

## **Lepiej razem niż osobno. Symbiotyczna wyprawa do lasu**

**Władysław Polcyn**

*„Autoportret”, 1-2023 (80), Kwartalnik Małopolskiego Instytutu Kultury w Krakowie*

*Życie oparte na nisko kosztowych zasobach odnawialnych wychodzi poza zwierzęcy schemat eksploatacji. Rośliny nie są bezwzględnie podporządkowane zasadzie konkurencji, dysponują sprawnościami przetestowanymi w toku ewolucji, które umożliwiają inwestycje w symbiozę. Drzewa w symbiozach leśnych otwierają innym gatunkom dostęp do bogatego źródła energii słonecznej. Dzięki tej cesze pełnią funkcję pierwotnego producenta w podziemnym ekosystemie, ale także jego organizatora, podejmują bowiem decyzje o udostępnianiu swoich zasobów. Czynią to w relacji „check and balance” z równie autonomicznymi grzybami mikoryzowymi i różnorodnością innych mikroorganizmów sfery korzeniowej.*

Jeszcze niedawno w rolnictwie, ogrodnictwie i leśnictwie dominował pogląd, że do optymalnego wzrostu roślin niezbędne są przede wszystkim dostarczenie określonych makro- i mikroelementów, dostęp do światła i wody oraz chemiczna ochrona przed patogenami. Dziś już wiemy, że chemizacja prowadzi do masowej degradacji gleb. Bogatsi o to doświadczenie poszukujemy metod upraw zgodnych z ideą gospodarki zrównoważonej, próbując naśladować równowagę w ekosystemach naturalnych. Roślinom sprzyja obecność zróżnicowanych społeczności mikroorganizmów glebowych, wchodzą z nimi w korzystne relacje ekologiczne. Nieuwzględnianie kontekstu mikrobiologicznego skutkuje niepowodzeniami w próbach zagospodarowania nieużytków, rekultywacji gleb przemysłowych, zwiększa też ryzyko degradacji gleby w lasach, gdzie stosowane są agresywne, maszynowe techniki gospodarcze.

Rola mikroorganizmów glebowych nie sprowadza się do rozkładania substancji organicznych i uwalniania pierwiastków biogenych. Bezpośrednio i długotrwale oddziałują z roślinami w relacjach, które nazywamy symbiotycznymi. Związki symbiotyczne opierają się na skoordynowanych zachowaniach grup mikroorganizmów i złożonej komunikacji między nimi i roślinnymi partnerami, zgodnie z mutualistycznymi zwyczajami wypracowanymi w ciągu setek milionów lat. Opowieść o tym wysoce złożonym współistnieniu światów bakteryjnego, grzybowego i roślinnego niesie nadzieję na nowe rozdanie w relacjach człowieka z Naturą.

### **Ewolucja światów symbiotycznych**

Mechanizmom symbiotycznym długotrwale zbliżenia zawdzięczają przedstawiciele gatunków należących do odległych trajektorii ewolucyjnych: królestwa bakterii, protistów, grzybów, roślin i zwierząt. Ewolucję związków symbiotycznych z udziałem mikroorganizmów wyróżnia niezwykle zdolność tego partnera do przenoszenia materiału genetycznego między organizmami, które nie są spokrewnione w linii prostej.

Kooperacja symbiotyczna jest możliwa również jako integracja na poziomie genomowym. Między niespokrewnionymi organizmami przenoszone są gotowe rozwiązania w postaci pakietów genów obsługujących symbiozę. Proliferacja takiego rodzaju zmienności genetycznej – symbiogeneza – jest mechanizmem ewolucyjnym komplementarnym do Darwinowskiego. W świecie prokariotycznym mechanizm tworzenia bioróżnorodności przez udostępnianie swoich genów jest dominującą siłą ewolucyjną.

