

TE, CO ROSNĄ I LATAJĄ

Kiedy mówimy o grzybach, zazwyczaj przed oczami staje nam borowik albo muchomor. Tymczasem taksonomiczne królestwo grzybów jest znacznie większe i bardziej różnorodne – do dzisiaj opisano ponad 100 tysięcy gatunków, przy czym szacuje się, że w rzeczywistości może ich być nawet pięćdziesiąt razy więcej. Niektóre ukochały paliwo lotnicze.

dr Julia Pawłowska

Uniwersytet Warszawski



Dr Julia Pawłowska

pracuje w Zakładzie Filogenetyki Molekularnej i Ewolucji Wydziału Biologii UW. Zajmuje się ewolucją i różnorodnością grzybów, zwłaszcza tych, które jako pierwsze zasiedlały środowisko lądowe. Jest sekretarzem Polskiego Towarzystwa Mykologicznego.

julia.pawlowska
@biol.uw.edu.pl

Przestawiciele grzybów możemy spotkać absolutnie wszędzie: występują na wszystkich kontynentach, w bardzo różnorodnych siedliskach, w tym także w tych powszechnie uważanych za ekstremalne. Jednym z najbardziej skrajnych środowisk, w jakich stwierdzono obecność grzybów, są układy paliwowe samolotów. Na obecność mikroorganizmów w tak nietypowym miejscu zwrócono uwagę dopiero w latach dziewięćdziesiątych XX w. Wówczas okazało się, że wiele awarii silników nie tylko w samolotach, ale także w łodziach jest powodowanych wzrostem mikroorganizmów na granicy faz pomiędzy wodą a paliwem. Dokładniejsze badania w kolejnych latach pozwoliły ustalić, że głównym sprawcą problemów jest grzyb o nazwie *Amorphotheca resinae*, który jako jedyne źródło węgla (pierwiastka kluczowego dla funkcjonowania wszystkich organizmów na Ziemi) jest w stanie wykorzystywać alkany obecne właśnie w paliwie lotniczym.

Innym przykładem bardzo nietypowego środowiska, w którym stwierdzono obecność grzybów, są ruiny elektrowni jądowej w Czarnobylu, która uległa awarii w 1986 r., powodując skażenie promieniotwórcze obszaru ponad 100 tysięcy km². Na początku lat dziewięćdziesiątych w pozostałościach budynku elektrowni stwierdzono grzyby z rodzajów *Cladosporium*, *Wangiella* oraz *Cryptococcus*. Wszystkie te grzyby charakteryzowały się silnie zmelanizowanymi ścianami. Grupa badaczy pod kierunkiem profesor

Ekateriny Dadachovej postuluje, że grzyby te są nie tylko zdolne do wzrostu w warunkach silnego promieniowania jonizującego, ale prawdopodobnie są w stanie wykorzystywać je w procesach fizjologicznych. W warunkach laboratoryjnych grzyby o zmelanizowanych ścianach migrowały w kierunku źródeł promieniowania gamma.

Melanina to pigment, który występuje powszechnie nie tylko u grzybów, ale także u wielu innych organizmów. Jest to grupa różnorodnych polifenoli, mających unikatowe właściwości fizykochemiczne. Dzięki temu melaniny pełnią różne funkcje biologiczne oraz odpowiadają za adaptację organizmów do skrajnych warunków środowiska. Grzyby o silnie zmelanizowanych ścianach można spotkać w Arktyce, Antarktyce czy na wysokogórskich pustyniach. W wysokich górach zawartość melaniny w ścianach osobników izolowanych z południowych stoków zazwyczaj jest większa niż u organizmów żyjących od strony północnej. Wynika to z faktu, że melanina zawarta w ścianach tych grzybów chroni je przed silnym promieniowaniem UV, które jest szkodliwe dla organizmów.

