

Grzegorz Siebielec, Sylwia Siebielec

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

BIORÓŻNORODNOŚĆ GLEB*

Słowa kluczowe: bioróżnorodność, degradacja, organizmy glebowe, mikroorganizmy, praktyki rolnicze

Rola bioróżnorodności gleb

Populacja ludzi na świecie stale rośnie i oczekuje się, że do 2030 roku osiągnie 8,6 miliarda. Dla zapewnienia jej przyszłości niezbędne jest zrównoważone gospodarowanie bogactwami naturalnymi, w tym glebami, wodami, powietrzem, minerałami oraz bioróżnorodnością, która wspiera życie na Ziemi. Szacuje się, że nawet do 30% gruntów na świecie uległo już degradacji (46)

Termin „różnorodność biologiczna” (ang. *biological diversity*) został stworzony przez Thomasa Lovejoya w 1980 r. Różnorodność biologiczna jest określana jako suma wszystkich zmienności biotycznych od poziomu genów do ekosystemów (52).

Różnorodność biologiczna gleby, która podtrzymuje ekosystemy i życie na Ziemi była w dużej mierze pomijana w globalnych strategiach. Aktywność biologiczna i złożone interakcje, jakie zachodzą w środowisku glebowym stanowią podstawę wielu funkcji ekosystemu, w tym obiegu składników odżywczych, kontroli patogenów, infiltracji wody, tworzenia łańcuchów troficznych. Priorytetem w badaniach naukowych jest z pewnością zrozumienie powiązań między różnorodnością biologiczną gleby a równowagą, jaka powinna panować na Ziemi (18, 60).

Konwencja o różnorodności biologicznej (CBD) zdefiniowała różnorodność biologiczną gleby jako „zróżnicowanie życia w glebie, od genów po zbiorowiska i kompleksy ekologiczne, których są częścią, czyli od mikrosiedlisk glebowych po krajobrazy”. Pojęcie różnorodności jest tradycyjnie używane w sensie genetycznym

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

i oznacza liczbę odrębnych gatunków (bogactwo) oraz ich proporcjonalną liczebność, ale można je rozszerzyć na różnorodność fenotypową, funkcjonalną, strukturalną lub troficzną. Całkowita ilość biomasy pod ziemią jest na ogół równa lub przewyższająca poziom nadziemny, podczas gdy biomasa organizmów glebowych przewyższa o rzędy wielkości biomasę organizmów na powierzchni gleby. Niektóre liczby dobrze opisują poziom różnorodności biologicznej gleby: łyżeczka gleby może zawierać zazwyczaj miliard komórek bakteryjnych (co odpowiada około dziesięciu tysiącom różnych genomów bakterii), do miliona pojedynczych grzybów, około miliona komórek protistów i kilkaset nicieni. Oprócz mikroorganizmów i mikrofauny w glebie żyją różne gatunki mezo- i makro- oraz megafauny reprezentowane przez stawonogi, dżdżownice i ssaki (34).

Podobnie jak większość zasobów, z których ludzie korzystają, gleby i ich różnorodność biologiczna są zagrożone. Gleby to w zasadzie nieodnawialne zasoby, ponieważ nie można ich odtworzyć w ciągu ludzkiego życia. Istotnym krokiem w kierunku zapobiegania utracie gatunków zamieszkujących glebę jest postrzeganie gleby jako siedliska wymagającego ochrony. Utrata siedlisk spowodowana zmianą użytkowania gruntów i zmianami klimatu jest głównym zagrożeniem dla fauny i flory, a rolnictwo w największym stopniu powoduje utratę naturalnych siedlisk. Różnorodność biologiczna spada na całym świecie poprzez przekształcanie gruntów na cele rolnicze i zarządzanie nimi w intensywny sposób (26, 45). Jak sugerują dane literaturowe, zmiany bioróżnorodności mogą wpływać na usługi ekosystemowe gleby, takie jak obieg węgla i składników odżywczych oraz naturalna ochrona przed szkodnikami. Mniej intensywne rolnictwo, takie jak rolnictwo ekologiczne, może wzmocnić samoregulację systemów glebowych, wiąże się to jednak ze zmniejszeniem plonów (60).

Fauna i flora glebowa jest bardziej obfita w gatunki w porównaniu z większością innych siedlisk na Ziemi (48). Rozmiar organizmów glebowych obejmuje wiele rzędów wielkości, co wymaga odpowiedniego doboru skali przestrzennej, w której należy badać bioróżnorodność gleby. Ekolodzy gleby od dawna badają stan i przyczyny zmian różnorodności biologicznej w glebach. W ostatnich latach badania dotyczące bioróżnorodności gleb wskazują na jej rolę dla funkcji i usług ekosystemowych, choć wiele zależności jest w dalszym ciągu niewystarczająco poznanych (5, 46, 67). Ponadto ostatnie postępy metodyczne, takie jak sekwencjonowanie, umożliwiły badania różnorodności biologicznej gleby z większą precyzją oraz wgląd w różnorodność biologiczną gleby w różnych skalach, a także na poziomie genetycznym (4, 29).

Ocena roli bioróżnorodności gleby w regulowaniu wielofunkcyjności gleb jest niezbędna, aby lepiej zrozumieć potencjalne konsekwencje utraty różnorodności biologicznej gleby dla utrzymania wielu funkcji i usług ekosystemowych, które mają kluczowe znaczenie dla globalnego zrównoważonego rozwoju (19). Jest również prawdopodobne, że różne grupy organizmów glebowych pełnią różną rolę w utrzymaniu wielofunkcyjności. Na przykład większe bezkręgowce glebowe (takie jak pierścienice, niesporczaki, stawonogi i płazińce) są odpowiedzialne za

