



**dr inż.
Natalia Kartawik**

Pracuje na stanowisku asystentki w Katedrze Entomologii i Fitopatologii Leśnej UPP. Zajmuje się badaniem zbiorowisk grzybów zasiedlających rozkładane drewno i ich wpływem na drzewostany gospodarcze.

natalia.kartawik
@up.poznan.pl

NAJSTARSI KOLONIZATORZY ZIEMI

Grzyby – organizmy, które jako pierwsze pojawiły się na lądzie – wciąż pozostają mało poznane. Co wiemy na temat ich historii i ewolucji?

Próchnilec maczugowaty
(*Xylaria polymorpha*)



Różnorodność i liczebność organizmów żywych na Ziemi jest bardzo duża. Podzielono je więc na jednostki o różnicach na tyle istotnych, że można je nazwać królestwami. Klasyfikuje się do nich grupy organizmów (taksony) o udowodnionych wspólnych, unikatowych, ale pochodnych cechach adaptacyjnych. Obecnie wyróżnia się pięć królestw opisanych przez Roberta Whittakera w 1969 roku. Badania nad grzybami trwają stosunkowo krótko. Wiadomo jednak, że królestwo grzybów istnieje na Ziemi od milionów lat, a ich obecność wpływa na funkcjonowanie ekosystemów lądowych i ewolucję innych organizmów. Dotychczas podejmowano liczne próby zidentyfikowania synapomorfii i cech genetycznych, które definiują królestwo grzybów i oddzielają je od innych grup. W oparciu o analizy datowania molekularnego dotyczących względnego wieku ustalono, że królestwo grzybów ma morskie pochodzenie i jest starsze od skamieniałości fauny i flory lądowej.

Przodkiem wszystkich grzybów był prawdopodobnie parazytoidalny mikroalg, posiadający zdolności fagotrofizmu, wykazujący ruchliwość zarówno ameboidalną, jak i wiciową oraz chitynowe ściany komórkowe. Bez względu na to, jak definiujemy grzyby, zrozumienie zmian, które leżały u podstaw ich ewolucji, jest kluczowe dla lepszego poznania zależności panujących w ekosystemach ziemskich. Grzyby to cudzożywne, szeroko rozpowszechnione na Ziemi organizmy o silnym zróżnicowaniu zarówno filogenetycznym, jak i funkcjonalnym. Strzępki tworzące grzybnie wykazują zdolność do rozwoju w różnych środowiskach, trawienia zewnętrznego oraz wchłaniania i metabolizowania wielu różnych związków, w tym ligniny i celulozy. Możliwość zmian form życiowych pozwala niektórym grzybom na interakcje z wieloma żywicielami w różnych warunkach środowiskowych. Ponadto doskonale dostosowują się do zróżnicowanych – zarówno przestrzennie, jak i czasowo – zasobów pożywienia.

Szacuje się, że królestwo grzybów obejmuje około 5,1 mln taksonów grzybów właściwych, które można podzielić na dziewięć głównych typów: *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Blastocladiomycota*, *Chytridiomycota*, *Glomeromycota*, *Mucoromycota*, *Neocallimastigomycota*, *Opisthosporida*, *Zoopagomycota*. W porównaniu z grupami organizmów grzybopodobnych, np. *Corallochytrium* (*Holozoa*, *Opisthokonta*), *Hyphochytriumycetes* (*Pseudofungi*) i *Oomycetes*, grzyby pojawiły się na lądzie jako pierwsze i skutecznie utrzymały nisze



Mączniak prawdziwy dębu (*Erysiphe alphitoides*) jest najbardziej niebezpieczny dla młodych drzewek

dzięki dalszym adaptacjom. Odkrycie skamieniałości w Grassy Bay w 2019 roku o charakterystycznej dla grzybów strukturze komórkowej sugeruje, że grzyby pojawiły się 600 mln lat wcześniej, niż sądzono do tej pory. Podkrólestwo *Dikarya* wyodrębniło się około 500 mln lat temu. *Ascomycota* i *Basidiomycota*, liczące ponad 1,5 mln taksonów, to dwa główne typy należące do *Dikarya*, będącą najbardziej zróżnicowaną i najlepiej zbadaną grupą grzybów. Charakteryzują się cyklem płciowym, który obejmuje łączenie strzępek bez procesu mejozy, przez co nowo powstałe komórki zawierają dwa niezależne jądra komórkowe (strzępki dikariotyczne).