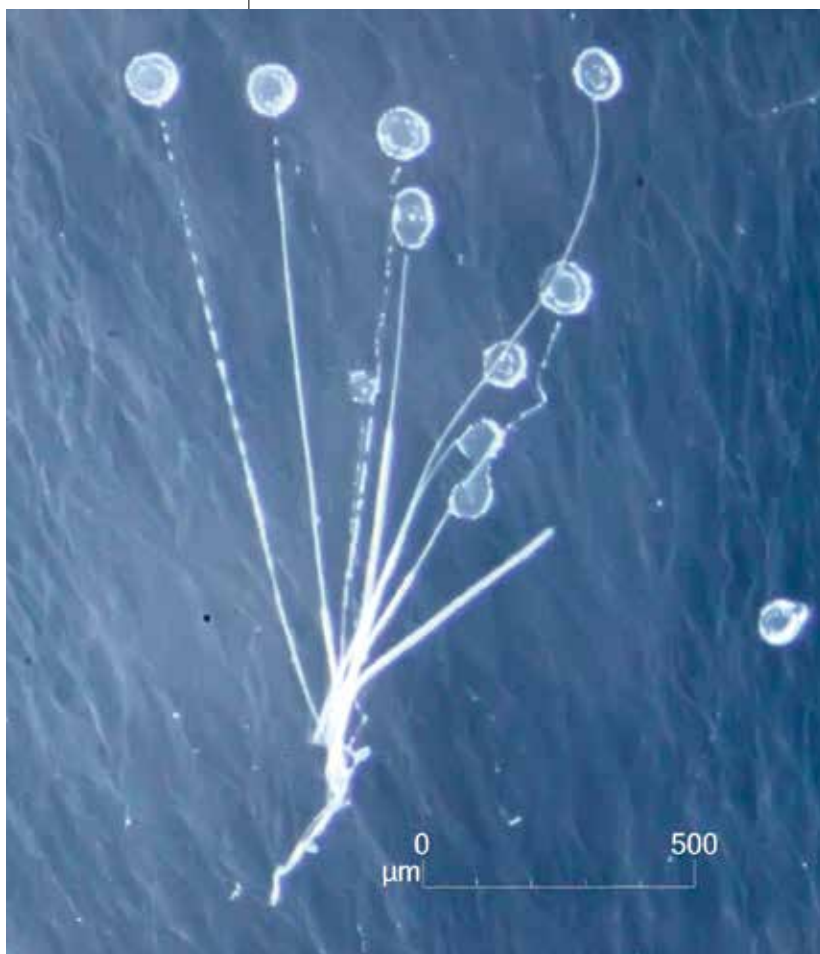
Poza wspomnianymi wyżej mechanizmami fizjologicznymi, które umożliwiają grzybom zasiedlanie siedlisk ekstremalnych, ważną rolę odgrywa także ich niebywała zdolność do wchodzenia w interakcje z innymi organizmami. Najpowszechniej znanym przykładem takich interakcji są porosty, czyli grzyby zlichenizowane. Są to organizmy składające się z grzybów, wchodzących w obligatoryjne symbiozy z autotroficznymi cyjanobakteriami lub zielenicami. Od niedawna wiadomo także, że układ ten jest bardziej skomplikowany, niż wcześniej sądzono. Biorą w nim udział także bakterie oraz grzyby drożdżoidalne należące do podstawczaków. Zdolność porostów

o znoszenia ekstremalnie trudnych warunków środowiska była badana od dawna. W ostatnim czasie wykazano na przykład, że porost *Peltigera aphthosa* jest w stanie przetrwać zarówno w temperaturze -70°C , jak i $+70^{\circ}\text{C}$ i w warunkach beztlenowych. Co więcej, żaden z wymienionych czynników stresowych nie wpływa istotnie na wydajność prowadzonej przez porost fotosyntezy. Wydaje się, że to właśnie dzięki interakcji pomiędzy organizmami uzyskuje się nową jakość, która umożliwia porostom zasiedlanie siedlisk, w których żaden z komponentów sam nie byłby w stanie sobie poradzić. Jedną z takich cech, umożliwiających porostom przetrwanie w warunkach braku wody, jest zdolność do zatrzymania czynności fizjologicznych, które następnie mogą zostać wznowione, kiedy woda się pojawi. Wyjątkowe zdolności porostów zostały też przetestowane w kosmosie. W 2005 r. grupa badaczy z rosyjskiej rakiety Sojuz umieściła dwa gatunki porostów na 15 dni na zewnątrz statku krążącego na orbicie wokółziemskiej. Kiedy po tym czasie ponownie trafiły do wnętrza statku, wznowiły tam swoje czynności życiowe.

Poza porostami innym dobrze znanym przykładem interakcji, w jakie wchodzi grzyby, są mykoryzy, czyli związki z korzeniami roślin. Układy te zostały opisane po raz pierwszy już w XIX w. i od tego czasu są intensywnie badane. Uważa się, że to właśnie wejście w relację z grzybami umożliwiło roślinom kolonizację środowiska lądowego. W szkolnym ujęciu mykoryzę przedstawia się następująco: roślina dostarcza grzybom związki węgla pochodzące z fotosyntezy, a w zamian uzyskuje od grzybów związki azotu i fosforu. Z biegiem lat okazało się jednak, że podobnie jak w przypadku porostów układ jest często znacznie bardziej złożony. Pod koniec XX w. odkryto bowiem istnienie tzw. *mycorrhizal helper bacteria* (MHB), czyli bakterii wspomagających funkcjonowanie układu mykoryzowego. Okazało się, że różne szczepy bakterii występujących w ryzosferze, np. z rodzajów *Pseudomonas* czy *Streptomyces*, mogą wpływać na ekspresję genów u grzybów wchodzących w związki ektomykoryzowe z drzewami. Z czasem podobne mechanizmy zaobserwowano także w relacjach grzybów endomykoryzowych z roślinami zielnymi. W tym przypadku bakterie stymulują dojrzewanie spor u przedstawicieli *Glomeromycota*.

Badania nad mykoryzą zapoczątkowały wiele odkryć pokazujących, że interakcje grzybów z bakteriami są powszechnym zjawiskiem. W roku 2010 amerykański zespół badawczy po raz pierwszy wyizolował endosymbiotyczne bakterie ze strzępek grzybów endofitycznych, czyli takich, które rozwijają się wewnątrz tkanek roślinnych, nie wywołując u gospodarzy żadnych objawów. Trzy lata później okazało się, że endosymbiotyczne bakterie stymulują grzyby endofityczne do produkcji hormonów roślinnych, czyli związków regulujących wzrost i rozwój roślin.





