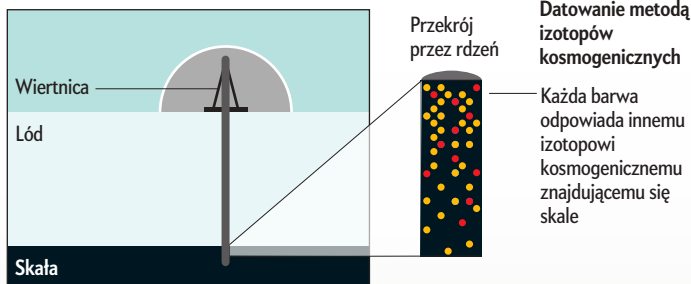
Plejstocen, okres obejmujący ostatnią epokę lodowcową, zaczął się przed 2,6 mln lat i skończył 11 tys. lat temu. Po lądach wędrowały wtedy mamuty włochate, tygrysy szablastozębne oraz pierwsi nowocześni ludzie. Z tego jednego rdzenia badacze dowiedzieli się, że podczas tej epoki lądolód grenlandzki zniknął na dłużej – całkowicie lub prawie całkowicie. „Masz tutaj dane z jednego konkretnego miejsca, które znajduje się pod najgrubszą częścią lądolodu, co oznacza, że musiał on zniknąć w całości, by także ta część wyspy została uwolniona od lodu – mówi Schaefer. – To podłoże skalne mówi nam: O tak, owszem, podczas ostatniej epoki lodowej dość często nie było na mnie lodu.”

„To dało początek koncepcji nazwanej czasami hipotezą wrażliwej Grenlandii” – mówi Paul Bierman, geolog z University of Vermont. Jego zespół znalazł dodatkowe dowody wspierające to niepokojące twierdzenie.

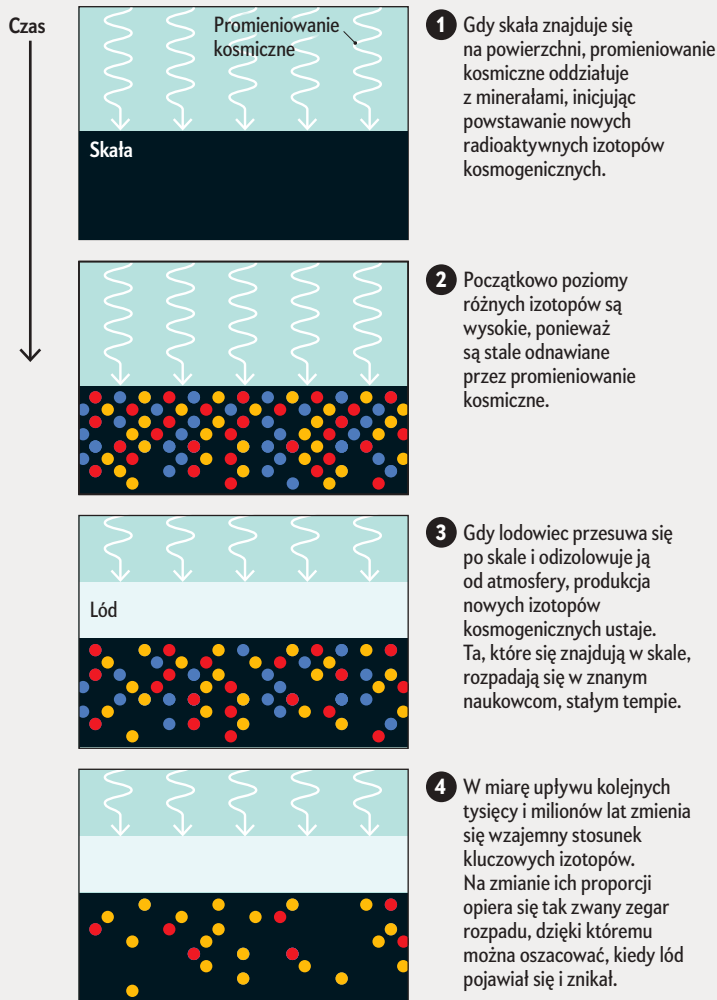
Widok z drona na obóz GreenDrill.

# Skala naszym kronikarzem

Naukowcy z ekspedycji GreenDrill użyli dwóch metod, aby obliczyć, kiedy podłoże skalne lodolodu było po raz ostatni wystawione na działanie światła słonecznego: datowania z użyciem izotopów kosmogenicznych oraz datowania luminescencyjnego. Obie metody wykorzystują dane molekularne uwięzione w skale. Pierwsze podejście zostało opisane poniżej. Datowanie luminescencyjne opiera się na podobnej koncepcji, ale wykorzystuje naturalne promieniowanie pochodzące z pierwiastków znajdujących się w skorupie ziemskiej. Jest ono trudniejsze do przeprowadzenia, a do jego wykonania potrzebny jest namiot chroniący próbki przed zanieczyszczeniem światłem. Połączenie obu metod daje najlepszy efekt.



Naukowcy wydobywają rdzeń skalny z interesującego ich obszaru, a następnie wykorzystują zawarte w nim molekularne wskazówki do odtworzenia przeszłości. Stosunek ilości różnych izotopów promieniotwórczych obecnych w rdzeniu (powyżej) może posłużyć do ustalenia, kiedy powierzchnia była ostatnio wolna od lodu. Oto, jak to działa:



W 2023 roku naukowcy ci opublikowali badania prezentujące „wiele linii dowodowych”, które wskazują, że znaczna część północno-zachodniej Grenlandii była wolna od lodu około 400 tys. lat temu. Wówczas stężenie dwutlenku węgla w atmosferze wynosiło mniej niż 300 części na milion. Dziś wynosi 430 części na milion.

Zespół GreenDrill przygotowuje się do opublikowania nowych ustaleń, jeszcze bardziej niepokojących. Caleb Walcott-George wkrótce zostanie adiunktem na Wydziale Nauk o Ziemi i Środowisku na University of Kentucky, ale podczas swoich dwóch pierwszych sezonów terenowych był jeszcze magistrantem. Ostatnio podczas konferencji naukowej przedstawił mocne dowody na to, że fragment północno-zachodniej Grenlandii trzykrotnie większy od Nowego Jorku, a obecnie pokryty lodem grubości około pół kilometra, był całkowicie lub niemal całkowicie pozbawiony lodu przed zaledwie 7 tys. lat. Był to okres Holoceńskiego Maksimum Termicznego, gdy średnie temperatury w tym regionie świata były wyższe od obecnych tylko o kilka stopni. Walcott-George twierdzi, że Grenlandia może doświadczyć takiego ocieplenia jeszcze przed rokiem 2100.

**N**IEDEŁUGO PO TYM, jak Moravec poczuł, że za chwilę może dojść do pęknięcia wiertła, pozyskano z głębokości 50 m pierwszą w tym sezonie próbkę skały. Kilka minut później rdzeń wyjechał na powierzchnię – znajdował się wewnątrz zamkniętej komory rdzeniowej, gotowy do inspekcji.

Walcott-George i Allie Balter-Kennedy z Tufts University stali obok siebie w małym, zaciemnionym namiocie, zaprojektowanym głównie z myślą o łowieniu ryb na zamrożonych jeziorach. Mrok rozświetlała jedynie pomarańczowa poświata pochodząca z paska LED przymocowanego do sufitu. Balter-Kennedy i Walcott-George odkręcili głowicę wiertniczą na końcu rury, przechylili ją i delikatnie ją potrząsnęli, a wtedy znajdujący się w środku rdzeń zjechał na tackę. Patrzyli na skałę, która mogła im powiedzieć, kiedy po raz ostatni widziała światło dzienne. „Pamiętała” też, jak długo była zagrzebana pod lodem. Jednak jej pamięć była nietrwała i błysk światła słonecznego mógł ją wyzerować.

Niektóre minerały w skałach zachowują się jak akumulatory, które „ładują się”, gdy zostają zagrzebane. Promieniotwórczy rozpad pierwiastków otaczających ziarna skalne pozbawia je elektronów, co powoduje luminescencję ziaren, chociaż same skały nie świecą w sposób widoczny. „Potrafimy określić tempo tego ładowania, a przez to ustalić, jak długo ziarna kwarcu i skaleni były ukryte przez światłem słonecznym” – wyjaśnia Walcott-George. Ponieważ nawet kilka sekund takiego światła może zresetować bezcenny sygnał, za każdym razem, gdy kawałek skały zostaje wydobyty spod lodu, na początek trafia do zaciemnionego namiotu.

Istnieje jeszcze jeden rodzaj magazynu pamięci w podlodowej skale, którego źródłem są umierające gwiazdy. Gigantycznym eksplozjom oznaczającym koniec gwiazdy towarzyszy emisja promieniowania kosmicznego przenikającego galaktykę. Promienie te docierają do ziemskiej atmosfery, inicjując powstanie kaskady cząstek elementarnych, które bombardują

Zdjęcie: Jason Briner/University at Buffalo



powierzchnię planety. „Kiedy wchodzą w kontakt ze skałami, wywołują reakcje jądrowe, podczas których powstają izotopy normalnie niewystępujące na Ziemi – wyjaśnia Balter-Kennedy. – Znamy tempo, w jakim te izotopy są wytwarzane. Jeśli dokonamy ich pomiaru, możemy ustalić, jak długo dana skała była wystawiona na działanie promieniowania kosmicznego – a w naszym przypadku dowiedzieć się, jak długo taka skała nie była zakryta przez lód.”

Metoda ta, zwana datowaniem wieku ekspozycji powierzchniowej, polega na określaniu koncentracji izotopów kosmogenicznych w próbce skały. Fazy wystawienia powierzchni skały na działanie światła słonecznego i fazy jej zagrzebania pod lodem zapisują się w badanych próbkach jako górki i dolki w całkowitej ilości izotopów, gdzie wystawienie na światło oznacza „włączenie” produkcji izotopów, a zakrycie – „wyłączenie”.

Jeśli naukowcy wezmą dwa z tych izotopów, powiedzmy beryl  $^{10}\text{Be}$  i glin  $^{26}\text{Al}$ , i zmierzą ich względne poziomy wzdłuż rdzenia długości wielu metrów, uzyskają zegar kosmogeniczny. Odlicza on czas, w miarę jak izotop rozpada się w przewidywalnym, charakterystycznym dla niego tempie. Kiedy naukowcy widzą fragment rdzenia, w którym zegar zyskał pewną ilość czasu, wiedzą, że powierzchnia terenu była wtedy wystawiona na działanie słońca. Kiedy skała jest

zakopana, wówczas zegar powoli traci ów czas, aż do wyzerowania ilości kosmogenicznych izotopów.

Te dwie metody pozwalają naukowcom niejako „przesłuchać” podłoże skalne. „Pytasz: Kiedy było wolne od lodu? Jak długo? I ile razy było wolne od lodu w niedawnej przeszłości geologicznej?” – mówi Schaefer. Jednakże tego dnia w zaciemnionym namiocie wydawało się, że tym razem nie uda się przesłuchać podłoża skalnego. Wydobyty rdzeń nie był bowiem do końca taki, jakiego oczekiwano. „Gdzie jest to wygładzone podłoże skalne?” – pytał Walcott-George, szukając twardej skały.

„Wydaje mi się, że to, co widzę, to jest lód zwirowy, a pod nim...” – urwała Balter-Kennedy. „Lód wymieszany z ziemią” – dokończył myśl nieco rozczarowany Walcott-George. Badacze postanowili spróbować ponownie następnego dnia.

OKOŁO 5 500 000 000 000 ton. Taka masę wody utracił lądolód Grenlandii, począwszy od 2002 roku. Zasiłała ona oceany. Gdyby tę wodę przelać do olimpijskich basenów, każdy z mieszkańców Afryki i Europy, łącznie około 2,2 mld ludzi, miałby prywatny zbiornik o pojemności 2,5 mln litrów.

Jak dokładnie będzie zazieleniała się Grenlandia, gdy zacznie z niej ubywać lodu – to jedno z największych

Przewodnik polarny Gíslason za pomocą przenośnej wiertnicy Shaw nawierca otwór w twardej skale tworzącej nunatak.



Allie Balter-Kennedy, obecnie na Tufts University, oraz Walcott-George, wkrótce na University of Kentucky, mierzą fragment rdzenia skalnego w zaciemnionym namiocie. Próbki muszą być chronione przed światłem słonecznym, które mogłoby wymazać utrwalone w skale cenne informacje o dawnym klimacie.

pytań dotyczących przyszłości wyspy, na które nauka nie zna jeszcze odpowiedzi. „Tak naprawdę wciąż nie wiemy, w jaki sposób przebiega dezintegracja lądolodu – mówi Briner. – Nie znamy dobrze mechanizmów rządzących procesem rozpadu i nie wiemy, jak szybko taka masa lodu znika”.

W debacie poświęconej Antarktyce słowo „załamanie” wypowiedziane jest często w kontekście kryzysu lodowców szelfowych, takich Thwaites, które są pływającym przedłużeniem antarktycznego lądolodu. Blisko 75% lodu przybrzeżnego Antarktyki przypada na lodowce szelfowe. Jednak los Grenlandii, jak się uważa, jest związany z jej lądowymi strumieniami lodowymi, które otaczają wnętrza wyspy, a z zewnątrz są ograniczone głębokimi fiordami.

Dorthe Dahl-Jensen, duńska klimatolożka zajmująca się analizami rdzeni lodowych, po raz pierwszy przybyła do Grenlandii w 1981 roku. „Wtedy jeszcze nikt nie mówił o globalnym ociepleniu” – mówi. Gdy opowiadała, że pozyskuje rdzenie lodowe do badań klimatycznych, słuchacze sądzili, że robi to, aby przewidzieć nadejście następnej epoki lodowcowej. W ciągu czterech dekad widziała wiele zmian zachodzących na lądolodzie. W 2012 roku, gdy przebywała w środku zlodzonej wyspy, nagle spadł deszcz. „Odczytałam to jako

znak, że globalne ocieplenie zaczyna dobierać się do samego serca lądolodu” – mówi.

Ostatnio Dahl-Jensen poprowadziła projekt East Greenland Ice-Core Project, który zakończył się pozyskaniem rdzenia lodowego długości około 2,4 km (wydobyto też trochę podlodowego mułu i kamieni). Wiercenie wykonano niedaleko miejsca, gdzie zaczyna się strumień NEGIS. Trwało osiem lat. „Kiedy spojrzymy na bilans lądolodu z ostatnich dekad, zobaczymy, że połowę lodu stracił on w wyniku jego topnienia na wybrzeżach, ale za drugą połowę odpowiada przyspieszenie strumieni lodowych” – mówi. Dahl-Jensen zdaje sobie sprawę, że to właśnie strumienie lodowe mogą odegrać kluczową rolę przy podnoszeniu się poziomu mórz, ale jest też świadoma, jak mało o nich wiemy. „Nasze modele matematyczne nie potrafią symulować ich zachowania” – przyznaje.

Dlatego zespół GreenDrill chciał pozyskać próbki podłoża skalnego znajdującego się pod NEGIS, ale z miejsca położonego znacznie bliżej wybrzeża niż wiercenie wykonane przez zespół Dahl-Jensen. Dane z obu miejsc zostaną wykorzystane w modelach, które próbują symulować rzeczywiste zachowania strumieni lodowych. „Nasza wiedza na temat fizyki procesów, które rządzą reakcjami lądolodu, jest wciąż pełna



luk” – mówi Schaefer, przyznając, że obecne symulacje komputerowe mają bardzo duży margines błędu.

Modele zachowania lądolodu działają podobnie, jak powszechnie używane modele klimatyczne – te, które przewidują pogodę na jutro. Te drugie wykorzystują matematykę do symulowania interakcji między rzeczywistymi zjawiskami atmosferycznymi: wiatrem, ciśnieniem, wilgotnością, termodynamiką i wieloma innymi. Są stosunkowo wiarygodne w zakresie od kilku godzin do kilku dni, ponieważ opierają się na rzeczywistych danych: historycznych, satelitarnych, powietrznych i naziemnych oraz na obserwacjach pochodzących z ładu, morza i komercyjnych samolotów.

W podobny sposób można poprawić dokładność modeli symulujących zachowania lądolodów. Chodzi o to, by lepiej przewidywały przyszłość lodu w różnych scenariuszach globalnego ocieplenia. Potrzebne są jednak nowe dane do weryfikowania postępów w rozwoju modeli, aby ich przewidywania coraz bardziej odpowiadały rzeczywistości.

Schaefer wierzy, że dokładniejsze modele zachowania lądolodów pomogą w adaptowaniu się do skutków zmiany ziemskiego klimatu. „Jeśli jesteś politykiem i chcesz, aby Nowy Jork, czy każde inne miasto nadmorskie, obroniło się przed wzrostem poziomu mórz,

potrzebujesz bardzo precyzyjnej prognozy” – mówi. Rola takich prognoz będzie rosła w miarę, jak świat będzie coraz szybciej kroczył ku przyszłości z cieplejszym klimatem – przyszłości, która według naukowców zajmujących się Grenlandią, może mocno uderzyć w ludzkość.

„Pomyślcie o masowej migracji, która nastąpi, jeśli stopimy cały lodowiec grenlandzki” – mówi Bierman. „Nie dojdzie do tego jutro, lecz za wiele stuleci, a nawet tysiące, ale gdy już taka zmiana nadejdzie, spowoduje największą w historii wyprowadzkę z miast, wsi i domów zajmowanych coraz śmielej przez wodę” – dodaje.

**D**ZIEN PO PIERWSZYM ROZCZAROWANIU zespół GreenDrill trafił jednak na twarde podłoże skalne. Właśnie taki sukces był im potrzebny. Po to tu przybyli – i odnaleźli to, czego szukali, niemal w ostatniej chwili. Kilka godzin później zaczęła się potężna burza śnieżna, która wstrzymała wiercenia na dwa dni.

Po wznowieniu prac postanowiono podjąć próbę wydobywania jeszcze jednego rdzenia. Odwiert miał być o połowę płytszy od pierwszego, więc uznano, że jest szansa na pozyskanie kolejnych próbek cennych skał podłoża w czasie o połowę krótszym niż przy pierwszym wierceniu. Wszystkie prace na lądolodzie musiały

Wiertła używane w systemie Winkie Drill. Jedne lepiej nadają się do wiercenia w lodzie, inne są przeznaczone do drażenia otworów w skale.





Barbara Olga Hild, odpowiedzialna za ochronę obozu przed niedźwiedziami polarnymi, przeprowadza inspekcję systemu ochronnego podczas dwudniowej zamieci. W czasie prac terenowych dwie takie kilkudniowe burze uwięziły naukowców w namiotach i wstrzymały wszystkie prace.

być zakończone w ciągu tygodnia, by przez wyjazdem pozostało jeszcze trochę czasu na spakowanie sprzętu. Gdyby trafiła się dobra pogoda, samolot by wylądował i nie czekał długo na start. Ewakuacja musiała być dobrze przygotowana.