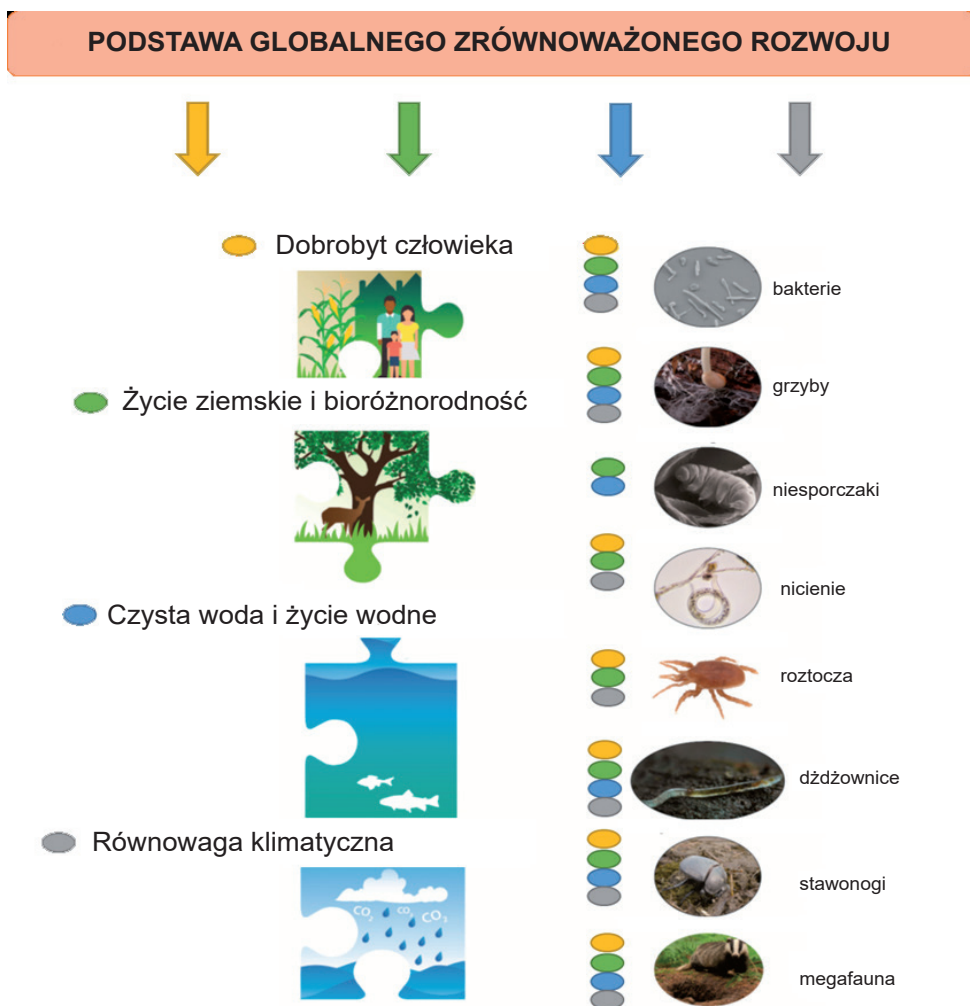
przetwarzanie dużych ilości szczątków roślin i zwierząt. Z kolei różnorodność biologiczna mikroorganizmów glebowych (takich jak protisty, bakterie i grzyby) może mieć fundamentalne znaczenie dla utrzymania wielu funkcji i przepływu energii w glebie, przy czym nadal będą one zależne od aktywności makrobioty (19, 28). Badania wskazują, że liczebność określonych i powiązanych ze sobą taksonów ma fundamentalne znaczenie dla utrzymania wysokiego potencjału funkcjonalnego gleby. Jednocześnie możliwość monitorowania kluczowych gatunków może być podstawą monitorowania funkcji ekosystemów glebowych (19).

Różnorodność gatunków jest jednym z najważniejszych atrybutów społeczności organizmów glebowych, który wpływa na stabilność i produktywność gleby. Różnice w różnorodności gatunkowej mogą być związane z kilkoma czynnikami, takimi jak lokalizacja, klimat lub typy użytków zielonych (68). Różnorodność gatunkową charakteryzuje się poprzez takie wskaźniki, jak: bogactwa gatunków Patricka, różnorodności Margalefa, różnorodności Simpsona, różnorodności Shannona-Wienera itd. (68). Wskaźniki te mogą być wykorzystywane jako stosunkowo wrażliwe miary negatywnych zmian w środowisku glebowym i całych ekosystemach.

Pomimo ogromnego postępu metodycznego badania nad różnorodnością biologiczną gleby są nadal na dość wstępnym etapie. Liczba publikacji jest wciąż ograniczona, a badania są utrudnione ze względu na złożoność ekosystemu glebowego z wieloma interakcjami między wpływającymi na siebie parametrami biotycznymi i abiotycznymi. Obecnie większość prac koncentruje się na porównaniach różnych systemów użytkowania gruntów, rodzajów nawozów, pestycydów i systemów uprawy oraz powiązanych efektach interakcji (17, 37, 60). W Polsce brak jest jak dotychczas stałego monitoringu zmian bioróżnorodności i aktywności organizmów glebowych w zależności od warunków glebowo-klimatycznych oraz pełnego usystematyzowania wpływu rolnictwa na bioróżnorodność gleb i jej funkcje.

Rola bioróżnorodności dla rolnictwa wiąże się z wkładem jaki wnoszą organizmy glebowe w cykle składników odżywczych, regulację dynamiki przemian materii organicznej gleby, sekwestrację węgla w glebie i emisję gazów cieplarnianych, modyfikację właściwości fizycznych gleby, dostępność składników pokarmowych dla roślin oraz kondycję roślin.

Organizmy glebowe odpowiadają za wiele usług ekosystemowych, które stanowią podstawę globalnego zrównoważonego rozwoju (rys. 1). Usługi ekosystemowe dostarczane przez środowisko glebowe mogą mieć charakter wspierający (np. produkcja podstawowa i różnorodność biologiczna) lub regulacyjny (np. kontrola erozji, filtracja wody, retencja składników odżywczych, regulacja gazów atmosferycznych i zwalczanie szkodników) (16, 53).



Rys. 1. Organizmy glebowe – podstawa globalnego zrównoważonego rozwoju. Kolorowe kółka obok każdego typu organizmu wskazują, do którego z czterech nadrzędnych części zrównoważonego rozwoju organizm przyczynia się bezpośrednio

Źródło: Bach i in., 2020 (3)

Wiele usług ekosystemowych gleb zależy od różnorodności biologicznej flory i fauny glebowej (6, 13). Usługi ekosystemowe zapewniane przez faunę i florę gleby to m.in.: stymulowanie obiegu składników odżywczych oraz regulacja przepływu i magazynowania wody; biologiczna regulacja występowania szkodników i chorób; utrzymanie struktury gleby; rozkład ksenobiotyków oraz regulacja składu atmosfery (33). W związku z tym gleby o dużej różnorodności biologicznej mogą wymagać mniejszych nakładów w postaci nawozów oraz różnego rodzaju agrochemikaliów.

W konsekwencji zrównoważone użytkowanie gruntów wiąże się z ochroną różnorodności biologicznej gleby, która jest warunkiem wstępnym stabilności ekosystemu przed zewnętrznymi zakłóceniami. Zdrowie gleby jest gwarancją utrzymania lub poprawy produktywności i jakości roślin, a także powietrza i wody (36).

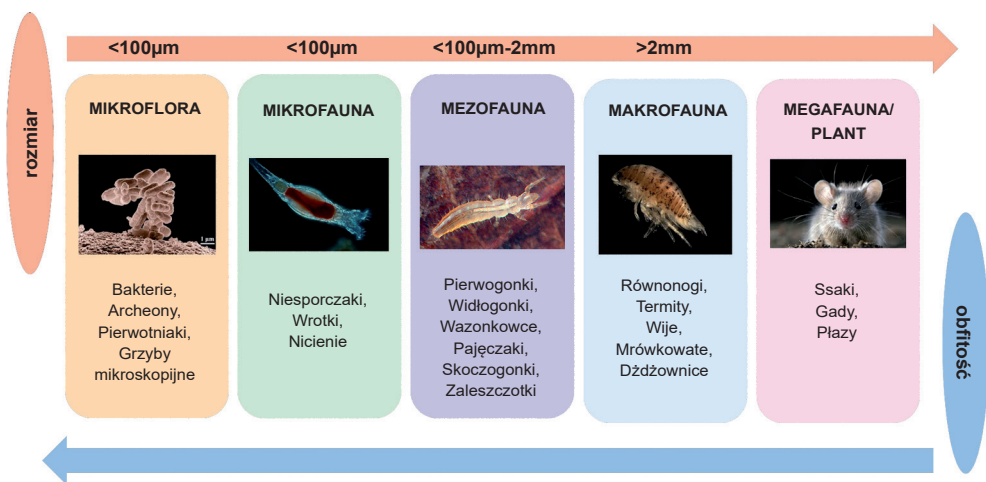
Gleby są ważnym globalnie rezerwuarem różnorodności biologicznej, w którym znajduje się co najmniej jedna czwarta wszystkich żywych organizmów na naszej planecie. Są środowiskiem życia wielu organizmów, takich jak: bakterie, grzyby, dżdżownice, wazonkowce, nicienie, stonogi, wije, skoczogonki, owady i ich larwy, roztocza i wiele innych (7, 18, 54, 66).

