



Voyager 1 (1977), który opuścił Układ Słoneczny w 2012 r.

Otrzymana odpowiedź jest zgodna z konstrukcją wskazaną przez Newtona: „połowimy odcinek  $OD$  w  $Q$  i przedłużamy  $OQ$  do  $S$  tak, aby  $QS$  było równe  $QC$ . Wówczas  $S$  jest wierzchołkiem stożka, którego część [stożek ścięty  $COBGDF$ ] jest rozwiązaniem problemu”.

Z przeprowadzonych rozważań wynika również, że kąt  $\angle CSB$  jest zawsze ostry. □

I mamy niespodziankę, wśród stożków o danej podstawie i wysokości najmniejszy opór w rozrzedzonym ośrodku stawia stożek ścięty (!), i to niezależnie od początkowych wartości  $r$  i  $2a$ . Dodatkowo, im mniejszy stosunek  $\frac{2a}{r}$ , tym większa będzie część płaska. Czy więc rzeczywiście „odwrócona patelnia” to najbardziej opływowa powierzchnia w rozrzedzonym ośrodku?

Wnioski te wydawały się tak absurdalne, że uznano je za błąd geniusza, były ignorowane (niezrozumiane?) przez 300 lat, aż do XX wieku, gdy rozpoczęła się eksploracja kosmosu. . .



## Niebo nade mną, grzyby pode mną

Jeśli jest lato i myślisz o grzybach, bardzo słusznie. Jeśli jest jesień i myślisz o grzybach, jeszcze lepiej. W sumie, bez względu na porę roku i doby powinniśmy myśleć o grzybach. Bo sieć cieniutkich nitek, która zawarta jest w wierzchniej warstwie naszych łądów ma kolosalne znaczenie. Od niej zależy dobrostan roślin łądowych. I, co tu dłużej ukrywać, nasz.

Wszystko zaczęło się od trufl. Albert B. Frank, niemiecki botanik, w 1885 roku badał możliwość sprowadzenia trufl do Prus. Odkrył niezwykłą rzecz: korzenie niektórych roślin były ściśle splątane ze strzępkami grzybni, a związek ten wydawał się korzystny dla obu stron. Dotąd obecność dziwnych struktur i strzępek grzybni w korzeniach roślin uważano za chorobę, pasożytnictwo lub, w najlepszym razie, za niedbałość przy pobieraniu próbek. Opublikowana przez Franka teoria o mikoryzie (ukuł ten termin od greckich słów *mykes*, grzyb oraz *rhiza*, korzeń) spotkała się z krytyką środowiska naukowego. Tymczasem Frank słusznie założył, że strzępki grzybni rozszerzają zasięg rośliny w glebie, dostarczają jej wody i związków nieorganicznych, głównie fosforanów i azotanów, ale także cynku i miedzi. Grzyb zyskuje związki organiczne do odżywiania.

Przypomnę tylko, że to, co potocznie nazywamy grzybem (zarówno takim w lesie, jak i w zapomnianym słoiku z dżemem), jest jedynie widoczną na zewnątrz małą częścią grzybiego ciała. Reszta to cienkie nitkowate struktury otoczone ścianą komórkową, nie zawsze podzielone na wyraźnie odrębne komórki, jak to jest u roślin i zwierząt. Mogą one stanowić długie, zawierające wiele jąder kanały. Ciało, które wyrasta na powierzchni, służy jedynie rozmnożeniu się za pomocą zarodników, roznoszonych wiatrem lub wodą na duże odległości.

W mikoryzie związek korzeni rośliny i strzępek może być różny. W przypadku drzew najczęściej strzępki grzybni gęsto oplatają korzeń i wchodzi w przestrzenie międzykomórkowe tkanek rośliny, jest to tzw. mikoryza zewnętrzna. W przypadku mikoryzy arbuskularnej strzępki wnikają do wnętrza komórek, a ściślej mówiąc, pod ścianę komórkową, tworząc silnie rozgałęzione arbuskule, twory, przez które zachodzi wymiana substancji. Struktura błony komórkowej pozostaje nienaruszona.

Uważa się, że około 90% gatunków roślin łądowych wchodzi w związki mikoryzowe, co nie jest dziwne, bo to dzięki temu powiązaniu rośliny mogły „wyjść z wody” około 470 milionów lat temu. Wtedy powierzchnia Ziemi była uboga w składniki mineralne, a pierwsze rośliny nie miały jeszcze dobrze wykształconych korzeni. Cieniutkie strzępki grzybów pozwalały zwiększyć zasięg i powierzchnię chłonną. Dowody na tę hipotezę pochodzą z badań kopalnych oraz analiz genetycznych współczesnych grzybów mikoryzowych. Niektórzy badacze uważają, że to mikoryza pozwoliła roślinom osiągnąć wielką różnorodność i opanować ogromną część powierzchni Ziemi.

Rosnąca liczba badań nad mikoryzą pokazuje, że rola grzybów jest większa, niż jedynie dostarczanie minerałów i wody. Grzyby wytwarzają także hormony roślinne, które po wnikięciu do organizmu rośliny regulują jego wzrost i rozwój. Grzyby wydzielają do gleby antybiotyki, zmniejszając prawdopodobieństwo zakażenia rośliny patogenami. Rośliny w związku z grzybem są bardziej odporne na stres: na skrajne



temperatury, toksyny czy niekorzystne pH. Dla części gatunków powstanie mikoryzy jest koniecznym warunkiem rozwoju.