Postępuję przykładem ewolucji roślin, by pokazać, że na lądzie rośliny zadomowiły się właśnie dzięki udostępnianiu zdolności do fotosyntezy. W zamierzonych czasach fotosynteza była umiejętnością wyłącznie bakteryjną. Pierwsze eukarionty, jednokomórkowe, jej nie posiadały, lecz niektóre wykazały się pewną powściągliwością konsumpcyjną i zaimportowały sobie tę cechę właśnie od bakterii. Złożyły foto-bakteriom ofertę zamieszkania w swoim wnętrzu. Wynalazek ten – endosymbioza – wymagał wielu dostosowań, na czele z koniecznością powstrzymania się przed skonsumowaniem mikropartnera. Tylko zdrów i cały mógł prowadzić fotosyntezę w obrębie błony komórkowej gospodarza i w ten sposób zmienić jego tryb życia z cudzożywnego na fototroficzny.

W następnych milionach lat historia udomowienia fotosyntezy powtórzyła się wielokrotnie, tyle że w kolejnych rundach mikropartnerem były już fototroficzne algi. W środowisku wodnym rozegrało się wiele aktów złożonej i nieraz zaskakującej ewolucji związków fotosymbiotycznych: najpierw między cyjanobakteriami i pierwszymi eukariontami, potem między algami i heterotroficznymi protistami, wreszcie między algami i plejadą morskich bezkręgowców. Za każdym razem w charakterze monety przetargowej dla pokojowego współistnienia wykorzystywano chloroplasty.

Podręczniki szkolne przyzwyczajają nas do postrzegania zwierząt jako organizmów ściśle heterotroficznych. Tymczasem klasyczne szkolne przykłady: orzęski i promienice, stułbiopławy, koralowce, a także gąbki, małże i meduzy, mogą prowadzić fototroficzny styl życia. Największe małże, z gatunku przydacznia olbrzymia, osiągają 300kg korzystając z symbiotycznej fotosyntezy. Fotobiontyczne algi są otoczone zwierzęcą błoną komórkową, wewnątrz której goście zachowują zdolność do podziałów komórkowych i nie podlegają trawieniu. W dwukierunkowej wymianie heterotroficzny partner korzysta z produktów fotosyntezy, a mikrosymbiont dostaje azot nieorganiczny, fosforany, niektóre witaminy oraz dwutlenek węgla – makrosymbiont wydziela ten gaz w procesie oddychania i pracowicie gromadzi w swoich tkankach na potrzeby fotosymbionta. Podobny obraz kooperacji odnajdujemy pomiędzy algami a grzybami porostowymi na stałym lądzie.

### **Jak symbiotyczne grzyby pomogły roślinom wyjść na stały ląd**

Rośliny, zwierzęta i grzyby są obecnie dobrze przystosowane do życia na lądzie, lecz pierwsi kolonizatorzy mieli trudne zadanie. Grzyby zadomowiły się na lądzie sto pięćdziesiąt milionów lat wcześniej niż rośliny, co wynika z datowania skamielin. To znaczy, że grzyby

towarzyszyły roślinom od początku ich pionierskiej misji na lądzie. Organizmy fototroficzne zadomowiły się poza środowiskiem wodnym dzięki symbiozom glonowo-grzybowym, na przykład porostom. Pierwotnie każdy z komponentów porostów potrafił istnieć samodzielnie, lecz razem zdołały opanować siedliska pozornie niedostępne dla życia, z okolicami wierzchołka Mount Everestu włącznie. Tajemnica ekstremalnej ekspansywności porostów tkwi w umiejętności przetrwania długotrwałych okresów desykcji w stanie kryptobiozy oraz zdolności do wiązania azotu z powietrza. Tą supermocą obdarzony jest trzeci partner – cyjanobakterie.

Związki cyjanobakterii i alg z grzybami na późniejszym etapie ewolucji poskutkowały wykształceniem roślinnych interakcji z grzybami mikoryzowymi. Niewątpliwie pierwsze rośliny, jednokomórkowe algi, pojawiły się na lądzie dopiero wewnątrz tkanek grzybowych. Później, gdy rośliny wyewoluowały do postaci rozbudowanych organizmów tkankowych, sytuacja się odwróciła: mikroskopijne grzyby funkcjonujące w glebie znalazły drogę do zamieszkania wewnątrz tkanek korzeniowych. Takie symbiotyczne grzyby nazywamy mikoryzami (łac. *mycorrhizae* – grzyb korzeniowy).