Zdolność gleb do świadczenia usług ekosystemowych w dużym stopniu zależy od jej różnorodności biologicznej (5), do tego stopnia, że bioróżnorodność gleby jest często uznawana za podstawę bezpieczeństwa gleby. Uważa się, że gleby o większej różnorodności biologicznej mają wrodzoną odporność na zmiany wywołane różnymi czynnikami biotycznymi i abiotycznymi. Utrata różnorodności biologicznej może prowadzić do obniżenia odporności gleby na degradację i jej obniżonej zdolności do regeneracji (1).

Wiele organizmów glebowych, w tym bakterie, grzyby, nicienie, skoczogonki, dżdżownice, bierze udział w rozkładzie i transformacji obornika, resztek poźniwnych i korzeni. Procesy te uwalniają składniki odżywcze dla roślin uprawnych, a jednocześnie przyczyniają się do zatrzymywania wody niezbędnej do prawidłowego funkcjonowania (64). Ponadto skład i różnorodność zbiorowisk organizmów glebowych są ważnymi wskaźnikami żyzności gleby. W glebach rolniczych drobnoustroje odgrywają istotną rolę we wspieraniu rozwoju roślin poprzez wiązanie azotu, solubilizację fosforu, syntezę hormonów roślinnych. Interakcje zachodzące w ryzosferze pomiędzy roślinami a mikroorganizmami wpływają korzystnie na prawidłowy rozwój korzeni i nadziemnej biomasy (63).

Elementy bioróżnorodności gleb

Organizmy glebowe tworzące różnorodność biologiczną gleb można podzielić na pięć głównych grup pod względem ich rozmiarów (rys. 2). Są to: drobnoustroje oraz mikrofauna o szerokości ciała poniżej 100 μm ; mezofauna o szerokości ciała od 100 μm do 2 mm; makrofauna i megafauna, większe niż 2 mm (tab. 1). Chociaż granice wielkości dla poszczególnych grup są powszechnie uzgodnione, klasyfikacje mogą się różnić, ponieważ niektóre taksony przekraczają granice rozmiarów i mogą być interpretowane w różnych kategoriach wielkości organizmu (62).



Rys. 2. Wraz ze wzrostem wielkości ciała zmniejsza się liczebność organizmów glebowych.
Schemat z Global Soil Biodiversity Atlas – modyfikacja własna

Źródło: Tibbett i in., 2020 (62)

Tabela 1

Hierarchia wielkości i liczebności organizmów zamieszkujących glebę

Klasyfikacja	Biomasa (g·m ⁻²)	Długość (mm)	Populacja (m ⁻²)
Mikroflora	1–100	-	10 ⁶ –10 ¹²
Mikrofauna	1,5–6,0	0,005–0,2	10 ⁶ –10 ¹²
Mezofauna	0,01–10	0,2–10	10 ² –10 ⁷
Makrofauna	0,1–2,5	10–20	10 ² –10 ⁷
Megafauna	10–40	≥20	0–10 ³

Źródło: Dindal, 1990 (21)

Mikroflora

Mikroflora glebowa to ogół mikroorganizmów glebowych (bakterii i drobnych grzybów lub grzybopodobnych protistów) pełniących szereg istotnych funkcji. Bakterie to najmniejsze i najliczniejsze organizmy żyjące w glebie. Mogą żyć zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych. Duże znaczenie dla żyzności gleby mają bakterie wiążące wolny azot atmosferyczny. Najlepiej rozpoznany mechanizm jest tworzenie układów symbiotycznego wiązania azotu atmosferycznego z bakteriami z rodzajów *Rhizobium* i *Bradyrhizobium* (32). W agroekosystemach rolniczych azot jest głównym składnikiem odżywczym wpływającym na wzrost roślin. Biologiczne wiązanie azotu jest zatem podstawowym mechanizmem zrównoważonej produkcji rolnej i zdrowego funkcjonowania ekosystemu (41).

Promieniowce, znane z produkcji szerokiej gamy metabolitów wtórnych, odgrywają również istotną rolę w środowisku glebowym. Uczestniczą w obiegu materii organicznej, hamowaniu wzrostu patogenów roślinnych w ryzosferze, biologicznym buforowaniu gleb, biologicznej kontroli środowiska glebowego poprzez wiązanie azotu i degradację związków o wysokiej masie cząsteczkowej. Dodatkowo poprawiają dostępność składników nawozowych i mikroelementów oraz promują wzrost roślin (9, 35).

Istotną rolę w środowisku glebowym odgrywają mikroorganizmy rozpuszczające fosfor. Oprócz ich wkładu w cykl krążenia fosforu, mikroorganizmy te wprowadzają do gleby wiele innych substancji stymulujących wzrost roślin, takich jak: siderofory, auksyny, cytokiny czy witaminy (8). Ich obecność w glebie jest uzależniona od wielu chemicznych i fizycznych właściwości gleb (np. odczyn, skład granulometryczny, zawartość materii organicznej, zawartość fosforu), ale także od czynników klimatycznych (tj. pora roku, temperatura, opady). Biorąc pod uwagę gleby użytkowane rolniczo, oddziaływania wyżej wymienionych czynników modyfikowane są w mniejszym lub większym stopniu przez zabiegi agrotechniczne związane z uprawą roślin, w szczególności orkę, stosowanie nawozów i chemicznych środków ochrony roślin oraz płodozmian (55).

Grzyby to grupa organizmów eukariotycznych biorących udział w rozkładzie związków organicznych, takich jak np. celuloza, ligniny. Odgrywają podstawową rolę w różnych procesach fizjologicznych, a także w pobieraniu składników mineralnych i wody, przemianach chemicznych, biosyntezie biostymulatorów wspomagających rośliny w obliczu stresów środowiskowych, takich jak: susza, zasolenie, zanieczyszczenia (70).

Mikrofauna

Mikrofauna to mikroskopijne organizmy zwierzęce o wielkości od 0,002 do 0,2 mm. Zalicza się do nich pierwotniaki (np. wiciowce, korzenionózki, orzęski) oraz organizmy tkankowe (np. nicienie). Nicienie to organizmy o nitkowatym kształcie ciała. Bytują głównie w górnej warstwie gleby, tj. 5–10 cm. Niektóre z nich żywią się szczątkami roślinnymi, przyczyniając się do ich rozkładu, inne z kolei żywią się bakteriami lub są wszystkożerne. Niektóre nicienie pasożytują na roślinach i powodują znaczne straty ekonomiczne. Jednym z bardziej znanych szkodników roślin uprawnych jest mątwik ziemniaczany (11). Istnieje pilna potrzeba znalezienia przyjaznych dla środowiska metod zwalczania szkodników, tak by praktyki te nie wiązały się ze znacznym ubytkiem bioróżnorodności gleb (51). Mikrofauna w ryzosferze odgrywa ważną rolę w uwalnianiu składników pokarmowych dostępnych dla roślin, akumulacji i stabilizacji węgla organicznego w glebie, oddziaływaniu hormonalnym na korzenie, kształtowaniu różnorodności mikroorganizmów i stabilności funkcjonalnej oraz bioremediacji skażonych gleb (14).