W ciągu następnych dwóch dni badacze poczynili znaczne postępy w drażeniu odwiertu. Zamiast ponownie rozkładać namiot, zaryzykowali i nie osłonili otworu przed światłem słonecznym. Ustawili tylko mały parawan, który chronił ich od wiatru. Gdy Moravec, Harmon i Tanner Kuhl – trzeci i najbardziej doświadczony inżynier wiertniczy – zaczęli ponownie drażyć lód, reszta udała się w stronę nunataków, skalnych wierzchołków wystających z lodu niczym głowy wielorybów z oceanu. Tam Walcott-George, Balter-Kennedy oraz przewodnik Arnar Pall Gíslason za pomocą przenośnych wiertnic nawiercili powierzchnię skały. Ponieważ nunatak był nieprzerwanie wystawiony na działanie promieniowania słonecznego i kosmicznego, zebrane z jego powierzchni próbki z kosmogenicznymi izotopami mogły posłużyć za punkt odniesienia dla próbek skał wydobytych spod lodu. Gdy wydawało się, że są już blisko celu, nagle przyszła kolejna śnieżycą.

„ZABIERAJMY SIĘ STĄD!” – krzyknął Matt Anfinson, mechanik obozowy. Wyszedł z namiotu wprost w zamieci śnieżną, która się nasilała. Namiot wiertniczy, jedyne schronienie oprócz namiotów jadalnego i sypialnego, uginał się złowieszczą pod naporem wiatru wiejącego z prędkością 80 km/h. Przy niemal zerowej widoczności zespół zaczął się po omacku wycofywać do obozu – drogę do niego wskazywał szereg czerwonych flag.

Przez następne trzy godziny grupa wykonywała coś w rodzaju operacji na otwartym sercu. „Pacjentami” były dwie przenośne wiertnice, które przestały działać podczas „wyprawy” do nunataka. Leżały teraz z odsłoniętymi wnętrznościami na stole operacyjnym w namiocie. Anfinson pomajstrował przy świecach zapłonowych, a potem szarpnął za linkę rozrusznika. Wiertnica zaważyła, zadymiała i zaczęła pracować. Niczym Dr Frankenstein cieszył się z tej reinkarnacji sprzętu, w który tchnął nowe życie. To było jedno z niewielu zwycięstw podczas, jak to określił Harmon, „szaleństwa pogodowego”.

Gdy znajdujemy się w takiej zamieci śnieżnej, możemy się poczuć, jakbyśmy tkwili wewnątrz paraliżującego zmysły urządzenia generującego biały szum. Na tej szerokości geograficznej w maju i czerwcu nie zapada noc, ale gdy wichur wciąż wieje i wieje, na zewnątrz jest równocześnie jasno i oślepiająco. Usypane przez wiatr zaspy wyrastają wokół obozu niczym lodowe palce. Blokują wyjścia z namiotów i utrudniają chodzenie; albo potykasz się o trzymetrową ścianę śniegu, której kilka godzin wcześniej nie było, albo spadasz z niej wprost w śnieżny puch metrowej grubości.

Ta monotonia nieustanych wichur stawała się trudną do wytrzymania. Egzystencja w obozie ograniczała się do krącenia pomiędzy namiotem sypialnym, jadalnym i toaletowym. Barbara Olga Hild, chroniąca nas przed niedźwiedziami polarnymi, walczyła nieustannie, aby elektryczny płot wokół obozu nie został zaspany przez śnieg. Walcott-George przesiadywał w namiocie

jadalnym, parząc kolejne dzbanki mocnej kawy, i starał się zadbać o siebie w arktycznych warunkach. Próbował zabezpieczyć suche, popękane dłonie przed działaniem płynu wiertniczego. Balter-Kennedy latała rozdarcia w swoich ulubionych ogrodniczkach z polaru i przeglądała dzienniki wierceń. Moravec i Harmon grali godzinami w cribbage. Wszyscy po kolei wymykali się na zmianę na zewnątrz z pomarańczowym, pięciogalonowym pojemnikiem, który napelniali śniegiem, topionym następnie na kuchence polowej (co za ironia, że tyle wysiłku kosztuje zdobycie wody pitnej, gdy wokół jest lód).

Co ciekawe, to właśnie w takich momentach najgorzej pogody osoby pracujące na lądolodzie otwierały się i opowiadały, dlaczego odpowiada im takie zajęcie w zimnie i izolacji od świata. „Ludzie jadą do Arktyki, bo tutaj wciąż można usłyszeć ciszę” – powiedziała Hild. Dahl-Jensen opowiadała mi, że miesiące spędzone w niemal całkowitej izolacji od świata były dla niej warte wszelkiego zimna i dyskomfortu. „Żyjemy w obozie i prowadzimy badania. I tylko tyle. Taki czas, gdy możesz skupić się na jednej rzeczy, jest naprawdę bezcenny” – powiedziała. Wielu członków zespołu przyznawało, że takiego właśnie uczucia zwolnienia tempa i zarazem maksymalnej koncentracji na wykonaniu zadania brakuje im, gdy znajdują się z dala od lodu. „Zawsze obawiam się końca sezonu terenowego” – przyznała Balter-Kennedy. Po drugiej stronie czeka brutalny powrót do normalnego życia, lawina e-maili domagających się odpowiedzi oraz rzeczywistość inna od tej, którą się zostawiło.

GDY BURZA WRESZCIE po trzech dniach ustąpiła, zespół dosłownie wyskoczył z namiotu, aby wrócić do pracy. Z powodu zamieci na dokończenie drugiego odwiertu pozostały im tylko dwa pełne dni. Na wykonanie pierwszego potrzebowali tygodnia, i to bez żadnych opóźnień z powodu niekorzystnej pogody. Teraz więc wszystko musiało przebiec nadzwyczaj gładko.

Udało się. Dzień później cały zespół otoczył wiertnicę, aby wydobyć ostatnią próbkę przed spakowaniem obozu. Wiertło przebiło się przez 25 m lodu. Pogoda była słoneczna, a dzień wydawał się wyjątkowo ciepły – było kilka stopni powyżej zera. Bez problemu dokończono wiercenie. Gdy ostatni kawałek rdzenia wylądował w komorze wiertła, po grenlandzkim lądolodzie rozeszły się dźwięki utworu zespołu rockowego Ween.

Rdzeń wyszedł czysty. Zakończenie prac uczczono okrzykiem radości oraz rozlaniem duńskiego likieru Gammel Dansk, znanego tu lepiej jako „płyn wiertniczy”. Nie był on jednak przeznaczony dla załogi. „Byłeś dobrym otworem” – oznajmił Harmon w chwili, gdy Moravec wlał alkohol do dziury.

Walcott-George uniósł ostatni kawałek rdzenia skalnego niczym trofeum wędkarskie. On i Balter-Kennedy pomierzyli go i opisali, a następnie zabezpieczyli na czas transportu, nie wiedząc jeszcze, jaką historię o przeszłości Grenlandii bez lodu oraz naszej przyszłości z podnoszącymi się morzami ma on do opowiedzenia. ■

---

#### Z NASZEGO ARCHIWUM

Nadchodzi katastrofa. Douglas Fox, grudzień 2022.





Balter-Kennedy dzieli skalny rdzeń na mniejsze segmenty, które łatwiej zapakować i przetransportować. Był to ostatni kawałek skały, który został wydobyty spod lodu przed zwinieniem obozu.



ASTRONOMIA

# CZARNE DZIURY CIERPIĄ NA NIESTRAWNOŚĆ

Czarne dziury pochłaniające gwiazdy  
czasami zwracają swój „pokarm”

YVETTE CENDES

Ilustracja MARK ROSS

sierpień 2025, Świat Nauki 55

# C

**ZARNE DZIURY SĄ NIEWIDOCZNE**, ale należą do najjaśniejszych obiektów we Wszechświecie. Gdy gwiazda znajdzie się w zbyt małej odległości od czarnej dziury, zostanie rozdarta na strzępy w wyniku zjawiska zwanego rozerwaniem pływowym. W miarę jak gwiazda zbliża się do czarnej dziury, jest wyginana i rozrywana, a około połowa jej masy zostaje wyrzucona na zewnątrz. Druga połowa tworzy wokół czarnej dziury dysk akrecyjny w kształcie frisbee. Nowo powstały dysk nie jest stabilny: materia rozlewa się i zderza ze sobą, tworząc spektakl, który można zaobserwować na falach radiowych.

Są to rzadkie zjawiska – naukowcy oceniają, że gigantyczna czarna dziura w centrum naszej Drogi Mlecznej pochłania gwiazdę mniej więcej co milion lat. Jednakże kiedy to się już dzieje, uwalniana jest ogromna ilość promieniowania i energii, co widać z odległości milionów, a nawet miliardów lat świetlnych.

Do niedawna astronomowie sądzili, że po takiej uczcie nigdy już nie da się zobaczyć pochłoniętej gwiazdy. Jednak z obserwacji prowadzonych w ciągu ostatnich pięciu lat wynika coś innego. Mimo że teoria tego nie przewidywała, okazuje się, iż czarne dziury mogą cierpieć na niestrawność i wyrzucać materię wiele lat po rozszarpaniu gwiazdy. Naukowcy odkryli, że nawet połowa czarnych dziur, które pożerają gwiazdy, zaczyna ponownie emitować promieniowanie radiowe wiele lat po akcie połknięcia – co można porównać do kosmicznego refluksu. Wiemy, że materia ta nie wraca spod horyzontu zdarzeń – jest to niemożliwe. Najprawdopodobniej znajduje się w dysku akrecyjnym. Wyjaśnienie, dlaczego czarne dziury wymiotują tak późno, jest jednak trudne. Rozwiązanie zagadki tych wymiotów może ujawnić nowe sekrety procesów zachodzących w najbardziej ekstremalnych środowiskach we Wszechświecie.

WIĘKSZOŚĆ GALAKTYK o rozmiarach zbliżonych do Drogi Mlecznej lub większych ma w swoim centrum supermasywną czarną dziurę, a każda z nich może być miliony, a nawet miliardy razy masywniejsza od naszego Słońca. Promienie ich horyzontu zdarzeń – granicy, spoza której nie ma powrotu – mogą przewyższać promień orbity Plutona. Pomimo tak gigantycznych rozmiarów czarna dziura nie wciąga materii jak odkurzacz z tego samego powodu, dla którego nasze Słońce nie polyka planet. Gdyby nasze Słońce zostało nagle zastąpione przez czarną dziurę, Ziemia nadal krążyłaby po tej samej orbicie. Tym, co sprawia, że czarna

dziura jest tak wyjątkowa, jest jej gęstość. Wewnątrz horyzontu zdarzeń jej przyciąganie grawitacyjne jest tak silne, że nic nie może się stamtąd wydostać.

W przypadku supermasywnych czarnych dziur sama ich masa oznacza, że ich przyciąganie grawitacyjne jest niezwykle silne. Tak jest w przypadku czarnej dziury w naszej Galaktyce, która nosi nazwę Sagittarius A\* (w skrócie Sgr A\*). Znajduje się ona około 27 tys. lat świetlnych od Ziemi i jest mniej więcej 4 mln razy masywniejsza od Słońca. Astronomowie od dziesięcioleci uważnie śledzą kilkadziesiąt pojedynczych gwiazd, które poruszają się po stabilnych orbitach wokół Sgr A\*. Wokół Sgr A\* musi jednak orbitować tysiące obiektów, których nie możemy zobaczyć. Wiele z nich to pozostałości po martwych gwiazdach, takie jak gwiazdy neutronowe lub białe karły – zbyt słabe, aby dało się je wykryć. Jeśli jeden z tych nieznanymi obiektów przeleci w pobliżu gwiazdy, może zakłócić jej orbitę, wysyłając ją na ścieżkę kolizyjną w kierunku Sgr A\*.

Gwiazda skazana na zagładę zacznie odczuwać siły pływowe na długo przed osiągnięciem horyzontu zdarzeń. Im bliżej masywnego obiektu, tym grawitacja jest silniejsza, więc strona gwiazdy bliższa czarnej dziurze będzie odczuwać mocniejsze przyciąganie grawitacyjne niż dalsza. Obiekt zacznie się rozciągać i ostatecznie, na granicy zwanej promieniem pływowym, różnica w sile przyciągania przez czarną dziurę między dwiema stronami gwiazdy będzie większa niż grawitacja utrzymująca ją w całości. Gwiazda rozpadnie się wzdłuż kierunku ruchu w procesie zwanym spaghetti-zacją – najpierw zmieniając się z kuli w owal, a następnie stając się długim pasmem materii przypominającym cienką nitkę makaronu. W miarę zmniejszania się gęstości gwiazdy proces fuzji termojądrowej w jej wnętrzu ustaje, a obiekt, który mógł świecić jeszcze przez miliardy lat, rozpadnie się w ciągu zaledwie kilku godzin. Połowa materii zostanie natychmiast wyrzucona

**Yvette Cendes** jest profesorką na wydziale fizyki i astronomii University of Oregon. Obserwuj ją na [BlueSky@wherisyvette.bsky.social](#)

na zewnątrz i nigdy już nie powróci, a reszta utworzy nowy dysk akrecyjny krążący wokół czarnej dziury. Kiedy to się dzieje, gwałtowna zmiana konfiguracji materii w dysk akrecyjny powoduje powstanie bardzo jasnego rozbłysku, widocznego zwykle w zakresie fal optycznych.

Pierwsze potencjalne przypadki rozerwania pływowego odkryto w latach 90., a do dzisiaj astronomowie zaobserwowali około 100 takich zjawisk. Rozerwanie gwiazdy powoduje wybuch widoczny z odległości milionów lat świetlnych, który na pierwszy rzut oka przypomina eksplozję gwiazdy. Istnieje jednak kilka kluczowych różnic. Po pierwsze, zjawisko rozrywania pływowego występuje w centrum galaktyki, gdzie czają się supermasywne czarne dziury, podczas gdy supernowe mogą pojawić się w dowolnym miejscu. Po drugie, promieniowanie z fajerwerku z okolic czarnej dziury ma widmo inne niż umierająca gwiazda. Astronomowie mogą w nim dostrzec charakterystyki świadczące o znacznej obfitości wodoru, ponieważ gwiazda zawiera jeszcze duże ilości niewykorzystanego paliwa, co sugeruje, że nie umarła śmiercią naturalną.

Rocznie odkrywamy około tuzina nowych zjawisk rozrywania pływowego. Erupcje te występują wokół czarnych dziur, które na co dzień nie pochłaniają zbyt wiele materii. To odróżnia je od czarnych dziur, zwanych aktywnymi jądrami galaktyk, które przez wiele lat ustawicznie pożerają ogromne ilości gazu i nieustannie emitują światło. Te intensywne procesy przebiegają w sposób niezwykle chaotyczny i zachodzą w nieprzewidywalnym tempie. W porównaniu z nimi zjawiska rozrywania pływowego są wydarzeniami stosunkowo spokojnymi, które pozwalają nam obserwować, co dzieje się wtedy, gdy niewielka ilość bardzo gęstej materii zostaje jednorazowo wstrzyknięta do czarnej dziury.

Kiedy ktoś zauważy takie nowe zdarzenie, radioastronomowie tacy jak ja natychmiast kierują tam swoje anteny, aby wykryć emisję masy i energii z nowo powstałego dysku akrecyjnego, zwaną wypływem. Poszukujemy wszelkich sygnałów radiowych, które wcześniej nie występowały. Fale radiowe są wytwarzane przez elektrony poruszające się spiralnie w polach magnetycznych powstałych w tych wypływach, dzięki czemu otrzymujemy obraz procesów fizycznych, który byłby niemożliwy do uzyskania na innych długościach fal. Możemy wyznaczyć prędkość uciekającej materii, energię wybuchu, natężenie pól magnetycznych, a nawet gęstość gazu i pyłu, przez który przeciska się wypływ. Co więcej, gdy wypływy opuszczają nowo powstały dysk akrecyjny, to zanim znikną, mogą pokonać odległość kilku lat świetlnych. Obserwacja takich wypływów daje astronomom wyjątkową możliwość zbadania środowiska wokół wcześniej uśpionej supermasywnej czarnej dziury z dokładnością niemożliwą do osiągnięcia innymi metodami.

Okolo 99% całej masy uwolnionej podczas zjawiska rozerwania pływowego jest nierelatywistyczne – porusza się z prędkością wynoszącą najwyżej 10% prędkości światła. Pozostały 1% ma jednak zupełnie inny charakter. W takich przypadkach materia z rozszarpanej

gwiazdy trafia do strumienia wyrzucanego z prędkością bliską prędkości światła, zwanego dżetem. Jest on tak szybki, że analizując go, należy uwzględnić zasady teorii względności – stąd wzięła się nazwa „wypływ relatywistyczny”. Pierwsze znane relatywistyczne zjawisko rozrywania pływowego, nazwane Swift J1644+57, wykryto w 2011 roku, kiedy wystrzelone przez NASA obserwatorium kosmiczne Neil Gehrels Swift zanotowało dziwny wybuch promieniowania z centrum galaktyki oddalonej o 3,8 mld lat świetlnych. Po półtora roku stałej emisji dżet w Swift J1644+57 nagle wygasł, prawdopodobnie w momencie, gdy materia z gwiazdy zasilającej dżet została w większości zużyta, a tempo akrecji – ilość masy pochłanianej przez czarną dziurę w danym czasie – spadło poniżej pewnej wartości krytycznej. Przed tym odkryciem nikt nie spodziewał się, że zasilanie czarnej dziury może prowadzić do powstania relatywistycznego dżetu, a tym bardziej takiego, który pojawia się i znika w tak krótkim czasie. Nie wiadomo dokładnie, jak i dlaczego tak się dzieje.

