Ochrona bioróżnorodności gleby warunkiem zdrowia obecnych i przyszłych pokoleń

Puławy 2019

INSTYTUT UPRAWY NAWOŻENIA I GLEBOZNAWSTWA
PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
INSTITUTE OF SOIL SCIENCE AND PLANT CULTIVATION
STATE RESEARCH INSTITUTE

Dyrektor: *prof. dr hab. Wiesław Oleszek*

Praca powstała w wyniku realizacji projektu finansowanego przez Unię Europejską z Funduszu Spójności w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014-2020 oraz dofinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Tytuł projektu: „Ochrona bioróżnorodności gleby warunkiem zdrowia obecnych i przyszłych pokoleń"
Nr POIS.02.04.00-00-0082/16-01

Beneficjent projektu: Instytut Ogrodnictwa,
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3,
96-100 Skierniewice

Koordynator projektu: *dr Beata Kowalska*

Redaktorzy: *prof. dr hab. Janusz Podleśny*
dr Beata Kowalska

Recenzenci: *dr hab. Alicja Niewiadomska*
prof. dr hab. Wiesław Barabasz

Projekt okładki: *dr Iwona Sowik*

Autorzy zdjęć na okładce: *dr Beata Kowalska,*
dr hab. Urszula Smolińska,
dr hab. Magdalena Szczech

Opracowanie redakcyjne i techniczne: *mgr Katarzyna Mikulska*

ISBN 978-83-7562-318-5

Egzemplarz bezpłatny

Druk: Mała Poligrafia IUNG-PIB w Puławach
tel.: (81) 4786720, (81) 4786730
e-mail: duw@pulawy.pl; http://www.iung.pulawy.pl
Nakład 1300 egz., B-5

WSTĘP

Celem niniejszej monografii jest edukacja w zakresie ochrony gleb użytkowanych rolniczo, ze szczególnym uwzględnieniem znaczenia bioróżnorodności mikroorganizmów glebowych oraz ich udziału w poprawie jakości i żyzności gleb. Monografia skierowana jest do osób biorących udział w produkcji żywności oraz wywierających największy wpływ na środowisko glebowe.

Jakość użytków rolnych w Polsce jest niższa niż średnia w Europie. Wynika to z bardzo dużego udziału gleb lekkich, zawierających mało próchnicy oraz kwaśnych i bardzo kwaśnych. W wyniku stosowania intensywnych metod uprawy w wielu rejonach kraju następuje zmniejszenie żyzności gleb charakteryzujące się m.in. ograniczeniem bioróżnorodności, nagromadzeniem w glebach mikroorganizmów szkodliwych i patogenów roślin oraz pestycydów, ich pochodnych oraz innych toksyn. Można przypuszczać, że zjawiska te będą się nasilały wskutek zmian klimatycznych, tj. wzrostu temperatury i zmniejszania opadów w okresie wegetacji.

Należy podjąć działania prowadzące do odbudowy żyzności gleb po okresie ich intensywnego i niewłaściwego użytkowania lub degradacji wskutek innych czynników (np. powodzie, susze). Dlatego niezbędna jest edukacja wszystkich biorących udział w produkcji rolniczej, ponieważ regeneracja gleb zdegradowanych oraz utrzymanie właściwej jakości gleb intensywnie uprawianych wymaga kompleksowych działań. Podstawowe znaczenie ma tu zwiększenie zawartości substancji organicznej, która determinuje właściwości fizyczne, biologiczne i chemiczne gleby, przede wszystkim zwiększa zawartość próchnicy glebowej. Wymogi UE, wprowadzone w 2008 r., w Kodeksie Dobrej Kultury Rolnej, wymagają od rolników dbałości o próchnicę glebową, która sprzyja zwiększaniu bioróżnorodności, ponieważ w zależności od składu chemicznego może stanowić źródło pokarmu dla mikroorganizmów glebowych. Materia organiczna przyczynia się do zmniejszenia zjawiska zmęczenia gleb, co poprawia ich produkcyjność. Zwiększenie różnorodności biologicznej, a więc naturalnej „odporności" gleb może wpływać na ograniczenie stosowania syntetycznych środków ochrony roślin. Poprawę jakości gleb można uzyskać, m.in. indukując zmiany w populacjach mikroorganizmów. Ich bogactwo gatunkowe, wielkość populacji, aktywność w rozkładzie materii organicznej i uruchamianiu nieprzyswajalnych form pierwiastków są niezbędne w utrzymaniu właściwej jakości gleb stwarzających optymalne warunki do wzrostu i rozwoju roślin.

