

Anna Krupa

*Instytut Chemii, Ochrony Środowiska i Biotechnologii, Akademia im. Jana Długosza,
42-200 Częstochowa, Armii Krajowej 13/15, Polska
e-mail: a.krupa@ajd.czyst.pl*

Mikoryzy i ich wielofunkcyjna rola w środowisku

Abstrakt

W artykule przedstawiono zjawisko mikoryzy występujące pomiędzy określonymi gatunkami roślin i grzybów. Scharakteryzowano poszczególne rodzaje mikoryz oraz omówiono ich rolę w środowisku, ze szczególnym uwzględnieniem pozytywnego wpływu grzybów mikoryzowych na kondycję rośliny oraz szeroko rozumianą ochronę przed patogenami i skutkami skażenia środowiska.

Słowa kluczowe: mikoryza, grzyby mikoryzowe, symbioza

Wstęp

Mikoryza jest dość powszechnym zjawiskiem występującym w przyrodzie. Ta swoista symbioza między korzeniami roślin, a specyficznymi gatunkami grzybów, przynosi roślinom bardzo wiele korzyści. Mikoryzy powodują poprawę ogólnej kondycji rośliny, wspomagają jej wzrost, podnoszą odporność na patogeny, przyczyniają się do bardziej efektywnego poboru składników odżywczych z gleby. Coraz więcej uwagi poświęca się ochronnej roli mikoryz przed negatywnym wpływem czynników zewnętrznych: głównie wysokim zanieczyszczeniem metalami ciężkimi.

Mikoryza

Mikoryzą nazywamy symbiozę między korzeniami roślin a niepatogenicznymi, wysoce wyspecjalizowanymi grzybami żyjącymi w glebie. Nazwa mikoryza pochodzi od dwóch greckich słów: *mykes* - grzyb, *rhiza* – korzeń, stąd też czasem spotkane jest inne określenie – grzybokorzeń¹. Grzyby mikoryzowe żyją w symbiozie niemal ze wszystkimi roślinami. Mówi się, że mikoryzy tworzy ok. 80-90% roślin lądowych^{1, 2}. Natomiast liczbę grzybów wchodzących w związki mikoryzowe z roślinami wyższymi szacuje się na około 5000 – 6000 gatunków³.

Rodzaje mikoryz

Mikoryzę można podzielić na cztery duże grupy: mikoryzę zewnętrzną (ektomikoryzę), mikoryzę wewnętrzną (endomikoryzę), ektendomikoryzę oraz mikoryzę perytroficzną.

Ektomikoryza (mikoryza zewnętrzna)