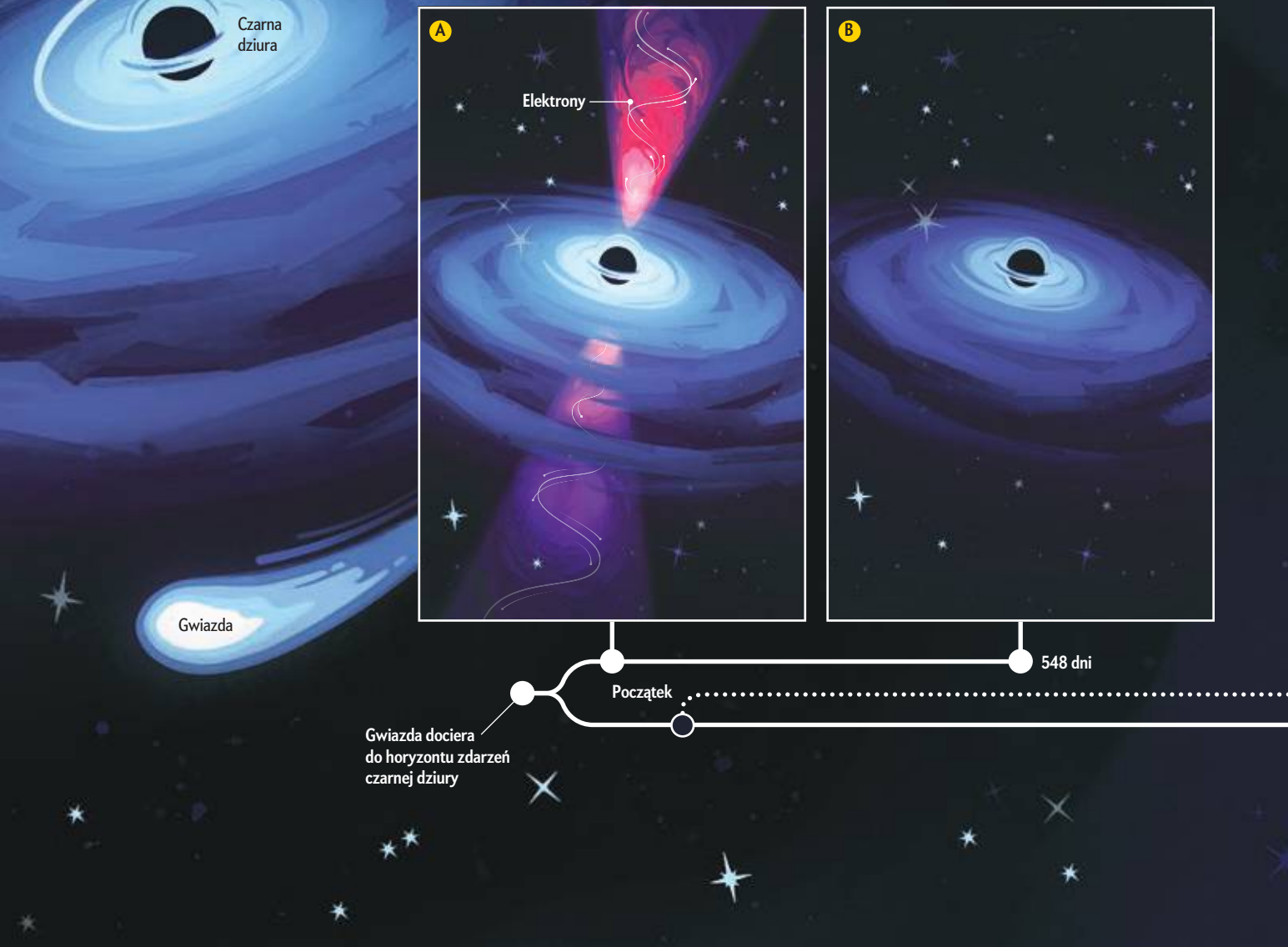
Astronomowie zakładali również, że schemat wszystkich przypadków rozerwania pływowego jest taki sam – trwający kilka miesięcy rozbłysk, po którym następuje cisza. Po zaniknięciu błysku zwykle przestajemy prowadzić obserwacje. W końcu czas pracy radioteleskopu jest cenny. Po co go tracić na obserwację wybuchu, który miał miejsce wiele lat temu? Było to rozsądne założenie, ale okazało się błędne. Jednak to dzięki niemu udało mi się dokonać odkrycia mojego życia.

ASTRONOMKĄ POSTANOWIŁAM ZOSTAĆ w wieku 13 lat, gdy przeczytałam książkę o kosmosie. Zawsze kochałam opowieści, a historia Wszechświata jest najwspanialszą z nich. W liceum postanowiłam zająć się radioastronomią – pod wpływem powieści Carla Sagana z 1985 roku pt. *Kontakt*, w której bohaterka, Ellie Arroway, pracująca w obserwatorium Very Large Array (VLA) w Nowym Meksyku, odbiera wiadomość pozaziemską. Nigdy nie odeszłam od radioastronomii, ponieważ ma ona w sobie coś magicznego: za pomocą połączonych anten o wielkości budynków pozwala wychwycić najsłabsze sygnały, które opowiadają historię niemożliwą do wysłuchania w inny sposób. Moja kariera jako radioastronomki była pełna przygód, ale żadna z nich nie może się równać z odkryciem AT2018hgz – mojej pierwszej wybuchającej czarnej dziury.

Wszystko zaczęło się w jasny, jesienny dzień 2021 roku w Cambridge w stanie Massachusetts. Odbywając staż podoktorski w Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, zajęłam się opracowywaniem danych z VLA, których nikt inny nie miał czasu przeanalizować. Kilka miesięcy wcześniej inny zespół wykrył w zakresie fal radiowych zjawisko rozerwania pływowego o nazwie ASASSN-15oi. Było to ponad 100 dni po tym, gdy po raz pierwszy zaobserwowano je w świetle widzialnym. Wcześniej nie zarejestrowano go na falach radiowych. Większość ludzi zakładała, że rozbłysk był wynikiem jakichś niezwykłych okoliczności związanych z tym obiektem lub jego otoczeniem, ale ja pomyślałam, że nie zaszkodzi przeprowadzić badania za

### WYPŁYW RELATYWISTYCZNY (WYSTĘPUJĄCY RZADZIEJ)

Czasami, gdy czarna dziura rozrywa gwiazdę, materia ulega skupieniu w postaci dżetu, który wyrzucany jest na zewnątrz z prędkością bliską prędkości światła w tak zwanym wypływie relatywistycznym (A). W jednym z takich przypadków dżet wylatujący z czarnej dziury o nazwie Swift J1644+57 nagle wygasł po 548 dniach emisji. Naukowcy wciąż próbują zrozumieć, co dokładnie spowodowało powstanie dżetu, i co ostatecznie go wygasilo (B).



pomocą VLA i sprawdzić, czy w innych czarnych dziurach też pojawiają się powtarzające się rozbłyski.

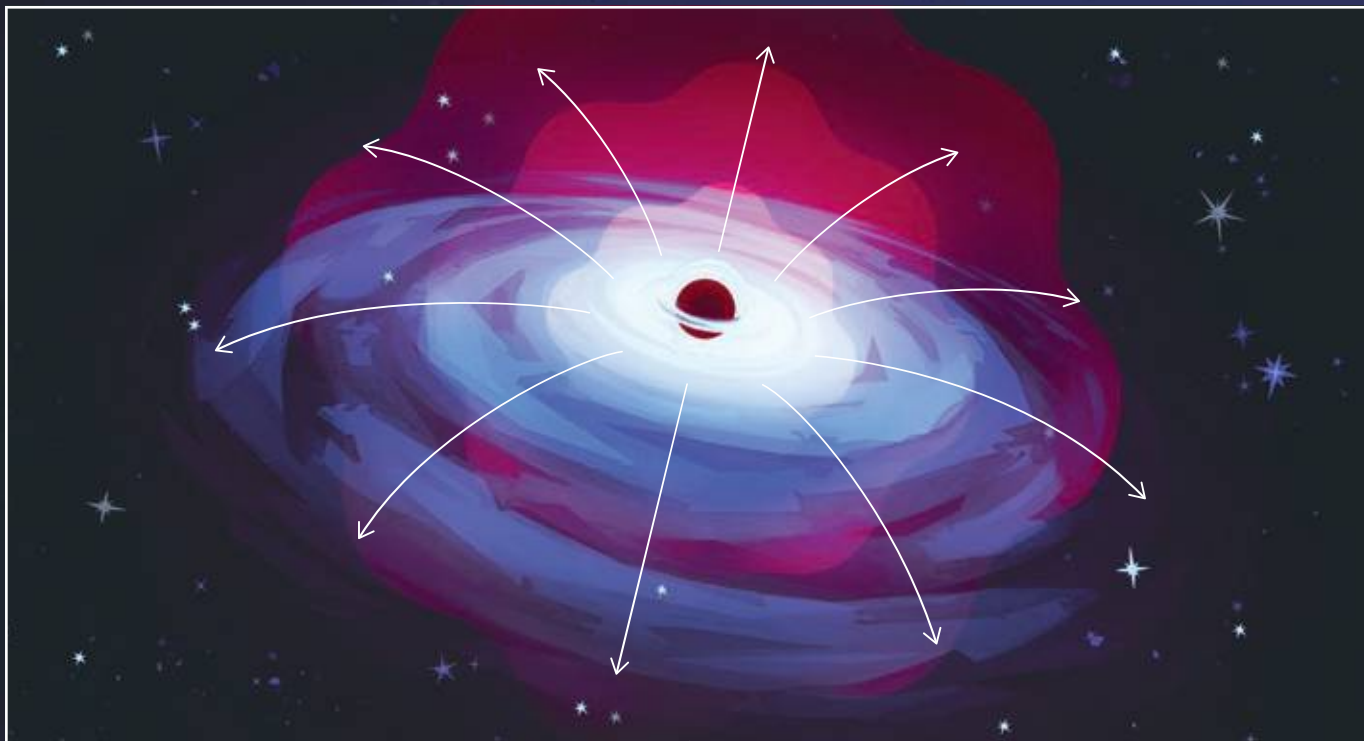
VLA przechwytyje fale radiowe za pomocą 27 anten. Następnie dane te muszą zostać połączone ze sobą w celu stworzenia obrazu radiowego. Jeśli widzimy źródło fal radiowych, pojawia się ono jako grupka pikseli na czarnym tle. Jeśli nic tam nie ma, widzimy tylko szum. W tym pamiętnym dniu wyświetliłam obraz zjawiska rozrywania pływowego o nazwie AT2018hyz, które zostało odkryte w świetle optycznym w 2018 roku. Kiedy patrzyłam na ekran, najpierw na chwilę zamarłam, po czym manualnie sprawdziłam, czy współrzędne są prawidłowe. Tam, gdzie spodziewałam się szumu, który

w tym obszarze kosmosu widziano wcześniej, pojawiło się niewątpliwie jasne źródło – mimo że znajdowało się ono około 665 mln lat świetlnych od Ziemi. „Włączyło się” bardzo wyraźnie i bez żadnych problemów.

Skontaktowałam się z moimi współpracownikami, którzy byli równie podekscytowani, jak ja, i znalazłam obraz z przeglądu radiowego, który został wykonany dokładnie dziewięć miesięcy wcześniej i przedstawiał ten sam fragment nieba. Nie było na nim nic poza szumem, co sugerowało, że emisja radiowa z AT2018hyz w ciągu zaledwie kilku miesięcy gwałtownie wzrosła. W historii astronomii nikt nigdy nie widział wcześniej czegoś podobnego.

# Śmierć zadana przez czarną dziurę

Kiedy gwiazda opada w kierunku czarnej dziury, dzieją się z nią dziwne rzeczy. Najpierw staje się coraz cieńsza, ponieważ jej strona bliższa czarnej dziurze podlega silniejszemu przyciąganiu grawitacyjnemu niż strona dalsza. W pewnym momencie gwiazda zaczyna przypominać nitkę spaghetti, a gdy zbliży się do czarnej dziury, jej materia tworzy spłaszczony pierścień zwany dyskiem akrecyjnym, który wiruje wokół czarnej dziury. Tarcie w tym dysku jest źródłem jasnego promieniowania, które widać z daleka.



„Refluks” może nastąpić z opóźnieniem od kilkuset do kilku tysięcy dni

## WYPŁYW NIERELATYWISTYCZNY (WYSTĘPUJĄCY CZĘŚCIEJ)

Gdy materia rozlewa się w dysku akrecyjnym krążącym wokół czarnej dziury, wskutek zachodzącego w nim tarcia emituje promieniowanie. Astronomowie uważali kiedyś, że czarne dziury pożerające gwiazdy wysyłają pojedynczy błysk światła i na tym kończy się ich aktywność. Jednak ostatnio naukowcy wykryli opóźnione błyski promieniowania radiowego pojawiające się około 1000 dni po początkowym sygnale. Te „refluksy” czarnych dziur stanowią dla nas zagadkę.

Mniej więcej w czasie, gdy napływały pierwsze obserwacje, wróciłam do domu i powiadomiłam o swoim odkryciu męża. „Problem polega na tym, że nazwa AT2018hyz nie jest zbyt łatwa do wymówienia – powiedziałam mu – a jest oczywiste, że przez jakiś czas będziemy o tym rozmawiać. Chcesz nadać mu nazwę?”. Mój mąż zamyślił się i z powagą, jaką należy wykazać, gdy żona daje prawo do nazwania czarnej dziury, powiedział stanowczo: „Jetty McJetface”. Nie jest to oficjalna nazwa, ale od tego momentu AT2018hyz nazywaliśmy w domu „Jetty”.

W pewnym sensie najbardziej niezwykłą rzeczą w przypadku Jetty jest to, że nie jest to jedyny taki

przypadek. Po przeanalizowaniu danych z całej kampanii obserwacyjnej udało mi się wykryć kilka nowych sygnałów radiowych związanych ze zjawiskami sprzed lat, które najpierw rozbłysły, później wygasły, a potem znów były widoczne. Wygląda na to, że czarne dziury w kilka lat po pochłonięciu gwiazd cierpią na niestrawność i refluks. Jest to zaskakujące z kilku powodów. Kilka lat na ponowne wyjaśnienie to niezwykła skala czasowa dla takiego zjawiska. Nie wraca się na miejsce wybuchu bomby po latach w oczekiwaniu, że zobaczy się nowe odłamki. Nie sądzimy też, aby czarna dziura po prostu zaczęła konsumować kolejną gwiazdę – gdyby tak było, obserwowalibyśmy

również promieniowanie optyczne, a przecież tak się nie dzieje.

W sumie nasz zespół przebadał około dwa tuziny czarnych dziur, z których wszystkie zostały po raz pierwszy odkryte w zakresie optycznym. Dzięki temu wiedzieliśmy dokładnie, kiedy nastąpił pierwszy rozblask. W międzyczasie wszystkie te obiekty obserwowano w zakresie radiowym, ale emisji nie zarejestrowano. Znaleźliśmy wśród nich 10 wymiotujących czarnych dziur, które rozblaskły ponownie na falach radiowych. Cokolwiek się dzieje, jest to powszechne i otwiera nam oczy na nowe zjawisko, które możemy wykorzystać do badania fizyki czarnych dziur.

Wciąż nie mamy odpowiedzi na wiele pytań, ale oto, co wiemy obecnie. Po pierwsze, założenie, że zjawiska rozrywania pływowego uwalniają promieniowanie i energię głównie w ciągu pierwszych kilku miesięcy, jest błędne. Chociaż na początku zjawiska zawsze obserwujemy promieniowanie optyczne, z naszych danych wynika, że emisja radiowa występuje zwykle co najmniej 1000 dni po tym wydarzeniu. Niektóre czarne dziury wydają się nawet wysłać dwie fale promieniowania radiowego – pierwszą stosunkowo szybko, a drugą setki dni po wygaśnięciu pierwszej. Nie wydaje się, aby istniała znacząca korelacja między chwilą, w której czarna dziura zaczyna emitować promieniowanie radiowe, a momentem, w którym emituje promieniowanie w innych długościach fal – emisji radiowej nie towarzyszy rozblask optyczny wskazujący na rozpad drugiej gwiazdy ani promieniowanie rentgenowskie sugerujące znaczącą zmianę w ilości masy akreowanej przez czarną dziurę.

Na koniec, zebrane dotychczas dane radiowe wskazują, że te opóźnione wybuchy przypominają stosunkowo normalne, nierelatywistyczne wypływy powstałe w wyniku rozrywania obiektów przez siły pływowe – tyle że obserwowane znacznie później, niż można by się spodziewać. Gęstość gazu, którą mierzymy w ich otoczeniu, jest również podobna do gęstości gazu w naszej Galaktyce. Innymi słowy, otoczenie czarnych dziur nie ma w sobie nic szczególnego.

**O**CZYWIŚCIE PYTANIE za milion dolarów brzmi: dlaczego czarne dziury cierpią na refluks? Wygląda to tak, jakby pochłaniały masę, robiły sobie przerwę, a następnie zaczęły tę masę nieco wypływać. Żeby było jasne, nie obserwujemy ucieczki materii spod horyzontu zdarzeń czarnej dziury: byłoby to fizycznie niemożliwe i nie ma absolutnie żadnych przesłanek, aby sądzić, że tak właśnie się dzieje. Uważamy natomiast, że coś dzieje się w dysku akrecyjnym lub obok niego. Być może, jak sugerują astrofizycy, dysk akrecyjny powstaje znacznie później, niż wcześniej zakładaliśmy, lub też czarne dziury wywołują nietypowe fluktuacje gęstości w swoim otoczeniu. Rozblaski mogą być spowodowane przez oddziałujące ze sobą obłoki pyłu, a może kokon materii wokół czarnej dziury opóźnia przepływ emisji radiowej do późniejszego momentu. Obecnie nie jest jasne, który z modeli teoretycznych jest poprawny.

Wyjątkiem od tej reguły jest jednak Jetty (czyli AT2018hzy). Chociaż inne czarne dziury wykazują między sobą pewne podobieństwa, Jetty dosłownie

przyćmiewa je wszystkie. Od momentu odkrycia jej jasność stale rośnie i obecnie jest ona około 40 razy jaśniejsza niż w momencie wykrycia. Nadal nie wiemy, co jest tego przyczyną. Istnieją dwie możliwości. Pierwsza zakłada, że Jetty „miała refluks” około dwa lata po pochłonięciu gwiazdy, uwalniając strumień poruszający się z prędkością około jednej trzeciej prędkości światła. Byłby to pierwszy znany nam strumień „łagodnie relatywistyczny”, plasujący się gdzieś pomiędzy strumieniem nierelatywistycznym a dżetem poruszającym się z prędkością bliską prędkości światła.

Druga opcja jest potencjalnie bardziej niezwykła. Być może podczas pierwotnego rozerwania pływowego, które miało miejsce w październiku 2018 roku, wystrzelony został relatywistyczny strumień materii pod kątem prawie 90° względem Ziemi. Strumień ten byłby jednym z najbardziej energetycznych, jakie kiedykolwiek zaobserwowaliśmy. Początkowo jego kierunek sprawiałby, że był dla nas niewidoczny, ale z czasem strumień rozszerzył się i znalazł się w naszym polu widzenia. Być może właśnie obserwujemy to teraz, wiele lat później. Nie da się przewidzieć, jak bardzo energetyczny i jasny jest strumień, dopóki nie zobaczymy go na własne oczy.