Wskutek rosnącej specjalizacji gospodarstw rolnych problemem są ogromne ilości odpadów powstających po sezonie produkcyjnym z przemysłu rolno-spożywczego. W wielu przypadkach są one niewłaściwie wykorzystane. Wszystkie działania, które pozwolą na ich „odzysk" są korzystne, ponieważ zgodnie z art. 6 dyrektywy PE 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. niektóre rodzaje tego typu pozostałości tracą status odpadów, gdy zostaną poddane procesowi odzysku.

Z roku na rok utrzymuje się wzrost sektora tzw. zdrowej żywności, ponieważ konsumenci przywiązują coraz większą wagę do wartości zdrowotnych, jakości oraz

bezpieczeństwa żywności. Nie wszystkie mikroorganizmy bytujące na produktach ogrodniczych są korzystne dla zdrowia człowieka. W ostatnich latach, ze względu na konsumpcję większej ilości warzyw i owoców, odnotowano znaczący wzrost zachorowań związanych ze spożyciem skażonych, świeżych produktów roślinnych.

Mamy nadzieję, że zaprezentowane w monografii zagadnienia pozwolą poszerzyć wiedzę na temat problemów związanych z jakością gleb w Polsce. Jednocześnie wierzymy, że zachęcimy odbiorców do większej troski o środowisko glebowe oraz wskażemy kierunki działań zmierzających do ochrony gleb.

dr Beata Kowalska
Koordynator Projektu

SPIS TREŚCI

I. OCENA AKTUALNEGO STANU ŻYZNOŚCI GLEB W POLSCE
dr Jacek Niedźwiecki

1. WSTĘP 11
2. RODZAJE DEGRADACJI GLEB 13
   2.1. Erozja wodna gleb 13
   2.2. Erozja wietrzna gleb 15
   2.3. Zapobieganie erozji wodnej i wietrznej 17
3. OBNIŻENIE ZAWARTOŚCI MATERII ORGANICZNEJ ORAZ BIORÓŻNORODNOŚCI ORGANIZMÓW GLEBOWYCH 19
   3.1. Zapobieganie spadkowi materii organicznej oraz bioróżnorodności mikroorganizmów glebowych 20
4. FIZYCZNA DEGRADACJA GLEB 22
   4.1. Zapobieganie degradacji fizycznej gleb 23
5. CHEMICZNA DEGRADACJA GLEB 24
   5.1. Ocena zawartości metali w glebach użytkowanych rolniczo w Polsce 25
   5.2. Zapobieganie degradacji chemicznej gleb 26
6. ZAKWASZENIE GLEB 26
   6.1. Potrzeby wapnowania 28
   6.2. Przeciwdziałanie zakwaszeniu gleb 28
7. PODSUMOWANIE 29

II. ROLA MIKROORGANIZMÓW W KSZTAŁTOWANIU ŻYZNOŚCI I ZDROWOTNOŚCI GLEBY
dr Beata Kowalska

1. WSTĘP 35
2. TWORZENIE PRÓCHNICY 36
3. AKTYWNOŚĆ ENZYMATYCZNA MIKROORGANIZMÓW 36
4. ROLA MIKROORGANIZMÓW W OBIEGU PIERWIASTKÓW 38
   4.1. Przemiany węgla 39
   4.2. Przemiany azotu 40
   4.3. Obieg fosforu 43
   4.4. Przemiany siarki 44
   4.5. Przemiany żelaza 45
   4.6. Przemiany manganu 45
5. BIOREMEDIACJA 45
6. WPŁYW ZABIEGÓW AGROTECHNICZNYCH NA MIKROORGANIZMY GLEBOWE 46
7. PODSUMOWANIE 47

III. ZNACZENIE MIKROORGANIZMÓW W ROZWOJU ROŚLIN
dr hab. Urszula Smolińska

1. WSTĘP ... 53
2. WZAJEMNE ODDZIAŁYWANIE MIKROORGANIZMÓW ... 54
3. ROLA MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH W ROZWOJU ROŚLIN ... 55
   3.1. Mikroorganizmy glebowe korzystne dla roślin ... 59
      3.1.1. Mykoryza ... 59
      3.1.2. Mikroorganizmy wiążące azot atmosferyczny ... 60
   3.2. Mikroorganizmy glebowe niekorzystne dla roślin ... 61
4. PODSUMOWANIE ... 62