Do rozdzielenia na *Ascomycota* i *Basidiomycota* doszło 1,2 mld lat temu. Z kolei dane zegara molekularnego dotyczące lęgniowców wskazują, że pojawiły się one na Ziemi około 250 mln lat temu. Obecność na lądzie pierwszych przedstawicieli *Peronosporales* datuje się na około 150 mln lat, czyli długo po tym, jak grzyby skolonizowały siedliska podobne do preferowanych przez rośliny. Jest więc wysoce prawdopodobne, że grzyby przez długi okres rozwijały cechy, które pozwoliły im na opanowanie nisz lądowych i utrzymywanie się w nich. Najważniejsze cechy ewolucyjne grzybów pozwalające na dostosowanie się do środowiska lądowego to utrata fagotrofii oraz wici, co jest związane z rozwojem strzępek. Zamiast utrzymywać elastyczną błonę, komórki grzybów zaczęły rozwijać sztywne i strukturalnie wzmocnione powierzchnie komórkowe. To z kolei chroni komórki przed wysokim ciśnieniem turgorowym i pozwala na wypełnienie cytoplazmy wysoko stężonymi substancjami, utrzymując szybkie tempo metabolizmu. Ewolucja sztywnych komórek umożliwia spolaryzowany wzrost na końcu rozgałęziającej się strzępki, które u większości grzybów posiadają organella składające się z licznych pęcherzyków pochodzących od aparatu Golgiego.



dr hab. Jolanta Behnke-Borowczyk, prof. UPP

Specjalizuję się w badaniu zbiorowisk grzybów ekosystemów leśnych ze szczególnym uwzględnieniem patogenów.
jolanta.behnke@up.poznan.pl



Skórnik szorstki
(*Stereum hirsutum*)

W komórkach grzybów są zawarte enzymy, lipidy i polisacharydy, niezbędne do syntezy błon i ściany komórkowej.

Mistrzowie adaptacji

Grzyby pośredniczą w powiązaniach między różnymi organizmami i ekosystemami, co wpływa na makroekologię i ewolucję tych organizmów. Odnalezione skamieniałości *Ascomycota*, *Blastocladiomycota*, *Chytridiomycota* i *Mucoromycota* na stanowisku paleontologicznym Rhynie Chert w Szkocji, pochodzące z wczesnego dewonu, są związane z najwcześniejszą znaną florą lądową. To niezbitny dowód na to, że interakcje między grzybami i roślinami są ekologiczną siłą napędową łączącą ich gospodarzy, konkurentów i antagonistów ze środowiskami.

Grzyby występują w niemal wszystkich ekosystemach lądowych, gdzie pełnią wiele funkcji. Począwszy od rozkładu materii organicznej i obiegu składników odżywczych, a na korzystnych i antagonistycznych związkach z roślinami i ze zwierzętami skończywszy. Wyróżnia się dwie główne strategie życia grzybów: biotrofię (zdolność rozwoju wyłącznie z żywymi organizmami) i nekrotrofię (zdolność życia w martwej materii organicznej). Strategie te nakładają radykalnie różne presje ewolucyjne, co znajduje odzwierciedlenie w charakterystyce ich genomu. Dowody kopalniane wskazują, że już w dewonie grzyby pełniły popularne do dziś funkcje troficzne, takie jakie cudzożywność, pasożytnictwo, a nawet mykoryza.