Aby rozróżnić obie możliwości, ja i moi współpracownicy badamy Jetty za pomocą innej metody, zwanej interferometrią o bardzo długiej bazie (Very Long Baseline Interferometry; VLBI). VLBI łączy ze sobą anteny rozmieszczone w Ameryce Północnej i Europie, tworząc wirtualny radioteleskop o rozmiarach odpowiadających odległości między Niemcami a Hawajami. Wierzymy, że będzie on miał wystarczającą rozdzielczość, aby bezpośrednio obserwować materiał wyrzucany z czarnej dziury, mimo że znajdujemy się setki milionów lat świetlnych od niej. Przeprowadzono już pierwsze obserwacje, ale analiza danych z tak dużych odległości jest trudna – mamy nadzieję, że wkrótce poznamy odpowiedź.

Mamy również nadzieję poszerzyć naszą kolekcję znanych zdarzeń rozrywania pływowego, aby móc monitorować refluksy. W tym roku ruszy pełną parą Vera C. Rubiny Obserwatory [Pierwsze zdjęcia pokazano 23 czerwca – przyp. red.]. Jest to znajdujący się w Chile teleskop o średnicy 8,4 m, który każdej nocy będzie przeczesywał całe niebo. Po osiągnięciu pełnej operacyjności Rubin ma znaleźć miliony nowych obiektów, od supernowych po planetoidy, i powinien odkrywać około 1000 nowych czarnych dziur rocznie. Ponadto w 2027 roku zostanie wystrzelony Kosmiczny Teleskop Nancy Grace Roman. Teleskop ten ma dostarczać obrazy o ostrości takiej, jak teleskop Hubble’a, ale będzie mieć 100 razy szersze pole widzenia. Oczekujemy, że pozwoli odkryć setki nowych przypadków rozrywania pływowego rocznie. Dla naukowców, którzy są przyzwyczajeni do odkrywania stosunkowo niewielkiej liczby nowych zjawisk, taki strumień napływających danych będzie stanowić duże wyzwanie.

Żyjemy we Wszechświecie pełnym kosmicznych katastrof o wielkiej skali zachodzących w odległościach często trudnych do wyobrażenia. Ale czarne dziury będą nadal ucztować – i wymiotować – a moi koledzy i ja będziemy na to patrzeć. ■

#### Z NASZEGO ARCHIWUM

Pożeracz słońc,  
niszczytel światów.  
S. Bradley Cenko i Neil  
Gehrels; maj 2017.

W 2019 roku za pomocą Event Horizon Telescope uzyskano pierwsze zdjęcie czarnej dziury, na którym w dysku akrecyjnym ze świetlistego gazu widoczny jest ciemny „cień”.



# Arktyka do ponow

Naukowcy próbują odbudować lód morski w Arktyce, aby odbijał w kosmos więcej promieniowania słonecznego

ALEC LUHN

zdjęcia TAYLOR ROADES

Zespół Real Ice przygotowuje się do nawiercenia lodu morskiego w kanadyjskiej Arktyce, po wcześniejszym zalaniu wodą morską innego fragmentu paku lodowego (*ciemnoniebieska plama*).

# nego zmrożenia



# M

**GAŁ Z KRYSTAŁKÓW LODU** tworzyła halo wokół nisko wiszącego słońca, gdy trzy skutery śnieżne sunęły po lodzie morskim pewnego lutowego poranka na dalekiej północy Kanady. Niesiony przez wiatr śnieg przemierza białą pustynię. Gdy wyruszyliśmy z Cambridge Bay, inuickiej osady zagubionej w rozległym archipelagu bezdrzewnych wysp i zablokowanych przez lód cieśnin, termometr pokazywał  $-26^{\circ}\text{C}$ . Było stosunkowo ciepło – sześć stopni powyżej średniej. Zima była najłagodniejsza od 75 lat. Pokrywa lodu morskiego na Oceanie Arktycznym miała najmniejszy zasięg w historii pomiarów. Naukowcy przewidują, że w ciągu najbliższych 15 lat arktyczny pak lodowy zniknie latem po raz pierwszy od wielu tysięcy lat, przyspieszając globalne ocieplenie. Brytyjska firma Real Ice, której mocno opatuleni pracownicy podskakiwali teraz na dwóch skutekach śnieżnych jadących przede mną, ma nadzieję, że zapobiegnie zrealizowaniu się tego scenariusza dzięki przedsięwzięciu, które uznano za wyjątkowo ambitne, szalone, a nawet niebezpieczne.

**Alec Luhn** jest autorem artykułu „Wprost z powietrza” poświęconego wychwytywaniu dwutlenku węgla opublikowanego w numerze 11 w 2024 roku. Jest wielokrotnie nagradzany dziennikarzem zajmującym się klimatem, który opisywał miasto atakowane przez niedźwiedzie polarne, jedyną na świecie pływającą elektrownię jądrową oraz najzimniejsze miejsce na świecie.

W miejscu odległym o 7 km od osady współzałożyciel Real Ice Cian Sherwin, Irlandczyk w czerwonej czapce i z niechlujną bródką, zeskoczył ze swojego skutera i po krótkich przygotowaniach zaczął wiercić otwór długą, elektryczną wiertnicą. Trysnęły strugi wody, spiętrzyły się lodowe zwierzyny, gdy wiertło przebiło lód grubości ponad metra. Inuicki przewodnik David Kavanna powiększył szczelinę piłą do lodu przypominającą włócznię, a następnie umieścił wokół niej drewnianą ramkę. Sherwin opuścił do otworu aluminiową pompę wyglądającą jak duży zaparzacz do kawy przymocowany do zakrzywionego gumowego węża. Podłączył kabel do pakietu akumulatorów. Po paru sekundach z węża zaczęła wypływać woda, rozlewając się na lodzie i przybierając eterycznie niebieski odcień. „Taka tężejąca na mrozie woda zachowuje się niemal jak lava – powiedział Sherwin. – Formowanie się lodu zaczyna się właściwie natychmiast.”

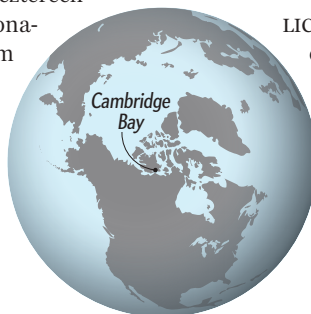
Cienkie, szerokie lodowe tafle rozrastają się zimą, gdy panuje ciemność i mróz, a latem, kiedy słońce świeci przez całą dobę, topnieją. Lód zachowuje się niczym gigantyczne lustro, odbijając w kosmos nawet 90% promieniowania słonecznego. Dla kontrastu, woda morska aż 90% światła słonecznego pochłania. Powierzchnia tzw. lodu wieloletniego, który utrzymuje się przez cały rok, skurczyła się w ciągu czterech dekad o około 40%, uruchamiając samonapędzający się mechanizm rozpadu: im więcej lodu topnieje, tym większa jest powierzchnia odsłoniętej wody, która absorbuje ciepło i nagrzewa się jeszcze silniej, przyspieszając topnienie kolejnych fragmentów lodu morskiego. Jeśli ten zniknie latem całkowicie,

temperatura globalna może wzrosnąć do 2050 roku dodatkowo o  $0,19^{\circ}\text{C}$ .

Real Ice próbuje pogrubić lód sezonowy, aby przetrwał on dłużej latem i schładzał w ten sposób planetę. Sherwin ma nadzieję, że jego metoda pozwoli w przyszłości na ponowne zmrożenie lodu morskiego – sezonowego i wieloletniego – na powierzchni około 1 mln  $\text{km}^2$ . To obszar rozmiarów połączonych ze sobą stanów Teksas i Nowy Meksyk i mniej więcej jedna piąta tego, co pozostaje latem na całym Oceanie Arktycznym. W ten sposób, jego zdaniem, można powstrzymać spiralę śmierci paku lodowego. Według obliczeń Real Ice potrzebne byłoby pół miliona urządzeń wytwarzających lód.

Polarna geoinżynieria na tak olbrzymią skalę mogłaby spowolnić tempo ocieplenia, dając światu więcej czasu na całkowite niezależenie się od węgla, ropy i gazu. Wielu naukowców jest zdania, że pomysł się nie sprawdzi, ale badacze z Real Ice argumentują, że trzeba próbować, bo nie ma już innej opcji; symulacje pokazują, że nawet natychmiastowe zrezygnowanie z paliw kopalnych może już nie uratować lodu morskiego latem. „To smutne, że do tego doszło. Musimy coś z tym zrobić – powiedział mi Sherwin, gdy staliśmy na lodowej równinie. – Same redukcje emisji już nie wystarczą.”

LICZĄCA OBECNIE około 1800 mieszkańców osada Cambridge Bay, którą brytyjscy odkrywcy nazwali tak w XIX wieku na cześć księcia Cambridge, znajduje się na Wyspie Wiktorii, należącej do dziesiątki największych wysp świata. Cieśnina, nad którą leży osada, oddziela wyspę od stałego lądu. W Cambridge



Artykuł został przygotowany we współpracy z Ocean Reporting Network – inicjatywą Pulitzer Center.



Cian Sherwin, współzałożyciel Real Ice, nawierca otwór w lodzie morskim o grubości metra, by dostać się do wody (z lewej). Inuicki myśliwy David Kavanna wskazuje zespołowi miejsca do wierceń znajdujące się 7 km od Cambridge Bay (z prawej).

Bay mieszkają głównie Inuici. Gdy tu przyleciałem dwusilnikowym samolotem turbośmigłowym, przywitał mnie wypchany wół piżmowy i tabliczka poświęcona brytyjskiej ekspedycji Johna Franklina z 1845 roku. Cambridge Bay leży przy Przejściu Północno-Zachodnim – skutym lodem szlaku morskim łączącym Europę i Azję, poszukiwanym przez żeglarzy przez 400 lat. Dwa okręty Franklina – *Erebus* i *Terror* – utknęły w lodzie morskim, który zimą w pobliżu Cambridge Bay zbija się w fałdy o wysokości dochodzącej do 10 m. Wszyscy uczestnicy ekspedycji – 129 osób – zmarli z zimna, głodu lub na skutek chorób. Dziś Przejście przemierzają co roku statki wycieczkowe, często odwiedzając groby członków ekspedycji Franklina.

Inuici mają własną nazwę Cambridge Bay. Brzmi ona „Ikaluktutiak”, co oznacza „dobre miejsce do łowienia ryb”. Przez tysiące lat ich koczowniczy przodkowie przybywali tu, by łowić golce (*Salvelinus alpinus*) – srebrzysto-pomarańczowych kuzynów pstrągów i lososi. Na stałe Inuici

osiedlili się tu dopiero w połowie XX wieku, gdy amerykańska armia zatrudniła ich do budowy wieży nawigacyjnej i stacji radarowej mającej wykrywać sowieckie bombowce przelatujące nad biegunem. Podczas zimnej wojny pojawiały się też różne pomysły na militarne wykorzystanie środowiska Arktyki. ZSRR rozważał niszczenie lodu morskiego za pomocą pyłu węglowego lub eksplozji. Zdetonowano nawet trzy bomby jądrowe, by otworzyć kanał żeglugowy przez Arktykę. W USA fizyk Edward Teller w ramach Project Plowshare chciał z użyciem bomb jądrowych usunąć część lodu, by stworzyć port na Alasce. Prawie uzyskał na to zgodę.

Dziś celem geoinżynierii jest schłodzenie Ziemi i powstrzymanie zmian klimatycznych. Niektórzy naukowcy i przedsiębiorcy koncentrują się na koncepcji rozpraszania siarczanowych drobin w stratosferze, by blokować światło słoneczne – może to zmniejszyć ocieplenie, ale też zaburzyć globalne zjawiska pogodowe, takie jak południowoazjatycki

monsun. Meksyk niedawno zakazał takiej geoinżynierii słonecznej po tym, jak startup Make Sunsets z Doliny Krzemowej wypuścił na jego terytorium dwa balony wypełnione dwutlenkiem siarki. Miasto Alameda w Kalifornii przerwało eksperyment polegający na rozsiewaniu cząstek soli morskiej w atmosferze, aby powstałe dzięki temu chmury odbijały więcej światła słonecznego. Testy terenowe przeprowadzone w Arktyce, Antarktyce i na olbrzymich lodowcach Himalajów nazywanych czasami „trzecim biegunem” wywołały mniej kontrowersji. Może dlatego, że ewentualne skutki uboczne dotknęłyby głównie te odległe miejsca. W Islandii i Indiach w ramach projektu Bright Ice Initiative, który narodził się w Dolinie Krzemowej, rozrzucono na lodowcach małe szklane kulki, aby odbijały więcej światła słonecznego i tym samym hamowały topnienie lodu. Chińskie agencje rządowe za pomocą rakiet, samolotów, dronów i kominów rozprowadzają w chmurach związki chemiczne, które mają wywołać opady śniegu ponad lodowcami na Wyżynie Tybetańskiej. Badacze ze Skandynawii opracowują gigantyczne zasłony mocowane do dna morskiego, które miałyby chronić



od spodu lodowce szelfowe Antarktydy przed ciepłą wodą oceaniczną. Aby to pomogło klimatowi, potrzebne byłyby miliardy dolarów.

Idea pogrubiania lodu morskiego narodziła się w kosmosie. W 2012 roku Steve Desch, astrofizyk z Arizona State University, wziął udział w burzliwej debacie poświęconej globalnemu ociepleniu. Naukowiec na co dzień badający lodowe ciała niebieskie, takie jak Charon – księżyc Plutona, zaczął się zastanawiać, czy sposobem na zyskanie cennego czasu mogłoby być sztuczne zwiększenie objętości lodu w Arktyce. Problem w tym, że lód morski zamarza od spodu. Kiedy powstanie jego pierwsza warstwa, izoluje ona wodę od powietrza, które może być nawet o 50°C zimniejsze. Im lód jest grubszy, tym wolniej rośnie. W 2016 roku Desch opublikował artykuł, w którym zgłosił nowatorski projekt: napędzane wiatrem pompy pogrubiałyby lód morski w ten sposób, że wypompowywałyby wodę spod lodu i rozpylały ją na jego powierzchni.

W tym samym czasie studenci z walijskiej uczelni Bangor University, zainspirowani filmem dokumentalnym o Arktyce, zbudowali „maszynę do mrożenia” – dość

Biolog Brendan Kelly przywiązuje pompę wodną do drewnianej ranki ustawionej wokół odwiertu (z lewej). Zasilana bateriami pompa tłoczy wodę morską spod lodu na jego powierzchnię, na której ona się rozlewa i przeobraża w nowy lód, który zwiększa grubość tafli, dzięki czemu ta przetrwa dłużej w lecie (z prawej).

niezdarną konstrukcję z węży strażackich tryskających wodą niczym zraszacz ogrodowy. Jednym z tych studentów był Sherwin. Zachęcony artykułem Descha w 2022 roku założył Real Ice, wraz z Simonem Woodsem, przedsiębiorcą z Londynu. Chciał sprawdzić, czy pomysł naukowca da się zastosować na masową skalę. Wkrótce zrekrutowali Descha oraz kilku badaczy lodu morskiego jako doradców. Pierwszy test wykonano w styczniu 2023 roku w osadzie Nome na Alasce, wykorzystując do tego celu komercyjną pompę. Rok później eksperyment przeniesiono do stacji badawczej Canadian High Arctic Research Station w Cambridge Bay. „To, co robimy, nie jest oczywiście naturalnym procesem przyrodniczym, ale niewiele od niego odbiega” – podkreśla Desch.

**P**O TYM, JAK ZESPÓŁ WYWIERCIŁ pierwszy otwór tamtego lutowego poranka i uruchomił pompę, pojechaliśmy skuterami do następnego punktu

oznaczonego przez GPS, znajdującego się kilkaset metrów dalej. Ponownie wywiercono otwór i umieszczono w nim kolejną pompę; po chwili pojawiła się woda, z głośnym syknięciem meldując się na powierzchni lodu. Łącznie zainstalowaliśmy cztery pompy w czterech miejscach. Woda tworzyła kałuże, których brzegi przesuwali się, po czym wsiąkała w nierówną warstwę śniegu zalegającego na powierzchni lodu, tworząc kruchą skorupę grubości nawet 25 cm, wyglądającą początkowo jak lukier, ale po kilku godzinach zmieniającą się w jaskrawoniebieską zmrożoną breję.

Po lunchu składającym się z batonów owocowych oraz chipsów ziemniaczanych, zjedzonym w namiocie przy małym piecyku gazowym, udaliśmy się na miejsce, w którym pak nawiercono dzień wcześniej. Pod cienką warstwą śniegu znajdował się płaski, szary lód. Jeden z ochotników za pomocą długiego wiertła wywiercił otwór i spuścił do niego



składaną miarkę z mosiężnymi zakończeniami. Lód miał grubość 152 cm; przybyło mu blisko 30 cm.

W kolejnych tygodniach lód miał grubieć jeszcze bardziej. Ponieważ śnieg jest lepszym izolatorem niż lód – to właśnie dlatego igloo tak dobrze utrzymują ciepło – zalewanie wodą i mrożenie śniegu sprawia, że więcej zimna przenika do spodnich warstw tafli lodowej, przyczyniając się do zwiększenia jej masy. Podczas zimy 2023/24 ekipa z Real Ice pogrubiała łącznie 4,1 tys. m<sup>2</sup> lodu morskiego. Podczas rekonesansu przeprowadzonego w maju 2024 roku odnotowano znaczący przyrost lodu. Tam, gdzie miała miejsce ingerencja człowieka, grubość lodu wynosiła średnio 1,9 m, podczas gdy naturalna grubość lodu w okolicy 1,44 m. „Lód przyrastał także od spodu, to dlatego efekt był tak wyraźny” – powiedział mi Woods podczas wiercenia otworu pomiarowego w kolejnym punkcie, w którym zimą przeprowadzono eksperyment.

Jednak śnieg jest też lepszym lustrem od lodu, co może komplikować ocenę efektywności takiej ingerencji. Pokryty śniegiem lód morski odbija 90% promieniowania słonecznego, podczas gdy czysty

lód odbija 50–70%. Real Ice musiałby pozwolić śniegowi na wiosenną akumulację na lodzie, aby uzupełnił on ten śnieg, który zimą został zalany wodą. Inaczej topnienie lodu mogłoby się nasilić po takiej ingerencji.

Również z innych przyczyn zalewanie śniegu wodą morską tłoczoną spod lodu mogłoby przynieść efekt odwrotny do zamierzonego. Kiedy woda morska zamarza, znajdująca się w niej sól jest usuwana z kryształków lodu i gromadzi się w formie rozlewisk solanki na powierzchni lodowych tafli. Ta sól obniża temperaturę zamarzania lodu. Jeśli zatem w wyniku wypompowywania wody na powierzchni lodu zgromadzi się latem więcej soli, może ona przyspieszyć jego znikanie.

