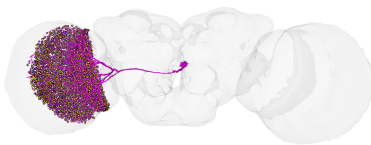


W ostatnim etapie konstrukcji mapy wszystkie rozpoznane obiekty warto opisać lub innymi słowy *zaanotować*, tzn. nanieść poszczególne nazwy ulic, parków, rzek. W neuronauce anotacje zapewniają niezbędny kontekst do interpretacji wzorców połączeń neuronalnych. Znajomość typu komórki i neuroprzekaźnika neuronu pomaga badaczom zrozumieć jego rolę w obwodach neuronowych i funkcjonowaniu mózgu. Ogromna większość anotacji, obejmująca około 100 tysięcy neuronów, była wykonywana manualnie przez małą grupę ekspertów. Do opisu pozostałej części neuronów wykorzystano właściwości symetrii oraz modularności mózgu – struktury analogiczne do zaanotowanych wcześniej łatwiej było opisać na podstawie dotychczasowej pracy. Przy wykrywaniu tych podobieństw w budowie używano algorytmów dopasowywania grafów, wyszukujących takie przyporządkowanie ich wierzchołków, które optymalizuje zgodność krawędzi między nimi. W tym przypadku wierzchołki reprezentowały neurony z dwóch obszarów mózgu, a krawędzie określone były na podstawie liczby połączeń synaptycznych. Tak sformułowane zadanie okazuje się analogiczne do jednego z podstawowych problemów optymalizacji kombinatorycznej: problemu przypisania kwadratowego. Mimo że jest to problem NP-trudny, istnieją jednak efektywne rozwiązania przybliżone dla obu zagadnień, których zastosowanie ułatwiło pracę ekspertom.



Obrys mózgu muszki owocówki z zaznaczoną rekonstrukcją neuronu wewnętrznego płata wzrokowego. Zrzut ekranu z narzędzia Codex dostępnego na flywire.ai

W rezultacie, poprzez kombinację narzędzi biologicznych, informatycznych oraz matematycznych, z sukcesem ukończono projekt FlyWire, o którym pisano w *Nature*, czyli największą i najdokładniejszą do tej pory mapę mózgu. Skrupulatnie zaanotowano 139 255 neuronów organizmu żeńskiego muszki owocówki, tworzących razem ponad 50 milionów połączeń synaptycznych. Zestaw danych FlyWire zawiera dwa kluczowe zasoby: morfologie wszystkich neuronów i wykres sieciowy pokazujący, w jaki sposób łączą się one ze sobą. Co najważniejsze, projekt jest otwarto-źródłowy, tzn. każdy może zobaczyć rezultat pracy naukowców na stronie flywire.ai.

Mapa ta przyda się w zrozumieniu funkcji struktur mózgowych u muszki owocówki, z których część ma odpowiedniki w mózgu ludzkim, a wypracowane techniki obrazowania i anotacji pomogą przy tworzeniu map mózgu innych, bardziej rozwiniętych organizmów. Ostatecznym celem jest zbudowanie mapy ludzkiego mózgu, do której przechowania (przy precyzji takiej jak FlyWire), jak się szacuje, potrzeba będzie zettabajtów (przedrostek *zetta* oznacza 10^{21}) pamięci!

Aby film nagrany w standardzie 4K zajmował jeden zettabajt, musiałby trwać około 10 milionów lat.



Masowe mikrowymieranie

Pamiętacie „Zaginiony świat” Arthura Conana Doyle’a, o wyprawie grupy naukowców do płaskowyżu, na którym przetrwały gatunki sprzed milionów lat, w tym dinozaury i ludzie pierwotni? Fikcja. A gdyby powiedziała, że jest takie miejsce na Ziemi, gdzie żyją relikty z czasów kredy?

W centralnej części pustyni Chihuahua w Meksyku znajduje się rezerwat Cuatro Cienegas, co po hiszpańsku oznacza „cztery bagna”. Teren wyniesiony na 750 m nad poziom morza otoczony jest wysokimi górami. Z obrazu uzyskanego okiem satelity z szaroburego tła wybija się turkusowa wstążka. To oaza, miejsce wielkiej różnorodności biologicznej, z długą listą gatunków endemicznych. Źródła, strumienie, jeziora, wysychające okresowo laguny tworzą bezdopływowy system. Woda w nim jest wymagająca dla życia: uboga w chlorek sodu (NaCl), ma w zasadzie niewykrywalne stężenia fosforanów, jest za to bogata w magnez, wapń, węglany i siarczany. W takiej wodzie nie rozwijają się glony ani rośliny wyższe. W tych ekstremalnych warunkach podstawą sieci pokarmowej są mikroorganizmy.

Ekstremalne warunki życia przyciągają badaczy. W piśmie PNAS z 2005 roku grupa meksykańskich uczonych opisuje wyniki badań przeprowadzonych na 10 próbkach wody i 3 próbkach osadów dennych z Cuatro Cienegas. Naukowcy częściowo zastosowali masową analizę DNA z próbek wody, część pobranych ze środowiska mikroorganizmów udało im się też wyhodować w laboratorium. Mieszane metody biologii molekularnej i klasycznej hodowli pozwoliły naukowcom sprawdzić pokrewieństwo mikroorganizmów z Cuatro Cienegas z tymi żyjącymi w innych rejonach Ziemi. Potwierdziło się, że ubogie wody kryją wyjątkowo duże bogactwo gatunków bakterii. Zdecydowanie zaskakujące było to, że ponad 50% z nich okazało się spokrewnione z bakteriami morskimi. Tymczasem dolina, gdzie znajduje się rezerwat, jest oddalona o 750 m w pionie i ponad 850 km w poziomie od najbliższego morza.