Ektomikoryza występuje u ok. 10% roślin. Znajdziemy ją zarówno u roślin nagozalążkowych, jak i okrytozalążkowych. Jej obecność stwierdzono u przedstawicieli rodziny: *Pinaceae* (m. in. *Abies*, *Larix*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga*, *Tsuga*), *Fagaceae* (*Fagus*, *Quercus*), *Betulaceae* (*Betula*, *Alnus*) oraz *Arbutus* i *Tilia*. W ektomikoryzie strzępki grzyba wnikają między ściany komórek miękiszu kory pierwotnej korzenia, oplatają je i tworzą system połączeń międzykomórkowych tzw. sieć Hartiga. U roślin okrytozalążkowych sieć Hartiga składa się z jednej warstwy komórek ograniczonej epidermą, a u nagozalążkowych dociera ona w głąb korzenia^{4, 5, 6}. Jest to miejsce, w którym dochodzi do wymiany substancji między symbiontami. Wolno rosnąca część korzenia pokryta jest tak zwaną mufką grzybniową (opilśnią). Przejmuje ona funkcje włośników, które w ektomikoryzie zanikają. Korzenie pod wpływem symbionta grzybowego wyraźnie zmieniają swój kształt i łatwo odróżnić je od korzeni niemikoryzowych. Mufka składa się zwykle z kilku warstw komórek, co odpowiada grubość rzędu 20–60 μm ¹. Barwa i budowa opilśni mogą być różne u różnych grzybów ektomikoryzowych^{1, 3}. Od mufki odchodzą w głąb podłoża zewnętrzne strzępki, które tworzą złożoną sieć zwaną grzybnią ekstrametrykalną¹. Bardzo często przechodzi ona w tzw. sznury grzybniowe, eksploatujące glebę na znaczne odległości. Sznury te łączą ze sobą systemy korzeniowe wielu gatunków roślin i umożliwiają wymianę między nimi substancji organicznych i nieorganicznych oraz wody. Uczestniczą one także w kolonizacji mikoryzowej korzeni sąsiednich roślin^{3, 7, 8}. Kolonizacja korzeni przez grzyby ektomikoryzowe może mieć miejsce już we wczesnym stadium rozwoju siewki, gdy wytworzy ona pierwsze korzenie boczne. Źródłem grzybni zasiedlającej korzenie są obecne w glebie strzępki grzybniowe, zarodniki lub mikoryzy występujące na starszych korzeniach. Wzrost grzybni mikoryzowej mogą stymulować wydzieliny korzeniowe tzw. eksudaty. Proces nawiązania symbiozy rozpoczyna się w momencie kontaktu korzenia ze strzępkami odpowiedniego gatunku grzyba¹.

Symbiotyczne związki ektomikoryzowe mogą mieć charakter obligatoryjny lub fakultatywny. Gatunki obligatoryjne nie rozwijają się prawidłowo bez mikoryzy (m. in. buk, dąb, sosna, świerk). Natomiast u roślin fakultatywnych (np. brzoza, wierzba, olsza) wykształcenie się mikoryzy uzależnione jest od różnych warunków środowiskowych, głównie warunków glebowych^{1, 4}.

Większość grzybów ektomikoryzowych nie wykazuje specyficzności w stosunku do roślin-gospodarzy. Niektóre gatunki grzybów, m. in. *Hebeloma crustuliniforme* mogą tworzyć ektomikoryzy z wieloma gatunkami roślin⁴. Podczas gdy inne grzyby są wyspecjalizowane i zdolne do tworzenia mikoryz z tylko jednym gatunkiem rośliny. Wiele gatunków z rodzaju *Suillus* wchodzi w kontakty ektomikoryzowe tylko z gatunkami z rodzaju *Pinus* lub *Larix*^{1,5,9}.

Najczęściej ektomikoryzy tworzą grzyby z klasy: *Homobasidiomycetes*, rzadziej *Ascomycetes*, najrzadziej *Zygomycetes*. Najbardziej powszechnymi rodzajami grzybów ektomikoryzowych są: *Amanita*, *Cenococcum*, *Hebeloma*, *Laccaria*, *Pisolithus* oraz *Telephora*. Występują one na obszarze całej kuli ziemskiej, współżyją z wieloma gatunkami roślin należących do różnych grup systematycznych³.

Endomikoryza (mikoryza wewnętrzna)

Endomikoryza jest najczęściej występującą mikoryzą. Ok. 250 000 gatunków roślin na całym świecie jest zdolna do tworzenia endomikoryz. Rozpowszechniona jest przede wszystkim u roślin zielnych oraz drzew owocowych^{1,10}.

W endomikoryzie strzępki grzyba wnikają do wnętrza komórek miękiszu kory pierwotnej korzenia i tam zostają strawione. Składniki tego rozkładu są pobierane przez roślinę³. We wnętrzu komórek korzenia, spenetrowanych przez strzępki grzyba, mogą tworzyć się dwa rodzaje struktur: wesikule (małe, wielojądrowe, rozdęte strzępki magazynujące lipidy i rozmnażające się aseksualnie) oraz arbuskule (skupiska cienkich, promieniście rozgałęzionych strzępek wyspecjalizowanych w wymianie substancji odżywczych między rośliną a grzybem). W tym typie mikoryzy włośniki nie zanikają, nie tworzy się mufka. Korzenie roślin z endomikoryzą posiadają włośniki i zewnętrznie niczym nie różnią się od korzeni niemikoryzowych. Obecność endomikoryz można stwierdzić dopiero w badaniach mikroskopowych^{3,11}.