Na razie nie wydaje się, by tak się działo. Następnego ranka Woods umieścił pustą czerwoną beczkę na wiertle i wywiercił otwór w miejscu, gdzie zmrażana była woda. Wydobyl na powierzchnię rdzeń lodowy mniej więcej tak długi i gruby, jak męskie ramię. Oglądając go pod słońce, zobaczyliśmy cieniutkie niczym włos kanały wydrążone przez słoną ciecz. „To naturalny proces, dzięki któremu solanka powraca do oceanu” – oznajmił Woods.

Wciąż nie jest jasne, w jaki sposób takie pogrubianie lodu wpływa na organizmy morskie, począwszy od mikroskopijnych alg przywierających do lodu od spodu. Te glony zjada zooplankton, który konsumują ryby pożerane z kolei przez ssaki. Pewnego ranka na przejażdżkę skuterem zabrał mnie Brendan Kelly, biolog morski z University of Alaska w Fairbanks. Naszym celem był niski grzbiet wypchnięty do góry przez dwie wielkie płyty lodu, które zderzyły się ze sobą. Kelly był doradcą ds. badań polarnych w administracji Baracka Obamy. Foki i niedźwiedzie polarne bada od ponad czterech dekad. Był świadkiem rosnących emisji gazów cieplarnianych. Choć jest sceptycznie nastawiony do geoinżynierii, zgodził się doradzać Real Ice.

W zamglonym powietrzu monochromatyczny krajobraz Arktyki wydawał się pozbawiony życia. Jednak kiedy wdrapaliśmy się na lodową grzędę, Kelly zatrzymał się i pokazał mi trop lisa polarnego odbity na złodzionym śniegu. Później znalazł na śniegu plamę moczu, potem wyschnięte zielone odchody, a na koniec małą jamę. „To chyba dzieło foki obrączkowanej (*Pusa hispida*)” – stwierdził. Wiosną foki drążą dziury w zaspach śnieżnych. Ukrywają tam

swoje białe, puszyste młode w czasie, gdy same nurkują w poszukiwaniu ryb i skorupiaków. Lisy i niedźwiedzie polarne ryją w takich miejscach, próbując znaleźć młode. Kelly położył się na miękkim śniegu, ale nie znalazł legowiska. Kiedy wstał, z jego białych wąsów zwisały małe sople.

Niedźwiedzie polarne także są uzależnione od śniegu. Wykopują nory w większych zaspach, aby ogrzać swoje młode, które w chwili narodzin mają rozmiary świnki morskiej. Większość arktycznego śniegu spada późną jesienią. Nie wiadomo, czy po pogrubieniu lodu, przeprowadzonym zimą na większą skalę, byłoby go wiosną wystarczająco dużo, aby foki i niedźwiedzie dały radę wygrzebać w nim jamy. Oczywiście populacje niedźwiedzi i fok skurczą się i tak, gdy ich lodowe siedliska stopnieją. Czy jednak mimo wszystko metoda proponowana przez Real Ice nie uczyni przyrodzie więcej szkód niż pożytku? „Tego nie wiemy – przyznał Kelly. – Musimy sprawdzić.”

ZESZŁEJ ZIMY w ciągu dwóch miesięcy Real Ice tłoczyło wodę morską przez blisko 200 otworów. Wiertła i skutery śnieżne się psuły, członkowie zespołu doznawali miejscowych odmrożeń, a lisy polarne przegryzały długie, cienkie przewody termistorów służących do pomiaru temperatury w śniegu i lodzie. Naukowcy pogrubili łącznie 250 tys. m<sup>2</sup> lodu morskiego. Pak lodowy w Arktyce traci co roku obszar większy 300 tys. razy.

Zastosowanie metody na masową skalę wymagałoby „przeniesienia całej maszyni pod wodę” – powiedział mi później Sherwin. Prestiżowa Scuola Superiore Sant’Anna we włoskiej Pizie pracuje nad podwodnym dronem długości 2 m, który będzie przewiercał lód od spodu za pomocą podgrzewanej rury, a następnie pompował wodę na zewnątrz. Na wizualizacjach pojazd przypomina składany scyzoryk z rurą zamiast ostrza. Real Ice planuje przetestować prototyp jeszcze w tym roku, mówi Andrea Ceccolini, włoski informatyk i inwestor, który dołączył do firmy w 2022 roku.

Plan zakłada pogrubienie 100 km<sup>2</sup> lodu morskiego zimą 2027/28, aby zademonstrować skuteczność techniki rządowi i inwestorom. To brzmi jak fantazja: rój 50 dronów w kilka minut wytopi otwory i zacznie pompować wodę, monitorując postępy za pomocą kamer na podczerwień. Technicy znajdujący się na pływającej lub lądowej platformie będą wymieniali dronom akumulatory, podłączając te wyczerpane do

ładowarek zasilanych turbinami wiatrowymi, zielonym wodorem lub amoniakiem dowiezionym statkami. Skorzystanie z energii elektrycznej pochodzącej z kanadyjskiego regionu Nunavut zwiększyłoby presję na klimat, ponieważ ta energia jest wytworzona z paliw kopalnych.

Ostateczny cel – pogrubienie miliona kilometrów kwadratowych lodu morskiego – wymagałby, według szacunków Ceccoliniego, użycia 500 tys. dronów, które potrzebowałyby 2 terawatogodzin energii i 20 tys. osób do obsługi. Roczny koszt wyniósłby 10 mld dolarów. Dronów byłoby ponad 100 razy więcej niż podwodnych sond Argo, których obecnie krąży w oceanach 3800. Eksperti od dronów mówią też, że potrzebna byłaby rewolucja w technologiach produkcji ognia.

W jakim stopniu wszystkie te działania przyczyniłyby się do zahamowania globalnego ocieplenia, zależałoby od wielu zmiennych związanych z bilansem cieplnym globu oraz dynamiką topnienia lodu morskiego. Real Ice szacuje, że zachowanie miliona kilometrów kwadratowych lodu przez dodatkowy miesiąc w sezonie letnim odpowiada usunięciu z atmosfery 930 mln ton CO<sub>2</sub> w ciągu 20 lat. Biorąc to pod uwagę, 10 mld dolarów to naprawdę niewiele, przy czym efekt chłodzący pojawiłby się natychmiast – twierdzi Ceccolini. Wychwycenie takiej ilości CO<sub>2</sub> z atmosfery za pomocą istniejących systemów kosztowałoby co najmniej 465 mld dolarów. Dla porównania, w tej chwili ludzkość wtłacza 910 mln ton CO<sub>2</sub> w ciągu ośmiu dni. Pogrubianie lodu morskiego to „plaster przydatny do chwili porządnego wyleczenia pacjenta, którym jest nasza planeta” – argumentuje Ceccolini.

W Cambridge Bay pompy pracowały przez trzy-cztery godziny dziennie. Potem były wyciągane z lodowego otworu czekaniem. Na ich powierzchni natychmiast pojawiały się grube, białe wykwyty mrozowe. Szybkość zamarzania wody była zdumiewająca, tak jak ogrom zamarznętej równiny ciągnęcej się po horyzoncie. Nietrudno było wyobrazić sobie te setki tysięcy morskich dronów topiących dziury w lodzie dzień w dzień przez całą zimę w ciągu kolejnych dekad.

JEDYNĄ „AUTOSTRADĄ” w Cambridge Bay jest lód morski. Zimą i wiosną Inuici przemierzają na skuterach śnieżnych setki kilometrów po lodzie, by łowić ryby w przerębłach oraz polować na piźmowoły i foki – powiedział mi miejscowy myśliwy Brandon Langan w swoim

salonie, na którego ścianie wisiała czarna skóra piźmowoła. Pracuje on na pół etatu dla Real Ice, sterując dronami, które mierzą albedo pogrubionego lodu. Gdy lód latem topnieje, Inuici łowią golce wpływające do zatoki morskiej z okolicznych jezior i strumieni. Gdy jesienią lód powraca, wówczas polują na karibu, które migrują po nim na południe, wracając na kontynent. Dwa z trzech posiłków stanowią ryby lub dziczyzna. „Lód morski to dla nas życie – powiedział mi Langan. – Daje nam pożywienie. Daje nam ubrania.”

Dziś jednak myśliwi, którzy kiedyś wyruszyli na lód w pałdzierniku, muszą czekać aż do grudnia. Kilku z nich nawet wpadło pod lód. Na wiosnę lód pęka i topnieje szybciej. Jego zniknięcie sprawiło, że miejscowa populacja karibu skurczyła się o 90%; zwierzęta głodują, czekając na możliwość przeprawy się po lodzie na stały ląd, a gdy zbyt długo zbierają się przy brzegu, stają się łatwym łupem dla wilków. Setki karibu utonęły, próbując migrować po zbyt cienkim lodzie. Jeden z myśliwych, który zatrudnił się jako przewodnik dla ekipy Real Ice, powiedział mi podczas rozmowy w szkolnej bibliotece, że ma nadzieję, iż pogrubianie lodu doprowadzi do odnowienia populacji zwierzyny łownej.

Wiedza i obserwacje inuickie są nieocenione. Przez wieki naukowcy i odkrywcy często ignorowali tradycyjną wiedzę rdzennych mieszkańców Arktyki. Ostatnimi, którzy widzieli członków ekspedycji Franklina, byli Inuici – spotkali głodujących marynarzy ciągnących tratwę ratunkową przez skutą lodem zatokę Washington Bay i odzianych w wełniane ubrania zamiast futer. Franklin nie żył, a ci, którzy pozostali przy życiu, wymieniali koraliki na focze mięso – najwyraźniej sami nie potrafili polować na foki. Później rdzenni mieszkańcy Arktyki znaleźli poćwiartowane ciała rozbitków, co wskazywało na kanibalizm. Charles Dickens zakwestionował te relacje jako „dzikie opowieści bandy nieokrzeszańców” i zasugerował, że to Inuici zabili ludzi Franklina. Ten kolonialny sposób myślenia utrzymał się, gdy kontrolę nad Arktyką przejęły państwa. Kanada i Alaska zabierały rdzenne dzieci, włącznie z tymi z Cambridge Bay, aby poddać je przemocowej reedukacji w szkołach z internatem, gdzie tysiące z nich zmarło.

Tydzień po spotkaniu z Langanem rozmawiałem z Sarą Olsvih, przewodniczącą organizacji Inuit Circumpolar Council, sprzeciwiającą się próbom prowadzenia eksperymentów z zakrywaniem dna morskiego w pobliżu jej rodzinnej Grenlandii



Sherwin przygląda się rdzeniowi lodowemu wydobytemu z miejsca, gdzie wcześniej pracowały pompy.

za pomocą specjalnych osłon. Uważa ona, że państwa powinny wprowadzić przepisy regulujące wszelkie testy geoinżynieryjne, a naukowcy muszą otrzymać od lokalnych społeczności zgodę na takie próby. „Gdy ktoś przychodzi mówi i że potrzebuje naszej ziemi w imię większego dobra, to jest to inna forma kolonizacji” – mówi Olsvig.

Real Ice uzyskało pozwolenia od inuickiego rządu terytorium Nunavut oraz od organizacji myśliwych i traperów z Cambridge Bay. Według Ceccoliniego cała operacja zostanie wstrzymana, jeśli pogrubianie lodu okaże się nieskuteczne lub szkodliwe. Choć firma może opatentować technologię dronów, statut Real Ice zabrania dzielenia się zyskami z innymi podmiotami. W grę wchodzi jednak założenie nowej spółki z udziałem reprezentacji rdzennych mieszkańców, jeśli podjęta zostanie decyzja o znacznym zwiększeniu skali działań.

Miejscowa starszyzna jest jednak ostrożna. W dni powszednie seniorzy z Cambridge Bay spotykają się w centrum kultury, gdzie szyją buty i rękawice z futra oraz rozmawiają w rodzimym języku. Podczas przerwy na herbatę i konserwowaną rybę zapytałem troje z nich, co sądzą o pogrubianiu lodu morskiego. Powiedzieli mi, że byłoby zaniepokojeni obecnością dronów, gdyby Real Ice chciał wyznaczyć liczący 100 km<sup>2</sup> powierzchni obszar demonstracyjny w cieśninie w pobliżu Cambridge Bay, zamiast gdzieś dalej na północ. „Jeśli zaczęła robić takie rzeczy pod wodą, znikną nam ryby, foki i inne zwierzęta” – niepokoiła się Annie Atighioyak, która na świat przyszła w 1940 roku w igloo zbudowanym na lodzie morskim.

**PONIEWAŻ** EMISJE gazów cieplarnianych wciąż rosną, nastawienie do geoinżynierii zaczyna się zmieniać. Dwa tygodnie przed przybyciem do Cambridge Bay wziąłem udział w dorocznej konferencji naukowej poświęconej Arktyce, organizowanej przez Oceanographic Institute of Monaco. Na podium wyszedł Frederik Paulsen, szwedzki miliardier farmaceutyczny w sztytm na miarę garniturze i bezramkowych okularach. Choć nie jest naukowcem, Paulsen jako pierwszy dotarł do wszystkich ośmiu biegunów Ziemi – geograficznego, geomagnetycznego, magnetycznego i najmniej dostępnych biegunów każdej z półkul, a w 2007 roku znalazł się na pokładzie jednego z dwóch batyskafów, które zatknęły rosyjską flagę

na dnie Oceanu Arktycznego na biegunie północnym.

W 2023 roku, lecąc ultralekkim samolotem ponad Grenlandią, zdziwił się, że niegdyś lśniący białą ładolód przybiera coraz ciemniejszy odcień, ponieważ spada na niego coraz mniej śniegu. Doszedł wtedy do wniosku, że tylko – jak się wyraził – „bardziej drastyczne rozwiązania” mogą uchronić ludzkość przed katastrofalnymi skutkami zmian klimatu, ponieważ ludzkość okazała się niezdolna do ograniczenia zużycia paliw kopalnych. „Badanie klimatu to za mało. Teraz jest czas na działanie” – strofował naukowców.

University of the Arctic – sieć instytucji edukacyjnych, której Paulsen przewodniczy – dokonała oceny potencjału 61 interwencji polarnych, od zraszania lodowców armatkami śnieżnymi po liny blokujące górom lodowym dryf na południe. Podczas konferencji John Moore, glaciolog z Uniwersytetu Lapońskiego w Rovaniemi, zaprezentował ideę zasłony rozpinanej na dnie morskim. Obecny był także Fonger Ypma z Arctic Reflections, holenderskiej


firmy zainteresowanej pogrubianiem lodu morskiego, która prowadziła testy terenowe na Nowej Fundlandii i Svalbardzie. W zeszłym roku odwiedził on Cambridge Bay, by zobaczyć, jak to robi Real Ice, ale zamiast dronów chciałby zastosować wiel-

kie, ruchome platformy z pompami.

Wzrost zainteresowania takimi koncepcjami doprowadził do rozłamu wśród badaczy Arktyki. W październiku 2024 roku w artykule naukowym przygotowanym przez 42 topowych glaciologów uznano pogrubianie lodu i inne technologie geoinżynierii polarnej za niebezpieczne i niewykonalne. Oslanianie dna morskiego mogłoby utrudnić dostawę składników pokarmowych do fitoplanktonu konsumującego CO<sub>2</sub>. Rozsypywanie szklanych kulek mogłoby obniżyć zdolność lodu do odbijania promieniowania słonecznego, gdyby został on pokryty świeżym śniegiem. Jednak główny zarzut jest taki, że geoinżynieria „czyni dekarbonizację znacznie mniej atrakcyjną” – mówi Heidi Sevestre, współautorka artykułu, która w zeszłym roku przyglądała się testom prowadzonym przez Arctic Reflections. „To nie usuwa przyczyny problemu, czyli emisji związków węgla” – zauważa.

Na konferencji w Monaco wystąpił Kim Holmén, klimatolog z Norweskiego

*Dokończenie na stronie 77*



Zakwity mrozowe powstają wtedy, kiedy bardzo zimne powietrze osiada na świeżym lodzie (z lewej), który jest relatywnie znacznie cieplejszy. Para wodna uciekająca z lodu gwałtownie krystalizuje, tworząc struktury podobne do kwiatów.



# Osobliwa historia diagramów Venna

Jak diagramy Venna łączą logikę z geometrią

JACK MURTAGH

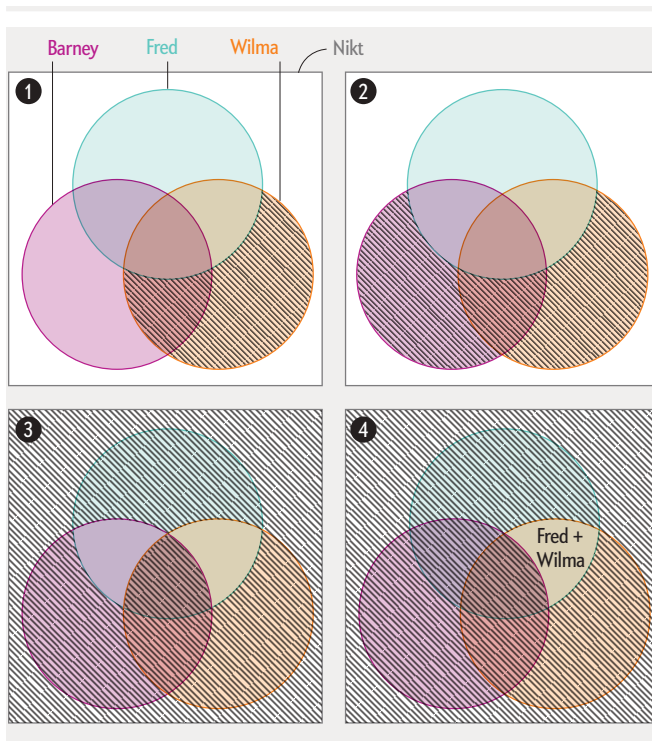
**W** WYDANEJ W 1994 ROKU KSIĄŻCE *The Mathematical Universe (Matematyczny wszechświat*, Zysk i S-ka, 2001) William Dunham (obecnie emerytowany profesor matematyki Muhlenberg College) napisał o angielskim matematyku Johnie Vennie: „W długiej historii matematyki nikt nie stał się bardziej znany dzięki równie skromnemu dorobkowi”. Chociaż ów dorobek, czyli diagram Venna, nie przyczynił się do rozwiązania jakichkolwiek ważnych problemów, jednak tworzące go pierścienie zasługują na uwagę. Dzięki zwiezłej, obrazowej formie przedstawienia zależności między zbiorami wciąż się przydają na szkolnych lekcjach i opracowującym infografiki.