Obserwowany w przeszłości rozwój strzępek świadczy albo o konieczności przerastania znacznie większych organizmów, albo zwiększeniu powierzchni w ramach saprotroficznego (cudzożywczego) stylu życia. Co więcej, zdolność do wydzielania enzymów

trawiennych i pojawienie się licznych błon preferencyjnych na końcach strzępek można rozumieć jako bezpośrednią konsekwencję saprotroficznego lub pasożytniczego trybu życia. Oznacza to, że organizmy będące przodkami grzybów, by uzyskać składniki odżywcze, naruszały struktury jednokomórkowych eukariontów. Kolejna cecha ewolucyjna to przejście na zewnętrzne trawienie złożonych związków chemicznych, połączone z aktywnym transportem przetworzonych metabolitów do wnętrza komórki.

Do głównych czynników adaptacyjnych należą stres, zakłócenia, występowanie konkurentów lub ich kombinacje. Grzyby stale przekształcają zasoby organiczne, w których rosną i żerują. Po dotarciu do materii, którą będą rozkładać, siła ich konkurencji decyduje o tym, czy odniosą sukces w kolonizacji i jak długo utrzymają terytorium. Nie jest zaskakujące, że grzyby wyewoluowały w różne grupy troficzne, by przetrwać w różnorodnych środowiskach. Obecnie na tempo adaptacji grzybów do nowych warunków może wpływać działalność człowieka, np. przez stosowanie fungicydów. Presja selekcyjna wywierana przez fungicydy powoduje, że w środowisku pozostają najsilniejsze i najbardziej odporne populacje. Grzyby są uważane za jedne z najważniejszych saprotrofów dzięki zdolności do rozkładania martwej materii organicznej na proste związki, które są łatwo przyswajalne przez rośliny. Gleba i rozkładające się drewno stanowią wielkie bogactwo grzybów saprotroficznych w środowisku leśnym, stale wykorzystujących związki organiczne, w których rosną i którymi się żywią.

W ekosystemach lądowych materia nie jest równomiernie rozłożona w czasie i przestrzeni. Przybiera bardzo zróżnicowane rozmiary – od drobnych fragmentów, takich jak łuski pączków, po ogromne pnie drzew. Enzymatyczny rozkład związków ligniny wyewoluował w biosferze raz, w klasie *Agaricomycetes*, około 290 mln lat temu. Pierwszy jednoznaczny

Zgnilizna brunatna



kopalny dowód na obecność białej zgnilizny pojawił się dopiero około 260 mln lat temu. Brak możliwości rozkładu ligniny wśród organizmów występujących na Ziemi w okresie karbonu pozwolił na zdeponowanie większości światowych złóż węgla i obniżenie poziomu atmosferycznego CO₂. Właśnie ta zdolność, której nabycie koreluje się z tworzeniem bardzo złożonych owocników, zapewniła *Agaricomycetes* wielki sukces ewolucyjny i ekologiczny. Grzyby rozkładające drewno, które nie mają tej zdolności, są nazywane grzybami brunatnej zgnilizny. Należy jednak dodać, że to rozróżnienie jest jedynie ogólnym przybliżeniem, ponieważ są znane taksony wykazujące zdolność do częściowej degradacji ligniny.