W efekcie symbiotycznej współpracy roślin z grzybami mikoryzowymi poszerza się obszar penetracji gleby dostępny roślinom. Strzępki grzybów dostają zaproszenie, by rezydować w międzykomórkowych i śródkomórkowych przestrzeniach miększu korowego korzeni. Część grzybni, która wyrasta poza korzenie ma zaledwie 2–5 mikrometrów średnicy, a więc zdolna jest do penetracji przestworów glebowych niedostępnych dla korzeni (10–20 mikrometrów średnicy). Grzyby otrzymują od roślin węgiel, który pozyskiwany jest z powietrza w procesie fotosyntezy, a rośliny zyskują w zamian poszerzony dostęp do glebowych zasobów wody wraz z rozpuszczonymi w niej związkami mineralnymi.

Wydaje się, że ten rodzaj partnerstwa pomógł zarówno roślinom, jak i mikoryzom skolonizować ogromną większość lądów. Znaczenie grzybów w kolonizacji lądu przez rośliny dokumentują skamieliny mikoryzowe datowane na ponad czterysta sześćdziesiąt milionów lat. Ogromna większość roślin lądowych jest obecnie uzależniona od różnych form tej symbiozy.

Istnieje ciekawa hipoteza, że ewolucję struktur korzeniowych mogła napędzić optymalizacja powierzchni interakcji symbiotycznej z partnerem grzybowym, gdyż pierwsze mikoryzy powstały, zanim rośliny wykształciły organy korzeniowe. Niewykluczone, że korzenie wyewoluowały z podziemnych pędów – rhizomów – zróżnicowanych na dwa wyspecjalizowane typy. Typ grubszy i trwalszy podtrzymywał struktury nadziemne, był organem rozmnażania wegetatywnego, organem zapasowym oraz głównym kanałem dystrybucji wody i substancji odżywczych. Typ cieńszy i dłuższy zawierał grzyby mikoryzowe oraz penetrował większą objętość gleby.

Korzenie progresywnie ewoluowały w rozgałęzione struktury hierarchiczne, o bezliku coraz cieńszych i bardziej rozproszonych elementów. Strukturalna heterogenność znalazła kulminację w postaci licznych drobnych korzeni bocznych. Wchodzą w asocjacje mikoryzowe,

dzięki czemu rosną szybko i mimo krótszego żywota w razie potrzeby odrastają, dając oparcie kolejnym grzybniom.

### **Ryzobiomy – żywią i bronią**

Rośliny w ekosystemach naturalnych nawiązują w ciągu życia trwałe interakcje z wieloma różnymi gatunkowo mikroorganizmami. Szczególnie ważne jest rozpoznanie mieszkańców zasiedlających strefę korzeniową, czyli ryzosferę, ponieważ to w tej przestrzeni dochodzi do większości spotkań światów roślin, grzybów i bakterii. Ryzosferę charakteryzuje wyjątkowe bogactwo bioróżnorodności. W tyżeczce gleby korzeniowej znajdziemy genomowe sygnatury świadczące o jednoczesnej obecności ponad dziesięciu tysięcy gatunków mikroorganizmów. To najbogatsze gatunkowo siedliska na Ziemi.

Te wysoce złożone społeczności mikrobów pozostają niemalże nierozpoznane, mimo potencjalnie szerokiego znaczenia dla roślin. Ostatnie szacunki wskazują, że znamy zaledwie około 7 procent gatunków grzybów lądowych, a można przypuszczać, że znaczna część grzybów aktywnie spotyka się z roślinami. Z oszacowań metagenomicznych wynika, że znamy poniżej 1 procenta gatunków bakteryjnych. Trudność w dostępie do tej wiedzy polega na tym, że przytłaczającej większości znanych i nieznanymi mikroorganizmów grzybowych i bakteryjnych nie da się wyhodować w warunkach laboratoryjnych. Znamy tylko ich sygnatury genomowe, ale nie zostały jeszcze zaobserwowane jako organizmy.