Najczęściej endomikoryzy tworzą grzyby z rzędu *Glomales*⁵. Większość roślin tworzy tylko jeden typ mikoryzy tzn. tylko ektomikoryzę lub tylko endomikoryzę. Istnieją także gatunki, które są zdolne do tworzenia obu tych mikoryz jednocześnie. Zaliczamy do nich m.in.: *Alnus*, *Populus*, *Salix*^{12,13}.

Ektendomikoryza

Ektendomikoryza posiada cechy zarówno ekto- jak i endomikoryzy. Charakteryzują się obecnością słabo wykształconej, cienkiej mufki, dobrze rozwiniętą siecią Hartiga oraz występowaniem strzępek grzyba we wnętrzu komórek kory pierwotnej korzenia rośliny^{1,3}. Najczęściej tworzą ją grzyby z rodzaju *Wilcoxina*, odznaczające się dużą odpornością na niekorzystne warunki środowi-

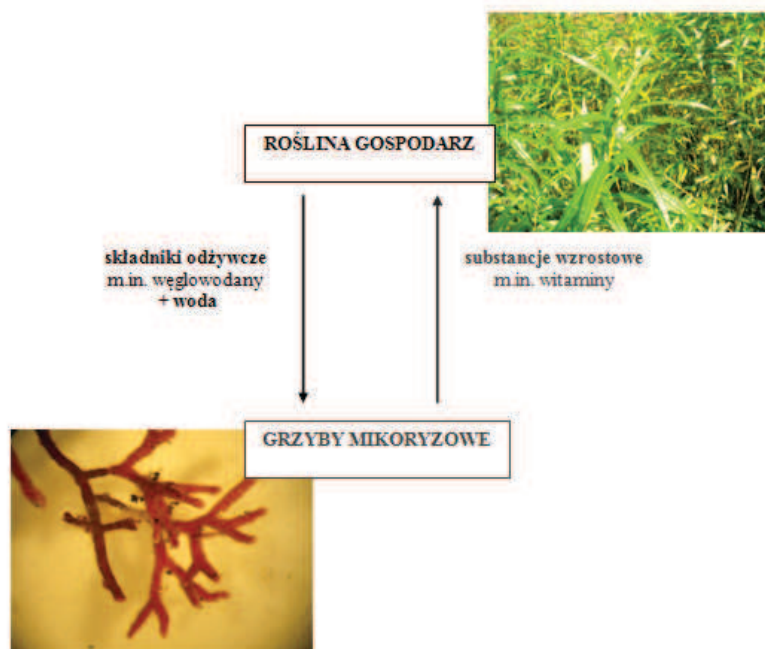
ska, licznie występują w zdegradowanych glebach mineralnych (np. porolnych). Gospodarzami grzybów ektendomikoryzowych są najczęściej gatunki: *Pinus* i *Larix*^{1, 14}. Ektendomikoryzę często uważa się za rozwojową odmianę ektomikoryzy.

Mikoryza perytroficzna

Jest to najluźniejszy typ symbiozy. Grzyby tworzące ten rodzaj mikoryzy żyją na powierzchni korzeni roślin lub w strefie przykorzeniowej i nie wchodzą w więzi anatomiczne z korą pierwotną korzeni. Grzyby mikoryzy perytroficznej zmieniają pod względem chemicznym najbliższe otoczenie korzeni roślin, często spełniając rolę swoistych buforów glebowego pH^{1, 11}.

