



Akademie věd
České republiky

Strategie AV21

Špičkový výzkum ve veřejném zájmu



Petr Baldrian, Tereza Mašínová

Mikroorganismy v lesních ekosystémech: diverzita, dynamika a funkce



VÝZKUMNÝ PROGRAM

ROZMANITOST ŽIVOTA A ZDRAVÍ EKOSYSTÉMŮ

Obsah

Lesní ekosystémy a jejich význam	2
Čím jsou lesy specifické?	3
Kde najdeme mikroorganismy – habitaty v lesním prostředí	7
Atmosféra	9
Listoví	10
Dřevo stromů	10
Kůra stromů	11
Vegetace bylinného patra	11
Kořeny a rhizosféra	11
Půda	13
Opad	14
Mrtvé dřevo	14
Minerální povrchy	15
Bezobratlí živočichové	16
Spojení mezi habitaty	17
Dynamika lesních ekosystémů	18
Sukcese mikroorganismů při rozkladu organické hmoty	21
Disturbance ekosystémů a jejich dynamika	24
Závěr	27
Mikroorganismy v lesních ekosystémech	29
Slovníček pojmů	30
Doporučená literatura	31

Lesní ekosystémy a jejich význam

Lesní ekosystémy mají v krajině řadu funkcí – od ekologických až po kulturní. To platí nejen pro území našeho státu, ale i celosvětově. S 38 miliony čtverečních kilometrů a počtem stromů přesahujícím tři biliony patří lesy – zejména na severní polokouli – k nejrozsáhlejším biomům. Z ekologického hlediska je zejména důležitá jejich schopnost akumulovat uhlík. Jeho příjem fotosyntézou totiž převyšuje ztráty vznikající při rozkladu organické hmoty o 7–25 procent a většina tohoto přebytečného uhlíku je postupně akumulována v lesních půdách. Lesy jsou však významné i pro bilanci a přeměnu dalších prvků, jako je například dusík, síra a fosfor. Uhlík je v půdách ukládán ve formě zbytkových látek, vznikajících při rozkladu odumřelé organické hmoty (zejména rostlinného opadu), a dále ve formě jednoduchých látek, které do půdy dodávají rostlinné kořeny. Jak na rozkladu organické hmoty, tak na využití a přeměně kořenových exsudátů se přitom rozhodující měrou podílejí mikroorganismy, zejména houby a bakterie. Ukládání uhlíku v lesních půdách je významný proces, který snižuje koncentrace skleníkových plynů v atmosféře. Studium lesních ekosystémů a biologických procesů je tedy zásadní proto, abychom byli schopni porozumět jejich fungování a předpovědět jejich budoucí vývoj. Vždyť lesy jsou ohrožovány širokým spektrem negativních faktorů, které je poškozují (disturbancí), jako jsou vichřice, lesní požáry, invaze hmyzu, znečištění či nevhodné hospodaření.

Výzkum mikroorganismů v prostředí (včetně prostředí lesního), byl dlouho limitován metodickými nedostatky: rozmanitost mikroorganismů v prostředí se zdála být příliš velká na to, aby bylo možné ji popsat. V posledních letech se však objevily přístupy, které studium společenstev mikroorganismů v prostředí umožňují – zejména sekvenace nukleových kyselin a citlivé metody mikroskopie a analytické chemie. Právě použití těchto metod pro studium různých prostředí obývaných mikroorganismy vedlo k poznání, že jednotlivé složky ekosystému – habitaty – se od sebe liší jak podmínkami pro život organismů, tak složením jejich společenstev neboli zastoupením jednotlivých druhů. Ukazuje se také, že fungování jednotlivých habitatů je úzce provázáno, a fungování celého lesního ekosystému tak nemůžeme pochopit bez poznání jeho součástí. Souhrn všech mikroorganismů, které daný ekosystém obývají, někdy nazýváme mikrobiomem, a mluvíme tedy například o mikrobiomu lesa. Cílem této brožury je ukázat mikroorganismy jako obyvatele různých prostředí v lesích temperátního a boreálního pásu a popsat na základě současných znalostí význam jejich životních procesů a jejich rozmanitosti pro fungování lesa.

Čím jsou lesy specifické?

Definice lesa není složitá: je to ekosystém, kde nejvýznamnějšími živými organismy jsou stromy a fungování lesa je přímo závislé na fungování stromů, které přeměňují oxid uhličitý z atmosféry na organickou hmotu. Přestože se na fixaci uhlíku v lesích podílí i vegetace podrostu, je její kvantitativní podíl na tvorbě organické hmoty malý – obvykle nejvýše 10 procent. Zatímco odumřelá biomasa stromů – rostlinný opad a mrtvé dřevo – tvoří významný zdroj komplexních organických látek, které se hromadí na povrchu půdy, značná část organických sloučenin – sacharidů, aminokyselin a organických kyselin – je kořeny transportována do půdy a v této jednoduché formě jsou uhlíkaté látky předávány jak houbám žijícím v symbióze s kořeny (mykorhizním houbám), tak dalším mikroorganismům v rhizosféře a volné půdě. Kromě produkce organických látek jsou stromy pro mikroorganismy významné i z dalších důvodů. Jejich orgány (listy, kořeny, dřevo, povrch kůry) jsou mikroorganismy osidlovány a tvoří tak specifické habitaty. Stromy také přispívají k prostorové různorodosti prostředí: nerovnoměrné rozložení tlejících kmenů, průnik kořenů vrstvami půdy či narušení povrchu půdy při vývratu stromů mají za následek vysokou prostorovou rozmanitost, zejména pak v přirozených lesích.

Mikroorganismy žijící na biomase stromů, v jejich opadu i v půdě jsou silně ovlivněny druhovou identitou stromů v lesním porostu. Houby, které tvoří mykorhizní symbiózu s kořeny stromů, nebo bakterie na povrchu kořenů často preferují určitý hostitelský strom. Rovněž listy a jejich povrchy, opad či půda pod porostem konkrétního druhu stromu díky svému specifickému složení obvykle hostí společenstvo mikroorganismů, které je pro daný druh stromu typické. Zejména vliv stromů na složení společenstva hub je velmi významný a řada druhů je exkluzivně vázána na jediný druh hostitele. Velká míra vzájemné závislosti je příčinou toho, že i endofytické houby žijící v listech a kořenech značně preferují určité hostitelské stromy před jinými. Vliv stromů je ale patrný rovněž v půdě, zejména v oblasti rhizosféry, kde je společenstvo půdních organismů pod vlivem specifického chemického složení kořenových exsudátů daného druhu stromu. Ve volné půdě mimo rhizosféru je obvykle nepřímý a je odrazem odlišného chemismu půdy daného porostu. Vliv stromů na složení společenstva bakterií je sice slabší než u hub, ale stále velmi významný. Rovněž stromy jsou značně závislé na symbiotických mikroorganismech, zejména na mykorhizních houbách, žijících symbioticky na jejich kořenech, popřípadě na bakteriích schopných fixovat vzdušný dusík. Mikroorganismy zprostředkují stromům přístup k dusíku buď jeho mobilizací, „vytěžením“ z odumřelé organické hmoty, nebo fixací – přeměnou dusíku v atmosféře na formu dostupnou pro kořeny rostlin. Uvádí se, že 80 procent dusíku a 75 procent fosforu, které stromy v temperátním a boreálním pásmu přijmou, je dodáváno prostřednictvím mykorhizních hub a bakterií fixujících dusík.



Obr. 1. Rozmanitosti lesního prostředí si lidé všímali už odedávna – ať už z ekonomických důvodů, nebo jako estetického prvku. Obraz Ivana Ivanoviče Šiškina *Smišený les* z roku 1888 zachycuje živé stromy různých generací, odumřelé dřevo s plodnicemi hub i bohatou pozemní vegetaci v prosvětleném březovo-smrkovém háji [foto archiv autorů]

Díky mnohvrstevnatosti lesní vegetace, která odráží průchod světla porostem, jsou lesy typické vysokou prostorovou různorodostí jak v nadzemní, tak v podzemní části ekosystému (**obr. 1**). Ve srovnání s travinnými či zemědělskými ekosystémy totiž lesy obsahují nadzemní vegetaci, odumřelé dřevo i kořeny různých dimenzí. Vysoké prostorové heterogenitě lesů pak odpovídají velké prostorové rozdíly v obsahu biomasy mikroorganismů, v rychlosti probíhajících biochemických procesů i lokální rozdíly v chemismu. Lokální rozdíly v chemismu půdy a v množství mikroorganismů, které v půdě žijí, jsou významné i u stejnověkových porostů stromů stejného druhu (monokultur), ve kterých chybí podrost. Ještě daleko větší je však prostorová heterogenita v přirozených lesích, které jsou složeny z různověkových stromů a bohaté, mnohvrstevné vegetace, jež obsahují významné množství odumřelých a mrtvých kmenů. V půdách těchto lesů je silně narušená přirozená stratifikace, charakteristická

klesajícím množstvím organické hmoty s hloubkou půdy, a půda je vlastně záznamem historických disturbancí různé intenzity, jakými jsou například větrné polomy, vývraty nebo invaze hmyzu. Výrazem těchto narušení je půda, která má specifickou geomorfologii a v níž jsou vytvořena mikroprostředí různých vlastností s rozdílným obsahem vody či organické hmoty. Procesy probíhající v půdě, jako například růst kořenů, jejich aktivita či odumírání nebo aktivita půdní fauny, rovněž významně přispívají ke vzniku prostorové různorodosti prostředí (**obr. 2**).

Prostorová různorodost půdy ovlivňuje složení a aktivitu mikrobiálních společenstev lesa dvěma hlavními způsoby. Prvním z nich je vliv chemismu půdy, zahrnující obsah minerálních prvků, organické hmoty či pH, jenž ovlivňuje zejména společenstva bakterií, ale také hub. Druhým faktorem je složení a aktivita vegetace, která naopak více ovlivňuje půdní houby než bakterie. Vliv těchto determinujících faktorů je zeslaben stochastickými (náhodnými) vlivy, jako jsou nepravidelné rozložení



Obr. 2. Plochy lesa, na nichž dochází k přirozené obnově po rozpadu porostů, například po kůrovcové kalamitě (zde porost horského lesa na území Národního parku Šumava), vykazují vysokou prostorovou diverzitu [foto Vojtěch Tláškal]

odumřelého dřeva v prostoru nebo náhodná kolonizace substrátu mikroorganismy ze spor transportovaných atmosférou, které vedou k tomu, že složení společenstev mikroorganismů v prostředí je rovněž velmi různorodé.