Mezofauna

Przedstawicielami tej grupy są między innymi skoczogonki i roztocza. Ich obecność w glebie wykazuje znaczną sezonowość i uzależniona jest od doboru roślin w płodozmianie, systemu uprawy roli, zmian klimatycznych (susza, nadmierna wilgotność), odczynu gleby, zawartości próchnicy oraz typu gleby (2, 65).

Mezofauna glebowa odżywia się innymi organizmami glebowymi, mikroorganizmami, materiałem zwierzęcym, żywym lub rozkładającym się materiałem roślinnym, grzybami, algami, porostami, zarodnikami i pyłkami (12). Odgrywa ona ważną rolę w obiegu węgla, uczestniczy w procesach glebotwórczych i tworzeniu próchnicy. Ponadto przyspiesza tempo dekompozycji materii organicznej oraz wpływa na uwalnianie pierwiastków niezbędnych do rozwoju żywych organizmów. Mezofauna sprzyja powstawaniu struktury gruzelkowej gleby oraz odpowiada za utrzymanie równowagi biologicznej w glebie uprawnej (10).

Makrofauna

Makrofauna glebowa, obejmująca między innymi dżdżownice i mrówki, w znacznym stopniu przyczynia się do rozwoju struktury gleby. W zrównoważonych agrosystemach dżdżownice korzystnie wpływają na produkcję roślinną, powodując zwiększoną aktywność wiązania azotu, większe ilości dostępnych makro- i mikroelementów, a także zwiększoną biosyntezę regulatorów wzrostu roślin. Dżdżownice są wrażliwe na poziom materii organicznej w glebie i zwykle występują obficie w zrównoważonych systemach gospodarowania, gdzie dostępna jest wystarczająca ilość resztek roślinnych (58).

Z kolei mrówki są głównymi drapieżnikami małych bezkręgowców i zapewniają kilka funkcji w agroekosystemach, takich jak: zapylenie roślin, mieszanie gleby, bioindykacja i regulacja szkodliwych dla upraw owadów. Ścieżki tworzone przez mrówki przy budowie gniazd pomagają napowietrzać glebę i zwiększają jej porowatość, co wpływa na lepszą infiltrację i cyrkulację wody oraz zmniejsza ryzyko erozji (20, 69). Mrówki i termyty zwalczają wiele szkodników w uprawach takich roślin, jak: mango, cytrusy, kokosy, orzechy nerkowca i bawełna. Rozsądne stosowanie środków owadobójczych i zmiany w praktykach gospodarowania, takich jak uprawa roli i rotacja upraw, pozwalają zachować korzystne populacje mrówek w różnych agroekosystemach (15, 49).

Megaafauna

Megaafauna glebowa to grupa większych zwierząt. Powoduje ona przemiany i mieszanie gleby, wpływa na jej strukturę, napowietrzanie i drenaż, a ponadto wspomaga zachowanie równowagi między różnymi elementami środowiska przyrodniczego. Duże zwierzęta roślinożerne wywierają wpływ na siedliska oraz

regulują występowanie innych gatunków poprzez konkurencję, a drapieżniki odgrywają ważną rolę w stabilności ekosystemu, regulując liczebność i zachowania mniejszych roślinożerców (42).

Utrata megafauny może skutkować uproszczeniem ekosystemów z kilkoma międzygatunkowymi interakcjami, krótszymi łańcuchami pokarmowymi oraz mniejszą nadmiarowością funkcjonalną (zdolnością wypełniania tych samych funkcji przez różne taksony) i odpornością. Utrata megafauny może doprowadzić do całkowitej restrukturyzacji społeczności organizmów glebowych, prowadząc do słabszej odporności ekosystemu na warunki środowiskowe (22, 42).

Różnorodność biologiczną gleby można opisać na wiele sposobów, w tym jako:

- różnorodność ekosystemów, która obejmuje różnorodność siedlisk występujących w glebie;
- różnorodność gatunkowa tzn. różnorodność i liczebność różnych typów organizmów zamieszkujących glebę;
- różnorodność genetyczna, czyli różnorodność genów występujących wewnątrz jednego gatunku, zmienność występująca w różnych populacjach tego samego gatunku, lub różnorodność genów w całej zbiorowości organizmów;
- różnorodność fenotypowa oparta na aspektach morfologicznych, biochemicznych lub fizjologicznych organizmów w glebie, zależna od czynników genetycznych i środowiskowych;
- różnorodność funkcjonalna to różnorodność funkcji pełnionych przez organizmy, takich jak np. nityfikacja i rozdrabnianie ściółki (61).

Wpływ praktyk rolniczych oraz czynników abiotycznych na bioróżnorodność gleby

Rolnictwo jest jednym z głównych czynników wpływających na zachwianie równowagi biologicznej i powodującym ograniczenie różnorodności biologicznej. Około 40% powierzchni ziemi na świecie zostało przekształcone w użytkowanie rolnicze (25). Oprócz utraty różnorodności biologicznej związanej z utratą siedlisk, intensyfikacja rolnictwa doprowadziła do silnego spadku różnorodności biologicznej terenów rolniczych (23). Intensywne stosowanie pestycydów i nawozów syntetycznych prowadzi do biologicznego zubożenia środowiska glebowego. Konieczność wyżywienia coraz większej liczby ludzi, w połączeniu ze zmianą diety w kierunku większej ilości białka zwierzęcego, wywiera dodatkową presję na grunty rolne i obszary przyrodnicze (23).

Naukowcy coraz częściej wskazują, że system rolniczy oparty na wykorzystaniu potencjału różnorodności biologicznej stwarza możliwości uzyskania odpornego systemu, w którym zarówno produkcja żywności, jak i przyroda mogą się rozwijać (23).

Praktyki rolnicze mają znaczny wpływ na różnorodność biologiczną w glebie. Główną przyczyną jest ścisły związek między różnorodnością biologiczną gleby,

a takimi cechami gleby, jak zawartość materii organicznej lub odczyn gleby, chociaż związki te nie zostały jeszcze w pełni wyjaśnione. Straty węgla, będącego źródłem energii dla organizmów glebowych, mogą prowadzić do zmniejszenia różnorodności biologicznej. Ponadto powszechne stosowanie nawozów, pestycydów i herbicydów w ramach intensyfikacji rolnictwa jest istotną przyczyną utraty bioróżnorodności gleby. Poza tym do utraty bioróżnorodności gleby prowadzą: uprawa monokulturowa, wynoszenie resztek poźniwnych, stymulowanie erozji gleby oraz jej zagęszczenie nadmiernymi przejazdami.

Nowoczesne rolnictwo powinno sprzyjać ochronie gleby, poprawie jej parametrów oraz zachowaniu jej żyzności. Niezwykle istotne jest ograniczenie strat glebowej materii organicznej oraz poprawa struktury gleby. Ze względu na realizujący się scenariusz klimatyczny kluczowe jest ograniczanie strat wody w glebie oraz poprawa jej zdolności infiltracyjnej i retencyjnej. Praktyki zalecane dla utrzymania potencjału produkcyjnego oraz tzw. zdrowotności gleby, związanej z życiem biologicznym gleby, obejmują przejście z upraw konwencjonalnych na uprawę bezorkową, powszechne wykorzystanie resztek poźniwnych, wprowadzanie roślin okrywowych oraz bardziej precyzyjne stosowanie składników nawozowych (38, 50). Szereg praktyk rolniczych promuje różnorodność składu mikroorganizmów w glebie. Obiecującym działaniem jest stosowanie poplonów jako okrywy roślinnej podlegającej przyoraniu. Technika ta, stosowana zarówno w rolnictwie konwencjonalnym, jak i organicznym, powoduje ponowne wykorzystanie składników odżywczych oraz przyczynia się do rozwoju pożytecznej fauny i flory. Wykazano, że gleby poddane działaniu roślin okrywowych mają większą złożoność i różnorodność w obrębie zbiorowisk drobnoustrojów niż gleby uprawne. Według Tahat i in. (59), rośliny okrywowe w większym stopniu stymulują zdrowotność gleby, w porównaniu z innymi zrównoważonymi technikami, w tym stosowaniem dodatków organicznych i uprawą minimalną. Dotychczasowe dane wskazują również, że rolnictwo ekologiczne poprawia biologiczny stan gleby poprzez zwiększenie liczebności, różnorodności i aktywności mikroorganizmów (59).