Interakcje mikroorganizmów i roślin najogólniej dzielą się na korzystne, szkodliwe albo neutralne. Aktywność większości bakterii i grzybów zamieszkujących ryzosferę jest dla roślin bezpośrednio neutralna, jednak utylizują związki organiczne pochodzenia roślinnego, dlatego odgrywają kluczową rolę w obiegu pierwiastków i modyfikacji środowiska roślinnego. Mikroorganizmy korzystne bliżej lub luźniej tworzą zbiorowisko mikrobiomu korzeniowego – roślinnego ryzobiomu. Przyczynia się on do wzrostu roślin i chroni je przed chorobami poprzez szereg mechanizmów, w tym ułatwienie pozyskiwania składników pokarmowych, wydzielanie stymulatorów wzrostu, biosyntezę związków inhibujących rozwój patogenów.

Organizmy szkodliwe są znacznie rzadsze, ale efekty ich działań łatwiej zauważyć. To patogenne grzyby, grzybopodobne lęgniowce, bakterie czy wirusy. W kolejnych pokoleniach ćwiczą się w omijaniu systemów odpornościowych roślin. W naturalnych ekosystemach roślinom przychodzą z odsieczą grzybowe i bakteryjne konfraternie, wspomagające odżywczo i sanitarnie. Zamieszkują ryzosferę i tworzą tam barierę obronną. Konkuruje z potencjalnymi antagonistami o zasoby roślinne, ale także podbudzają swoją aktywnością metaboliczną system odpornościowy rośliny gospodarza. Zależność między aktywnością ryzobiomu a podwyższoną gotowością roślin do wykrywania i zwalczania patogenów przenosi się na odporność roślin w obliczu inwazji przybywających z nadziemnej strony pędu. Odpowiedni partner mikoryzowy absorbuje też i neutralizuje metale ciężkie i potencjalnie toksyczne związki aromatyczne.

Mikoryzy odgrywają ważną rolę w formowaniu i stabilizacji agregatów glebowych – procesie zapobiegającym erozji gleby. Dzieje się to za sprawą glomaliny – glikoproteiny wydzielanej przez grzybnie. Związek ten przenika przez glebową materię organiczną i spaja ją z frakcją nieorganiczną. Mało kto wie, że glomalina może tworzyć nawet 27 procent glebowych zasobów węgla. Wszystkie jej cechy są szczególnie istotne dla obszarów ubogich w składniki mineralne i wodę, a także dla gleb wyeksploatowanych rolnictwem wysokonakładowym. Zabiegi typowe dla rolnictwa konwencjonalnego głęboko naruszają równowagę ekosystemu glebowego. Wysokie dawki nawozów mineralnych, przy jednoczesnym ograniczeniu nawożenia organicznego, dewastują strukturę gleby i ograniczają rozwój mikroflory glebowej. A skażenie stale rośnie...

### **Leśne sieci mikoryzowe**

Grzyby mikoryzowe dostarczają roślinom do 80 procent potrzebnego im fosforu, a także inne związki mineralne oraz azot. W zamian grzyby otrzymują do 20 procent węgla, który rośliny wprowadzają do gleby. Ten kierunek inwestycyjny powoduje, że rośliny przyczyniają się do wzrostu depozytu węglowego w glebach. Dopiszmy tutaj, że im starsze drzewo, tym większą objętość gleby wzbogaca w węgiel drogą symbiotyczną, kompletnie nieprawdziwa jest zatem propaganda leśników, jakoby zastępowanie dojrzałych lasów uprawami sadzonek pomagało zatrzymać węgiel w glebie leśnej.

Obserwacje naukowe wskazują, że wymiana mikoryzowa odbywa się pod kontrolą zarówno strony roślinnej, jak i grzybowej. Skomplikowane podziemne sieci budowane przez leśne mikoryzy mogą ciągnąć się kilometrami w gęstych skrętach i łączyć różnogatunkowe krzewy i drzewa. Znaczenie grzybni nie ogranicza się do funkcji infrastruktury przesyłowej. Jest partnerem; podejmuje własne decyzje dystrybucyjne oraz reguluje swoją aktywność enzymatyczną nakierowaną na pobieranie składników mineralnych z gleby.