Diagramy Venna to coś więcej niż tylko pomoce wizualne. Mogą także ułatwiać rozwiązywanie powszednich problemów logicznych i są źródłem ciekawych zagadnień geometrycznych. Na przykład: czy prawidłowy diagram Venna może składać się z czterech zachodzących na siebie okręgów? Nie, ponieważ takiego układu nie da się utworzyć. Dostrzegł to też Venn i wymyślił sprytnie rozwiązanie, co doprowadziło do dalszych zagadek geometrycznych, z którymi matematycy mierzą się do dziś.

Diagramy Venna debiutowały w 1880 roku jako sposób wizualizacji analizowanych wówczas zagadnień logicznych. Później skorzystano z nich w gałęzi matematyki zwanej teorią mnogości, zajmującej się zbiorami. Zazwyczaj diagramy Venna składają się z okręgów, z których każdy odpowiada pewnemu zbiorowi elementów (na przykład jeden zbiorowi sympatycznych stworzeń, a drugi Broadwayowskich musicali). Obszar nakładania się dwóch takich okręgów zawiera elementy należące do obu zestawów – w naszym przypadku mogłyby to być koty (to także tytuł musicalu). Podobnie jak przy wykresach statystycznych wizualizacja problemu często czyni go jaśniejszym.

Wyobraźmy sobie, że planujemy przyjęcie i uwzględniamy kaprysy gości: **1** – jeśli przyjdzie Wilma, to będzie i Fred; **2** – jeżeli zjawi się Barney, to pozostali również; **3** – Barney nie przyjdzie, jeśli przyjdzie Wilma, ale przyjdzie na pewno, jeśli jej nie będzie; **4** – jeśli Fred i Barney przyjdą, to zjawi się i Wilma (ale nie wiadomo, co zrobi Wilma, gdy przyjdzie tylko jeden z tych panów). Których osób należałoby się spodziewać na przyjęciu?

Diagram Venna zapewnia, dzięki wizualizacji, systematyczny sposób rozwiązania tego problemu. Każde stwierdzenie wyklucza pewne możliwości, które są oznaczane przez zaciemnianie odpowiadających im obszarów. Warunek **1** wyklucza obszary uczestnictwa Wilmy bez Freda; warunek **2** eliminuje obszar uczestnictwa tylko Barneya; warunek **3** wyklucza obszar Barney+Wilma, a także obszar nieobecności wszystkich oraz obecności tylko Freda. Ostatni warunek **4** oznacza eliminację obecności pary Fred+Barney bez Wilmy. Spodziewanymi gośćmi na przyjęciu będą więc tylko Fred i Wilma.

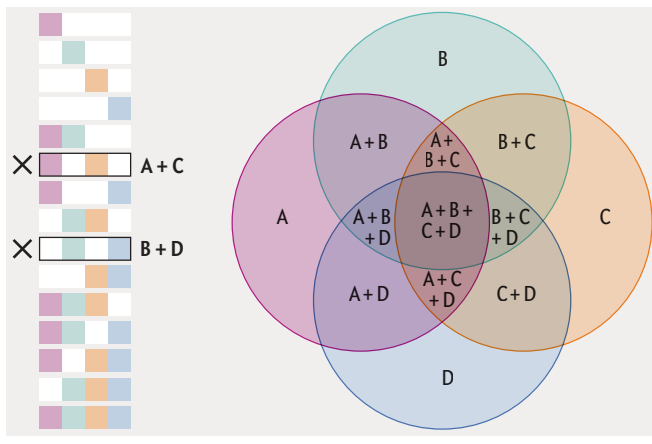


Jack Murtagh pisze o matematyce, w tym rekreacyjnej, m.in. o ciekawostkach matematycznych w „Scientific American” i na portalu Gizmodo. Uzyskał doktorat z informatyki teoretycznej na Harvard University. Aktywny w serwisie X (@JackPMurtagh).

Większość diagramów Venna zawiera dwa lub trzy nakładające się okręgi. A co, jeśli do rozważenia są co najmniej cztery możliwości?

Spróbujmy naświetlić ten problem. Przy czterech okręgach (A, B, C, D) nie ma obszaru nakładania się wyłącznie okręgów A i C; podobnie jest w przypadku B i D. Tymczasem prawidłowy diagram Venna powinien przedstawiać każdą możliwą kombinację możliwości. Inny układ czterech kół nic nie zmienia – wada w postaci wspomnianych braków pozostaje.

Aby wyjaśnić przyczynę tego stanu, należy zacząć od jednego okręgu, czyli



oznaczenia odpowiadających dwu możliwościom dwu obszarów – wewnątrz i na zewnątrz okręgu. Dodanie drugiego okręgu oznacza podwojenie liczby możliwości – pierwszy okrąg, drugi, pierwszy+drugi i obszar zewnętrzny, czyli brak możliwości. Stanie się tak, gdy okręgi przetną się w dwóch punktach (styk w jednym punkcie skutkuje tylko trzema obszarami: pierwszy, drugi i zewnętrzny). Z każdym nowym okręgiem liczba obszarów powinna być podwajana, jeśli mają być uwzględnione wszystkie możliwości. Aby tak było, liczba nowych obszarów powinna sięgać liczby nowych przecięć, podczas gdy nowy okrąg może przeciąć każdy już istniejący tylko w dwóch punktach.

Ta zależność funkcjonuje przy trzecim okręgu, bo dodawane są cztery obszary, a nowy okrąg może przeciąć każdy z dwu

istniejących w dwóch punktach, co daje cztery nowe przecięcia. Problem pojawia się przy czwartym okręgu, ponieważ przecięć może być tylko sześć, a potrzeba ośmiu nowych obszarów.

Oczywiście, okrąg jako kształt nie jest jedyną możliwością. Można by zamiast okręgów wykreślić kręte pętle tak, aby uzyskać potrzebną liczbę obszarów, choć kosztem elegancji diagramu. Cztery przecinające się sfery również mogłyby wyznaczać obszary, ale trójwymiarowe wizualizacje są mało czytelne. Venn dostrzegł wady okręgów, więc zamiast nich zaproponował wizualizowanie zbiorów elipsami.



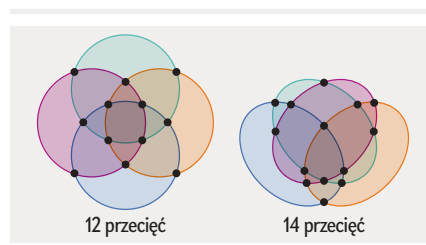
Warto zauważyć ładną symetrię obrotową diagramu Grünbauma: obrót o jedną piątą kąta pełnego nie zmienia układu. Podobnie dwukolowy diagram Venna po obrocie o 180° wygląda tak samo, a trzykolowy po obrocie o 120°. Natomiast czteroeliptyczny diagram nie ma symetrii obrotowej. Jak to wyjaśnić? Co łączy dwa, trzy i pięć, ale nie obejmuje czterech?

W 1960 roku David W. Henderson, wówczas student Swarthmore College, odpowiedział na to pytanie zaskakującym odkryciem (uzupełnił je później matematycy Stan Wagon z Macalester College i Peter Webb z University of Minnesota). Henderson udowodnił, że diagram Venna może mieć symetrię obrotową tylko wtedy, gdy objęta nim liczba zbiorów jest liczbą pierwszą (podzielna tylko przez 1 i samą siebie, np. 2, 3 lub 5, ale nie 4). Ścisłej: Henderson wykazał, że konieczna jest liczba pierwsza zbiorów, a nie, że dla każdej liczby pierwszej diagram Venna z symetrią obrotową uda się utworzyć. To zapoczątkowało konkurs na znalezienie takiego diagramu, który obejmowałby największą liczbę zbiorów. Osobliwy 11-zbiorowy diagram Venna utworzył Peter Hamburger z Indiana University – Purdue University Fort Wayne.

Henderson udowodnił, że aby diagram Venna był symetryczny względem obrotu, musi składać się z liczby zbiorów będącej liczbą pierwszą. Dopiero w 2004 roku matematycy z Uniwersytetu Południowej Karoliny potwierdzili, że dla każdej liczby pierwszej można stworzyć diagram Venna o symetrii obrotowej.

Jeśli sądzisz, że to odkrycie sprawiło, iż matematycy odłożyli ołówki i uznali temat diagramów Venna za zamknięty, to znaczy, że nie śledziłeś tej historii uważnie. Wręcz przeciwnie – środowisko naukowe podniosło swoje estetyczne wymagania i zaczęło poszukiwać figur o jeszcze bardziej wysublimowanych właściwościach.

Cytowany na wstępie Dunham twierdził, że diagramy Venna są przereklamowane. Nawet jeśli się z tym zgodzić, wpada uznać ich atrakcyjność jako formę wizualizacji łączącą logikę z geometrią. ■

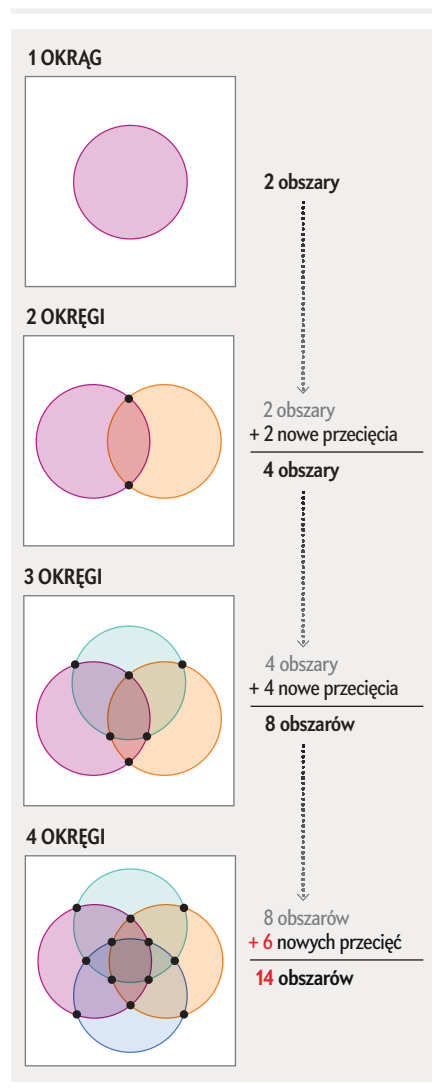


W odróżnieniu od okręgów dwie elipsy mogą się przecinać w czterech punktach. To eliminuje ograniczenia związane z okręgami, ale tylko na krótką metę. Elipsy działają bowiem dla czterech i pięciu zbiorów, lecz dalej zawodzą podobnie jak okręgi. Jeśli więc liczba zbiorów rośnie, potrzeba coraz bardziej wymyślnych kształtów, by wizualizować zależności.

Można zatem stwierdzić, że przy więcej niż czterech zbiorach diagramy Venna przestają być użyteczne. Już zresztą cztery elipsy tworzą układ mało przejrzysty.

Może zatem w przypadku pięciu i więcej zbiorów należałoby zrezygnować z reprezentacji wizualnych? Ale użyteczność nie jest w matematyce tak istotna, jak piękno i niezwykłość. Choć diagramy Venna debiutowały w ramach logiki i teorii mnogości, to dzięki zagadce czterech okręgów pojawiły się interesujące problemy geometryczne, a badanie geometrii diagramów Venna trwa do dziś.

Venn i kontynuatorzy jego prac uważali, że korzystając z elips nie można utworzyć wszystkich 32 obszarów wymaganych dla diagramu obejmującego pięć zbiorów. Dopiero w 1975 roku matematyk Branko Grünbaum z University of Washington udowodnił przykładem powyżej z prawej, że to możliwe.



ZRODŁO: Venn Diagrams and Independent Families of Sets, Branko Grünbaum, „Mathematics Magazine”, tom 48, nr 1, styczeń 1975 (odręcznie)

# Od figur do mebli

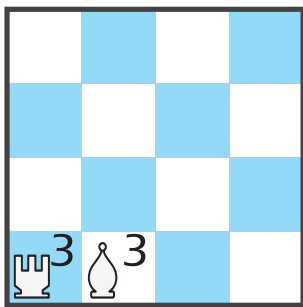
czyli stopniowanie swobód

MAREK PENSZKO

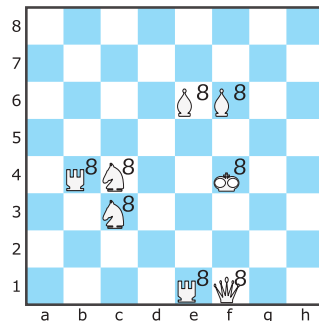
**LE STOPNI SWOBODY** ma skoczek szachowy? W ujęciu mechaniki klasycznej każda figura na szachownicy stanowi odpowiednik punktu na płaszczyźnie, więc dysponuje dwoma stopniami swobody. Jednak ograniczenie, wynikające ze specyficznego sposobu poruszania się skoczka, można potraktować jako tzw. wiązanie, a wówczas liczba stopni swobody zmaleje do jednego.

W lamigłówkach matematyczno-szachowych sprawa jest prostsza: stopień swobody lub po prostu swoboda ( $S$ ) oznacza co innego – jest synonimem liczby różnych posunięć, jakie można wykonać figurą w określonej sytuacji; inaczej mówiąc, jest liczbą **pustych pól**, na które można daną figurę przemieścić **jednym ruchem**.

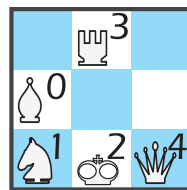
Na początku partii szachów wszystkie figury tworzą rząd zablokowany pionkami, więc dla większości z nich  $S=0$ . Tylko skoczki dysponują dwoma ruchami, a zatem na starcie  $S_S=2$ . W przeciwnej sytuacji, czyli przy pełnym luzie, po ulokowaniu figury solo na pustej szachownicy  $8 \times 8$ , stopień swobody prawie każdej jest zmienny: najmniejszy w rogu, a wzrasta w miarę przemieszczania się – najpierw ku środkowi boku, a następnie ku środkowi planszy. W rezultacie  $S$  skoczka  $S_S=2, 3, 4, 6$  lub  $8$ ; króla  $S_K=3, 5$  lub  $8$ ; gońca  $S_G=7, 9, 11$  lub  $13$ ; hetmana  $S_H=21, 23, 25$  albo  $27$ . Taka sama jest wszędzie tylko swoboda solistki wieży –  $S_W=14$ .



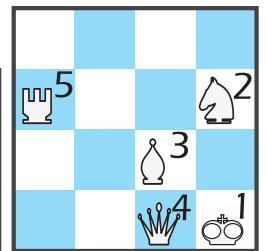
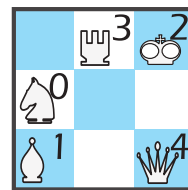
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

\*\*\*

$S$  stanowi parametr, który bywa podstawą problemów, polegających na umieszczeniu na planszy  $n \times n$  kilku figur tak, aby ich stopnie swobody miały określoną wartość. Problemy wynikają z faktu, że figury mogą się blokować, a tym samym wzajemnie ograniczać swoje stopnie swobody. Zadania są proste na małych planszach przy minimalnej liczbie figur – dwóch lub trzech. Na przykład nietrudno ulokować wieżę i gońca na szachownicy  $4 \times 4$  tak, aby ich stopnie swobody były jednakowe. Jest jedno rozwiązanie unikalne, czyli z pominięciem obrotów i odbić lustrzanych –  $S_W=S_G=3$  (rys. 1). Nieco trudniej uporać się z ustawieniem większej liczby figur na większej planszy, na przykład kompletu białych – król, hetman, dwie wieże, dwa skoczki i dwa gońce na polach różnego

**Marek Penszko**, z wykształcenia inż. poligrafii, jest znawcą i popularyzatorem gier i rozrywek umysłowych, głównie matematyki rekreacyjnej. Współpracuje z wieloma czasopismami, m.in. pisze blog dla „Polityki”.

koloru – na typowej szachownicy  $8 \times 8$ . Przykładowe rozwiązanie na rys. 2 – każda figura ma osiem stopni swobody, czyli najwięcej przy założeniu, że wszystkie powinny mieć tyle samo.

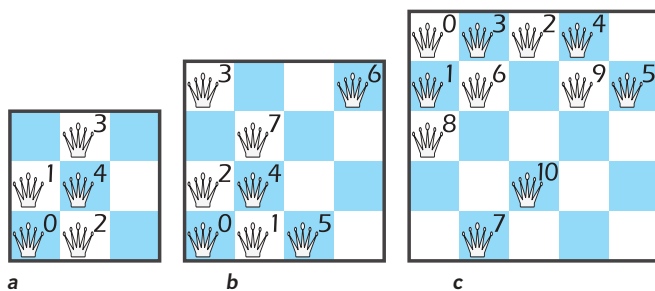
Mimo że szukając ustawień zwanych kardynalnymi (komplet ośmiu figur z jednakową swobodą każdej na szachownicy  $8 \times 8$ ), korzysta się głównie z metody prób i błędów, nie jest to zadanie aż tak trudne, jak mogłoby się wydawać. Nie tylko dlatego, że unikalnych ustawień, często różniących się bardzo nieznacznie, jest kilkaset (np. na rys. 2 wieżę z b4 można przesunąć na b3 bez zmiany swobód). Istotna jest także elementarna logika, o której wypada pamiętać w trakcie próbowania i błędzenia. Na przykład konieczne jest m.in.:

- radykalne blokowanie hetmana, aby jego  $S$  nie przekroczył 8;
- nieumieszczanie króla przy brzegu, gdy  $S$  powinien być większy od 5;
- lokowanie skoczka w centralnym kwadracie  $4 \times 4$ , jeśli  $S$  ma być większe niż 6.

W zdecydowanej większości ustawień kardynalnych stopień swobody równy jest 7 lub 8. Nieliczne ustawienia z mniejszym  $S$  są bardzo trudne do znalezienia bez komputerowego wsparcia. Jedno z nich stanowi w uproszczonej formie temat pierwszego zadania konkursowego.

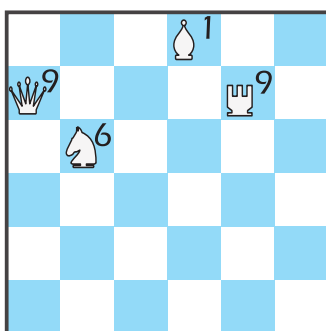
Innym konkretnym rodzajem ustawień są ustawienia progresywne. Stopień swobody każdej figury jest w nich inny, ale wszystkie tworzą fragment ciągu liczb naturalnych od  $S_{min}$  do  $S_{min}+f-1$ , gdzie  $f$  jest liczbą figur. Standard stanowi  $f=5$ , czyli pięć różnych figur rozmieszczonych na planszy  $n \times n$ , gdzie  $3 \leq n \leq 8$ . Im większe  $n$ , tym większe trzeba przyjąć  $S_{min}$ , aby odpowiednie ustawienie było możliwe. Praktycznie ustawienia z  $S_{min}=0$  uda się zrealizować tylko na planszy  $3 \times 3$ . Wszystkich unikalnych ustawień na takiej miniplanszy jest 30; dwa przykłady na rys. 3 znamienne są tym, że figury z zerową swobodą nie zajmują rogu. Na planszy  $4 \times 4$  swoboda zaczyna się od  $S_{min}=1$  (przykład na rys. 4).