Prostorová heterogenita lesních půd vede rovněž k významným rozdílům v množství mikroorganismů v půdě a jejich aktivitě, jež zahrnuje například rozklad organické hmoty specifickými enzymy. Vzhledem k tomu, že k akumulaci organické hmoty ve formě listového opadu či mrtvého dřeva dochází zejména na povrchu půdy, vzniká v lesních půdách vertikální gradient klesajícího obsahu organické hmoty, který je podmíněn postupným rozkladem biopolymerů opadu a jejich promícháváním s minerálními složkami půdy (**obr. 3**). Tento gradient je velmi ostrý, a tak ve svrchních několika centimetrech půdy existují rozdíly v množství



Obr. 3. Profil svrchní vrstvy půdy dubového lesa (Xaverovský háj). Pod povrchovou vrstvou opadu je patrný tmavý organický horizont půdy bohatý na organické látky, hlouběji je vrstva minerální půdy. Vertikální profil narušují kořeny stromů [foto Petr Baldrian]

biomasy mikroorganismů nebo aktivitě jejich enzymů až v rozsahu několika řádů. I v rámci půdního horizontu, tedy ve vrstvě půdy stejných vlastností a stejné hloubky, je aktivita mikroorganismů často koncentrována do omezených prostorů nazývaných „hotspoty“ aktivity. Obrat organické hmoty v těchto místech může být oproti okolní půdě až o několik řádů vyšší. Místa vyšší aktivity jsou například rhizosféra, oblasti se zvýšeným obsahem živin nebo vody. Vzhledem k tomu, že aktivita půdních organismů silně stoupá s vlhkostí půdy, lze kromě lokálního zvýšení aktivity pozorovat rovněž časově omezený vzestup aktivity, například v suchém létě při srážkách. Spouštěčem aktivity je v tomto případě uvolnění rozložených živin a jejich vyšší dostupnost pro půdní organismy. Aktivita mikroorganismů půdy nebo lesního opadu může v důsledku toho stoupat až na několika-násobek. Zejména v letním období jsou periody po srážkách velmi významné pro fungování ekosystému díky vyšší aktivitě mikroorganismů i vegetace bylinného patra.











Kde najdeme mikroorganismy – habitaty v lesním prostředí

Lesní ekosystémy očividně mikroorganismům nabízejí celou řadu habitatů: od všudypřítomné půdy, opadu a atmosféry přes habitaty spojené s lesními stromy (listoví, dřevo, kůra, kořeny a rhizosféra) po řadu dalších, které se vyskytují v různém rozsahu, jako je bylinná vegetace, mrtvé dřevo, povrch minerálů či těla bezobratlých živočichů (**obr. 4**).



Obr. 4. Různorodost habitatů v lese je patrná na fotografii z NPR Žofín zachycující pralesní ekosystém, ve kterém již od roku 1838 neprobíhá hospodářská činnost. Jednotlivé habitaty znázorněné na obrázku existují v těsné blízkosti, jejich snímky byly pořízeny v rámci oblasti zachycené na centrální fotografii [foto Tomáš Větrovský]

Velmi často se jednotlivé habitaty vyskytují v bezprostřední blízkosti, ale přesto se od sebe diametrálně liší podmínkami, které svým obyvatelům poskytují, i velikostí, kterou zaujmají. Specifické podmínky jednotlivých prostředí a zvláště dostupnost živin ovlivňují jak množství mikroorganismů, které jednotlivé habitaty obývají, tak složení jejich společenstev (**obr. 5**). Podmínky prostředí spolu s přítomností mikroorganismů potom rozhodují o tom, jaké ekosystémové procesy v jednotlivých habitatech probíhají a jaká je jejich dynamika v čase. I když pozornost, kterou dosud mikrobiologové věnovali jednotlivým habitatům v lesních ekosystémech, byla značně nevyrovnaná, jejich základní charakteristiky jsou známé a umožňují pochopit, jakým způsobem v nich mikroorganismy žijí.

Habitat	Zdroje uhlíku	Velikost	Biomasa mikroorganismů	Poměr houby / bakterie
 Atmosféra	CO ₂	●●●●●●●	velmi nízká	nízký
 Listoví	rostlinná biomasa	●●●●●	nízká	velmi vysoký
 Kůra	rostlinná biomasa (suberin), CO ₂	●●	nízká	neznámý
 Dřevo	fotosyntázy hostitele rostlinná biomasa	●●●●	velmi nízká	vysoký
 Kořeny / rhizosféra	fotosyntázy hostitele exudáty	●●●●	velmi vysoká	vysoký až průměrný
 Bylinná vegetace	rostlinná biomasa (celulóza, hemicelulóza, lignin, proteiny)	různá	různá	velmi vysoký
 Opad	rostlinná biomasa (celulóza, hemicelulóza, lignin, proteiny)	●●●●	velmi vysoká	vysoký
 Půda	humózní látky, rozpustná a pevná organická hmota, mrtvé kořeny a mycelia	●●●●●●●	vysoká	nízký
 Mrtvé dřevo	komponenty dřeva (celulóza, hemicelulóza, lignin) biomasa hub	různá	velmi vysoká	velmi vysoký
 Minerální povrchy	CO ₂ , externí zdroje uhlíku	různá	nízká	nejasný

Obr. 5. Vybrané charakteristiky habitatů v temperátních a boreálních lesích [archiv autorů]

Atmosféra

Atmosféra je prostředím, kterým se mikroorganismy pasivně šíří. Přestože množství mikroorganismů v atmosféře je malé, zdá se, že šíření mikroorganismů – bakteriálních buněk či spor hub – je velmi efektivní. Ačkoli se mikroorganismy mohou šířit i na značné vzdálenosti (například mezi kontinenty), šíření a přežití spor velmi výrazně klesají se vzdáleností od zdroje, například plodnice houby (**obr. 6**). Bakterie se pravděpodobně šíří na větší vzdálenosti než houby, protože jejich společenstva v atmosféře jsou často rozdílná od těch, která se lokálně vyskytují v půdě. Mikroorganismy musí v atmosféře odolávat působení slunečního záření a dennímu i sezonnímu kolísání teplot a vlhkosti. Těmto podmínkám jsou lépe přizpůsobeny odolné buňky a spory.



Obr. 6. Plodnice dřevokazné houby lesklokorky ploské (*Ganoderma applanatum*) na tlejícím kmenu buku v NPR Žofín v Novohradských horách. Kakaové zbarvení plodnic a jejich okolí je důsledkem masivní produkce spor, které slouží k šíření houby. Velké víceleté plodnice produkují až několik miliard spor za sezonu [foto Vojtěch Tláškal]

Listoví

Plocha listoví je značná a převyšuje svým rozsahem geografickou plochu lesů. Představuje prostředí, v němž působí řada stresových faktorů, konkrétně vysoké fluktuace ozáření, teploty a vlhkosti. Ve srovnání s půdou a opadem jsou množství i diverzita mikroorganismů v tomto habitatu nízké. I když je listoví bohaté na živiny, ty jsou pro většinu mikroorganismů nedostupné. Endofytickým mikroorganismům brání ve vstupu do buněk rostlin obranné reakce hostitele a povrch listů je často tvořen složitými látkami, jako jsou pryskyřice a vosky, takže epifytické mikroorganismy obvykle využívají jen malé množství dostupných organických látek, jako je například metanol. Houby jsou v listoví početnější než bakterie, ale přestože je známo, že jsou schopny rozkládat rostlinné biopolymery, není jasné, zda tuto schopnost v živých listech využívají.

Složení společenstva v listech je ovlivněno řadou faktorů, z nichž mezi důležité patří depozice během atmosférického transportu nebo srážky. Periody stresu, například vysoké letní teploty či osychání listů, mají pravděpodobně za následek silnou redukci početnosti mikroorganismů a přispívají k tomu, že společenstva na povrchu listů jsou v čase velmi proměnlivá. Složení společenstev hub se liší i v rámci koruny jednoho stromu, pravděpodobně v souvislosti s různou mírou ozáření. Společenstva bakterií v listech jsou často druhově chudá a podobné druhy adaptované na dané podmínky lze najít ve velmi rozdílných ekosystémech.

Listoví představuje dynamický habitat s vysokým ročním obratem. Zatímco listy stálezelených stromů zůstávají aktivní v průběhu celého roku, opadavé stromy tvoří listoví na jaře a ztrácí je na konci vegetační sezony. Složení mikroorganismů na jejich listoví je proto daleko dynamičtější a složení společenstva hub a bakterií se mění v průběhu vývoje i stárnutí listu.

Dřevo stromů

Dřevo stromů představuje v ekosystému značnou potenciální zásobu živin. Vzhledem k tomu, že dřevo má pro žijící strom fyziologickou i strukturní roli, jeho napadení mikroorganismy je často pro strom fatální. Takovému napadení se proto stromy brání a biomasa mikroorganismů ve dřevu živých stromů je nízká. Protože vláknitý růst umožňuje houbám lepší kolonizaci dřeva, dominují v tomto habitatu výrazně nad bakteriemi. Houby nacházené ve dřevě jsou buď endofyty, nebo potenciálními parazity, kteří se mohou za vhodných podmínek aktivovat. O bakteriích kolonizujících dřevo je dosud známo velmi málo.

Kůra stromů

Protože důležitou funkcí kůry je ochrana dřeva, kůra stromů se skládá z obtížně rozložitelných látek, jako je například polyfenolický polymer suberin, a často je navíc impregnována pryskyřicemi, které inhibují růst mikroorganismů. Hlavním zdrojem uhlíku pro mikroorganismy na povrchu kůry, například řasy a sinice, je CO_2 , ať už jeho fixátoři žijí samostatně nebo symbioticky jako součást lišejníků. Rozmanitost hub na kůře je velká a zahrnuje i kvasinky, řada hub se účastní tvorby lišejníků. V posledních letech se ukazuje, že lišejníky jsou komplexní organismy, zahrnující kromě hub a sinic či řas rovněž další bakterie, které jsou v nich stabilně přítomné a podílejí se na příjmu dusíku, fosforu a síry, ale také na podpoře růstu hub a řas a degradaci odumřelých lišejníkových stélek.

Vegetace bylinného patra

V lesích, kde dostatečné množství slunečního záření proniká až na povrch půdy, se vyvíjí bylinné patro vegetace rozmanitého složení, které závisí zejména na složení stromového patra lesa. Habitaty, které bylinná vegetace vytváří, jsou analogické k těm, jež se vyskytují u stromů, a podobné vlastnosti má i jejich mikrobiom. Kořeny pozemní vegetace tvoří nejčastěji symbiózu s mykorhizními houbami arbuskulárního či erikoidního typu, které v půdě koexistují s mykorhizními symbionty kořenů stromů. Specifická společenstva hub jsou asociována se stélkami mechů.

Stejně jako u stromů i aktivita bylinné vegetace v průběhu roku kolísá. V opadavých lesích se navíc mění i její složení v souvislosti se změnami prostupu slunečního záření korunami stromů, takže jarní a letní vegetace se často významně liší. Diverzita vegetace je největší jednak u mladých, jednak u velmi starých porostů. Sezonní aktivita vegetace má za následek sezonní změny společenstva asociovaných mikroorganismů. Vzhledem k tomu, že fotosyntetická aktivita bylinného patra tvoří pouze velmi malé procento celkové primární produkce lesů, je její vliv na mikroorganismy v půdě relativně malý.