IV. BIORÓŻNORODNOŚĆ MIKROBIOLOGICZNA – ZNACZENIE I ZAGROŻENIA
prof. dr hab. Magdalena Frąc

1. WSTĘP ... 67
2. ROLA RÓŻNORODNOŚCI MIKROBIOLOGICZNEJ W ŚRODOWISKU GLEBOWYM ... 68
3. BIORÓŻNORODNOŚĆ A USŁUGI EKOSYSTEMÓW GLEBOWYCH ... 71
4. BIORÓŻNORODNOŚĆ A INTERAKCJE MIKROORGANIZMÓW ŚRODOWISKA GLEBOWEGO ... 73
5. ZNACZENIE RÓŻNORODNOŚCI MIKROBIOLOGICZNEJ W OCHRONIE ROŚLIN ... 75
6. FUNKCJE RÓŻNORODNOŚCI GRZYBÓW W ŚRODOWISKU GLEBOWYM ... 77
7. ZAGROŻENIA DLA BIORÓŻNORODNOŚCI ... 79
8. METODY BADANIA RÓŻNORODNOŚCI MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH ... 79
9. PODSUMOWANIE ... 81

V. PATOGENY GLEBOWE – SKĄD SIĘ BIORĄ I JAK Z NIMI WALCZYĆ
dr hab. Czesław Ślusarski

1. PATOGENY NAJCZĘŚCIEJ WYSTĘPUJĄCE W GLEBACH ZDEGRADOWANYCH, UŻYTKOWANYCH OGRODNICZO ... 87
2. METODY UMOŻLIWIAJĄCE HAMOWANIE ROZWOJU I ROZPRZESTRZENIANIA PATOGENÓW GLEBOWYCH ... 90
   2.1. Metody agrotechniczne i genetyczne ... 90
   2.2. Metody fizyczne ... 92
   2.3. Metody chemiczne ... 94
   2.4. Metody biologiczne ... 100
3. PODSUMOWANIE ... 102

VI. JAK PRZYWRACAĆ ŻYZNOŚĆ GLEB?
dr hab. Wojciech Stępień

1. ŻYZNOŚĆ GLEB....107
2. KIERUNKI PRZETWARZANIA (UZDATNIANIA) ODPADÓW BIODEGRADOWALNYCH NA PRODUKTY NAWOZOWE....112
3. WYKORZYSTANIE ODPADÓW DO PRODUKCJI NAWOZÓW I POLEPSZACZY GLEBOWYCH DO NAWOŻENIA GLEB I ROŚLIN....116
4. GLEBA JAKO UKŁAD UMOŻLIWIAJĄCY WYKORZYSTANIE ODPADÓW....116
5. PODSUMOWANIE....120

VII. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE MIKROORGANIZMÓW W ROLNICTWIE
dr hab. Anna Gałązka

1. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA WZROST I ROZWÓJ MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH....125
2. ROLA MIKROORGANIZMÓW W ŚRODOWISKU GLEBOWYM....126
3. PREPARATY MIKROBIOLOGICZNE....128
4. PODSUMOWANIE....133

VIII. DBAŁOŚĆ O STAN SANITARNY UPRAW – BEZPIECZNA ŻYWNOŚĆ
dr hab. Magdalena Szczech

1. WPROWADZENIE....139
2. ŹRÓDŁA SKAŻENIA ROŚLIN PRZEZ CHOROBOTWÓRCZE MIKROORGANIZMY....139
3. PRZEŻYWALNOŚĆ PATOGENÓW W RÓŻNYCH ŚRODOWISKACH....144
4. JAK OGRANICZAĆ RYZYKO SKAŻEŃ MIKROBIOLOGICZNYCH....147
5. PROBLEM ODPORNOŚCI NA ANTYBIOTYKI BAKTERII PATOGENICZNYCH Z PRODUKCJI ZWIERZĘCEJ....149
6. PODSUMOWANIE....150

STRESZCZENIE....155
SUMMARY....156

I OCENA AKTUALNEGO STANU ŻYZNOŚCI GLEB W POLSCE

Jacek Niedźwiecki

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
Państwowy Instytut Badawczy w Puławach
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
e-mail: jacek@iung.pulawy.pl

1. WSTĘP

Prowadzona przez wiele lat intensywna gospodarka rolna przyniosła wiele negatywnych skutków dla jakości gleb uprawnych. Właściwą zasobność chemiczną gleby można przywrócić, stosując odpowiednie nawożenie. Jednak większym problemem jest odbudowa fizycznych i biologicznych właściwości gleb, które są ze sobą ściśle powiązane. Nadmierna eksploatacja, chemizacja i nieprawidłowe zabiegi agrotechniczne działają niekorzystnie na życie biologiczne, co skutkuje degradacją warstwy próchnicznej, pogorszeniem struktury gleby i zaburzeniem jej podstawowych funkcji. Duże znaczenie w uprawach ma również degradacja gleb wynikająca z erozji wodnej lub wietrznej. Wielu rolników nie interesuje się tą kwestią lub nie wie, co można zrobić, aby poprawić sytuację.