Swego czasu dość wnikliwie analizowano rodzaj ustawień progresywnych z figurami jednego rodzaju – hetmanami. Zaczęło się od progresywnego rozmieszczenia na planszy  $3 \times 3$  pięciu hetmanów ( $S=0, 1, 2, 3$  i  $4$ , rys. 5a). To maksymalna ich liczba, bo największe  $S$  nie może przekraczać liczby pozostawionych wolnych pól. Zadanie polegało na znalezieniu najliczniejszych hetmańskich ustawień progresywnych na większych planszach. Dla formatu  $4 \times 4$  liczba hetmanów też może być największą możliwą, równą 8 (rys. 5b), ale dla większych plansz coraz bardziej odbiega w minus od teoretycznie maksymalnej. Na przykład przy  $5 \times 5$  jest mniejsza o 2 (rys. 5c).

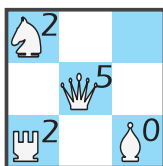


Rys. 5

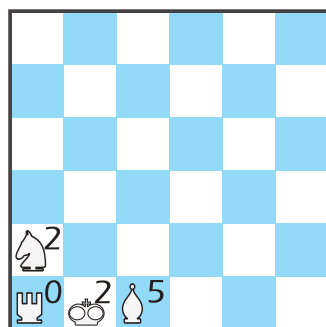
Lamigłówki szachowe ze stopniami swobody bywają też lżejszego kalibru. W jednej z nich chodzi o umieszczenie na szachownicy czterech figur tak, aby ich stopnie swobody tworzyły liczbę oznaczającą określony rok. Pierwsze takie zadanie pojawiło się w argentyńskim magazynie „El Acertijo”. Na planszy 6×6 lokowano hetmana, wieżę, gońca i skoczka, a ich stopnie swobody miały składać się na rok publikacji zadania, czyli 1996. Okazało się, że unikalnych rozwiązań jest 15; przykładowe na rys. 6. Chyba każdy czterocyfrowy rok da się wyrazić w taki sposób, ale wszystko zależy od wielkości planszy. Do bieżącego idealnie pasuje najmniejsza zapewniająca luz, czyli 3×3 (rys. 7), choć ustawienie możliwe jest także przy formacie 6×6 (rys. 8).



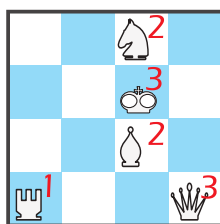
Rys. 6



Rys. 7



Rys. 8

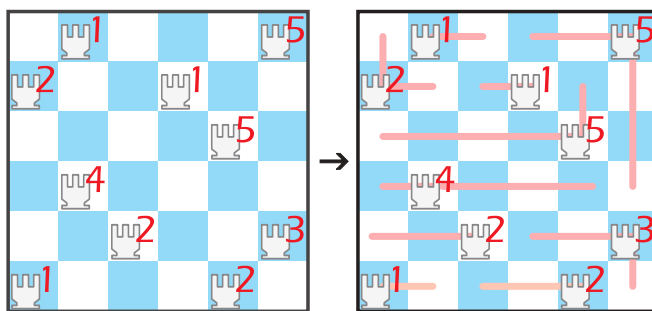


Rys. 9

\*\*\*

Szachowy stopień swobody jest ściśle związany ze stopniem agresji. Agresja jest z reguły mniejsza niż swoboda, bo mocniej egoistyczna, czyli wyklucza atakowanie tego samego pola przez więcej niż jedną figurę, a równocześnie żadne pole nie może pozostać nieatakowane. Przykład zadania z takimi założeniami przedstawia rys. 9: każda czerwona cyfra oznacza liczbę atakowanych przez daną figurę pustych pól i każde puste pole atakuje jedna i tylko jedna figura. Taka sytuacja kojarzy się z dokonaniem

przez figury czegoś w rodzaju rozbioru planszy, bo każda podporządkowuje sobie odrębną strefę wpływów określonej wielkości. Lamigłówka na rys. 9 jest bardzo prosta – polega na oznaczeniu każdego pola pierwszą literą nazwy atakującej je figury (K, H, W, S, G). Zadania tego rodzaju są zwykle łatwe, ale formalnie złożone (zestaw różnych figur) i zapewne między innymi dlatego pojawiają się sporadycznie. Natomiast od wielu lat popularne są ich odmiany z udziałem tylko jednego rodzaju figur – wież. Na rys. 10 z lewej jest przykład takiego zadania na diagramie 6×6, a z prawej jego rozwiązanie. Strefy wpływów wież oznaczone są wysuwanymi przez nie różowymi „mackami”.



Rys. 10

Agresywność albo moc każdej wieży, czyli towarzysząca jej liczba, równa się oczywiście liczbie pól zawłaszczanych mackami przez wieżę. Wiąże się z tym schematyczna i prosta podstawowa metoda rozwiązywania – opanowanie pola przez wieżę następuje z dwóch powodów: albo dlatego, że tylko jedna wieża jest w stanie sięgnąć go macką, albo ze względu na konieczność wykorzystania pełnej mocy danej wieży. Oczywiście nie każdy układ wież umożliwi bezpośrednie korzystanie z tych dwu sposobów.

Praktycznie w zadaniach inspirowanych ruchem wieży figury te nie występują. W kratkach są tylko cyfry, a nazwa zadania jest całkiem nie wieżowa (*macki, cztery wiatry, kielki, sieć promieni*, a początkowo – tuż po debiucie na początku lat 90. w Japonii – *uorujikkku*, czyli *ścianki logiczne*). Aspekty matematyczne i niektóre odmiany takich lamigłówek były w tej rubryce omawiane przed pięciu laty.

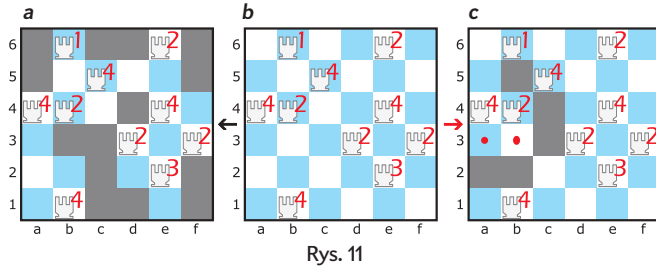
\*\*\*

W większości odmian *macek* szachowa wersja stopnia swobody pełni drugorzędną rolę albo jest zmodyfikowana. Najciekawsza modyfikacja występuje w rodzaju lamigłówki powstałym, podobnie jak *macki*, w Japonii i noszącym mało oryginalną nazwę *wyspa*. Stopień swobody wieży jest w tym przypadku określany nieco inaczej – równa się liczbie pól, do których tą figurą można dotrzeć nie, jak poprzednio, w jednym ruchu, ale w dowolnej liczbie ruchów. Wyjaśnieniem tej sytuacji jest przedstawione na rys. 11a rozwiązanie przykładowej konkretnej lamigłówki.

Część pól jest zaciemniona, a jasne tworzą spójny wielokąt, czyli tytułową wyspę, na której stoją wieże. Ciemne pola blokują zasięg ruchów wież, ale blokadami są względem siebie także same wieże. Każdą można przemieścić na tyle pustych jasnych pól między blokadami, jaka obok niej jest liczba. Na przykład wieże a4 i b1 mają w zasięgu te same 4 pola (a1, a2, a3, b2), wieżę e2 można dotrzeć do 3 pól (d2, e1, e3), a wieżę e6 – do 2 (d5, e5). W zadaniu (rys. 11b) ujawnione są wszystkie wieże, a celem jest

zaciemnienie takich pól, aby stopień swobody każdej odpowiadał towarzyszącej jej liczbie – czyli takie, jak na rys. 11a. Należy przy tym pamiętać, że jasne pola powinny tworzyć jedną wyspę.

*Wyspy z natury nie są zadaniami prostymi.*

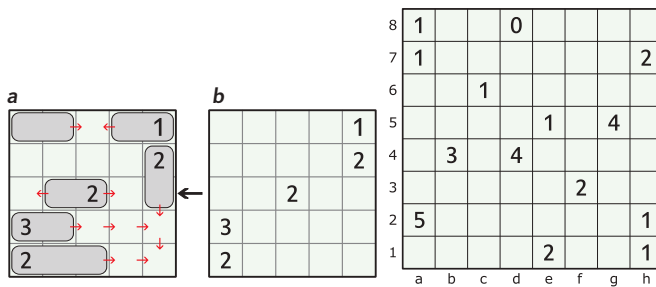


Rys. 11

Rozwiązywanie polega na szukaniu pól, które można potraktować jednoznacznie. Na przykład na rys. 11b przynajmniej dwa z trzech pól a5, a6, b5 muszą zostać zaciemnione, aby wieża b6 nie przekroczyła jednostkowego zasięgu. W związku z tym wieża a4 musi sięgać przynajmniej trzech pól pod nią. Jasne pozostanie więc na pewno pole a3, a jako drugie pole a2 lub b3. Jeśli przyjmiemy, że jasne będzie b3, to wypełni się zasięg wieży b4 i trzeba będzie zaciemnić otoczenie (rys. 11c), a w efekcie przekroczony zostanie zasięg wieży b6 ze względu na konieczność pozostawienia jasnymi pól a5 i a6, aby dopełnić zasięg wieży a4. Zatem jasne musi pozostać pole a2 itd. Jak z tego widać *wyspowe* logiczne wnioskowanie bywa mocno zakręcone.

\* \* \*

Zbliżony do szachowego stopień swobody występuje jeszcze w dwóch interesujących rodzajach zadań – także z japońskim rodowodem. Figury szachowe są w nich zastąpione figurami geometrycznymi. Zasady pierwszej, o autorskiej nazwie *parking*, też najlepiej wyjaśnić na rozwiązaniu przykładu.

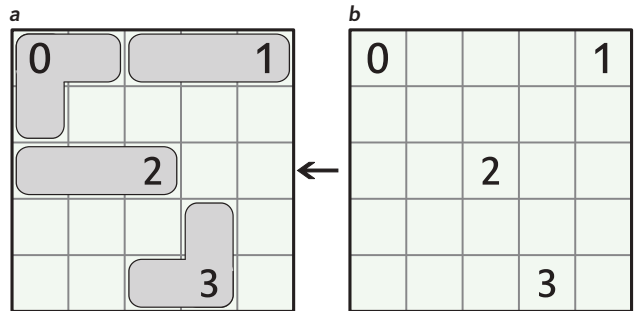


Rys. 12

Rys. 13

Diagram udaje kwadratowy parking, na którym stoją auta. Wielkość parkingu może być różna; w przykładzie ma on wymiary 5x5 (rys. 12a). Auta są prostokątami dwóch rodzajów – mniejszymi, zajmującymi dwa pola (1x2) i większymi, pokrywającymi trzy pola (1x3). Na autach są cyfry, ale niekoniecznie na każdym. Cyfra oznacza liczbę stopni swobody auta, czyli liczbę wolnych pól, na które można nim wjechać (wskazane czerwonymi strzałkami) – oczywiście jadąc tylko do przodu lub do tyłu. Tak wygląda rozwiązanie, a zadanie różni się od niego brakiem aut (rys. 12b). Ich zaparkowanie jest celem główkowym – takim, jak na rys. 12a, czyli spełniającym podane wyżej warunki oraz dodatkowy: puste pola powinny tworzyć jeden spójny wielokąt, na podobieństwo wyspy w zadaniu opisanym wcześniej. Trzeba też pamiętać, że auta mogą się pojawić także na polach

bez cyfry. *Parking*, podobnie jak wyspa, jest z reguły dość trudną łamigłówką. Można się o tym przekonać, rozwiązując zadanie (kokursowe) na rys. 13.

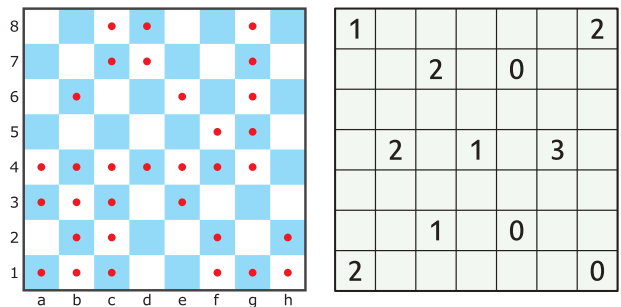


Rys. 14

W drugim rodzaju zadań „figurowych” parking zastąpiony jest *magazynem mebli*, o wielkości 3 kratki, ale o dwóch różnych kształtach – jedno są proste, drugie narożnikowe. W rozwiązaniu przykładu (rys. 14a) na każdym meblu znajduje się jedna cyfra równa jego stopniowi swobody. Jednak stopień swobody w przypadku mebli ma nieco inne znaczenie – równy jest liczbie głównych kierunków (z czterech możliwych), w których można dany mebel przesunąć. W zadaniu (rys. 14b) mebli brak, a chodzi oczywiście o rozmieszczenie ich pełnego asortymentu we właściwy sposób, czyli w przykładzie tak, jak na rys. 14a. *Mebli* należą do bardzo twardych łamigłówekowych orzechów, czego potwierdzeniem będzie zapewne trzecie zadanie konkursowe.

### ZADANIA

1. Na szachownicy 8x8 (rys. 15) stoi komplet 8 niewidocznych figur: król, hetman, dwie wieże, dwa skoczki i dwa gońce zajmujące pola różnego koloru. Każda figura atakuje dokładnie 5 pustych pól. Wszystkie atakowane pola oznaczone są czerwonym punktem. Należy „uwidocznić” cały komplet, a jako odpowiedź podać pozycje konkretnych figur, korzystając ze współrzędnych umieszczonych przy brzegach diagramu.



Rys. 15

Rys. 16

2. Celem jest znalezienie rozmieszczenia aut na parkingu z rys. 13. W rozwiązaniu wystarczy podać liczby parkujących mniejszych (2-polowych) i większych (3-polowych) aut.  
3. Celem jest rozmieszczenie na diagramie (rys. 16) dwóch rodzajów 3-polowych mebli – zgodnie z instrukcją opisaną w artykule. Jako rozwiązanie wystarczy podać ogólną liczbę mebli prostych oraz ogólną liczbę narożników.

*Rozwiązania prosimy nadsyłać do 31 sierpnia 2025 r. pocztą elektroniczną (redakcja@swiatnauki.pl), wpisując w temacie*

e-maila hasło **UG 08/25**. Spośród autorów poprawnych rozwiązań przynajmniej dwóch zadań wyłonimy pięciu zwycięzców i nagrodzimy ich książką Chrisa Haughtona Historia informacji ufundowaną przez Wydawnictwo Naukowe PWN. Warunkiem udziału w konkursie jest zamieszczenie w e-mailu z odpowiedzią oświadczenia:

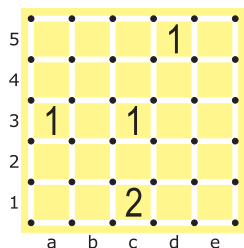


Zapoznałam/em się z regulaminem konkursu i akceptuję jego treść oraz wyrażam zgodę na przetwarzanie danych osobowych na potrzeby realizacji konkursu.

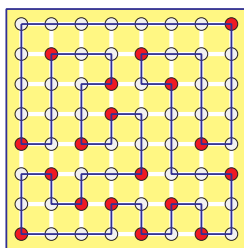
Regulamin konkursu jest dostępny na stronie [www.swiatnauki.pl](http://www.swiatnauki.pl).

### ROZWIĄZANIA ZADAŃ Z NUMERU CZERWCOWEGO

1. Pokropka  $6 \times 6$  (36 kropek) z czterema ujawnionymi cyframi (a3-1, c1-2, c3-1, d5-1; rys. 17) jest przykładem mającej jedno rozwiązanie przy minimalnej liczbie cyfr na starcie, z których żadna nie jest trójką.

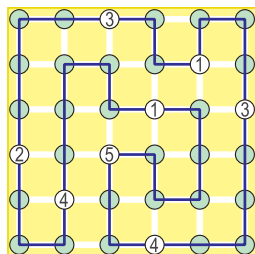


Rys. 17

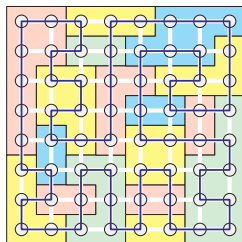


Rys. 18

2. Pętla załamuje się 12 razy w koralikach przy brzegu diagramu. Pełne rozwiązanie na rys. 18.



Rys. 19



Rys. 20

3. Liczba załamania cyklu - 18. Pełne rozwiązanie na rys. 19.  
4. Cykl załamuje się 38 razy. Pełne rozwiązanie na rys. 20.

Za poprawne rozwiązanie przynajmniej dwóch zadań książkę Kelly i Zacha Weinersmithów *Miasto na Marsie*, ufundowaną przez Wydawnictwo Insignis, otrzymują: Paweł Gocłowski z Warszawy, Maciej Horodecki z Torunia, Mateusz Kostanek z Krakowa, Mariusz Trzyna z Hyznego oraz Kamil Zaborowski z Suwałk.

### Rozwiązanie zagadki matematycznej ze strony 16

129. Każda liczba jest sumą tylu początkowych liczb pierwszych, ile boków ma otaczający ją wielokąt (także fragment ciągu zaczynającego się zerem, w którym każda liczba jest większa od poprzedniej o kolejną liczbę pierwszą, począwszy od 2).

„Arktyka do ponownego zmrożenia”, dokończenie ze strony 70

Instytutu Polarnego, który spędził ponad trzy dekady na Svalbardzie, najszybciej ocieplającym się zakątku Ziemi. Przekonywał, że naprawianie szkód wyrządzonych przez jedne technologie poprzez użycie kolejnych technologii to szaleństwo. „Każdego dnia popełniam błędy, podobnie jak wy. System, który będzie musiał działać bez zarzutu każdego dnia, kiedyś zawiedzie” – powiedział. Krytycy mówią, że efektywniejsze byłoby przekierowanie wszystkich środków, także tych na geoinżynierię, na redukcję emisji.