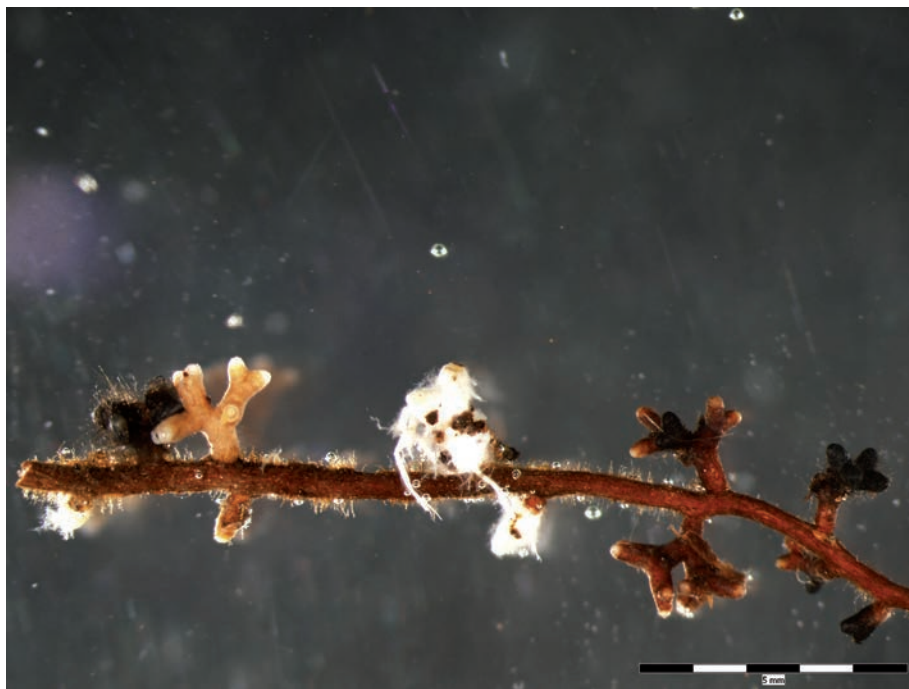
Kořeny a rhizosféra

Výměna živin mezi rostlinami a půdním prostředím je komplexní fenomén, který je zprostředkován činností kořenových pletiv rostlin, kořeny s arbuskulárními, erikoidními či ektomykorhizními symbionty i myceliem mykorhizních hub, které se z kořene šíří do rhizosféry i do okolní půdy. Ektomykorhizní kořeny vlastně představují

specifický symbiotický orgán, který kombinuje struktury vytvářené kořenem i jeho houbovým symbiontem. Kořeny a rhizosféra proto jednoznačně představují rozsáhlý a unikátní habitat, kde je početnost i aktivita mikroorganismů výrazně vyšší než v okolní půdě (obr. 7).

Společenstva mikroorganismů v rhizosféře se od okolní půdy liší i složením, konkrétně zastoupením mykorhizních hub, ale i specifických bakterií. Tato specificita se zdá být udržována uvolňováním kořenových a hyfových exsudátů, které obsahují sacharidy, aminokyseliny, nízkomolekulární alifatické i aromatické kyseliny, mastné kyseliny, enzymy a rostlinné hormony.

Z rhizosfér lesních ekosystémů je nejlépe popsána ektomykorhiza. Ektomykorhizní kořeny podporují existenci specifických bakterií, které se podílejí na vzniku symbiózy mezi houbou a kořenem. Uvnitř kořenů se kromě pletiv mykorhizních hub vyskytují v různé míře i endofytické a dřevokazné houby. Rhizosféra se od okolní půdy



Obr. 7. Kořeny smrku, tvořící symbiózu s ektomykorhizními houbami, jsou ztlustělé a jejich povrch zcela obalují vlákna hub. Houbová vlákna z kořene vyrůstají dále do rhizosféry a okolní půdy [foto Petr Kohout]

odlišuje i větším množstvím bakterií a specifickým složením jejich společenstev, zatímco množství archaeí je nízké.

Sezonní produkce kořenů a sezonnost jejich aktivity má za následek změny ve složení mikrobiomu rhizosféry v průběhu roku. Při kolonizaci kořenů se silně uplatňuje efekt priority a složení mykorhizních hub na kořenech stromů se mění i s věkem stromů.

Půda

Půda představuje habitat, v němž je množství mikroorganismů jednoznačně největší. Velmi důležitou komponentou půdy jsou zejména mycelia ektomykorhizních hub, které v temperátních a boreálních lesích představují až jednu třetinu celkové mikrobiální biomasy. Mykorhizní houby uvolňují dusík a fosfor z půdy a minerálů a zásobují jím hostitelskou rostlinu, ale rovněž vytvářejí komplexní systémy, v nichž mycelium propojuje stromy navzájem, i s vegetací bylinného patra. Přestože mykorhizní houby během evolučního vývoje ze svých saprotrofních předků ztratily většinu genů pro rozklad organické hmoty, částečně se na tomto rozkladu podílí, když z půdy získávají dusík obsažený v organických látkách. Mycelia ektomykorhizních hub často tvoří husté nárosty, které hostí specifická společenstva dalších asociovaných hub a bakterií a dále také prvoky, chvostoskoky, členovce a hlístice.

Kromě ektomykorhizních hub, jejichž zastoupení v půdním profilu s hloubkou roste, se v půdě vyskytují saprotrofní houby a bakterie, jejichž podíl naopak klesá spolu s klesajícím obsahem organických látek. Archaea v půdě obvykle tvoří pouze malé procento mikroorganismů a jejich početnost s hloubkou stoupá.

Podle podílu na produkci proteinů jsou v půdě neaktivnější bakterie, následované houbami, prvoky a zástupci archaeí. Aktivita i složení společenstev mikroorganismů reagují na sezonnost aktivity stromových kořenů. Například houby zodpovídají za 33 procent celkové transkripce v půdě v létě, zatímco jejich podíl v zimě, kdy jsou mykorhizní houby málo aktivní, činí jen 16 procent. Na rozdíly v dostupnosti fotosyntátů v půdě reagují kromě mykorhizních hub i další mikroorganismy a přizpůsobují jim svoji aktivitu. Za určitých podmínek se v půdě mohou vytvořit dočasně oblasti bez přístupu kyslíku (anoxické), které jsou obývány zejména bakteriemi a malým množstvím hub se silným zastoupením kvasinek.

Opad

Hromadění rostlinného opadu, zejména opadu stromů, je důležitým faktorem přispívajícím k akumulaci organické hmoty na povrchu půdy. Protože se opad skládá zejména z biopolymerů rostlinných buněčných stěn, podporuje hlavně výskyt saprotrofních mikroorganismů, které jsou schopné jej rozkládat. Zvláště saprotrofní vláknité houby z oddělení Basidiomycota a Ascomycota jsou efektivními rozkladači opadu. O velkém významu hub v opadu svědčí to, že přes 60 procent aktivity je připisováno houbám, zatímco na bakterie připadá 30 procent a na archaea méně než 2 procenta. Většina enzymů pro rozklad organické hmoty v opadu je navíc houbového původu. Rovněž řada bakterií dokáže využívat organický uhlík z opadu, zvláště četní jsou zástupci kmenů Proteobacteria a Bacteroidetes. Protože množství hub v opadu je vysoké, jejich mycelia představují další významný zdroj živin. Rozklad mycelií je obvykle rychlejší než u rostlinného opadu, zatímco rozklad odumřelých kořenů, tedy kořenového opadu přítomného převážně v hlubších vrstvách půdy, je obvykle pomalejší.

V průběhu rozkladu se mění chemické složení a obsah živin v opadu a spolu s těmito změnami se mění i aktivita enzymů a složení společenstev bakterií a hub.

Mrtvé dřevo

Mrtvé dřevo představuje specifický habitat, jehož velikost v lesích je velmi rozdílná. Zatímco v přirozených lesích se vyskytuje až 1200 m³ mrtvého dřeva na hektar (což je větší množství než biomasa živých stromů), v hospodářských lesích s těžbou dřeva je zásoba mrtvého dřeva typicky mezi 2 a 65 m³/ha. Díky fyzikálně-chemickým vlastnostem, zejména neprostupnosti, vysokému podílu ligninu a velmi nízkému obsahu dusíku, je počáteční kolonizace mrtvého dřeva mikroorganismy pomalá. Rozkladu dřeva dominují zejména houby z oddělení Basidiomycota, které jsou schopné rychlé kolonizace substrátu pomocí myceliálních provazců a efektivního rozkladu dřeva (**obr. 8**). Rozkládající dřevo je tak pod silným vlivem hub, které ovlivňují jeho chemismus a často snižují jeho pH. V bakteriálním společenstvu jsou zastoupeny saprotrofní, komezální i mykofágní druhy tolerující nízké pH.

Rozklad dřeva je obvykle dlouhodobý a často trvá přes 50 let. V jeho průběhu se mění zastoupení hub i bakterií v závislosti na měnícím se chemickém složení rozkládaného dřeva. Za vhodných podmínek se na dřevu tvoří plodnice hub a produkovávané spory se šíří vzduchem tak, aby mohly kolonizovat dřevo mrtvých či živých stromů v okolí.



Obr. 8. Starý tlející kmen buku lesního v pralesní rezervaci NPR Salajka. Na povrchu jsou patrné silné provazce vláken dřevokazných hub [foto Vojtěch Tláška]

Minerální povrchy

Minerální povrchy na povrchu lesní půdy i v půdním profilu jsou obývány mikroorganismy, které jsou schopny je zvětrávat a uvolňovat z nich tímto způsobem minerální živiny. Ektomykorhizní houby zvětrávají minerály za pomoci produkce organických kyselin. Organické kyseliny spolu s chelátory iontů uvolňovaných z minerálů produkují i některé bakterie včetně těch, které žijí na povrchu hyf mykorhizních hub. Minerální povrchy exponované vnější atmosféře jsou často porůstány řasami a lišejníky (**obr. 9**).



Obř. 9. Povrchy skal a balvanů (zde z NPR Źofín v Novohradských horách) představují specifický habitat pro mechorosty, lišejníky a řadu mikroorganismů. Minerální povrchy umožňují pevné uchycení organismů a jsou zdrojem minerálních látek [foto Vojtěch Tláškal]

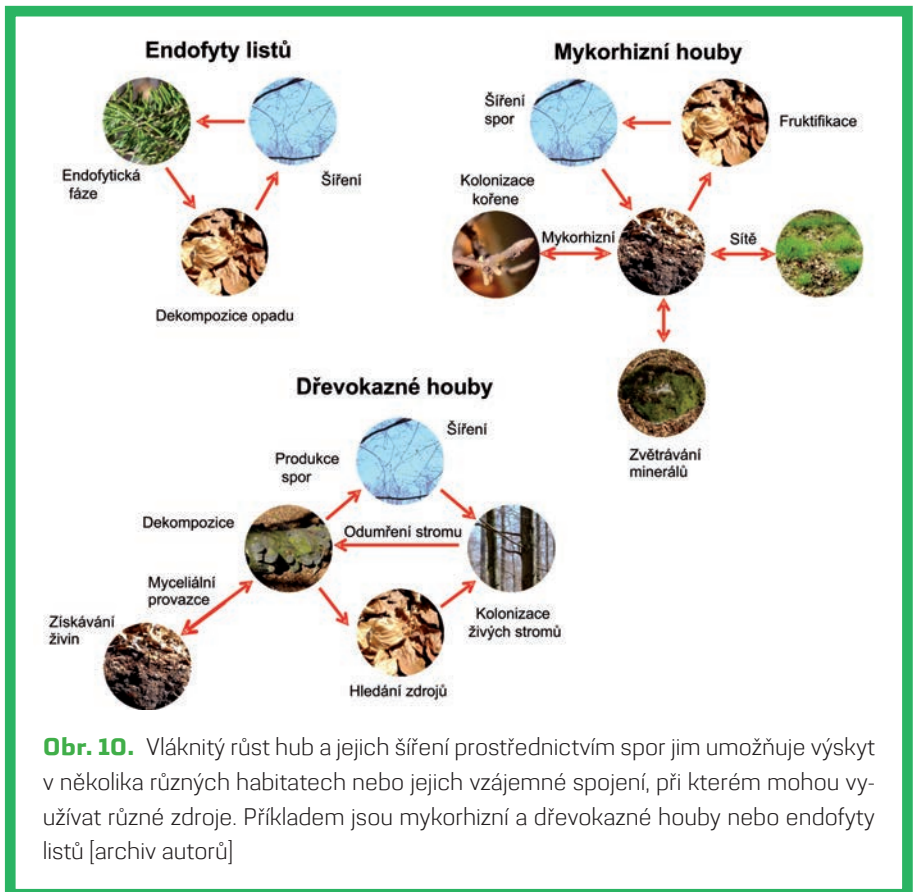
Bezobratlí živočichové

Bezobratlí živočichové hostí řadu mikroorganismů od volně asociovaných na tělesných površích, které jsou pouze pasivně přenášeny, přes komenzály až po specializované symbionty. Například kůrovci často přenášejí houby, z nichž některé mohou sloužit jako zdroj potravy pro larvy nebo mohou usnadnit napadení živého stromu. Řada druhů hmyzu, mezi něž patří například dřevokazní brouci či pilořitky, mají ve svém trávicím traktu mikroorganismy, které jim pomáhají trávit celulózu či lignin, jež jsou obsažené ve dřevě. Bezobratlí živočichové v půdě se často živí okusováním mycelia hub nebo predací půdních bakterií. Bylo prokázáno, že tím výrazně ovlivňují výskyt i složení společenstev hub i bakterií.