Biorąc pod uwagę znaczenie fauny i flory glebowej, jednym z kluczowych wyzwań w badaniach rolniczych jest zrozumienie i przewidywanie wpływu poszczególnych praktyk na ekologię gleby, nie tylko dla oceny wpływu uprawy na organizmy i funkcje gleby, ale także dla projektowania najbardziej korzystnych systemów uprawy oraz pełnego wykorzystania różnorodności biologicznej gleby (24).

Okresy suszy i związane z tym stres wodny, a następnie gwałtowne nawodnienie środowiska glebowego mogą mieć szybkie odbicie w strukturze społeczności mikroorganizmów. Większość organizmów glebowych jest zależna od warunków wilgotnościowych. Zmieniony układ warunków pogodowych może mieć istotny wpływ na liczebność i strukturę społeczności mikroorganizmów, wpływając w ten sposób na ważne procesy ekosystemowe, w których pośredniczą organizmy glebowe. Niektóre z badań wskazują na szkodliwy wpływ suszy na określone populacje mikroorganizmów w glebie i ich biomasę, a także zmniejszenie różnorodności społeczności drobnoustrojów. Ponadto wyniki badań Lindberga i in. (40) wskazują, że susza

powoduje spadek liczebności mikrostawonogów w glebie, ale w niewielkim stopniu wpływa na skład zbiorowiska nicieni. Z kolei badania Sieberta i in. (56) wykazały, że susza miała szkodliwy wpływ na aktywność żerowania bezkręgowców w glebie i uproszczoną strukturę społeczności nicieni, podczas gdy aktywność drobnoustrojów glebowych i biomasa pozostały nienaruszone. Różnice w wynikach badań wskazują na różną odporność gleb na warunki suszy pod względem reakcji mikroorganizmów.

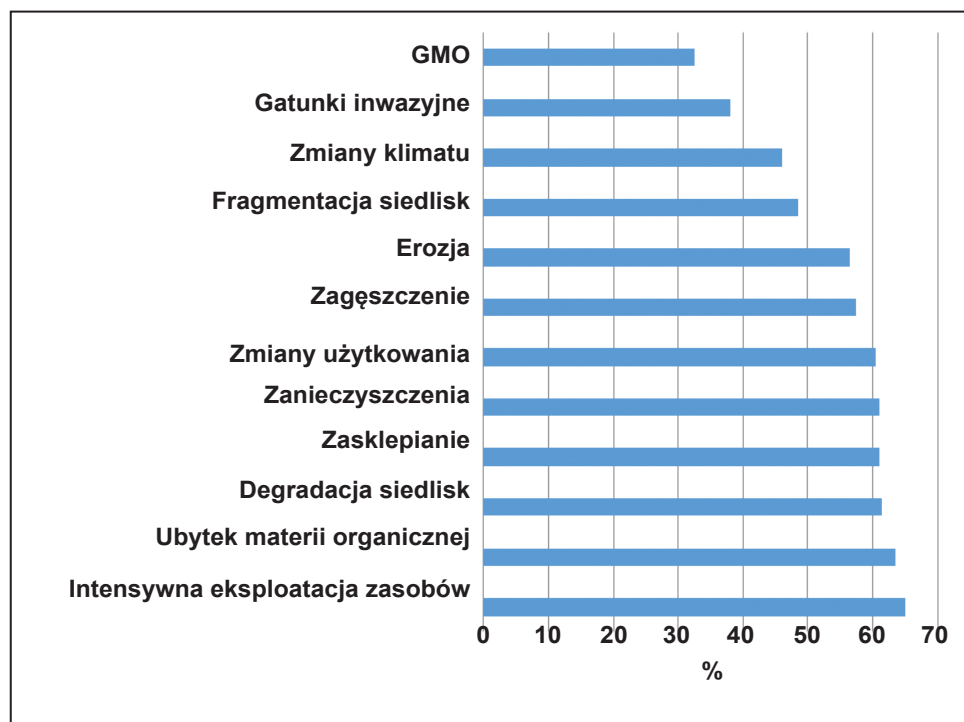
Siebielec i in. (57) ocenili wpływ długości suszy na dynamikę azotu mineralnego, aktywność enzymatyczną i różnorodność bakterii w glebach o różnej teksturze (piasek słabogliniasty i pył gliniasty). Długość suszy silnie modyfikowała aktywność dehydrogenaz, fosfatazy kwaśnej i zasadowej oraz różnorodność funkcyjną i genetyczną bakterii. Gleba gliniasta wykazywała większą odporność na hamowanie aktywności enzymatycznej. Po nawadnianiu, zarówno po miesięcznej, jak i dwumiesięcznej suszy, aktywność enzymów i nityfikacja w dużej mierze powróciły w tej glebie do wyjściowego poziomu.

Badania wykazały, że zastosowane warunki stresowe wpływały na aktywność mikrobiologiczną gleb, a większa ilość iłu koloidalnego i węgla w glebie (pochodzącego z kompostu) sprzyjały odbudowie aktywności po okresach suszy. Podobnie jak w przypadku enzymów glebowych poziom odbudowy nityfikacji był większy w glebie gliniastej i po dodaniu kompostu. Dodatek kompostu do gleby ponadto znacznie złagodził zahamowanie aktywności mikroorganizmów w okresach suszy. Susza spowodowała znaczne zmiany w różnorodności funkcjonalnej zbiorowisk bakteryjnych oraz zmiany we względnej liczebności poszczególnych typów bakterii, na przykład przyrost udziału *Acidobacteria* lub spadek *Verrucomicrobia*. Badania wyraźnie dowodzą większej podatności zbiorowisk drobnoustrojów na suszę w glebach piaszczystych oraz istotnej roli egzogennej materii organicznej w ochronie aktywności mikroorganizmów w okresach suszy.

Według Gleesona i in. (31), w warunkach nawodnienia gleby, po długim okresie suszy ma miejsce liza komórek mikroorganizmów połączona z uwolnieniem z nich wewnątrzkomórkowych enzymów. Ponadto w takich warunkach dochodzi do wzrostu szybkości mineralizacji zarówno węgla, jak i azotu. Z drugiej strony niektóre drobnoustroje, zwłaszcza formy przetrwalnikowe, mogą w suchych środowiskach przetrwać przez wiele lat w stanie anabiozy (39). Gianfreda i Bollag (30) wykazali z kolei, iż spadek zawartości wody w glebie może również prowadzić do powstania hipertonicznego ciśnienia osmotycznego, powodując w konsekwencji obniżenie aktywności mikrobiologicznej bądź wysuszenie komórek bakteryjnych. Należy również zwrócić uwagę na interakcje pomiędzy odpornością roślin na warunki suszowe a charakterystyką mikrobiologiczną gleb w warunkach suszy i aktywnością pewnych grup mikroorganizmów. Mikroorganizmy mogą wspomagać odporność roślin na suszę poprzez np. produkcję polisacharydów poprawiających strukturę gleby, syntezę deaminaz, produkcję kwasu indoliloctowego i proliny, poprawę cyrkulacji wody przez grzyby (44).