Naukowcy postawili więc hipotezę, że w czasie tworzenia się warstw skał w mezozoiku woda morska została uwieczniona w ich wnętrzu i po wypiętrzeniu się kontynentu, stosunkowo niedawno, w miarę postępujących procesów krasowych, wydostała się na powierzchnię. Zmiany te rozpoczęły się kilkadziesiąt milionów lat temu, w czasach, kiedy po lądach maszerowały dinozaury. Uwiecznione mikroorganizmy musiały dostosować się do zmian zachodzących w wodzie: rozpuszczania się niektórych minerałów i zmniejszania się stężenia soli. Hipotezę podtrzymują wyniki kolejnych prac, między innymi publikacji z PNAS z 2008 roku. Autorzy zsekwencjonowali i opisali genom jednego z wolno żyjących gatunków bakterii w wodach Cuatro Cienegas, *Bacillus coahuilensis*. Sekwencja jednoznacznie wskazuje na pokrewieństwo z morskimi gatunkami *Bacillus*, odkryto jednak szereg niezbędnych dla przetrwania modyfikacji. Dla przykładu genom *B. coahuilensis* w porównaniu do innych gatunków *Bacillus* okazał się bardzo mały. Ponieważ cząsteczki DNA zawierają dużo fosforu, w środowisku, gdzie go brakuje, redukcja genomu jest korzystna. Dodatkowo odkryto geny, które pozwalają zamienić główny składnik błon komórkowych, fosfolipidy, w ich odpowiednik zawierający zamiast fosforu siarkę. Geny te nie są jednak typowe dla *Bacillus*, bakterie musiały je uzyskać od sinic na drodze tak zwanego poziomego transferu genów, czyli procesu, w którym mikroorganizmy, nawet różnych gatunków, przekazują sobie fragmenty DNA.

Turkusowe jeziora na środku meksykańskiej pustyni kryją wiele tajemnic. Unikatywne w skali Ziemi gigantyczne zbiorowiska komórek różnych gatunków wchodzić ze sobą w interakcje. To relikty epoki schyłku kredy, po którym nastąpiło piąte w historii Ziemi wielkie wymieranie gatunków. Tymczasem spokój badających je mikrobiologów od wielu lat jest naruszany z powodu zachodzących obecnie lawinowych zmian środowiska.

W maju 2025 roku biolodzy – specjaliści od ochrony gatunków zebrali się w Scripps Institution of Oceanography w San Diego, by omówić plan utworzenia grupy do spraw mikroorganizmów w ramach Komisji Ochrony Gatunków Międzynarodowej Unii Ochrony Przyrody (IUCN). IUCN odpowiada za prowadzenie czerwonej listy gatunków zagrożonych wyginięciem,

śledzącej ryzyko wyginięcia zwierząt, roślin i grzybów (ale tylko tych, które można zobaczyć gołym okiem). Dotąd nikt na serio nie zajmował się losem mikroorganizmów.

Jeden ze współorganizatorów spotkania, Kent Redford, opowiada redaktorowi z magazynu „Science” o zagrożeniach miejsc cennych ze względu na mikroorganizmy, takich jak gorące źródła czy kominy hydrotermalne na dnach oceanów. Także o rezerwacie Cuatro Cienegas, którego egzystencja narażona jest przez wielkoobszarową uprawę lucerny w sąsiednich dolinach. Woda do podlewania pobierana jest z miejsc, które zasilają mokradła, a rezerwat zaczyna wysychać. Rząd Meksyku nie współpracuje. „Chcemy ocalić to miejsce, ponieważ odzwierciedla historię życia na Ziemi, odmienną od znanej z innych części świata. Organizmy tam żyjące mogą być spokrewnione z tymi, które skolonizowały ląd”.

Pracujący w tej samej grupie Jack Gilbert szacuje, że na Ziemi żyje 10^{31} bakterii, wirusów, archeonów, protistów i grzybów. „Produkują one większość tlenu na świecie, kolonizują nasze jelita, są źródłem informacji o początkach życia na Ziemi, powodują choroby i leczą je, wytwarzają wino i ser oraz pomagają roślinom rosnąć. Dzięki bioinżynierii umożliwiają tworzenie nowych leków, wykrywanie toksyn, zmniejszanie zapotrzebowania na nawozy i poprawianie plonów”. Musimy je chronić.

Wstępnym działaniem grupy byłoby stworzenie listy szczególnie cennych mikrobiologicznie miejsc, podobnie do już istniejącej czerwonej listy ekosystemów. Założenia tego działania naukowcy chcą przedstawić w październiku 2025 roku na najbliższym Światowym Kongresie IUCN.

Kiedy wybrałam na studiach specjalizację z mikrobiologii, mój kolega ukuł prześmiewkę: „Kto to jest mikrobiolog? Bardzo mały biolog”. Faktycznie „małość” tego zawodu nieraz mi dokuczała. Większość ludzi albo nie wierzy, że bakterie istnieją, albo uznaje wszystkie mikroorganizmy za coś, czego trzeba się pozbyć za wszelką cenę. A chronić?! Jak ustrzec przed wyginięciem coś, czego nie widać? – Nigdy nie wiadomo, czy właśnie gdzieś obok nie ginie ostatnia z bakterii X – A jednak trzeba. . . Ponieważ przy obecnym tempie zaniku naturalnych siedlisk te mikrotragedie mogą się stać sprawą całkiem makro.

Marta FIKUS-KRYŃSKA