Spojení mezi habitaty

Přestože se lesní habitaty zdají být svou povahou často značně rozdílné, existuje řada mikroorganismů, které obývají, ať už současně nebo postupně, několik různých habitatů. K tomu jsou zvláště dobře přizpůsobeny vláknité houby, kterým jejich vláknitý růst umožňuje transport živin či vody mezi habitaty. Životní cykly endofytů listů, patogenních hub kolonizujících dřevo či mykorrhizních hub ukazují, jak mohou být habitaty propojeny (obr. 10).

Mnoho endofytických hub je přítomno v listech opadavých stromů, kde se vyskytují bez viditelných vlivů na svého hostitele. Po odumření listů v podzimním období se



však významným způsobem podílejí na rozkladu listů, dříve než jsou listy po opadání kolonizovány půdními houbami. Předpokládá se, že zimu přežívají na rozkládaném opadu a na jaře sporulují, aby mohly být jejich spory atmosférou translokovány zpět na mladé listy živých stromů.

Saprotrofní houby využívají mrtvé dřevo jako substrát, ze kterého získávají uhlík a energii, a díky tomu se mohou prostřednictvím vláken šířit půdou či opadem v prostředí, kde mohou infikovat další mrtvé dřevo nebo – v případě patogenů – kořeny živých stromů. Rozklad dřeva je naopak podporován translokací dusíku a fosforu vláknou hub z půdy do dřeva, v němž jsou oba prvky málo zastoupené. Pokud je tlejícího dřeva dostatek, dřevokazné houby na něm vytvářejí plodnice a produkují spory transportované vzduchem. Spory kolonizují buď mrtvé dřevo, nebo – v případě patogenních hub – dřevo živých stromů například v místech poškození kůry. Některé dřevokazné houby mohou v případě nedostatku mrtvého dřeva přežít tak, že energii a živiny získávají rozkladem opadu.

Ekatomykorhizní houby žijí v kořenových špičkách stromových kořenů a v rhizosféře, která je obklopuje. Většina z nich se navíc šíří i do půdy, kde může využívat dusík obsažený v organických látkách či minerální látky získané zvětráváním minerálů a dodávat tyto látky svým hostitelům. Často se vytvářejí komplexní sítě, kdy mykorhizní houby propojují kořenové systémy více stromů a s jejichž využitím mohou zprostředkovat přesun produktů fotosyntézy mezi jednotlivými stromy. Při vhodných podmínkách mykorhizní houby kolonizují opad a vytvářejí plodnice, aby se jejich spory mohly šířit atmosférou či prostřednictvím aktivity bezobratlých živočichů. Kromě přenosu látek mohou mykorhizní sítě přenášet i signály, například informaci o napadení hostitelského stromu hmyzem.

O tom, v jaké míře sdílejí habitaty bakterie, neexistuje dosud mnoho informací, ale je známo, že řada z nich obývá podobné habitaty, například opad a svrchní vrstvy půdy. Je zajímavé, že pro své šíření v prostředí mohou bakterie využít klouzání po povrchích houbových vláken – hyfách. Přestože informací o sdílení rozdílných habitatů mikroorganismy přibývá, řada případů pravděpodobně stále ještě čeká na odhalení.

Dynamika lesních ekosystémů

Ekosystémové procesy v lesích neprobíhají konstantní rychlostí, ale dynamicky – jejich intenzita je v čase proměnlivá. Příkladem dynamického procesu může být například fotosyntetická produkce stromů, jejíž intenzita kolísá v průběhu vegetační sezony a v rámci ní je omezena na denní dobu, kdy je k dispozici dostatek slunečního záření. I když dynamické procesy ovlivňují celý ekosystém, jejich intenzita může být v jednotlivých habitatech rozdílná. Časová škála dynamických procesů je velmi široká (**tab. 1**). Například bezprostřední využití kořenových exsudátů mikroorganismy

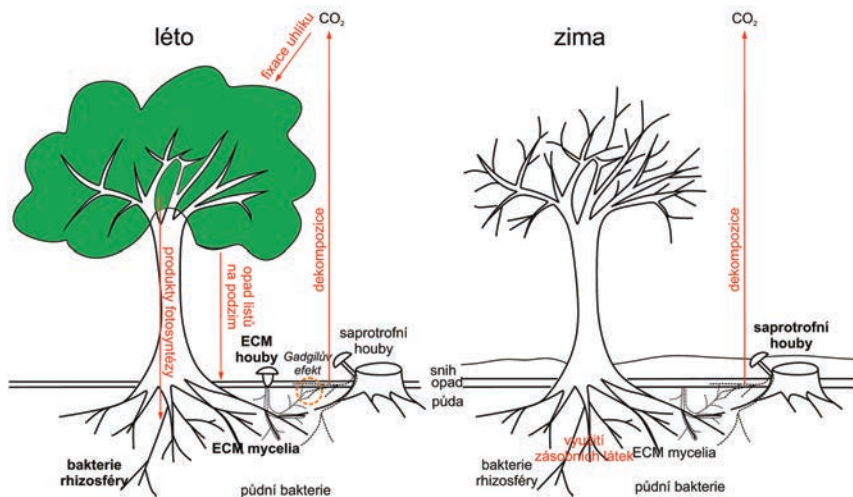
Tabulka 1. Dynamické procesy v lesních půdách, kterých se účastní mikroorganismy

Proces	Doba trvání	Frekvence	Periodické opakování	Lokalizace
Aktivita kořenů	24 h	denní	ano	rhizosféra
Kolísání vlhkosti půdy	dny	náhodné		opad a půda
Sezonní aktivita kořenů	rok	roční	ano	opad a půda
Rozklad mycelia hub	týdny až měsíce	stálé	ano	lokální
Rozklad opadu	1–5 let	roční	ano	opad
Rozklad mrtvého dřeva	10–50 let	náhodné		lokální
Vývoj lesa po narušení	desítky let	náhodné		opad a půda

probíhá v měřítku minut až hodin, zatímco zrychlení růstu mikroorganismů a zvýšení jejich respirace po dešti obvykle trvá od několika hodin po několik dnů. Delší dobu trvá rozklad organické hmoty: u mycelia hub či odumřelých kořínků jsou to měsíce, rozklad opadu trvá roky a kmeny velkých stromů tlejí často déle než 50 let. Vývoj přirozených lesů po narušení porostů disturbancemi, zvětrávání minerálů nebo akumulace organické hmoty v půdě patří k procesům, jejichž délka přesahuje sto let.

Ekosystémové procesy, které se odehrávají v krátkých časových škálách, jako je například denní průběh fotosyntetické aktivity lesního porostu, jsou sice dobře dokumentovány, ale jejich vliv na denní režim aktivity mikroorganismů není znám. Vzhledem k tomu, že mezi fotosyntetickou produkcí a transportem fotosyntátů do kořenů je časová prodleva, předpokládá se, že rozdíly v aktivitě mikroorganismů v rámci jednoho dne nejsou velké. Podstatně významnější a daleko lépe popsány jsou vlivy sezonních změn na fungování ekosystémů temperátních a boreálních lesů. Zatímco v období s dostatečnou teplotou a intenzitou slunečního záření, které obvykle trvá od jara do podzimu, je vegetace aktivní a fixace CO₂ z atmosféry vede k tvorbě organických látek a růstu, v zimním období se aktivita vegetace snižuje na minimum a v opadavých lesích navíc stromy ztrácejí svůj fotosyntetický aparát, když jejich listy odumírají a opadávají. Aktivita půdních organismů však neustává ani v tomto období vzhledem k tomu, že půda je izolována sněhovou pokrývkou a v tomto období je teplota půdy obvykle stálá, mírně vyšší než 0 °C (obr. 11).

Sezonní změny ovlivňují celou řadu mikrobiálních habitatů: mění se aktivita listovní, kořenů a rhizosfér, produkce mykorhizního mycelia, a v důsledku toho i aktivita mikroorganismů, které jsou na ně bezprostředně vázány, i těch, které se vyskytují v opadu a v půdě.



Obr. 11. Sezonní změny v opadavém lese mírného pásma. V **létě** během vegetační sezony fixují stromy uhlík z CO_2 a v podobě organických látek jej svými kořeny poskytují mykorrhizním houbám a bakteriím v rhizosféře. Tyto mikroorganismy mají neomezený přísun uhlíku a rostou, ektomykorrhizní houby produkují myceliální vlákna, která se šíří do půdy, z níž získávají dusík. Saprotrófní houby rozkládají odumřelou organickou hmotu, ale jejich aktivita v půdě je limitována Gadgilovým efektem – kompetitivní inhibicí ze strany ektomykorrhizních hub, které s nimi soustěží o dostupný dusík. Většina jednoduchých látek v opadu je v létě už rozložena a zbývají v něm pouze obtížně dostupné biopolymery. Na konci vegetační sezony opadávají listy stromů a obohacují vrstvu opadu. V **zimě** bývají opad a půda izolovány od vnějšího prostředí vrstvou sněhu, ale při teplotách okolo 0°C , které pod sněhovou pokrývkou trvají po celou zimu, život mikroorganismů pokračuje. Ektomykorrhizní houby a bakterie rhizosféry nemají přístup k fotosyntátům hostitele, a musejí využívat zásobní látky. Inhibiční vliv ektomykorrhizních hub na saprotrofní houby mizí. Protože opad stále nabízí dostatek snadno dostupných látek, je jeho rozklad důležitým zdrojem živin pro saprotrofní mikroorganismy [archiv autorů]

Ve vegetační sezoně proudí do půdy velké množství organických látek produko-
vaných stromy při fotosyntéze a tyto látky jsou k dispozici zejména ektomykorhizním
houbám, žijícím v symbióze s kořeny stromů. V kořenových špičkách, které ektomy-
korhizní houby kolonizují, probíhá intenzivní výměna uhlíkatých látek poskytova-
ných stromem za minerální látky poskytované houbovým partnerem. Zejména se
jedná o dusík, jehož potřeba je u aktivní a rostoucí vegetace v letním období vysoká.
U některých druhů stromů, například olší, je uhlík získaný fotosyntézou poskytován
bakteriím žijícím uvnitř kořenů výměnou za dusíkaté látky, jež vznikají při fixaci
vzdušného dusíku. Velké množství uhlíku poskytované stromem ektomykorhizním
houbám jim umožňuje tvorbu mycelia a následně kolonizaci půdní organické hmo-
ty a uvolnění dusíkatých organických látek. Při rozkladu organické hmoty dochází
k jejich kompetici se saprotrofními houbami, které mohou tento rozklad zpomalovat.
V zimním období je situace opačná: přísun uhlíku pro ektomykorhizní houby se zasta-
vuje a také požadavky stromů na dusík v období vegetačního klidu klesají. Saprotrofní
mikroorganismy tak mají snadnější přístup k živinám v půdě, protože ke kompeti-
ci s mykorhizními houbami nedochází. V důsledku těchto procesů kolísá v průběhu
roku aktivita symbiotických a samostatně žijících mikroorganismů tak, že v létě jsou
aktivnější symbionti, zatímco v zimě saprotrofové. Snížení teplot v zimním období
vede také ke snížení rychlosti biochemických reakcí, zprostředkovaných enzymy mi-
kroorganismů, a v důsledku toho dochází ke zpomalení rychlosti rozkladu organické
hmoty.