Interakcja z innymi procesami degradacji gleb

Spadek różnorodności biologicznej gleby jest zwykle związany z innym typami degradacji gleby, takimi jak erozja, zubożenie materii organicznej, zasolenie, zanieczyszczenie i zagęszczenie. Wzajemne interakcje pomiędzy formami degradacji gleb wciąż nie są wystarczająco poznane i zwaloryzowane. Dlatego w dotychczasowej literaturze wzajemne relacje między procesami degradacji gleb często oceniano metodą ekspercką (rys. 3) (33).



Rys. 3. Potencjalne zagrożenia dla bioróżnorodności gleb związane z innymi procesami degradacji, na podstawie opinii ekspertów Grupy Roboczej ds. Bioróżnorodności Gleb Komisji Europejskiej – wyrażone jako procent maksymalnego możliwego wyniku, modyfikacja własna

Źródło: Jeffery i Gardi, 2010 (33)

Przykładowo można założyć, że związek pomiędzy erozją gleby a jej różnorodnością biologiczną jest dość ścisły. Intensywna utrata gleby w procesie erozji z pewnością ma wpływ na organizmy zamieszkujące ten ekosystem. Z drugiej strony różnorodność gatunków żyjących w glebie wpływa zarówno na stabilność agregatów, jak i na infiltrację wody poprzez ich ruch i bytowanie, przeciwdziałając zjawiskom erozji (67). Korzyści z poprawy struktury gleby obejmują bowiem zmniejszone ryzyko erozji.

Niemniej do tej pory powiązania te były słabo analizowane, głównie ze względu na złożony charakter relacji. Niektóre organizmy, na przykład ssaki żyjące w glebie, mogą nasilać erozję poprzez destabilizację struktury gleby, z kolei grzyby zmniejszają utratę gleby, ponieważ wzmacniają wiązania między cząstkami gleby poprzez gęstą sieć grzybni (43).

Spadek bioróżnorodności gleb może negatywnie wpływać na rozkład zanieczyszczeń w glebie. Zmiany klimatu lub intensywna produkcja rolnicza powodują ograniczenie różnorodności biologicznej, a w konsekwencji ograniczenie nadmiarowości funkcjonalnej, co oznacza na przykład zmniejszony rozkład trwałych zanieczyszczeń gleb (61).

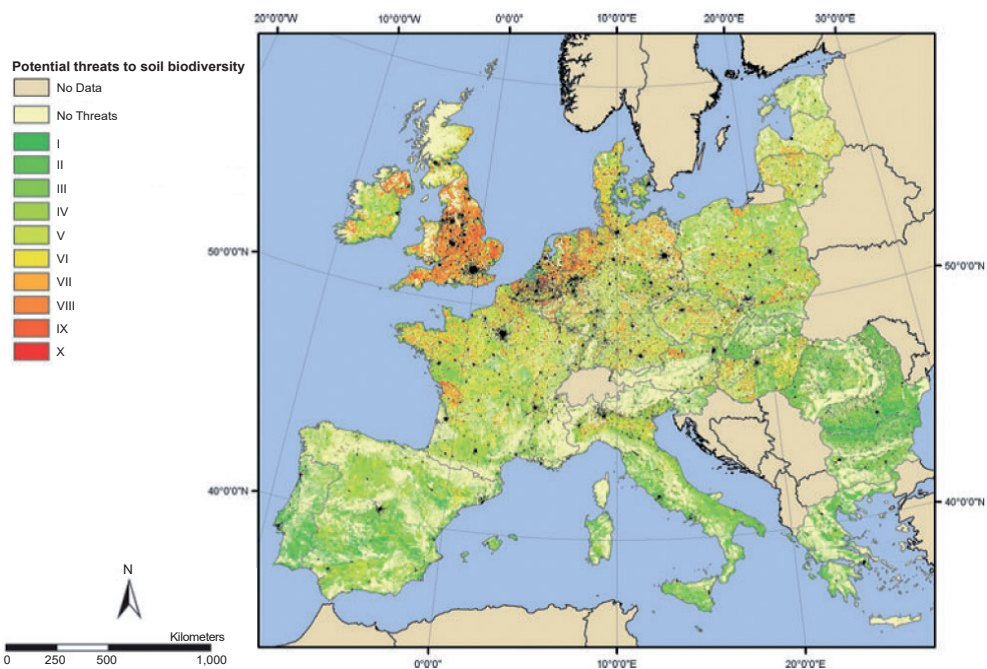
Inicjatywy dotyczące bioróżnorodności gleb i bazy danych o bioróżnorodności gleb

Globalna inicjatywa dla bioróżnorodności gleb (ang. *Global Soil Biodiversity Initiative* – GSBI) została utworzona w celu nawiązania współpracy naukowców, mając na celu informowanie opinii publicznej, propagowanie tych informacji w polityce środowiskowej oraz ogólnie tworzenie platformy dla obecnego i przyszłego zrównoważenia gleb. Działalność GSBI polega na:

- integracji wiedzy na temat różnorodności biologicznej gleby i powiązanych usług ekosystemowych;
- promocji przykładów możliwych rozwiązań dla utrzymania i poprawy bioróżnorodności gleby;
- wymianie wiedzy pomiędzy różnymi interesariuszami w celu ustalenia programów badawczych i instrumentów politycznych;
- forum dyskusji dla grup roboczych IPBES (ang. *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) zajmujących się różnorodnością biologiczną gleby i usługami ekosystemowymi;
- sponsorowaniu warsztatów poświęconych bioróżnorodności;
- interakcji z Globalnym Partnerstwem dla Gleb;
- organizacji grup roboczych w celu integracji wyników badań między dyscyplinami.

Kluczowe dla oceny zmian bioróżnorodności gleby oraz wpływu różnych scenariuszy rozwoju lub zmian klimatu na bioróżnorodność są bazy danych. Niestety z uwagi na różnorodność cech opisujących bioróżnorodność gleby oraz dynamiczny charakter wielu z nich brak jest wiarygodnych baz danych przestrzennych charakteryzujących bioróżnorodność gleb. Elementy oceny bioróżnorodności nie zagościły jak dotychczas na stałe w programach monitoringu jakości i funkcji gleb. Ponadto do chwili obecnej brak jest pomiędzy ekspertami ustaleń co do optymalnego zestawu parametrów, które opisywałyby stan i kierunki zmian bioróżnorodności gleb, co wiąże się z trudnościami w wycenie zysków i strat związanych ze spadkiem wartości danego parametru.

Jedną z niewielu prób przestrzennego przedstawienia zagrożeń dla bioróżnorodności gleb na poziomie Europy podjęli Gardi i in. (27) (rys. 4). Ich mapa jest wynikiem połączenia analiz eksperckich (33) oraz dostępnych baz danych przestrzennych, charakteryzujących w możliwie największym stopniu procesy degradacji, wymienione na rysunku 3. Dla przykładu, w celu przestrzennego przedstawienia intensywności eksploatacji zasobów wykorzystano dane o średnim wykorzystaniu azotu, a dla scharakteryzowania erozji gleb wykorzystano dane opracowane na podstawie modeli PESERA (ang. *Pan European Soil Erosion Risk Assessment*) oraz modelu RUSLE (ang. *Revised Universal Soil Loss Equation*).