Funkcje mikoryz

Główną rolą grzybów mikoryzowych jest pobieranie składników pokarmowych i wody oraz ich transport do komórek gospodarza symbiotycznego, dzięki zwiększeniu powierzchni chłonnej korzeni roślin. Roślina w zamian dostarcza grzybom składników odżywczych, przede wszystkim węglowodanów, wytworzonych w procesie fotosyntezy.



Rysunek 1. Schemat zależności między rośliną gospodarzem a grzybem mikoryzowym.

Zwiększanie powierzchni chłonnej korzeni

Powierzchnia chłonna roślin tworzących ektomikoryzy jest ok. 1000 razy większa w porównaniu z korzeniami niemikoryzowymi. Wpływa na to rozrost mufki grzybniowej oraz tworzenie się sznurów grzybniowych. Przerost komórek miękiszu kory pierwotnej korzenia strzępkami grzyba zwiększa średnice korzeni mikoryzowych, przez co mogą one pobierać więcej wody z podłoża, a wraz z nią i składników mineralnych. Rośliny tworzące mikoryzę są lepiej zaopatrzone w wodę i odżywione. Sadzonki z dobrze wykształconą mikoryzą są zwykle większe od niemikoryzowych^{1,2}.

Sieć grzybni ekstramatrykalnej penetruje glebę na znaczną odległość, zwiększając tym samym objętość gleby dostępnej dla rośliny. Strzępki grzyba mikoryzowego docierają do bardzo małych przestrzeni w profilu glebowym, niedostępnych dla zwykłych korzeni rośliny. Mikoryza zwiększa pobieranie azotu, fosforu i potasu, ale także innych pierwiastków m. in. wapnia, żelaza oraz magnezu z gleby^{1, 3, 11, 15, 16}. Mikoryzy są nie tylko zdolne do zwiększonej absorpcji tych pierwiastków, ale mogą także wykorzystywać organiczne oraz nieorganiczne ich związki, niedostępne lub słabo dostępne dla roślin. Szczególnie dotyczy to fosforu, który dominuje w glebach w postaci nierozpuszczonej, nieprzyswajalnej przez rośliny. Grzyby mikoryzowe wykorzystują taki fosfor m. in. poprzez: produkcję kwasów organicznych (np. kwasu szczawiowego)^{1, 6}. W konsekwencji mikoryzy gromadzą więcej fosforu niż korzenie niemikoryzowe, zwiększając tym samym zawartość fosforu w roślinach. Mikoryzy pobierają sprawnie także azot pod różnymi postaciami: amonowy, azotanowy oraz organiczny¹. Zaopatrując tym samym w przyswajalny azot swojego symbionta roślinnego. Niektóre grzyby ektomikoryzowe wytwarzają szeroki zakres enzymów: hydrolaz i oksydaz, zdolnych do depolimeryzacji organicznych związków azotu. Korzenie mikoryzowe gromadzą więcej azotu na glebach ubogich niż na glebach żyzniejszych¹¹.

Prawidłowo wykształcona mikoryza zwiększa przeżywalność roślin w trudnych warunkach poprzez podniesienie dostępności składników pokarmowych. Głównym źródłem węgla dla grzybów mikoryzowych są węglowodany pobierane od gospodarza roślinnego. Około 20%–30% całkowitego zasymilowanego przez roślinę węgla może być przekazywana do symbionta grzybowego. Roślina może zwiększać aktywność fotosyntetyczną wraz z postępującą kolonizacją mikoryzową, tym samym rekompensując sobie straty węgla do gleby^{10, 18}. Roślina powiększa wówczas powierzchnię liści i ilość wiązanego CO₂ przez jednostkę wagową liścia⁵. Dzięki zwiększonemu pobieraniu wody oraz składników odżywczych mikoryzy zwiększają wielokrotnie tolerancję rośliny na suszę oraz niedobór substancji mineralnych.