Sukcese mikroorganismů při rozkladu organické hmoty

Buněčné stěny poskytují organismům dostatečnou ochranu a často tvoří pletiva, kte-
rá zajišťují mechanickou pevnost. Jsou proto tvořeny organickými látkami, jejichž
rozklad je obtížný, biopolymery, tzn. polysacharidy či polyfenoly. Buněčná stěna
rostlin je například složena z polysacharidů celulózy, hemicelulóz, pektinů a poly-
fenolického polymeru ligninu, buněčná stěna hub obsahuje hlavně glukany a chitin.
Odumřelá organická hmota (listový opad, mrtvé dřevo, odumřelá mycelia hub) se pro-
to rovněž rozkládá obtížně, a tudíž pomalu, i když rychlost rozkladu může být značně
rozdílná.

Obrat organické hmoty je silně závislý na jejím složení a na rozložitelnosti bio-
polymerů, které obsahuje. Protože se složení organické hmoty v průběhu rozkladu
mění, lze v jejím průběhu pozorovat sukcesi různých skupin mikroorganismů, které ji
obývají. Neatraktivnějším cílem rozkladu se zdají být mycelia hub, která se rozkládají
podstatně rychleji než rostlinný opad. Zatímco v průběhu šesti měsíců je rozloženo
mezi 7 a 50 procenty listového opadu, stejný podíl mycelií je rozložen již v průběhu
čtyř týdnů. Zejména mycelia s vysokým obsahem chitinu nebo dusíku se rozkládají

rychle, zatímco přítomnost melaninu má opačný vliv. Rozkládající se mycelium se vyznačuje vysokou aktivitou extracelulárních enzymů a významný podíl na rozkladu mají zvláště bakterie.

Rychlost rozkladu rostlinného opadu je limitována zejména nízkým obsahem dusíku a přítomností obtížně rozložitelného ligninu. Chemické složení opadu se v průběhu rozkladu mění, ze začátku se rozkládají nejdostupnější biopolymery, celulóza a hemicelulóza, které postupně ubývají, zatímco obsah ligninu stoupá. Spolu s těmito změnami se mění aktivita extracelulárních enzymů i složení společenstev hub a bakterií, které se na něm vyskytují (**obr. 12**). Na počátku převažují v opadu houby včetně těch, které se původně vyskytovaly v živých listech. Podíl bakterií v průběhu rozkladu postupně roste, řada z nich se účastní rozkladu celulózy, ale i mycelií hub, které na opadu rostou.

Mrtvé dřevo představuje specifický substrát, který je charakteristický velmi nízkým obsahem dusíku, vysokým obsahem ligninu a omezenou prostupností. Všechny tyto faktory jeho rozklad zpomalují, a kompletní rozklad tak často trvá více než 50 let. Díky svým vlastnostem jsou hlavními rozkladači mrtvého dřeva houby. Počáteční kolonizace mrtvého dřeva se zdá být do značné míry náhodná, ale rozhoduje významně o tom, jak se bude vyvíjet jeho chemické složení, například zda v pozdějších fázích rozkladu převládne nerozložená celulóza nebo lignin. Obsah dusíku v průběhu rozkladu stoupá, k čemuž přispívá řada faktorů: úbytek uhlíku ve formě oxidu uhličitého, translokace uhlíku houbami z půdy či opadu a fixace vzdušného uhlíku bakteriemi. Se stoupajícím množstvím dusíku a postupným rozpadem struktury dřeva v něm stoupá podíl bakterií, které se podílejí jak na rozkladu samotného dřeva, tak mycelia dřevokazných hub.

Obr. 12. Rozklad opadu dubu letního v prostředí temperátního opadavého lesa. Senescentní listy obývané společenstvem endofytických mikroorganismů padají na povrch půdy a jsou postupně kolonizovány dalšími mikroorganismy. Objevují se různě zbarvené oblasti svědčící o chemické přeměně látek v opadu a mycelia hub, které opad rozkládají. V průběhu rozkladu se mění chemické složení opadu, aktivita mikroorganismů i složení společenstev hub a bakterií. Hmotnost opadu a jeho součástí postupně klesá a enzymy, které rozkládají snadno dostupné látky (jako například β -glukosidáza), jsou nahrazeny těmi, jež rozkládají komplexní biopolymery (endocelulóza). Biomasa mikroorganismů na čerstvém opadu je zpočátku nízká. Zatímco množství biomasy hub vrcholí krátce po opadání listů, množství bakterií stoupá v průběhu celého rozkladu. Rozklad zahajují endofytní mikroorganismy, které později z opadu mizí a jsou postupně nahrazeny bakteriemi, rozkládajícími biomasu hub a celulózu, a houbami, jež rozkládají lignin [archiv autorů]



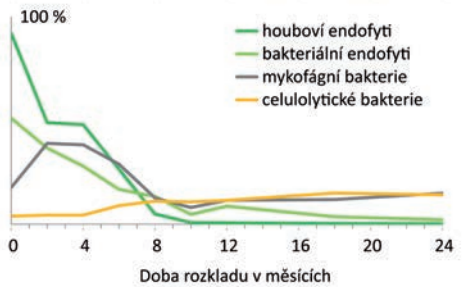
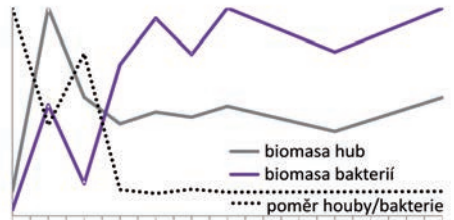
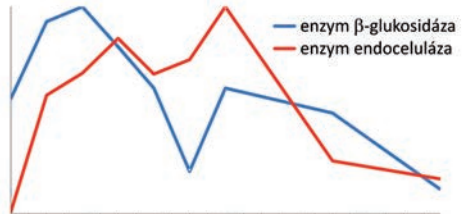
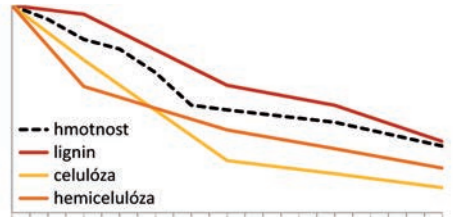
čerstvý opad



opad po 8 měsících rozkladu



opad po 18 měsících rozkladu












Disturbance ekosystémů a jejich dynamika

S nízkou frekvencí dochází v lesních porostech k velkým disturbancím, které zasahují celý ekosystém. Primárním cílem těchto disturbancí jsou stromy jako dominantní organismy lesů. V důsledku intenzivních disturbancí může dojít k úplnému odumření stromového patra. Příkladem takovýchto disturbancí jsou lesní požáry, iniciované například zásahem blesku, které mohou mít v závislosti na množství organické hmoty v ekosystému a na klimatických podmínkách větší či menší vliv. Intenzivní požáry mohou vést ke spálení většiny organické hmoty, usmrtit všechny stromy tvořící symbiózu s mykorrhizními houbami, a biomasa mikroorganismů je často redukována o mnoho desítek procent. Mikroorganismy včetně mykorrhizních hub mohou lesní požáry přežít jako spory a tyto spory tvoří základní stavební prvek nového společenstva, které po požáru vzniká. Zatímco v krátkodobém hledisku vedou požáry k silné redukci



Obr. 13. Fotografie okolí Plešného jezera na Šumavě ukazuje rozsah kůrovcové kalamity, velkoplošné disturbance, která vedla k odumření prakticky všech vzrostlých stromů [foto Jaroslav Šnajdr]

Habitat	Procesy po disturbanci
 Bezobratlí	Vysoká míra reprodukce, intenzivní šíření asociovaných mikroorganismů
 Listoví	Rychlá defoliace – habitat zaniká
 Dřevo	Pomalé odumření a přeměna na stojící mrtvé dřevo (habitat zaniká)
 Kořeny / rhizosféra	Pomalé odumření – produkce kořenového opadu (habitat zaniká)
 Opad	Jednorázová akumulace následovaná velmi nízkou produkcí v dalších letech
 Půda	Změny chemismu v průběhu času, postupné nahrazení kořenových symbiontů saprotrofy
 Kůra	Akumulace na povrchu půdy v prvních letech po odumření stromů
 Mrtvé dřevo	Zvětšení velikosti habitatu
 Pozemní vegetace	Zvýšení biomasy v důsledku zvýšené penetrace slunečního záření

Obr. 14. Dynamické změny habitatů v ekosystému smrkového lesa v Národním parku Šumava po odumření vzrostlých stromů v důsledku kůrovcové kalamity [archiv autorů]

mikrobiální biomasy, její další vývoj je zejména závislý na rychlosti obnovy vegetace, na kterou je značná část mikroorganismů vázaná. Vzhledem k tomu, že bylinná vegetace se vyvíjí rychleji než stromové patro, dochází po požáru hlavně k vývoji arbuskulární mykorhizních hub, jež tvoří symbiózu s kořeny trav a bylin. Až v pozdějších fázích obnovy postupně dochází k vzestupu biomasy ektomykorhizních hub v souvislosti s tím, jak stoupá biomasa stromového patra a s ní i jejich hostitelů.

Mezi ekonomicky nejvýznamnější disturbance lesních ekosystémů patří invaze fytofágního hmyzu. I na území naší republiky se vyskytují velké kůrovcové kalamity, které vedou k odlesnění rozsáhlých území (**obr. 13**). Jak podkorní, tak listožravý hmyz může zahubit až 100 procent dospělých stromů na daném území a vzhledem k intenzitě takové disturbance mohou hmyzí kalamity sloužit jako vhodný příklad dynamického vývoje ekosystému (**obr. 14**). V případě gradace kůrovce v okolí Trojmezí na území Národního parku Šumava došlo k odumření takřka všech dospělých smrků na rozsáhlém území – z původních porostů o hustotě 330 vzrostlých stromů na hektar přežil v průměru méně než 1 strom na hektar. Ihned v průběhu napadení došlo

k opadání jehličí a později k odumření lýka a dřeva. Habitaty listoví a dřeva živých stromů tak přestaly existovat.