Rys. 4. Mapa syntetycznego wskaźnika presji na bioróżnorodność gleb w Europie
Źródło: Gardi i in., 2013 (27)

Literatura

1. Allison S.D., Martiny J.B.H.: Resistance, resilience, and redundancy in microbial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**: 11512-11519.
2. Alvarez T., Frampton G., Goulson D.: Epigeic Collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agric. Ecos. Environ.* 2001, **83**: 95-110.
3. Bach E.M.; Ramirez K.S.; Fraser T.D. Wall D.H.: Soil Biodiversity Integrates Solutions for a Sustainable Future. *Sustainability*, 2020, **12**: 2662.

4. Bahram M., Hildebrand F., Forslund S.K., Anderson J.L., Soudzilovskaia N.A., Bodegom P.M., Bengtsson-Palme J., Anslan S., Coelho L.P., Harend H., Huerta-Cepas J., Medema M.H., Maltz M.R., Mundra S., Olsson P.A., Pent M., Pöhlme S., Sunagawa S., Ryberg M., Tedersoo L., Bork P.: Structure and function of the global topsoil microbiome. *Nature*, 2018, **560**: 233-237.
5. Bardgett R.D., Van der Putten W.H.: Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, 2014, **515**: 505-511.
6. Barrios E.: Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, 2007, **64**: 269-285.
7. Bartkowski B., Bartke S., Helming K., Paul C., Techen A.K., Hansjürgens B.: Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. *PeerJ*, 2020, **8**: e8749.
8. Bhattacharyya P.N., Jha D.K.: Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR): Emergence in Agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2012, **28**: 1327-1350.
9. Bhatti A.A., Haq S., Bhat R.A.: Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. *Microbial Pathogenesis*, 2017, **111**: 458-467.
10. Boczek J., Błaszczak C.: Roztocze (Acari) – znaczenie w życiu i gospodarce człowieka. Wyd. SGGW, Warszawa, 2005, ss. 284.
11. Boczek J., Lewandowski M.: Nauka o szkodnikach roślin uprawnych. Wyd. SGGW, Warszawa, 2016, ss. 411.
12. Buscot F., Varna A.: Microorganisms in Soil: Roles in Genesis and Functions. *Soil Biology*. Springer, Berlin, 2005, ss. 425.
13. Brussaard L.: Ecosystem Services Provided by the Soil Biota. W: *Soil Ecology and Ecosystem Services* Soil Ecology and Ecosystem Services, Wall D.H. (ed). 2013, p. 45-58.
14. Chen X., Liu M., Hu F., Mao X., Li H.: Contributions of soil micro-fauna (protozoa and nematodes) to rhizosphere ecological functions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27(8)**: 3132-3143.
15. Choate B., Drummond F.: Ants as biological control agents in agricultural cropping systems. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2011, **4**: 157-180.
16. Costanza R., Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van de Belt M.: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, **387**: 253-60.
17. Cullman S.W., Young-Mathews A., Hollander A.D., Ferris H., Sánchez-Moreno S., O'Geen A.T., Jackson L.E.: Biodiversity is associated with indicators of soil ecosystem functions over a landscape gradient of agricultural intensification. *Landscape Ecology*, 2010, **25**: 1333-1348.
18. Decaëns T., Jiménez J.J., Gioia C., Measey G.J., Lavelle P.: The values of soil animals for conservation biology. *Eur. J. Soil Biol.*, 2006, **42**: 23-38.
19. Delgado-Baquerizo M., Reich P.B., Trivedi C., Eldridge D.J., Abades S., Alfaro F.D., Bastida F., Berhe A.A., Cutler N.A., Gallardo A., Garcia-Velazquez L., Hart S.C., Hayes P.E., He J.Z., Hseu Z.Y., Hu H.W., Kirchmair M., Neuhauser S., Perez C.A., Reed S.C., Santos F., Sullivan B.W., Trivedi P., Wang J.T., Weber-Grullon L., Williams M.A., Singh B.K.: Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nat. Ecol. Evol.*, 2020, **4**: 210-220.
20. Diamé L., Rey J.R., Vayssières J.F., Grechi I., Chailleux A., Diarra K.: Major functional elements in fruit agro-ecosystems and biological control agents. *Sustainability*, 2017, **10**: 23.
21. Dindal D.L. *Soil biology guide*. Wiley-Interscience, 1990, pp. 1376.
22. Elmhagen B., Ludwig G., Rushton S.P., Helle P., Lindén H.: Top predators, mesopredators and their prey: Interference ecosystems along bioclimatic productivity gradients. *Journal of Animal Ecology*, 2010, **79(4)**: 785-794.
23. Erisman J.W., van Eekeren N., de Wit J., Koopmans C., Cuijpers W., Oerlemans N., Koks B.J.: Agriculture and biodiversity: a better balance benefits both. *Agriculture and Food*, 2016, **1(2)**: 157-174.
24. Estrade J.R., Anger C., Bertrand M., Richard G.: Tillage and soil ecology: Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 2010, **111(1)**: 33-40.
25. Fahrig L., Baudry J., Brotons L., Burel F.: Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*, 2011, **14**: 101-112.