Działający tu mechanizm oscylacji przepływu zasobów oraz sygnałów chemicznych, a nawet elektrycznych służy do szacowania stopy zwrotu inwestycyjnego. Podobnych oszacowań dokonują rośliny, i nie dzieje się to wyłącznie w wymiarze osobniczym. Niektóre opracowania naukowe pokazują, że aktywność fotosyntetyczna pokrywy leśnej kilkuhektarowych obszarów oscyluje wokół wartości średniej, zbiorczo reaguje bowiem na zmienne środowiskowe. W perspektywie „społecznościowej” las ukształtowany przez procesy naturalne jawi się jako roślinno-grzybowy ekosystem z własnym „zdolnościami odpornymi”, a nie jako plantacja – konstrukt biznesowy.

Dzięki modułowej strukturze sieci grzybowe reagują na zmiany w otoczeniu przez dostosowywanie tempa i kierunku wzrostu, aby skoncentrować wysiłki w najbardziej pożądanym obszarach, na przykład tam, gdzie aktualnie jeszcze dostępna jest woda. Z punktu widzenia trwałości grzybni kluczowe znaczenie ma długodystansowa transllokacja pozyskanych zasobów. Strzępki rosnące w rejonie ubogim w pokarm czy wodę dostają

wsparcie od tkanek bytujących w części zasobniejszej. Tworzy to system dynamicznej sieciowej redystrybucji, z którego mogą korzystać również węzły roślinne.

Dostęp do tak zarysowanej grzybocentrycznej infrastruktury zależy od adaptacyjnych zdolności roślin. Dopasowują one swój metabolizm do lokalnych wahań w ofercie grzybowej. Badaczom udało się jednak wykazać, że sieci grzybowe nie zatrzymują depozytów roślinnych wyłącznie na swój użytek; sporą ich część przekazują do innych roślin, pozornie biernej strony tej redystrybucji. Obraz ten kłóci się z interpretacją Przyrody jako areny „walki o byt”, zwłaszcza że międzygatunkowe relacje w podziemnych sieciach lasu nie mają nic wspólnego z przypadkowymi spotkaniami gdzie może dominować „dylemat więźnia” z teorii gier. Tu każdy z węzłów sieci dysponuje potencjałem inwestycyjnym. Może bezpiecznie dla innych uruchomić go z opóźnieniem, bo przecież nigdzie nie ucieknie, niezmiennie pozostaje sąsiadem.

Szczególnie jaskrawego przykładu inkluzywnego charakteru ról donorowych i akceptorowych w sieci lasu dostarczają przykłady symbiotycznego funkcjonowania drzew po... utracie części nadziemnej. Uszkodzone lub wycięte pniaki nadal korzystają z dystrybucji sieciowej, mimo że nie są zdolne do fotosyntezy. Tkanki zarastającej ich rany po uszkodzeniu co roku przybywa. To dowód, że niektóre ścięte pnie jodłowe czy daglezwowe żyją dalej, nawet przez pięćdziesiąt lat! Po prostu ich strefa korzeniowa nie obumiera i wciąż uczestniczy jako węzeł w leśnej sieci transferu.

Wchodząc do lasu, szczególnie tego, w którym gospodarka leśna nie zniszczyła procesów naturalnych, nie sprowadzajmy go w myślach do pni przeznaczonych na deski. Lasu jest co najmniej drugie tyle pod naszymi stopami.

## Architektura sieci

Profesor Józef Paczoski obserwował sto dwadzieścia lat temu zaskakującą trwałość składu gatunkowego leśnych zespołów roślinnych. W *Życiu gromadnym roślin* (1896)<sup>1</sup> opisywał zbiorowiska roślinne ze świadomością, że ukształtowały je fitosocjologiczne zdolności kooperacyjne. W jego przekonaniu asocjacje roślinne „związane są pomiędzy sobą w jedną całość czynnikiem natury socjalnej”. Podawał, że regułą integrującą takie zbiorowiska jest współdziałanie „na podobieństwo organizmu”, który „wyzyskuje w najlepszy sposób twórcze siły zajmowanego terenu i nie naraża ciągłości swego bytowania”<sup>2</sup>. Widział, że sprawność ugrupowań leśnych nie malała z upływem czasu, wręcz przeciwnie: „Im dana formacja była starsza, a więc silniej wpłynęła na zmiany swego otoczenia, tym była odporniejsza i tym