V souvislosti s opadáním jehličí ustala fotosyntetická produkce stromů a transport jejich produktů do kořenů a kořeny začaly postupně odumírat. Přísun opadu ve formě jehličí a odumřelých kořenů byl sice jednorázově vysoký, ale v dalších letech prakticky ustal. V průběhu několika následujících let došlo v důsledku omezení zástinu k postupné expanzi přízemní vegetace, která vytvořila hustý, ale prostorově heterogenní pokryv. Současně řádově stoupla zásoba mrtvého dřeva stojících a později padlých kmenů smrku (**obr. 15**). Po kůrovcové kalamitě dochází ke změnám i v půdě. Obsah organických forem dusíku klesá, zatímco koncentrace dusičnanů v krátkém období silně rostou. Dostupnost jednotlivých forem uhlíku a dusíku v půdě se mění i v následujících letech a ovlivňuje tak biogeochemické pochody zprostředkované mikroorganismy. Zvýšený obsah dusičnanů a bazických kationtů vede k jejich vyplavení do vodních toků, které jsou tak disturbancí lesního ekosystému rovněž ovlivněny. Rozpad porostu má za následek rychlejší proudění vzduchu a dochází k úbytku půdní vlhkosti a vysychání opadu a povrchu půdy, a to zejména v horkých letních dnech na místech vystavených přímému slunečnímu záření. Ke změnám dochází také u mikroorganismů obývajících opad a půdu. Po disturbanci následuje rychlý a výrazný úbytek biomasy hub, zatímco početnost bakterií se snižuje pouze pomalu a postupně.



2008

2010

2012

Obr. 15. Lesní ekosystém horského smrkového lesa v NPR Trojmezna v Národním parku Šumava na jaře roku 2008, 2010 a 2012. V létě roku 2008 všechny vzrostlé stromy na studovaných plochách odumřely v důsledku invaze kůrovce. Postupně došlo k opadu jehličí, drobných větviček a kůry, v pozdější době se rozpadají tlející kmeny stromů [foto Petr Baldrian]

Houboví symbionti kořenů smrku jsou postupně nahrazováni saprotrofními druhy a dřevokaznými houbami, které kolonizují půdu a opad z mrtvého dřeva, jež se postupně hromadí na povrchu půdy. Aktivita mikrobiálních procesů, měřená jako aktivita enzymů rozkládajících organickou hmotu, klesá v souvislosti s úbytkem snadno rozložitelných látek v opadu a půdě. Přestože společenstvo bakterií se po disturbanci mění méně, zejména u bakterií listoví a rhizosféry jsou změny významné. Společenstvo bakterií v půdě potom reaguje na změny chemismu a dostupnosti živin.

Narušení lesních ekosystémů listožravým hmyzem má podobné důsledky jako invaze podkorního hmyzu. V závislosti na stupni okusu listoví se mění fotosyntetická produkce vegetace a s ní zastoupení mikroorganismů, které jsou závislé na kořenových exsudátech, zejména mykorhizních hub.

Přestože po rozpadu porostu dochází postupně k dorůstání mladých stromů a jeho obnově, vývoj porostů do dosažení stabilizovaného stadia trvá mnoho let. Například obnova složení ektomykorhizních hub v disturbovaných lesích temperátního a boreálního pásma trvala v průměru 90 let, zatímco u epifytických lišejníků stabilizace trvala 180 let. Vývoj ekosystému ale není završen dosažením dospělého věku u dominantních stromů v porostu. Výzkumy v severských lesích ukázaly, že existují významné rozdíly mezi lesy, které se nerušeně vyvíjejí po dobu 50 až 5000 let od poslední disturbance. Obrat uhlíku a mikrobiální biomasy byl nižší v mladých porostech, zatímco v nejstarších porostech docházelo ve velké míře ke stabilizaci uhlíku. K tomu přispívala zejména jeho akumulace v obtížně rozložitelných myceliích některých hub.

Vývoj hospodářských lesů po smýcení je do značné míry podobný vývoji po velkých disturbancích. Hlavními faktory jsou opět nárůst biomasy stromů a změny množství pozemní vegetace, které je nejvyšší u pasek a mladých porostů. Množství mikrobiální biomasy, složení společenstev a jejich aktivita tyto změny odrážejí. Bezprostředně po pokácení dochází k vymizení ektomykorhizních hub, jež jsou nahrazeny saprotrofními druhy a později, v době maxima produkce pozemní vegetace, houbami tvořícími arbuskulární mykorhizu. Zastoupení mykorhizních hub opět stoupá v souvislosti se vzestupem biomasy stromového patra a mění se i zastoupení jednotlivých druhů. Vlivy smýcení na bakterie a archaea v půdě jsou podstatně menší.

Závěr

Mikroorganismy jsou v lesním prostředí všudypřítomné a často se podílejí na významných procesech, které ovlivňují celý ekosystém lesa. Jejich nejdůležitější rolí je pravděpodobně rozklad organické hmoty v půdě, kdy jejich činnost přispívá k produkci oxidu uhličitého. Vzhledem k tomu, že oxid uhličitý z atmosféry je naopak přijímán a fixován do biomasy, rozhoduje poměr mezi rychlostí jeho fixace vegetací a produkce

mikroorganismy o tom, v jaké míře se uhlík v lesních půdách ukládá. Vzhledem k tomu, že oxid uhličitý je významným plynem podílejícím se na tvorbě skleníkového efektu, je ukládání uhlíku v půdách lesů velmi významné, a je třeba zajistit, aby zdravotní stav lesů tento pozitivní proces podporoval. Zdravé a stabilní lesy s velkou druhovou rozmanitostí všech organismů včetně mikroorganismů by měly být prostředkem, jak tohoto cíle dosáhnout, a představují proto do budoucna jeden z klíčových směrů ekologického a mikrobiologického výzkumu. Komplexní charakter lesních ekosystémů činí tento výzkum velmi náročným, ale i velmi zajímavým. V České republice se výzkumu v oblasti mikrobiologie lesních ekosystémů věnují především Mikrobiologický ústav AV ČR, Botanický ústav AV ČR, Biologické centrum AV ČR, ale také Univerzita Karlova v Praze, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Mendelova Univerzita v Brně a Česká zemědělská univerzita v Praze (**obr. 16**).



Obr. 16. Členové Laboratoře environmentální mikrobiologie Mikrobiologického ústavu AV ČR při výzkumu diverzity lesních ekosystémů Národního parku Šumava. Výzkum lesních ekosystémů je důležitý pro pochopení jejich fungování, návrh optimální ochrany a obhospodařování. Pomáhá také předpovědět možnou reakci lesů na vývoj klimatu v budoucnosti [foto Vojtěch Tláškal]

Box 1: Mikroorganismy v lesních ekosystémech

Saprotrofní houby – houby získávají uhlík pro stavbu svého těla rozkladem komplexní organické hmoty. Jejich vláknitý růst (při němž mohou dosahovat značných rozměrů) jim umožňuje efektivní transport vody a živin a umožňuje tak efektivní využití nerovnoměrně rozptýlených zdrojů. Schopnost efektivně rozkládat komplexní biopolymery (celulózu, hemicelulózy, chitin, pektin a lignin) je podmíněna produkcí širokého spektra efektivních extracelulárních enzymů. Saprotrofní houby jsou efektivními rozkladači mrtvého dřeva a opadu.

Plísně – saprotrofní houby, které získávají uhlík z jednoduchých organických látek – sacharidů, organických kyselin či aminokyselin, které jsou například produkovány jako exsudáty hyf nebo jsou součástí odumřelé organické hmoty, například mycelií hub. Jejich enzymatické systémy jsou méně účinné než u ostatních saprotrofů, a nestačí na rozklad komplexních organických látek. Obvykle klíčí ze spor poté, co se v prostředí objeví vhodný substrát, a rostou po omezenou dobu, dokud substrát není vyčerpán.

Mykorhizní houby – houby žijící v symbiotické asociaci s rostlinami, respektive jejich kořeny, a získávají uhlíkaté látky od tohoto svého hostitele. Lesní ekosystémy hostí řadu typů mykorhizních hub včetně arbuskulárních mykorhiz (obvykle symbióza hub a bylin či trav), ektomykorhiz (symbióza hub s kořeny stromů) a erikoidních mykorhiz (specifická symbióza hub s kořínky vřesovcovitých rostlin, například borůvek). Mycelia ektomykorhizních hub pokrývají kořenové špičky svých hostitelů a jejich vlákna prorůstají do půdy. Právě těmito vlákny dodávají mykorhizní houby svým hostitelům minerální živiny, například dusík nebo fosfor. Přestože mají určité schopnosti rozkládat organickou hmotu, nedovedou využívat uhlíkaté látky z komplexních biopolymerů.

Lišejníky – symbiotické organismy zahrnující houbového a bakteriálního partnera (sinici), popřípadě i další bakteriální partnery či řasy. Lišejníky kolonizují povrch půdy, skal či hostitelů, zdrojem uhlíku je pro ně však atmosféra: organické látky produkuje sinice po fixaci oxidu uhličitého. Minerální živiny ze substrátu dodává a fyzickou ochranu ostatním partnerům poskytuje houbový organismus.

Bakterie – vysoce rozmanitá skupina mikroorganismů, většinou jednobuněčných. Přestože řada z nich získává uhlík pouze z jednoduchých organických látek (jako například rychle rostoucí bakterie vyskytující se v rhizosféře), řada druhů dokáže rozkládat biopolymery obsažené v buněčných stěnách rostlin a hub. Jejich schopnost rozkládat organické látky je obvykle omezena vyššími nároky na příjem dusíku a neschopností translokovat živiny.

Archaea – specifické, obvykle jednobuněčné mikroorganismy, které se v lesních půdách vyskytují v omezeném množství. Přestože jejich způsoby výživy jsou značně rozmanité, není příliš známo, jakým způsobem se podílejí na přeměně organických látek v lesích. Zdá se však, že nejsou ani symbionty rostlin, ani typickými rozkladači.