Ochrona przed patogenami

Ochrona korzeni roślin przed atakiem patogenów uważana jest za podstawową rolę ekologiczną mikoryz. Grzyby ektomikoryzowe obniżają częstość chorób korzeni w różny sposób. Mufka, występująca w ektomikoryzach, stanowi swoistą barierę chroniącą korzeń przed infekcją powodowaną przez patogeny. Niektóre gatunki grzybów mikoryzowych produkuje antybiotyki, które działają bójkczo na mikroorganizmy chorobotwórcze. Dodatkowo symbiont mikoryzowy może pobudzić roślinę-gospodarza do produkcji i wydzielania pewnych substancji np. fenoli czy kwasu szczwiooctowego, które mogą hamować wzrost i rozwój patogenów. Ponad to, grzyby mikoryzowe redukują liczbę patogenów poprzez konkurencję z nimi o składniki odżywcze. Ektomikoryzy chronią systemy korzeniowe roślin głównie przed mikroorganizmami powodującymi zgorzel i zgniliznę korzeniową: *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia*^{1, 5, 18}.

Ochrona przed niekorzystnym wpływem czynników zewnętrznych

Mikoryzy podnoszą odporność roślin na szereg czynników m. in. na suszę i ekstremalne temperatury oraz liczne zanieczyszczenia środowiska: metalami ciężkimi, kwaśnymi deszczami itp. Zwiększenie powierzchni chłonnej korzeni roślin tworzących symbiozę z grzybami ektomikoryzowymi czyni je bardziej odporne na długotrwały niedobór wody w otoczeniu. Występowanie grzybów mikoryzowych na korzeniach roślin wielokrotnie zwiększa tolerancję roślin na podwyższoną zawartość metali ciężkich w glebie. Wiele gatunków grzybów mikoryzowych może wiązać metale ciężkie z podłoża obniżając jego toksyczność oraz zapobiegając ich przemieszczaniu do gospodarza roślinnego¹⁹. Metale te mogą być unieruchamiane w obrębie ściany komórkowej grzybów lub w bogatych w fosfor ziarnistościach wakuolarnych. Często są wiązane także przez pigmenty występujące na powierzchni grzybni przerastającej glebę²⁰. Grzyby mikoryzowe przekształcają metale ciężkie w nietoksyczną formę wewnątrz strzępek lub usuwają je na zewnątrz grzyba³. W większości przypadków zjawisko biofiltracji dotyczy grzybni ekstramatrykalnej. Grzyby mikoryzowe kumulując jony metali ciężkich stanowią swego rodzaju filtr ochronny dla przemieszczania się metali ciężkich w układzie gleba-roślina.

Inne funkcje mikoryzy

Niektóre grzyby mikoryzowe produkują substancje pobudzające wzrost roślin (głównie hormony roślinne z grupy auksyn). Są one produkowane w grzybni, a następnie dostarczane do korzeni. Można uważać auksyny za ważny czynnik w powstawaniu i stabilizacji mikoryz¹. Grzybnia grzybów mikory-

zowych może również poprawiać strukturę podłoża poprzez wydzielanie substancji wiążących lub sklejających cząsteczki gleby^{1, 10, 19, 20, 21}.

Symbioza mikoryzowa przynosi gospodarzom roślinnym złożone i wielopłaszczyznowe korzyści. Zapewnia roślinom optymalny wzrost i rozwój, jednocześnie stanowi skuteczną barierę biologiczną, chroniącą roślinę przed stresami środowiskowymi. O skali tych korzyści może decydować rodzaj grzyba nawiązującego symbiozę z rośliną, jak również rodzaj samej rośliny. W związku z powyższym, zjawisko mikoryzy coraz częściej staje się obiektem zainteresowań badaczy, szczególnie w przypadku obszarów zdegradowanych i porolnych.