---

<sup>1</sup> Józef Paczoski, *Życie gromadne roślin*, przedruk z czasopisma *Wszechświat*, tom XV, Warszawa 1896, Biblioteka botaniczna, tom II, Polskie Towarzystwo Botaniczne, Warszawa 1930, s. 17. <https://polona.pl/item/zycie-gromadne-roslin-social-life-of-plants,Nz11NTI4Nzg/0/#item> (dostęp: 25.02.2023)

<sup>2</sup> Józef Paczoski, *Szkice fitosocjologiczne*, Biblioteka botaniczna, tom I. Polskie Towarzystwo Botaniczne, 1925, s. 34. <https://rcin.org.pl/dlibra/publication/2970/edition/39433/szkice-fitosocjologiczne-paczoski-jozef-1864-1942> (dostęp: 25.02.2023)

mniejsze można było zauważyć zmiany pod względem składających ją gatunków roślin i ilości osobników”<sup>3</sup>.

W tamtym czasie brakowało argumentów naukowych za wskazaniem mechanizmów, którym można by przypisać rolę czynnika integrującego wielogatunkowe roślinne kooperacje. Teraz wiemy, że jądrem relacji z innymi roślinami jest unikalna zdolność do zawiązywania kooperacji z grzybami mikoryzowymi oraz z ogromną liczbą mikroorganizmów glebowych.

Architektura sieci symbiotycznych powstaje w przestrzeni wspólnej. Nie ma tu izolacji od zagrożeń, ale na jej korzyść przemawia łatwość tworzenia i zadziwiająca samonaprawialność. To co nadaje sprawności i odpornej trwałości wywodzi się z dwóch prymarnych zasad. Zgodnie z pierwszą sieć utrzymuje się dzięki optymalnej komunikacji i wymianie zasobów; druga zastrzega, że połączenia sieci powstają oddolnie, a uczestnicy nie gromadzą zasobów bezzwrotnie.

Nie ma tu schematu centralistycznego, podległości stanowisk; są spontaniczność i skalowalność. Komunikację w sieciach biologicznych charakteryzują brak odgórnego zarządzania oraz takie oddziaływania kooperacyjne, które skracają dystans operacyjny między uczestnikami. Opisują te właściwości eleganckie w swej prostocie modele matematyczne znane jako „sieci małych światów”. Mimo – a może dzięki – specjalistycznej różnorodności uczestników dynamika sieci jest bardziej intensywna i mniej narażona na dezorganizację niż w modelach ubogich gatunkowo lub deterministycznych.

## **Mykonauci**

Dla współczesnych nauk biologicznych, postawionych wobec grozy przyspieszającego kryzysu klimatyczno-środowiskowego nie ma ważniejszego zadania niż wypracowanie narzędzi ochrony bioróżnorodności. Największy niepokój budzi obecnie niewiedza, czy ekosystemy lądowe pozostawione procesom naturalnym są zdolne do utrzymania swojej trwałości wobec gwałtownych zmian klimatycznych i wciąż zwiększającej się presji ekonomicznej.

Dopasowanie składu gatunkowego grzybów mikoryzowych do zmieniającego się składu roślinnego obejmuje całą gamę strategii: od kosmopolitycznych, w których „generaliści” tworzą związki z większością gatunków roślin, po gatunki grzybowych „specjalistów”, którzy w kontaktach symbiotycznych ograniczają się do wąskiego grona roślin. Mikoryzowi „generaliści” są z reguły oportunistami; mają skromne wymagania i skłonność do dominacji w środowiskach zaburzonych. Gatunkom „specjalistycznym” można przypisać rolę gatunków zwornikowych, o zasadniczym znaczeniu dla adaptacyjnych zdolności ekosystemu. Nie muszą wpływać na biocenozę lasów proporcjonalnie do ich rozkładu ilościowego, dlatego łatwo wymykają się tradycyjnym metodom obserwacji ekologicznych.