Interakcje międzygatunkowe

Symbioza to wzajemne, korzystne połączenie dwóch lub więcej organizmów. Grzyby i rośliny lądowe łączą jedną z najdłuższych i najbardziej bliskich relacji w biosferze. Kolonizacja łądu przez eukarionty była prawdopodobnie możliwa przez symbiozę między organizmem fotosyntetyzującym (fototrofem) a grzybem. Endotrofizm to słabo poznana nisza grzybów charakteryzująca się imponującą różnorodnością biologiczną. Skamieniałość *Glomeromycota* jest jednym z pierwszych bezpośrednich dowodów na istnienie lądowego życia grzybów. Ponadto do kilku odrębnych taksonów *Dikarya* również należą gatunki będące endotrofami korzeniowymi. Oznacza to, że korzenie szybko stały się ważną niszą dla grzybów. Dowody kopalne z Rhynie Chert wskazują, że już 400 mln lat temu występowały zespoły mykoryzowe. To odkrycie dodatkowo potwierdza, że interakcje roślin z grzybami były niezbędne w procesie opanowania łądu przez rośliny. Pierwotne związki mykoryzowe są często nazywane paramykoryzami, ponieważ rośliny nie miały prawdziwych korzeni. Sposób kolonizacji różnych organów przypomina tę obserwowaną u współczesnych wątrobowców. Endotrofy to grzyby, które żyją wewnątrz tkanek roślinnych, nie wyrządzając im szkód. Te grzyby nie cieszyły się tak dużym zainteresowaniem naukowców jak mykoryzy, w związku z czym nadal brakuje dokładnych szacunków ich liczebności, znaczenia i różnorodności. Sugeruje się, że obecność grzybów endotroficznych chroni roślinę przed grzybami chorobotwórczymi, stymulując mechanizmy obronne roślin i pełniąc funkcję niszowego konkurenta. Wytwarzając metabolity wtórne, pomagają roślinie w walce z roślinożercami lub stymulują jej wzrost. Niektóre taksony grzybów są pasożytami innych organizmów, takich jak owady, nicienie, a nawet innych grzybów. Organizmy prowadzące parazytoidalny tryb życia rzadko występują w środowisku w dużych ilościach, co zmniejsza prawdopodobieństwo ich zachowania w zapisie kopalnym. Grzyby są w stanie atakować i trawić praktycz-



nie każdy rodzaj żywej struktury, w tym inne grzyby. Zdolność do zasiedlania innych grzybów pojawiła się bardzo wcześnie. Zespoły mykopasożytów znaleziono już w najstarszych jednoznacznych skamielinach grzybów, we wczesnym dewońskim osadzie powstałym około 410 mln lat temu. Z ewolucyjnego punktu widzenia wydaje się, że mykopasożyty mogą ułatwiać transfer genów (HGT), przekazując DNA bezpośrednio do swojego żywiciela lub usuwając jego ścianę komórkową. W ten sposób eliminują fizyczną barierę w pozyskiwaniu DNA od innych gatunków.

Badania nadal trwają

Grzyby są kluczowym elementem ewolucji życia na Ziemi. Dziś znacznie częściej i z dużo większą świadomością zwraca się uwagę na ich obecność i funkcje, które pełnią w ekosystemach, dlatego wiele z nich podlega ochronie. Od dawna grzyby mają zastosowanie w medycynie, a w ostatnim czasie również w nauce. Pierwsza kompletna sekwencja genomu eukariota, opublikowana w 1996 roku, która zrewolucjonizowała świat nauki, należy właśnie do grzyba (*Saccharomyces cerevisiae*). Nadal wiele taksonów pozostaje niepoznanych ze względu na trudności związane z identyfikacją. Jednak wciąż dynamicznie postępujący rozwój metod i narzędzi badawczych pozwala na coraz lepsze poznanie niepozornych, często niewidocznych gołym okiem organizmów. Zdobyta wiedza może pomóc nie tylko w ochronie, lecz także zastosowaniu czy znalezieniu odpowiedzi na inne pytania badawcze związane z mniej lub bardziej pokrewnymi organizmami. Jest to szczególnie istotne w aspekcie ocieplającego się klimatu i związanych z tym zmian stężenia CO₂ czy wzrostu temperatury, których szybkie tempo jest bardzo niepokojące. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Naranjo-Ortiz M.A., Gabaldón T., *Fungal evolution: diversity, taxonomy and phylogeny of the Fungi*, „Biological Reviews of the Cambridge Philosophy Society” 2019, doi: 10.1111/brv.12550, PMID: 31659870, PMID: PMC6899921.

Richards T.A., Leonard G., Wideman J.G., *What Defines the „Kingdom” Fungi?*, „Microbiology Spectrum” 2017, doi: 10.1128/microbiolspec.FUNK-0044-2017, PMID: 28643626.