Wydatki na arktyczną geoinżynierię są niewielkie, ale rosną. Arctic Reflections pozyskało 1,1 mln dolarów, a Moore – 2 mln. Szeffowie Real Ice przeznaczyci 5 mln dolarów na projekt pogrubienia lodu, co stanowi tylko ułamek budżetu projektu pilotażowego obejmującego 100 km<sup>2</sup>. Trudno wyobrazić sobie, by państwa zdecydowały się przeznaczać co roku 10 mld dolarów na pogrubianie lodu morskiego, szczególnie że Chiny, Rosja i podobno także USA chcą rozwijać arktyczne szlaki żeglugowe – dla nich im mniej lodu tym lepiej. Brazylijski Amazon Fund zajmujący się ochroną lasów tropikalnych, który jest dla Real Ice przykładem właściwego modelu finansowania, zebrał od rządów dotąd tylko 780 mln dolarów.

Wejście do gry prywatnych inwestorów oznaczałoby zapewne mniej politycznych przeszkód. W marcu tego roku Paulsen, który przeznaczył 100 tys. euro na nagrody dla projektów „odwracających zmiany w Arktyce”, zorganizował w Genewie przyjęcie, podczas którego przedstawił badaczy zajmujących się geoinżynierią, w tym doradcę Real Ice, dwóm tuzinom potencjalnych darczyńców. Zamierza organizować podobne spotkania za oceanem. Twierdzi, że rozmawiał o geoinżynierii z przedstawicielami administracji Trumpa, która wycofała USA z Porozumienia Paryskiego. Nikt z administracji nie odpowiedział na naszą prośbę o komentarz.

Real Ice i Arctic Reflections chciałyby, tak jak start-up Makee Subsets, oferować kredyty węglowe. Osoba lub firma chcąca zrekompensować własne emisje CO<sub>2</sub> płaci start-upowi za wstrzelanie balonów z dwutlenkiem siarki blokującym światło słoneczne. Kredyty węglowe sfinansowały sadzenie drzew usuwających z atmosfery dziesiątki milionów ton CO<sub>2</sub>. Jednakże takie mechanizmy finansowe są krytykowane jako „licencja na zanieczyszczanie” pozwalająca uniknąć cięć w emisjach. Wśród największych nabywców są firmy technologiczne, takie jak Microsoft, których emisje szybko rosną wraz z otwieraniem kolejnych centrów danych na potrzeby SI.

Kelly, były doradca Białego Domu, obawia się, że geoinżynieria zostanie „przejęta” przez firmy naftowe lub technologiczne, które w ten sposób zyskają pretekst, aby nic nie zmieniać w swojej działalności. Jednak jeszcze bardziej martwi go gigantyczny eksperyment geoinżynieryjny, który już prowadzimy, emitując co roku dziesiątki miliardów ton gazów cieplarnianych. Firmy zajmujące się geoinżynierią lodową muszą być gotowe na wstrzymanie swoich działań, jeśli zaczną one szkodzić przyrodzie lub podważać cele klimatyczne – powiedział mi przy kawie na stacji badawczej w Cambridge Bay. Muszą być gotowe na zawrócenie z drogi, postąpić inaczej niż Franklin i inni zbyt pewni siebie odkrywcy przekonani, że zdobędą Przejście Północno-Zachodnie. „Powinniśmy wciąż zadawać sobie pytanie: czy nie popadliśmy w pychę? – powiedział Kelly. – Bo ryzykowne jest przekonanie, że to my [ludzie] wiemy wszystko najlepiej i że Przejście na pewno będzie nasze.”

# Zmiana planów?

Nieosiągnięcie celu klimatycznego nie oznacza, że musimy się poddać

Tekst ANDY REISINGER

Infografiki ANGELA MORELLI, TOM GABRIEL JOHANSEN/INFODESIGNLAB

**G**LOBALNE OCIEPLENIE ma wkrótce przekroczyć 1,5°C, co oznacza, że świat najprawdopodobniej nie zdoła osiągnąć celu Porozumienia Paryskiego z 2015 roku, jakim było ograniczenie wzrostu średniej temperatury do 1,5°C. Nawet jeśli Ziemia ociepli się bardziej, ten kluczowy cel nie jest jeszcze całkowicie poza zasięgiem. Naukowcy twierdzą, że możemy obniżyć średnią globalną temperaturę, jeśli podwoimy nasze wysiłki. Koncepcja „rozminięcia się z celem” (overshoot) – czyli przekroczenia progu, ale późniejszego zejścia poniżej – powinna być dla nas zarówno ostrzeżeniem, jak i wskazówką do dalszego działania.

Ostrzeżenie jest poważne: nawet jeśli uda się obniżyć temperaturę do 1,5°C przed końcem tego stulecia, niektóre straty i tak będą nieodwracalne. Ekosystemy ulegną przekształceniu, gatunki wyginą, a wrażliwe społeczności poniosą trwałe szkody. Niemniej jednak dopilnowanie, aby przekroczenie progu 1,5°C było jedynie tymczasowe, mogłoby ograniczyć szkody i dać pewną szansę na regenerację.

Badania wskazują, że jeśli utrzymamy maksymalny wzrost ocieplenia wyraźnie poniżej 2°C, istnieje spora nadzieja na obniżenie temperatury w przyszłości poprzez usuwanie z atmosfery znacznie większej ilości dwutlenku węgla, niż go wyemitujemy – takie podejście nosi nazwę emisji ujemnej netto. Samo osiągnięcie emisji zerowej netto – taki jest główny cel wielu krajów uprzemysłowionych – nie wystarczy już, aby ograniczyć ocieplenie do 1,5°C.

Przyznanie, że przekroczyliśmy ten próg, nie usprawiedliwia opóźniania działań; przeciwnie – wymaga ich przyspieszenia. Każda dziesiąta część stopnia ocieplenia powyżej 1,5°C przyniesie Ziemi i ludzkości więcej szkód i utrudni powrót do tego poziomu, jednocześnie komplikując adaptację do zmieniającego się klimatu. W obecnej sytuacji strategia niepoddawania się i przyspieszenia działań może być naszym jedynym rozwiązaniem w walce z długofalowymi skutkami zmiany klimatu.

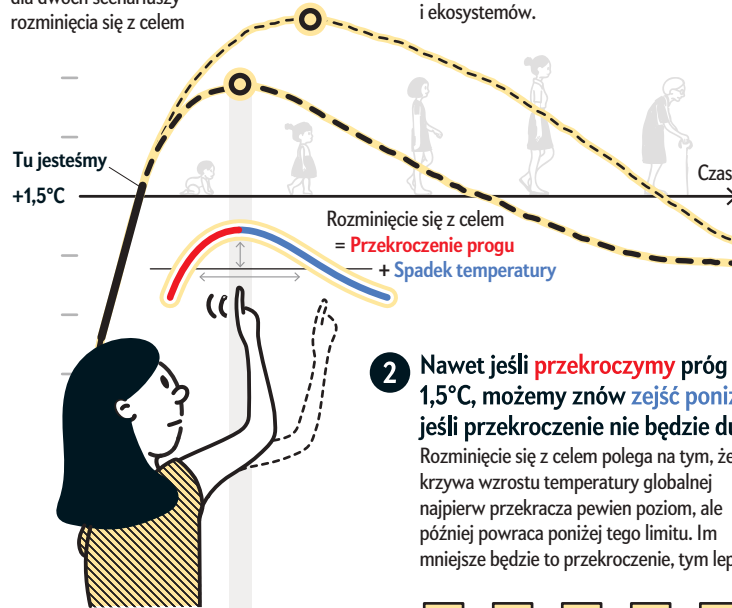
ZRÓDŁO: „Overshoot: A Conceptual Review of Exceeding and Returning to global Warming of 1.5°C”, Andy Reisinger, Jan S. Fuglestedt, Anna Pirani i in., „Annual Review of Environment and Resources”, tom 50; 14 kwietnia 2025 (dane liczbowe)

Andy Reisinger jest honorowym profesorem nadzwyczajnym Institute for Climate, Energy and Disaster Solutions na Australian National University.

## 1 Kluczowym zadaniem pozostaje jak najmniejsze przekroczenie progu 1,5°C.

Im bardziej przekroczymy wartość 1,5°C, tym poważniejsze będą skutki dla ludzi i ekosystemów.

Zmiana temperatury [°C]  
W stosunku do okresu 1850–1900 dla dwóch scenariuszy rozminięcia się z celem

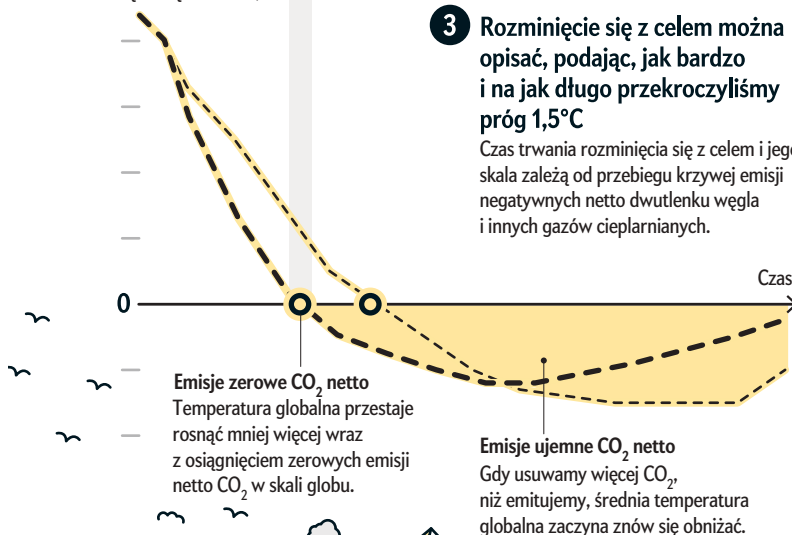


## 2 Nawet jeśli przekroczyliśmy próg 1,5°C, możemy znów zejść poniżej, jeśli przekroczenie nie będzie duże.

Rozminięcie się z celem polega na tym, że krzywa wzrostu temperatury globalnej najpierw przekracza pewien poziom, ale później powraca poniżej tego limitu. Im mniejsze będzie to przekroczenie, tym lepiej.



Emisje netto dwutlenku węgla (w gigatonach CO<sub>2</sub> rocznie)  
Dla dwóch scenariuszy rozminięcia się z celem 1,5°C



## 3 Rozminięcie się z celem można opisać, podając, jak bardzo i na jak długo przekroczyliśmy próg 1,5°C

Czas trwania rozminięcia się z celem i jego skala zależą od przebiegu krzywej emisji negatywnych netto dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych.

Emisje zerowe CO<sub>2</sub> netto  
Temperatura globalna przestaje rosnać mniej więcej wraz z osiągnięciem zerowych emisji netto CO<sub>2</sub> w skali globu.

Emisje ujemne CO<sub>2</sub> netto  
Gdy usuwamy więcej CO<sub>2</sub>, niż emitujemy, średnia temperatura globalna zaczyna znów się obniżać.

**4** Świat, który powróci do globalnego ocieplenia na poziomie 1,5°C, będzie znacząco zmieniony i bardziej zniszczony.

Niektóre szkody związane z klimatem, dotykające ludzi i ekosystemy, będą nieodwracalne, a część z nich może po dłuższym czasie zostać częściowo cofnięta.



**Szkody nieodwracalne**



- A** Ocieplenie przyczynia się do podniesienia poziomu mórz, powodując erozję, powodzię i zasolenie wód gruntowych
- B** Odwrócenie globalnego ocieplenia spowalnia tempo podnoszenia się mórz, ale nie stopuje go przez wiele tysięcy lat

- Zagrożone obszary przybrzeżne
- Wzrost poziomu mórz
- Znikanie lodu morskiego
- Wymieranie gatunków

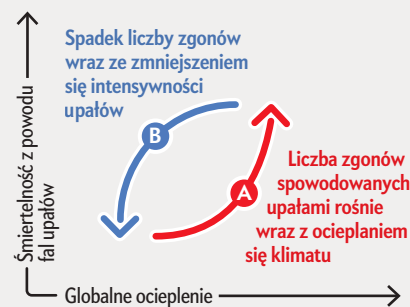
**Szkody odwracalne w dłuższym czasie**



- A** Ocieplenie zwiększa ryzyko suszy i upałów, szkodząc uprawom i zwierzętom oraz pogłębiając niepewność żywnościową.
- B** Odwrócenie globalnego ocieplenia może złagodzić presję klimatyczną, ale wychodzenie z głodu i ubóstwa będzie trwało przez wiele pokoleń.

- Brak bezpieczeństwa żywnościowego
- Niskie plony
- Transformacja ekosystemów

**Szkody odwracalne w krótkim czasie**



- A** Wyższa średnia globalna temperatura powoduje częstsze i bardziej intensywne fale upałów, zwiększając zagrożenia dla zdrowia ludzi.
- B** Odwrócenie globalnego ocieplenia ogranicza ekstremalne upały i może zmniejszyć liczbę zgonów z tego powodu.

- Fale gorąca
- Zgony wywołane falami gorąca
- Wichury
- Susze
- Powodzie



**5** Powrót globalnego ocieplenia do poziomu poniżej 1,5°C byłby złożonym procesem.

Ostateczny kształt trajektorii hamowania wzrostu temperatury zależec będzie od przyjętej polityki, która będzie wynikiem m.in. odpowiedzi na poniższe pytania.

Czy korzyści wynikające ze sprowadzenia temperatury poniżej progu 1,5°C przewyższają koszty?

Czy dopuszczenie przejściowego przekroczenia progu wpłynie na obecne działania powstrzymujące ocieplenie?

Czy usuwanie dwutlenku węgla z atmosfery jest równie ważne, jak redukowanie skali trwających emisji, czy też odwraca uwagę od głównego celu?

Czy wysiłki na rzecz odwrócenia globalnego ocieplenia mogą przeszkodzić w działaniach adaptacyjnych?

# ŚWIATNAUKI

POLSKA EDYCJA

## SCIENTIFIC AMERICAN

### W NUMERZE WRZEŚNIOWYM

Terapia zastępcza testosteronem (TRT) prawdopodobnie nigdy wcześniej nie była tak popularna i szeroko promowana. Jakie daje korzyści?

A jakie są przeciwwskazania, ryzyko i działania niepożądane? I kto jej tak naprawdę potrzebuje? Globalny rynek TRT jest szacowany na 1,9 mld dolarów i obejmuje sprzedaż tabletek, plastrów, zastrzyków lub wszczepialnych kapsułek.

Więcej o wszystkich za i przeciw tej terapii w kolejnym numerze, a ponadto:

Nastolatki – co zrobić, żeby chciały się uczyć?

Recykling na wybiegach

Duńscy poszukiwacze-amatorzy pomagają odkrywać historię kraju

Pasieki w niebezpieczeństwie

Złożone stereotypie ruchowe – co to takiego?

Kwantowa fizyka to nonsens – wywiad z Gerardem 't Hooftem

**Prócz tego:**

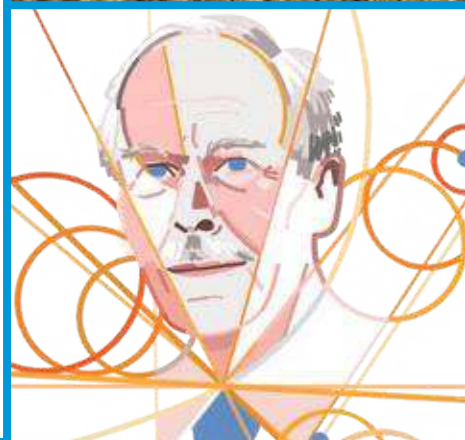
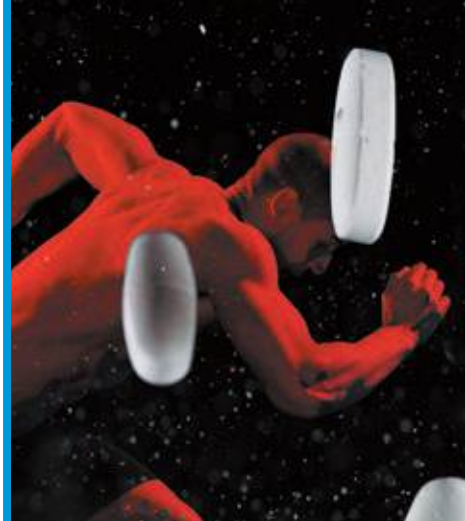
Gestykulacja macek

Osobliwe radiowe kręgi

Czy wierzyć swoim wspomnieniom?

Tak cię piszą, jak cię... słyszą

**INNI OPISUJĄ NAUKĘ.  
NASI AUTORZY JĄ TWORZĄ.**



„Świat Nauki” w wersji cyfrowej: [www.projektpulsar.pl](http://www.projektpulsar.pl)

Prenumerata papierowa: [www.sklep.polityka.pl/sn](http://www.sklep.polityka.pl/sn)

W kioskach numer wrześniowy dostępny od 27 sierpnia



## Wszystko, co warto wiedzieć o nauce:

- **naukowe newsy** – najważniejsze odkrycia, najnowsze wyniki badań
- artykuły naukowe z bieżących wydań „**Polityki**”
- aktualne wydania „**Wiedzy i Życia**” – pisma, które od ponad 100 lat przybliża zdobycze nauki i techniki
- aktualne wydania „**Świata Nauki**” – polskiej edycji renomowanego pisma „Scientific American”
- bogate **archiwum tekstów** najlepszych dziennikarzy naukowych oraz ekspertów i badaczy w swoich specjalizacjach

## ...i jeszcze więcej:

- recenzje najgorętszych książek popularnonaukowych
- cotygodniowy newsletter Pulsara
- podcasty „**Pulsar nadaje**” – już ponad 140 rozmów z najciekawszymi polskimi naukowcami



**WOJCIECH DZWOLAK:**

Śledzę magię  
w mikrokroplach



**BARBARA PIETRZAK:**

Rozwielitka uwodzi  
osobowością

pulsar

**KAROLINA MROZIEWICZ:**

Tygiel rodzi wyjątkowe dzieła



Zaprenumeruj nas:  
**projektpulsar.pl**

ROZRUSZAJ SZARE KOMÓRKI!

# OMNIBUS

Wydanie specjalne nr 4/2023  
Cena 11,99 zł (w tym 8% VAT)

POLITYKA

WAKACYJNY

Zagadki  
i ćwiczenia  
umysłowe



Szarady

Quizy

Rebusy

Krzyżówki

Słupki

Łamańce



## Letnie łamanie głowy!

Zagadki logiczne, liczbowe, słowne  
i wiedzy – każdy znajdzie coś dla siebie!

Do kupienia w punktach sprzedaży oraz na [sklep.polityka.pl](http://sklep.polityka.pl)