---

<sup>3</sup> J Paczoski, *Życie gromadne roślin*, dz. cyt., s. 18

Badania nad klasyfikacją i ochroną zbiorowisk roślinnych zdążyły już się przysłużyć programom ochrony bioróżnorodności. Ekologia gleb wciąż boryka się z brakiem szczegółowej wiedzy na temat interakcji biologicznych i strategii życiowych wielu gatunków grzybów symbiotycznych. Monitorowanie, wzmacnianie i ochrona różnorodności gatunkowej oraz funkcjonalnej mikroorganizmów ryzosfery są ograniczone jej ekstremalnie wysoką złożonością. Podziemnego świata nie da się tak po prostu prześwietlić.

Na szczęście w obecnym stuleciu ludzka pomysłowość udostępniła naukom ekologicznym narzędzia analityczne o niezwykłej precyzji i przepustowości. Można powiedzieć, że weszliśmy w erę ekologii molekularnej, metagenomiki. Dysponujemy maszynami do masowego rozpoznawania sygnatur genetycznych tysięcy mikroorganizmów w jednej próbce glebowej. Intensywnie rozwija się bioinformatyka na usługach rozpoznawania interakcji wewnątrz mikrobiomów środowisk powietrznych, wodnych i glebowych.

Właśnie te narzędzia są podstawą ambitnego międzynarodowego programu SPUN (Society for the Protection of Underground Networks). Ruszył w ubiegłym roku i ma na celu dostarczenie danych dla globalnych działań ochronnych wobec ekosystemów mikoryzowych. Należę do jednej z kilkunastu grup, które angażują się w pobieranie i analizę próbek grzybowego DNA z miejsc dotychczas niebadanych. Miejsca wskazała mapa predykcyjna stworzona z pomocą sztucznej inteligencji. Ruszamy odkrywać ostatnie białe plamy na mapie świata – obszary dla eksploracji nierozpoznanego jeszcze świata podziemi.

Na mapie SPUN widnieje dziesięć tysięcy potencjalnych hot-spotów glebowej bioróżnorodności – naturalnych zbiorowisk mikoryzowych, zagrożonych antropopresją. Ekspedycje mają sprawdzić, czy predykcje wybrano trafnie, a my ruszymy w ostatnią egzotyczną misję odkrywczą na Ziemi. Na mapie SPUN widnieją obszary z regionu Karpat. Wybieramy się w rejon otuliny Bieszczadzkiego Parku Narodowego. O jej ochronę zabiegają zaprzyjaźnieni aktywiści z Fundacji Dziedzictwo Przyrodnicze oraz Inicjatywy Dzikie Karpaty. Ruszymy z nimi do stóp monumentalnych drzew o wymiarach pomnikowych. Na mapie aktywistów jest ich 3675, ale nad setkami z nich wisi śmiertelne zagrożenie – zachłanność Lasów Państwowych.

Do mykonautycznej misji, w którą się angażujemy w Bieszczadach, włączeni są także artyści i edukatorzy z poznańskich uczelni skupieni wokół projektu „Ryzosfera – wielka sieć małych światów”. Od kilku lat wspólnie adorujemy potęgę świata symbiotycznego, a teraz chcemy opowiedzieć o mikoryzowym bogactwie Karpat. Jesteśmy częścią wyprawy mykonautów, poznamy złote runo mykobiomów drzew, zmierzmy się z potworami naszych czasów. Wiemy, że dołączy do nas wielu szlachetnych podróżników i podróżniczek ze środowisk naukowych, artystycznych, szkolnych i aktywistycznych<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Więcej na: SPUN <https://www.spun.earth/> i projekt „Ryzosfera” <https://artscience-node.com/rhizosphere-network/>



## **Czy symbiotyczne sieci mogą być wzorem dla ludzkich projektów społecznych?**

Czy możliwe jest wyjście ze schematu „Nur für Menschen”? Oczywiście, że tak, bo nasze dotychczasowe pomysły cywilizacyjne powielają tylko jedną ze skrajnych wersji interakcji z gatunkami innymi niż ludzkie – zasadę eksploatacji. Świat człowieka jest światem osobników. Większość życia spędzamy na zajęciach indywidualnych, a budowanie trwałych relacji jest dla wielu z nas nie lada wyzwaniem. Niestety, łatwo nas przekonać, że najbezpieczniejszym wzorcem jest zasada egoizmu, a do istot z nami niespokrewnionych najlepiej odnosić się z nieufnością.