DR MARTA WRZOSEK

Mortierella calciphila
wyzolowana z gleby
wapiennej w województwie
zachodniopomorskim

W kolejnych latach ten sam zespół wykazał, że bakterie obecne w strzępkach grzybów wpływają na zdolność wykorzystywania przez grzyby różnych źródeł węgla. Jeśli grzyby endofityczne zostaną pozbawione swoich bakteryjnych endosymbiontów, tracą zdolność do wykorzystywania np. trehalozy. Powyższe wyniki wskazują, że wewnątrzstrzępkowe bakterie zasiedlające endofityczne grzyby wpływają pośrednio na zdolności adaptacyjne rośliny gospodarza. Innymi słowy, ich obecność lub brak może wpływać na to, czy dana roślina będzie mogła utrzymać się w określonej niszy ekologicznej.

W toku badań nad endosymbiotycznymi bakteriami grzybów odkryto ich wpływ na toksyczność gospodarza. Występujący w siewkach ryżu patogeniczny grzyb rozłóżek *Rhizopus microsporus* ma w swoich strzępkach endosymbiotyczne bakterie z rodzaju *Burkholderia*, które odpowiadają za produkcję toksyny uznanej pierwotnie za grzybową (tzw. ryzoksyny). Jako że *Rhizopus* należy do grupy pleśniakowców, które są jednymi z pierwszych grzybów lądowych, powyższe odkrycie spowodowało wzrost zainteresowania ich interakcjami z prokariotami. *Rhizopus* należy do grupy pleśniakowców – grzybów o szerokim, niepodzielonych ścianami strzępkach, w których nieraz i nie

tylko u rozłóżka można dostrzec kolonie bakteryjne. Trudno dziś jednoznacznie stwierdzić, w jakim charakterze się tam znalazły – czy jako pasożyty, czy jako współpracownicy.

W świetle współczesnych badań filogenetycznych za pierwszą grupę grzybów występujących w środowisku lądowym uważa się przedstawicieli podtypu *Mortierellomycotina*, która skupia przede wszystkim saprotroficzne grzyby glebowe. Są to organizmy kosmopolityczne, chętnie zasiedlające środowiska ubogie w składniki odżywcze. Niedawne badania pokazały, że wielu przedstawicieli tej grupy wchodzi w obligatoryjne lub fakultatywne interakcje z bakteriami wewnątrzstrzępkowymi. Opublikowana w zeszłym roku analiza genomu grzyba *Mortierella elongata* oraz jego wewnątrzstrzępkowego symbionta *Mycoavidus cysteinexigens* pokazała, że genom grzybowego gospodarza zawiera komplet genów podstawowych szlaków metabolicznych, podczas gdy genom endosymbiotycznej bakterii jest silnie zredukowany. Kolejne eksperymenty, polegające na usuwaniu endosymbionta, udowodniły jego silny wpływ na metabolizm gospodarza. Uzyskane wyniki wskazują na starą ewolucyjnie interakcję pomiędzy grzybami a bakteriami.

Początki tej symbiozy sięgają prawdopodobnie czasów, kiedy grzyby zaczynały zasiedlanie środowiska lądowego. Środowisko to, w porównaniu z wodami, gdzie powstało życie, było skrajnie ubogie i całkowicie pozbawione gleby – struktury powstałej z części mineralnych i organicznych. Zasiedlenie nagich skał wystawionych na działanie promieniowania UV oraz skrajnych temperatur musiało być w historii życia na Ziemi prawdziwą rewolucją. Wydaje się, że zanim na lądy wkroczyły rośliny ze swymi grzybowymi partnerami, wcześniej pojawiły się proste konsorcja i układy symbiotyczne grzybów z bakteriami. Z czasem, kiedy na pokryte warstwą gleb lądy wychodziły kolejne grzyby zdolne do rozkładu szczątków roślinnych i zwierzęcych, pionierskie organizmy zaczęły być powoli wypierane i do dziś znajdują swoje miejsce na obszarach pustynnych, chłodnych i w wysokich górach – tam gdzie organizmy specjalizujące się w rozkładzie celulozy ligniny nie mają odpowiedniego podłoża do rozwoju. To właśnie w środowiskach skrajnych szukamy grzybów żyjących w interakcjach z innymi organizmami, wierząc, że ich poznanie odpowie nam na wiele ważnych pytań o przeszłość ewolucyjną, w tym o zasiedlanie przez grzyby środowiska lądowego.

JULIA PAWŁOWSKA

Opisane badania są obecnie prowadzone w Zakładzie Filogenetyki Molekularnej i Ewolucji Wydziału Biologii UW i finansowane w ramach projektów Narodowego Centrum Nauki dr Marty Wrzosek OPUS nr 2016/23/B/NZ8/00897 oraz dr Julii Pawłowskiej SONATA nr 2015/17/D/NZ8/00778 i OPUS nr 2017/25/B/NZ8/00473.