Slovníček pojmů

- Autotrofie** – schopnost mikroorganismů využívat jako zdroje uhlíku minerální látku, například oxid uhličitý
- Biomasa** – souhrn látek tvořících těla organismů
- Celulóza** – polymer buněčné stěny rostlin, polysacharid složený z jednotek cukru glukózy, vázané beta-1,4 vazbou; přispívá k pevnosti dřeva
- Dekompozice** – rozklad organických látek na jednodušší organické látky nebo až na minerální látky, například oxid uhličitý, vodu či amoniak
- Disturbance** – narušení stávajícího stavu ekosystému, zejména narušení velké intenzity, které zásadně mění jeho charakter (lesní požár, smýcení porostu, usmrcení stromů při invazi hmyzu)
- Efekt priority** – proces, při němž získává výhodu ten, který substrát (například list po opadu či padlý strom v lese) obsadí jako první
- Ekosystém** – ucelená část biosféry, která má specifické vlastnosti, ale není uzavřená a komunikuje s ostatními částmi přírody; příkladem může být ekosystém listnatého lesa
- Endofyt** – organismus žijící uvnitř živých pletiv rostliny (například listu či kořene)
- Epifyt** – organismus žijící na povrchu rostliny (například na povrchu listu)
- Extracelulární enzym** – enzym produkovaný ven z buňky, určený například pro vněbuněčné „trávení“ – rozklad organické hmoty
- Exsudát** – výpotek, typicky organické látka produkovaná vně určitého orgánu, například kořene (kořenový exsudát) či houbového vlákna (hyfy)
- Fixace** – proces, při kterém jsou minerální látky (například atom dusíku ze vzduchu či uhlíku z oxidu uhličitého) inkorporovány do živého organismu
- Fotosyntéza** – biochemická reakce, která využívá energie slunečního záření na tvorbu organických látek z jednoduchých minerálních látek, v případě rostlin z oxidu uhličitého a vody
- Habitat** – prostředí určitého charakteru, v němž se organismy (nebo mikroorganismy) vyskytují
- Hemicelulóza** – polymer buněčné stěny rostlin, polysacharid složený z jednotek různých monosacharidů (jednotlivých cukrů) vázaných rozličnými vazbami; příkladem je například xylan či glukomanan vyskytující se ve dřevě
- Hyfa** – vícebuněčné vlákno vláknité houby
- Chelátor** – organická molekula, jež je schopná vázat kationty kovů, popřípadě jiné malé molekuly
- Chitin** – polymer buněčné stěny hub, polysacharid složený z cukru N-acetylglukosaminu, kromě uhlíku obsahuje také dusík
- Komensalismus** – biologická interakce mezi dvěma organismy, z nichž jeden má ze vztahu prospěch, zatímco druhý není ovlivněn, příkladem je konzumace produktů rozkladu celulózy mikroorganismy, které ji samy nerozkládají
- Lignin** – polymer buněčné stěny rostlin se složitou strukturou obsahující různé typy chemických vazeb a velmi odolný vůči rozkladu; dodává dřevu pružnost a odolnost proti vstupu mikroorganismů

- Melanin** – hnědý až černý pigment vyskytující se v buněčné stěně některých hub, který jim dodává odolnost díky obtížné rozložitelnosti a toxicitě pro řadu mikroorganismů
- Mikrobiom** – souhrn všech mikroorganismů obývajících dané prostředí
- Mutualismus** – vzájemné ovlivňování či soužití mezi organismy, které je pro všechny zúčastněné prospěšné
- Mycelium** – podhoubí, je to shluk vzájemně propletených vláken, charakteristický zejména pro houby a některé bakterie tvořící jejich organismus
- Mykofagie** – získávání živin z těl hub
- Predátor** – organismus, který loví jiné organismy a živí se jimi
- Rhizosféra** – oblast půdy pod bezprostředním vlivem kořene
- Saprotrofie** – získávání uhlíku z odumřelé organické hmoty
- Spora** – výtrus, struktura sloužící k nepohlavnímu rozmnožování, adaptovaná k rozšiřování a přežití i v nepříznivých podmínkách a na dlouhou dobu
- Sukcese** – změna druhového složení organismů v čase
- Symbióza** – úzké soužití dvou či více organismů, například stromů a ektomykorhizních hub, kolonizujících jejich kořeny
- Transkripce** – přepis genetické informace z molekuly DNA (genů) do molekuly RNA za účelem produkce specifických proteinů

Doporučená literatura

- Aanderud, Z. T., Jones, S. E., Fierer, N. et al. Resuscitation of the rare boisphere contributes to pulses of ecosystem activity. *Frontiers in Microbiology* 2015, **6**, 24.
- Augusto, L., De Schrijver, A., Vesterdal, L. et al. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. *Biology Reviews* 2015, **90**, 444–466.
- Baldrian, P. The Forest Microbiome: Diversity, Complexity and Dynamics. *FEMS Microbiology Reviews* 2017, **41**, fuw040.
- Baldrian, P., Kolařík, M., Štursová, M. et al. Active and total microbial communities in forest soil are largely different and highly stratified during decomposition. *ISME Journal* 2012, **6**, 248–258.
- Baldrian, P., Zrůstová, P., Tláškal, V. et al. Fungi associated with decomposing deadwood in a natural beech-dominated forest. *Fungal Ecology* 2016, **23**, 109–122.
- Berg, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management* 2000, **133**, 13–22.
- Boddy, L., Watkinson, S. C. Wood decomposition, higher fungi, and their role in nutrient redistribution. *Canadian Journal of Botany* 1995, **73**, S1377–S1383.
- Brabcová, V., Nováková, M., Davidová, A. et al. Dead fungal mycelium in forest soil represents a decomposition hotspot and a habitat for a specific microbial community. *New Phytologist* 2016, **210**, 1369–1381.
- Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O. et al. Roots and Associated Fungi Drive Long-Term Carbon Sequestration in Boreal Forest. *Science* 2013, **339**, 1615–1618.

- Crowther, T. W., Glick, H. B., Covey, K. R. et al. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 2015, **525**, 201–205.
- Crowther, T. W., Stanton, D. W. G., Thomas, S. M. et al. Top-down control of soil fungal community composition by a globally distributed keystone consumer. *Ecology* 2013, **94**, 2518–2528.
- Boer, W. de, Folman, L. B., Summerbell, R. C. et al. Living in a fungal world: impact of fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiol Reviews* 2005, **29**, 795–811.
- Eichlerová, I., Homolka, L., Žifčáková, L. et al. Enzymatic systems involved in decomposition reflects the ecology and taxonomy of saprotrophic fungi. *Fungal Ecology* 2015, **13**, 10–22.
- Eklblad, A., Wallander, H., Godbold, D. L. et al. The production and turnover of extramatrical mycelium of ectomycorrhizal fungi in forest soils: role in carbon cycling. *Plant Soil* 2013, **366**, 1–27.
- Ettema, C. H., Wardle, D. A. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 2002, **17**, 177–183.
- Fernandez, C. W., Kennedy, P. G. Revisiting the 'Gadgil effect': do interguild fungal interactions control carbon cycling in forest soils? *New Phytologist* 2016, **209**, 1382–1394.
- Fierer, N., Jackson, R. B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 2006, **103**, 626–631.
- Frey-Klett, P., Garbaye, J., Tarkka, M. The mycorrhiza helper bacteria revisited. *New Phytologist* 2007, **176**, 22–36.
- Högberg, M. N., Högberg, P. Extramatrical ectomycorrhizal mycelium contributes one-third of microbial biomass and produces, together with associated roots, half the dissolved organic carbon in a forest soil. *New Phytologist* 2002, **154**, 791–795.
- Johnston, S. R., Boddy, L., Weightman, A. J. Bacteria in decomposing wood and their interactions with wood-decay fungi. *FEMS Microbiology Ecology* 2016, **92**, fiw179.
- Kohler, A., Kuo, A., Nagy, L. G. et al. Convergent losses of decay mechanisms and rapid turnover of symbiosis genes in mycorrhizal mutualists. *Nature Genetics* 2015, **47**, 410–U176.
- Kuzyakov, Y., Blagodatskaya, E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biology & Biochemistry* 2015, **83**, 184–199.
- Lennon, J. T., Jones, S. E. Microbial seed banks: the ecological and evolutionary implications of dormancy. *Nature Reviews Microbiology* 2011, **9**, 119–130.
- Lindahl, B. D., Ihrmark, K., Boberg, J. et al. Spatial separation of litter decomposition and mycorrhizal nitrogen uptake in a boreal forest. *New Phytologist* 2007, **173**, 611–620.
- Lindahl, B. D., Tunlid, A. Ectomycorrhizal fungi – potential organic matter decomposers, yet not saprotrophs. *New Phytologist* 2015, **205**, 1443–1447.
- Lladó, S., Žifčáková, L., Větrovský, T. et al. Functional screening of abundant bacteria from acidic forest soil indicates the metabolic potential of Acidobacteria subdivision 1 for polysaccharide decomposition. *Biology and Fertility of Soils* 2016, **52**, 251–260.

- López-Mondéjar, R., Voříšková, J., Větrovský, T. et al. The bacterial community inhabiting temperate deciduous forests is vertically stratified and undergoes seasonal dynamics. *Soil Biology & Biochemistry* 2015, **87**, 43–50.
- López-Mondéjar, R., Zühlke, D., Becher, D. et al. Cellulose and hemicellulose decomposition by forest soil bacteria proceeds by the action of structurally variable enzymatic systems. *Scientific Reports* 2016, **6**, 252–279.
- Osono, T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research* 2007, **22**, 955–974.
- Peay, K. G., Schubert, M. G., Nguyen, N. H. et al. Measuring ectomycorrhizal fungal dispersal: macroecological patterns driven by microscopic propagules. *Molecular Ecology* 2012, **21**, 4122–4136.
- Perry, D. A., Oren, R., Hart, S. C. *Forest Ecosystems*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2009.
- Peršoh, D. Plant-associated fungal communities in the light of meta'omics. *Fungal Diversity* 2015, **75**, 1–25.
- Prescott, C. E., Grayston, S. J. Tree species influence on microbial communities in litter and soil: Current knowledge and research needs. *Forest Ecology and Management* 2013, **309**, 19–27.
- Rajala, T., Peltoniemi, M., Pennanen, T. et al. Fungal community dynamics in relation to substrate quality of decaying Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) logs in boreal forests. *FEMS Microbiology Ecology* 2012, **81**, 494–505.
- Rayner, A. D. M., Boddy, L. *Fungal decomposition of wood: its biology and ecology*. Chichester–New York: Wiley, 1988.
- Redford, A. J., Bowers, R. M., Knight, R. et al. The ecology of the phyllosphere: geographic and phylogenetic variability in the distribution of bacteria on tree leaves. *Environmental Microbiology* 2010, **12**, 2885–2893.
- Rinta-Kanto, J. M., Sinkko, H., Rajala, T. et al. Natural decay process affects the abundance and community structure of Bacteria and Archaea in *Picea abies* logs. *FEMS Microbiology Ecology* 2016, **92**, fiw087.
- Rosling, A., Landeweert, R., Lindahl, B. D. et al. Vertical distribution of ectomycorrhizal fungal taxa in a podzol soil profile. *New Phytologist* 2003, **159**, 775–783.
- Seibold, S., Bässler, C., Brandl, R. et al. Experimental studies of dead-wood biodiversity – A review identifying global gaps in knowledge. *Biological Conservation* 2015, **191**, 139–149.
- Schneider, T., Keiblinger, K. M., Schmid, E. et al. Who is who in litter decomposition? Metaproteomics reveals major microbial players and their biogeochemical functions. *ISME Journal* 2012, **6**, 1749–1762.
- Stokland, J. N., Siitonen, J., Jonsson, B. G. *Biodiversity in Dead Wood*. Biodiversity in Dead Wood. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2012.
- Šamonil, P., Král, K., Hort, L. The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review. *Geoderma* 2010, **157**, 65–79.
- Šnajdr, J., Cajthaml, T., Valášková, V. et al. Transformation of *Quercus petraea* litter: successive changes in litter chemistry are reflected in differential enzyme activity