Badania kanadyjskiej naukowczyni Suzanne Simard wykazały olbrzymi wpływ mikoryzy na kondycję lasu oraz jej rolę w komunikacji drzew między sobą, także międzygatunkową. Przez wiele lat badań Simard wykazała, że sieć mikoryzowa jest kluczem do funkcjonowania całego ekosystemu. Drzewa wymieniają między sobą związki organiczne przez grzybnie, także międzygatunkowo (!), a kierunek przekazywania substancji zależy od tego, które drzewo jest bardziej w „potrzebie”, na przykład z braku dobrego światła do fotosyntezy. Drzewa-matki wysyłają młodym drzewom wyrosłym z ich nasion więcej węgla i substancji odżywczych niż niespokrewnionym osobnikom. Drzewa zaatakowane przez szkodniki (np. owady) lub w stresie wysyłają przez grzybnie sygnały, dzięki czemu inne drzewa uruchamiają systemy obronne. W ostatnich etapach życia stare drzewo intensywnie zasila sieć mikoryzową, oddając wszystko, by wzmacniać młode osobniki. Monokultury sadzonych i „pielonych” lasów są słabe, bo bez wsparcia sieciowego innych gatunków sadzonki iglaste znacznie częściej chorują i umierają. W obliczu stresu klimatycznego (wyższych temperatur i susz) zależność drzew od podziemnych sieci grzybowych drastycznie rośnie.

Nowe możliwości – używanie modeli sztucznej inteligencji i masowa analiza wielu próbek – ujawniają wymiar globalny roli mikoryzy. Naukowcy zaangażowani w badania stworzyli SPUN (*Society for the Protection of Underground Networks*), publikują dane i próbują przebić się z głosem o konieczności ochrony podziemnych sieci. W opublikowanej w *Science* w czerwcu 2026 roku pracy skupiającej się na mikoryzie arbuskularnej.

Z 16 000 próbek gleby pobranych z różnych ekosystemów (lasy, łąki, sawanny itd.) na świecie oznakowano, ile strzępek mikoryzowych znajduje się w określonej objętości gleby. Następnie użyto modelu uczenia maszynowego i stworzono mapy przewidujące gęstość grzybni dla każdego obszaru lądowego na Ziemi. Dzięki temu powstała pierwsza globalna mapa mikoryzy arbuskularnej. Na podstawie analizy 300 000 próbek strzępek grzybni rosnących w laboratorium przeliczono oszacowaną długość strzępek na biomasę grzybowej sieci. Wyniki zostały przedstawione na mapie świata pod nazwą „A Hidden Infrastructure”. Są doprawdy oszałamiające. Badacze oszacowali, że w górnej warstwie gleby na Ziemi (do 20 cm) znajduje się około  $1,1 \times 10^{17}$  km żywych strzępek grzybów mikoryzowych. Jest to, według przeliczeń, około 300 megaton czystego węgla organicznego, co stanowi 4–6 razy więcej niż masa węgla w ciałach wszystkich ludzi na Ziemi.

Można to porównać do odkrycia, że pod powierzchnią Ziemi istnieje gigantyczna biologiczna infrastruktura transportowa, przez którą przepływa część węgla pobieranego z atmosfery. Skoro sieć jest tak rozległa i zawiera setki milionów ton biomasy, nie można jej ignorować przy analizowaniu globalnego cyklu węgla.

Mikoryza arbuskularna stanowi 70% mikoryzy, głównie dotyczy roślin zielnych. Niestety ponad 90% łąd, który pokryty jest tymi roślinami, nie jest chronione. Jednocześnie średnia gęstość grzybni mikoryzy arbuskularnej na gruntach rolnych jest o blisko 50% niższa niż w naturalnych ekosystemach. Staje się jasne, że trzeba je chronić, także ze względu na zdolności gleby bogatej w mikoryzę do magazynowania węgla.

Profesor Susan Simard w swoim wystąpieniu w ramach TED mówi o lesie jak o rodzaju inteligentnego organizmu, w którym drzewa i inne rośliny komunikują się ze sobą przez sieć podziemnych połączeń. W jej rodzinnej Kanadzie, w Terrasse-Vaudreuil, niedaleko Montrealu 9 czerwca tego roku przyjęto uchwałę, która uznaje drzewa za osoby mające prawo do obrony i dobrego życia. Zastanawiam się, czy da się powiedzieć, gdzie osoba drzewa się kończy. Czy tam gdzie jej korzenie, czy sięga dalej niezmiernie złożonym system biologicznych kanałów? A może to wszystko to jedna osoba?

Marta FIKUS-KRYŃSKA

#### Wspomniane publikacje:

Frank A.B., Trappe J.M.: On the nutritional dependence of certain trees on root symbiosis with belowground fungi (an English translation of A.B. Frank's classic paper of 1885). *Mycorrhiza* 2005.

Stewart J. D. i wsp.: Global density and biomass of arbuscular mycorrhizal fungal networks. *Science* 2026.

Simard S.W.: Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field, *Nature* 1997.

Mapa dostępna na stronie organizacji SPUN: [a-hidden-infrastructure.spun-earth/story/a-hidden-infrastructure](https://a-hidden-infrastructure.spun-earth/story/a-hidden-infrastructure)