Literatura

1. Rudawska M., Ektomikoryza, jej znaczenie i zastosowanie w leśnictwie, Instytut Dendrologii PAN, Kórnik 2000.
2. Rai M. K., Hand book of Microbial Biofertilizers, Food Product Press. New York, London, Oxford 2000.
3. Krupa P., Ektomikoryzy i ich znaczenie dla drzew rosnących na terenach zanieczyszczonych metalami ciężkimi, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2004.
4. Brundrett M., Diversity and classification of mycorrhizal associations, Biol. Rev. 79, 2004, s. 473–495.
5. Paul E. A., Clark F. E., Mikrobiologia i biochemia gleb, Wyd. Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin 2000.
6. Tarkka M., Developmentally regulated proteins in *Pinus silvestris* roots and ectomycorrhiza, University of Helsinki, Helsinki 2000.
7. Püttsepp Ü., Effects of sustainable management practices on fine-root system in willow (*Salix viminalis*, *Salix dasyclados*), grey alder (*Alnus incana*) and Norway spruce (*Picea abies*) stands, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala 2004.
8. Tagu D., Lapeyrie F., Martin F., The ectomycorrhizal symbiosis: genetics and development, Soil and Plant 244, 2002, s. 97–105.
9. Rudawska M., Leski T., Znaczenie wiedzy o zbiorowiskach grzybów mikoryzowych w szkółkach leśnych dla rozwoju mikoryzacji sterowanej, Sylwan 1, 2009, s. 16–26.
10. Johansson J. F., Paul L. R., Finlay R. D., Microbial interaction in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture, FEMS Microbiology Ecology 48, 2004, s. 1–13.
11. Dominik T., Studium o mikoryzie, Fol. For. Pol. 5, ser. A, 1961.
12. Van der Heijden E. W., Kuyper T., Does origin of mycorrhizal fungus or mycorrhizal plant influence effectiveness the mycorrhizal symbiosis?, Plant and Soil 230, 2001, s. 161–174.

13. Püttsepp Ü., Rosling A., Taylor A. F. S., Ectomycorrhizal fungal communities associated with *Salix viminalis* L. and *S.dasyclados* Wimm. clones in a short-rotation forestry plantation, *Forest Ecology and Management* 196, 2004, s. 413–424.
14. Trevor E., Yu J-C., Egger K. N., Peterson R. P., Ectendomycorrhizal association – characteristic and functions, *Mycorrhiza* 11, 2001, s. 167–177.
15. Kernaghan G., Mycorrhizal diversity: cause and effect?, *Pedobiologia* 49, 2005, s. 511–520.
16. Hilszczanka D., Sierota Z., Wpływ inokulum grzybowego grzyba *Thelephora terrestris* na wzrost sadzonek sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. i Badania laboratoryjne, *Sylwan* 1, 2006, s. 40–47.
17. Harley J. L., The significance of mycorrhiza, *Mycological Research* 92, 1989, s. 129–139.
18. Mańka M., Mikoryzy a ochrona drzew leśnych przed chorobami, *Sylwan* 1, 2009, s. 27–30.
19. Baum Ch., Hryniewicz K., Leinweber P., Meißner R., Heavy-metal mobilization and uptake by mycorrhizal and nonmycorrhizal willows (*Salix dasyclados*), *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 2006, s. 516–522.
20. Turnau K., Jurkiewicz A., Grzybowska B., Mikoryza i jej rola w środowisku, *Kosmos, Problemy nauk biologicznych* 255, 2002, s. 185–194.
21. Baum C., Weih M., Verwijst T., Makeschin F., The effects of nitrogen fertilization and soil properties on mycorrhizal formation of *Salix viminalis*, *Forest Ecology and Management* 160, 2002, s. 35–43.

Anna Krupa

Mycorrhizas and their multifunctional role in the environment

Abstract

The report contains information about mycorrhiza. The relationship between the plant and the fungi are characterized. This specific symbiosis gives various benefits, especially to plants. Mycorrhiza influences growth and development of plants, protects them from pathogenic organisms and heavy metals pollution.

Keywords: mycorrhiza, mycorrhizal fungi, symbiosis