26. Franco A.L.C., Sobral B.W., Silva A.L.C., Wall D.H.: Amazonian deforestation and soil biodiversity. *Conserv. Biol.*, 2019, **33**: 590-600.
27. Gardi C., Jeffery S., Saltelli A.: An estimate of potential threats levels to soil biodiversity in EU. *Global Change Biology*, 2013, doi.org/10.1111/gcb.12159.
28. Geisen S.: The bacterial-fungal energy channel concept challenged by enormous functional versatility of soil protists. *Soil Biol. Biochem.*, 2016, **102**: 22-25.
29. Geisen S., Snoek L.B., Hooven F.C., Duyts H., Kostenko O., Bloem J., Martens H., Quist C.W., Helder J.A., Van der Putten W.H.: Integrating quantitative morphological and qualitative molecular methods to analyze soil nematode community responses to plant range expansion. *Methods in Ecology and Evolution*, 2018, **9**: 1366-1378.
30. Gianfreda L., Bollag J.M.: Enzyme activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **8**: 123-192.
31. Gleeson D.B., Herrmann A.M., Livesley S.J., Murphy D.V.: Influence of water potential on nitrification and structure of nitrifying bacterial communities in semiarid soils. *Appl. Soil Ecol.*, 2008, **40**: 189-194.
32. Graham P.H., Vance C.P.: Legumes: importance and constraints to greater use. *Pl. Physiol.*, 2003, **131**: 872-877.
33. Jeffery S., Gardi C.: Soil biodiversity under threat—A review. *Acta Societatis Zoologicae Bohemicae*, 2010, **74**: 7-12.
34. Jeffery S., Gardi C., Jones A.: European Atlas of Soil Biodiversity. European Commission, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN: 978-92-79-15806-3, 2010.
35. Jeffrey L.S.H., Sahilah A.M., Son R., Tosiah S.: Isolation and screening of actinomycetes from Malaysian soil for their enzymatic and antimicrobial activities. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 2007, **35**: 159-164.
36. Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift M.J.: Soil health in agricultural systems. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.*, 2008, **363(1492)**: 685-701.
37. König S., Wubet T., Dormann C.F., Hempel S., Renker C., Buscot F.: Taqman real-time PCR assays to assess arbuscular mycorrhizal responses to field manipulation of grassland biodiversity: effects of soil characteristics, plant species richness, and functional traits. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**: 3765-3775.
38. Lal R.: Challenges and opportunities in soil organic matter research. *European Journal of Soil Science*, 2009, **60(2)**: 158-169.
39. Libudzisz Z., Kowal K., Żakowska Z.: *Mikrobiologia techniczna. Mikroorganizmy i środowiska ich występowania*. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa, 2007, ss. 356.
40. Lindberg N., Engtsson J.B., Persson T.: Effects of experimental irrigation and drought on the composition and diversity of soil fauna in a coniferous stand. *Journal of Applied Ecology*, 2002, **39**: 924-936.
41. Mahmud K., Makaju S., Ibrahim R., Missaoui A.: Current Progress in Nitrogen Fixing Plants and Microbiome Research. *Plants*, 2020, **9**: 97.
42. Malhi Y., Doughty C.E., Galetti M., Smith F.A., Svenning J.C., Terborgh J.W.: Megafauna and ecosystem function from the Pleistocene to the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113(4)**: 838-846.
43. Mardhiah U., Caruso T., Gurnell A., Rillig M.C.: Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae reduce soil erosion by surface water flow in a greenhouse experiment. *Applied Soil Ecology*, 2016, **99**: 137-140.
44. Milosević N.A., Marinković J.B., Tintor B.B.: Mitigating abiotic stress in crop plants by microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, **123**: 17-26.
45. Mueller R.C., Paula F.S., Mirza B.S., Rodrigues J.L.M., Nüsslein K., Bohannan B.J.M.: Links between plant and fungal communities across a deforestation chronosequence in the Amazon rainforest. *ISME J.*, 2014, **8**: 1548-1550.
46. Nielsen U.N., Wall D.H., Six J.: Soil biodiversity and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 2015, **40**: 63-90.
47. Nilsson M., Griggs D., Visbeck M.: Policy: Map the interactions between Sustainable Development Goals. *Nature*, 2016, **534**: 320-322.

48. Orgiazzi A., Panagos P., Yigini Y., Dunbar M.B., Gardi C., Montanarella L., Ballabio C.: A knowledge-based approach to estimating the magnitude and spatial patterns of potential threats to soil biodiversity, *Science of The Total Environment*, 2016, **545–546**: 11-20.
49. Orhue E.R., Uzu O.F., Osaigbovo U.A.: Influence of activities of termites on some physical and chemical properties of soils under different land use patterns: A review. *International Journal of Soil Science*, 2007, **2**: 1-14.
50. Palm C., Blanco-Canqui H., DeClerck F., Gatere L., Grace P.: Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2013, **187**: 87-105.
51. Perry R.N., Moens M.: Introduction to plant-parasitic nematodes; modes of parasitism. W: *Genomics and Molecular Genetics of Plant – Nematode Interactions* (J.T. Jones, L. Gheysen and C. Fenoll, eds), Heidelberg, Springer, 2011, p. 3-20.
52. Purvis A., Hector A.: Getting the measure of biodiversity. *Nature*, 2000, **405**: 212-219.
53. Robinson D.A., Hockley N., Dominati E., Lebron I., Scow K.M., Reynolds B., Emmett B.A., Keith A.M., de Jonge L.W., Schjonning P., Moldrup P., Jones S.B., Tuller M.: Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach. *Vadose Zone Journal*, 2012, **11**: 6.
54. Schulte R.P.O., Creamer R.E., Donnellan T., Farrelly N., Fealy R., O'Donoghue C., O'hUallachain D.: Functional land management: a framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental Science and Policy*, 2014, **38**: 45-58.
55. Sharma S., Kumar V., Tripathi R.B.: Isolation of Phosphate Solubilizing Microorganism (PSMs) from soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research*, 2011, **1(2)**: 90-95.
56. Siebert J., Sünemann M., Auge H., Cesarz S., Guerrero-Ramírez N.R., Eisenhauer N.: The effects of drought and nutrient addition on soil organisms vary across taxonomic groups, but are constant across seasons. *Scientific Reports*, 2019, **9**: 639.
57. Siebielec S., Siebielec G., Klimkowicz-Pawlas A., Gałazka A., Grządziel J., Stuczyński T.: Impact of a water stress on microbial community and activity in sandy and loamy soils. *Agronomy*, 2020, **10**: 1429.
58. Soto A., Mininni A.N., Ricciuti P.: Soil Macrofauna: A key factor for increasing soil fertility and promoting sustainable soil use in fruit orchard agrosystems. *Agronomy*, 2020, **10(4)**: 456.
59. Thahat M.M., Alananbeh K.M., Othman Y.A., Leskovar D.I.: Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 2020, **12**: 4859.
60. Thiele-Bruhn S., Bloem J., de Vries F.T., Kalbitz K., Wagg C.: Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Curr. Opin. Environ. Sustain*, 2012, **4**: 523-528.
61. Tibbett M.: Decline in soil biodiversity. W: Stolle J. et al. *Soil threats in Europe. Status, methods, drivers and effects on ecosystem services*. JRC Technical Reports. European Union, 2016, s. 146-154.
62. Tibbett M., Fraser T.D., Duddigan S.: Identifying potential threats to soil biodiversity. *PeerJ*, 2020, **8**: e9271.
63. Tilak K.V.B.R., Ranganayaki N., Pal K.K., De R., Saxena A.K., Nautiyal C.S.: Diversity of plant growth and soil health supporting bacteria. *Current Science*, 2005, **89(1)**: 136-150.
64. Tilman D., Reich P., Isbell F.: Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance or herbivory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, **109**: 10394-10397.
65. Wardowski J.: Wpływ uproszczeń w uprawie roli pod pszenicę ozimą na zgrupowania stawonogów epigeicznych i glebowych. *Monografie CVII, Wydawnictwo UP Wrocław*, 2010, ss. 141.
66. Vogel H.J., Bartke S., Daedlow K., Helming K., Kögel-Knabner I., Lang B., Rabot E., Russell D., Stöbel B., Weller U., Wiesmeier M., Wollschläger U.: A systemic approach for modeling soil functions. *Soil*, 2018, **4**: 83-92.
67. Wall D.H., Nielsen U.N., Six J.: Soil biodiversity and human health. *Nature* 2015, **528**: 69-76.
68. Wang C.T., Long R.J., Wang Q.J., Ding L.M., Wang M.P.: Effects of altitude on plant-species diversity and productivity in an alpine meadow, Qinghai-Tibetan plateau. *Aust. J. Bot.*, 2007, **55**: 110-117.

69. Warren R.J., Bradford M.A.: Ant colonization and coarse woody debris decomposition in temperate forests. *Insectes Sociaux*, 2011, **59**: 215-221.
70. Y uvaraj M., Ramasamy M.: Role of Fungi in Agriculture. Open access peer-reviewed chapter, 2020, doi:10.5772/intechopen.89718
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Grzegorz Siebielec¹, mgr inż. Sylwia Siebielec²
¹Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów,
²Zakład Mikrobiologii Rolniczej,
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 47 86 910
email: gs@iung.pulawy.pl; ssiebielec@iung.pulawy.pl

AUTOR

ORCID

Grzegorz Siebielec

0000-0001-8089-6123

Sylwia Siebielec

0000-0001-9516-1939