Stosujemy wzorce zoocentryczne – naśladujemy zachowania drapieżników, w ich świecie mniejszość utrzymuje się kosztem większości. Narzuca się nam z wielkim przekonaniem elitarne koncepcje, że zwyciężać powinien najsprawniejszy drapieżnik, który w dodatku bierze wszystko. Mało kto się zastanawia, że model, według którego na świecie miałyby żyć dziewięć miliardów drapieżników, jest nie do utrzymania; wręcz się sugeruje, że nie ma dla niego alternatywy.

To nieprawda. Możemy czerpać z innych wzorców – permakulturowych, nisko kosztowych. Dzięki nim sieci roślinno-grzybowe przetrwały miliony lat. Sieci te wykształcały się przez setki milionów lat ewolucji, by osiągnąć dzisiejszą doskonałość. Symbiotyczne procesy ryzosfery są, obok fotosyntezy, główną przyczyną gigantycznego sukcesu ewolucyjnego roślin.

Możemy spojrzeć na rośliny jak ideał produktywności, długowieczności, odporności na uszkodzenia, zdolności rozrodczych, utrzymania zasięgu terytorialnego, efektywności wykorzystania zasobów środowiska, wreszcie zdolności kooperacyjnych i komunikacyjnych. Z takiej perspektywy ocena jakości życia roślin wygląda imponująco. To oczywiste, że organizacje budowane przez ludzi zyskałyby, jeśli wzięłyby przykład z funkcjonalności modelu organizacyjnego ryzosfery.

Drzewa w lesie nie są osobnikami. Są węzłami sieci, dzięki której mogą przenosić swoją tożsamość genetyczną, nawet gdy dobiegnie kresu ich dumna pionowa postawa. Starość roślin różni się radykalnie od starości zwierząt. Rośliny sezonowe właśnie wtedy osiągają swój największy wigor i wydają nasiona lub tworzą rozłogowy depozyt, by z niego wkrótce się odrodzić.

Drzewa przez całe życie zachowują zdolność do wegetatywnej regeneracji, na zranienia reagują odrostami, a z pozornie martwego pnia może się wyodrębnić młoda postać pędu i korzeni. Cechą klonalności są obdarzone również współżyjące z drzewami grzyby. Żaden inny ziemski organizm nie przebije klonalnych kolonii roślin lub grzybów pod względem rozmiarów, ale i długowieczności.

Podstawową cechą definiującą życie jest zdolność usuwania nadmiaru detrytusowej energii poza obręb układu. Istotą jest tu wewnętrzna przestrzeń, w której realizuje się przedziwna termodynamiczna mechanika pozwalająca zatrzymać i odwrócić zasadę wzrostu entropii. W sprzyjających okolicznościach dyktatura strzałki czasu się zawiesza, kontrolę przejmuje zasada

samoorganizacji. Po szczęśliwej stronie krawędzi chaosu powstaje wtedy architektura życia, pęcznieje przestrzeń niezależności, z bezładu wyłania się porządek. Jest to przestrzeń zależna od warunków brzegowych, nieodporna na zakłócenia o wysokiej amplitudzie, lecz w obrębie swojej ekosfery zdolna do neutralizowania impulsów mniej gwałtownych. Kontemplacja zasady samoorganizacji, spontanicznego tworzenia połączeń nieoczywistych, daje nadzieję, że wysiłek oporu rozproszy również złą energię społeczną i jednocześnie wykorzysta jej część do inicjacji kolejnego cyklu życia.

Obrazu okrucieństwa Przyrody używamy, by usprawiedliwić ludzką zachłanność. Możemy jednak opowiedzieć się za Republiką równych, wyjść poza ideologię drapieżniczą. Potrzebujemy emancypacji od gadziej części naszego mózgu, potrzebujemy implantacji odruchów symbiotycznych, detronizacji bożka zdobywcy.