- and changes in the microbial community composition. *FEMS Microbiology Ecology* 2011, **75**, 291–303.
- Šnajdr, J., Valášková, V., Merhautová, V. et al. Spatial variability of enzyme activities and microbial biomass in the upper layers of *Quercus petraea* forest soil. *Soil Biology & Biochemistry* 2008, **40**, 2068–2075.
- Štursová, M., Šnajdr, J., Cajthaml, T. et al. When the forest dies: the response of forest soil fungi to a bark beetle-induced tree dieback. *ISME Journal* 2014, **8**, 1920–1931.
- Štursová, M., Žifčáková, L., Leigh, M. B. et al. Cellulose utilization in forest litter and soil: identification of bacterial and fungal decomposers. *FEMS Microbiology Ecology* 2012, **80**, 735–746.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Cajthaml, T. et al. Tree diversity and species identity effects on soil fungi, protists and animals are context dependent. *ISME Journal* 2016, **10**, 346–362.
- Tláskal, V., Voříšková, J., Baldrian, P. Bacterial succession on decomposing leaf litter exhibits a specific occurrence pattern of cellulolytic taxa and potential decomposers of fungal mycelia. *FEMS Microbiology Ecology* 2016, **92**, fiw177.
- Urbanová, M., Šnajdr, J., Baldrian, P. Composition of fungal and bacterial communities in forest litter and soil is largely determined by dominant trees. *Soil Biology & Biochemistry* 2015, **84**, 53–64.
- Uroz, S., Calvaruso, C., Turpault, M. P. et al. Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. *Trends in Microbiology* 2009, **17**, 378–387.
- Vainio, E. J., Muller, M. M., Korhonen, K. et al. Viruses accumulate in aging infection centers of a fungal forest pathogen. *ISME Journal* 2015, **9**, 497–507.
- Heijden, M. G. A. van der, Bardgett, R. D., Straalen, N. M. van, The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 2008, **11**, 296–310.
- Vorholt, J. A. Microbial life in the phyllosphere. *Nature Reviews Microbiology* 2012, **10**, 828–840.
- Voříšková, J., Baldrian, P. Fungal community on decomposing leaf litter undergoes rapid successional changes. *ISME Journal* 2013, **7**, 477–486.
- Voříšková, J., Brabcová, V., Cajthaml, T. et al. Seasonal dynamics of fungal communities in a temperate oak forest soil. *New Phytologist* 2014, **201**, 269–278.
- Wallander, H., Johansson, U., Sterkenburg, E. et al. Production of ectomycorrhizal mycelium peaks during canopy closure in Norway spruce forests. *New Phytologist* 2010, **187**, 1124–1134.
- Waring, R. H., Running, S. W. *Forest Ecosystems. Analysis at Multiple Time and Space Scales*. Forest Ecosystems. 3. ed., San Diego: Academic Press, 2007.
- Warmink, J. A., Nazir, R., Corten, B. et al. Hitchhikers on the fungal highway: The helper effect for bacterial migration via fungal hyphae. *Soil Biology & Biochemistry* 2011, **43**, 760–765.
- Žifčáková, L., Větrovský, T., Howe, A. et al. Microbial activity in forest soil reflects the changes in ecosystem properties between summer and winter. *Environmental Microbiology* 2016, **18**, 288–301.

Nová strategie Akademie věd České republiky

motto: „Špičkový výzkum ve veřejném zájmu“

Uplynulých dvacet let prokázalo, že Akademie věd je významnou a nenahraditelnou součástí systému výzkumu, vývoje a inovací České republiky. Nadále musí zůstat garantem kvality, avšak pro její další rozvoj je nezbytné, aby byla schopna identifikovat důležité vědecké a společenské otázky, fundovaným způsobem definovat problematiku a vypracovat návrhy řešení z hlediska současné úrovně dosaženého poznání. Akademie věd má již ve své dnešní podobě dobré základy pro to, aby v blízké budoucnosti mohla působit nejen jako součást špičkové světové vědy a centrum národní kultury, ale i jako stále důležitější hospodářský činitel.

Témata, jako jsou například energetická budoucnost České republiky, zdraví občanů nebo kvalita veřejných politik, představují složité okruhy problémů, jejichž řešení vyžaduje široce založený interdisciplinární výzkum. Akademie věd proto připravila Strategii AV21, jejímž základem je soubor koordinovaných výzkumných programů využívající mezioborových a meziinstitucionálních synergií s cílem identifikovat problémy a výzvy dnešní doby a koordinovat výzkumné úsilí pracovišť Akademie věd směrem k jejich řešení. Základní rámec strategie schválil Akademický sněm v prosinci 2014 s tím, že relevantní programy bude možné navrhovat i v dalším období. Výzkumné programy Akademie věd jsou od počátku otevřeny partnerům z vysokých škol, podnikatelské sféry a institucím státní a regionální správy, stejně jako zahraničním výzkumným skupinám a organizacím. Nezbytnou podmínkou pro uskutečňování Strategie AV21 je dlouhodobá stabilita systému výzkumu, vývoje a inovací v České republice.

Základním nástrojem pro realizaci Strategie AV21 je soubor koordinovaných výzkumných programů pracovišť Akademie věd:

- Naděje a rizika digitálního věku
- Systémy pro jadernou energetiku
- Účinná přeměna a skladování energie
- Přírodní hrozby
- Nové materiály na bázi kovů, keramik a kompozitů
- Diagnostické metody a techniky
- Kvalitní život ve zdraví i nemoci
- Potraviny pro budoucnost
- Rozmanitost života a zdraví ekosystémů
- Molekuly a materiály pro život
- Evropa a stát: mezi barbarstvím a civilizací
- Paměť v digitálním věku
- Efektivní veřejné politiky a současná společnost
- Formy a funkce komunikace
- Globální konflikty a lokální souvislosti: kulturní a společenské výzvy
- Vesmír pro lidstvo
- Světlo ve službách společnosti
- Preklinické testování potenciálních léčiv

Koordinátory výzkumných programů jsou ředitelé zapojených pracovišť nebo pověřeni vědečtí pracovníci. Ti zajišťují vyhledávání nových, společensky relevantních témat výzkumu, provádějí syntézu dostupných informací a výsledků výzkumu z hlediska současné úrovně dosaženého poznání a koordinují vypracování návrhu výzkumného programu.

Výzkumné programy schvaluje Akademická rada v součinnosti s Vědeckou radou.

Program **Rozmanitost života a zdraví ekosystémů** (ROZE) v rámci Strategie AV21 koordinuje Biologické centrum. Kromě něj je do programu ROZE zapojeno dalších 7 ústavů Akademie věd ČR (Botanický ústav, Geologický ústav, Mikrobiologický ústav, Sociologický ústav, Ústav biologie obratlovců, Ústav státu a práva, Ústav živočišné fyziologie a genetiky) a řešení se účastní více než 30 dalších institucí a firem.

Program ROZE se zabývá nepostradatelnou rolí biodiverzity na úrovni molekul, genů, druhů, společenstev a ekosystémů. Jeho náplní je i lepší poznání a pochopení mechanismů klíčových biogeochemických cyklů a toků látek a energie mezi složkami ekosystému. Náplní je také poznání koevoluce a vzájemných vztahů druhů, ekologie invazních druhů včetně vlivu na původní ekosystémy, hodnocení genetické diferenciace v populacích a poznání procesů vzniku nových druhů. Hierarchické členění biodiverzity vytváří mimořádně vhodné příležitosti k mezioborové spolupráci.

Metodicky program propojuje biologické, ekologické, geologické i společenské disciplíny s ambicí přinést originální a komplexní poznatky o biodiverzitě a jejím významu pro lidskou společnost na pozadí abiotických složek prostředí, jakož i poznatky o struktuře a funkcích suchozemských i vodních ekosystémů. Získané výsledky se uplatní v trvale udržitelných systémech ochrany rostlin, v zemědělství, lesnictví, rybářství a dalších oborech využívajících přírodní ekosystémy. Výstupem budou též teoretické a praktické přístupy k péči o životní prostředí, moderní východiska ochrany přírody a krajiny i další doporučení sledující účelné a udržitelné využívání přírodních zdrojů lidskou společností, v důsledku zajišťující kvalitní život. Významnou součástí programu bude komunikace s nejširší veřejností a výchova všech cílových skupin obyvatelstva.

Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i., v současnosti představuje největší pracoviště v České republice, které komplexně studuje vlastnosti mikroorganismů (bakterií, kvasinek, hub a řas) a savčích buněčných linií z hlediska základního výzkumu i z hlediska jejich praktické využitelnosti v průmyslu či medicíně. Hlavními směry výzkumu v MBÚ jsou buněčná a molekulární mikrobiologie, genetika a fyziologie mikroorganismů a jejich rezistence vůči antibiotikům, produkce mikrobiálních metabolitů a jejich biotransformace a šlechtění produkčních kmenů. K důležitým oblastem patří environmentální mikrobiologie, ekotoxikologie a mikrobiální degradace organických polutantů v životním prostředí. Část ústavu zaměřená na imunologické problematiky se věnuje významu mikroorganismů ve fylogenetickém a ontogenetickém vývoji imunity a při vzniku autoimunitních chorob a v neposlední řadě imunoterapii nádorových onemocnění.

Mikrobiologický ústav je rovněž zapojen spolu s dalšími pěti ústavu Akademie věd ČR a dvěma fakultami Univerzity Karlovy v Praze do centra excelence BIOCEV, jehož výzkum je zaměřený na vybrané oblasti biotechnologie a biomedicíny.

Mikrobiologický ústav má nyní více než 600 zaměstnanců, přibližně polovinu tvoří pracovníci s vysok školským vzděláním včetně více než sta postgraduálních studentů.

Historie Mikrobiologického ústavu AV ČR začíná ještě před jeho vznikem, v roce 1948. Tehdy Ivan Málek odešel z Prahy na Lékařskou fakultu Univerzity Karlovy v Hradci Králové a vytvořil tam pracovní skupinu, která se stala základem Mikrobiologického oddělení Ústředního ústavu biologického. Po založení Československé akademie věd v roce 1952 přešla tato skupina z Hradce Králové na Flemingovo náměstí v Praze-Dejvicích a bylo ustaveno Mikrobiologické oddělení Biologického ústavu ČSAV. Samostatný Mikrobiologický ústav ČSAV vznikl v roce 1962 a o dva roky později se přestěhoval do nové budovy v Praze-Krči.

Doc. RNDr. Petr Baldrian, Ph.D., je vedoucím Laboratoře environmentální mikrobiologie Mikrobiologického ústavu AV ČR, v. v. i. Absolvoval studium mikrobiologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze, kde v současné době přednáší o ekologii mikroorganismů a jejich významu v životním prostředí. Zabývá se významem mikroorganismů – hub a bakterií – v ekosystémových procesech, zejména v lesních ekosystémech, jejich účastí na přeměně organických látek a vztahy s dalšími organismy. Předmětem jeho zájmu je i využití mikroorganismů a jejich enzymů v biotechnologiích. Je autorem nebo spoluautorem více než 140 vědeckých a odborných publikací.

Mgr. Tereza Mašínová studuje mikrobiologii v doktorském programu na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Od roku 2013 pracuje v Laboratoři environmentální mikrobiologie Mikrobiologického ústavu AV ČR, v. v. i., kde se zaměřuje na studium významu kvasinek v lesních ekosystémech.



Edice Strategie AV21 | Rozmanitost života a zdraví ekosystémů

Petr Baldrian, Tereza Mašínová | **Mikroorganismy v lesních ekosystémech: diverzita, dynamika a funkce**

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., pro Kancelář Akademie věd ČR, Národní 3, 117 20 Praha 1. Grafická úprava Robin Brichta. Fotografie na obálce Vojtěch Tláškal. Technická redaktorka Ivana Říhová. Odpovědná redaktorka Dana Packová. Vydání 1, 2017. Ediční číslo 12128. Sazba a tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

<http://av21.avcr.cz>

ISBN 978-80-200-2775-7



9 788020 027757