W tym rozdziale przedstawiono aktualny stan gleb w Polsce, opisano przyczyny pogarszania ich żyzności oraz skutki degradacji.

Trzeba pamiętać, że gleba jest wytworem złożonego procesu, zwanego procesem glebotwórczym, na który składają się oddziaływania klimatu, skały macierzystej, położenia w rzeźbie terenu i przede wszystkim mikroorganizmów, organizmów roślinnych i zwierzęcych, a także działalności człowieka. Proces ten jest powolny i przebiega z szybkością około 1 cm wytworzonej gleby na 100–400 lat. Do powstania dobrze wykształconego naturalnego profilu gleby potrzeba 1000–2000 lat (Klimaszewski 1978). Gleby obok przebiegającego bardzo powoli, ale stale procesu tworzenia podlegają równocześnie procesom degradacji, które niekiedy mogą przebiegać bardzo szybko. Wyróżnia się procesy degradacji fizycznej, chemicznej i biologicznej gleb. Są one ze sobą ściśle połączone i mogą być wywoływane tymi samymi przyczynami. Degradacja gleb powoduje również określone skutki środowiskowe wykraczające poza samo środowisko glebowe (Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej 2002).

Gleby należy zaliczyć do najważniejszych zasobów przyrody, ponieważ zapewniają możliwość produkcji żywności dla ludzi i paszy dla zwierząt, jednak należy pamiętać, iż są to wytwory natury, które są łatwo zniszczalne i trudno odtwarzalne.

Według Organizacji Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO), gleby pełnią jedenaście najważniejszych funkcji, z czego aż siedem jest bezpośrednio bądź pośrednio związanych z produkcją rolną:

1) dostarczają żywności i surowców dla przemysłu;
2) umożliwiają sekwestrację węgla organicznego;
3) oczyszczają wodę i redukują poziom zanieczyszczeń;
4) wpływają na klimat;
5) gwarantują obieg pierwiastków;
6) stanowią siedlisko życia organizmów żywych;
7) zmniejszają zagrożenie powodzią;
8) są źródłem substancji leczniczych i zasobów genetycznych;
9) stanowią podstawę pod infrastrukturę;

10) dostarczają materiałów dla przemysłu;
11) stanowią dziedzictwo kulturowe.

Jak wskazują powyższe funkcje gleb, jedną z ważniejszych jest dostarczanie żywności. Do spełnienia tej funkcji gleba musi odznaczać się odpowiednią **żyznością** zapewniającą możliwość wyprodukowania plonów na zadowalającym poziomie.

O żyzności gleb stanowi zespół cech morfologicznych (rodzaj i miąższość poziomów glebowych), fizycznych (np. uziarnienie, struktura, właściwości wodne), chemicznych, fizykochemicznych (np. odczyn, kompleks sorpcyjny), biochemicznych i biologicznych (np. zawartość materii organicznej, bioróżnorodność mikroorganizmów glebowych), zapewniających roślinom uprawnym odpowiednie warunki do wzrostu i rozwoju. Żyzność jest wypadkową zasobności w składniki pokarmowe i właściwości gleby (Kowaliński 1999, Prusinkiewicz 2004). Możemy wyróżnić następujące rodzaje żyzności gleb:

- **Żyzność naturalna** – jest wynikiem właściwości skały macierzystej, procesu glebotwórczego i zależy od zawartości w glebie m.in. koloidów glebowych, związków mineralnych, próchnicy, drobnoustrojów, np. mikroorganizmy glebowe odnawiają żyzność gleby. Jest ona charakterystyczna dla naturalnych gleb, na które nie oddziałuje człowiek. Żyzność naturalna jest ściśle związana z typem, rodzajem i gatunkiem gleby, a także z krajobrazem i naturalnymi zbiorowiskami roślinnymi.
- **Żyzność agrotechniczna** (sztuczna) – jest wynikiem działalności człowieka, najczęściej zabiegów agrotechnicznych. Może być zwiększona poprzez odpowiednie nawożenie, wapnowanie, uprawę, stosowanie płodozmianu i meliorację. Negatywnie na żyzność może działać wylesianie, przesuszenie, niewłaściwa agrotechnika i płodozmiany.
- **Żyzność nabyta** – jest to żyzność wytworzona przez człowieka na utworach, które jej prawie nie posiadały. Dotyczy to głównie rekultywacji hałd i wyrobisk pogórniczych oraz innych zdegradowanych antropogenicznie miejsc (Błaszczyk 2010).

Niewłaściwa agrotechnika, źle dostosowana do warunków glebowych czy rzeźby terenu, a także działalność przemysłu mogą powodować **degradację gleb**, która przejawia się w pogorszeniu bądź utracie zdolności gleby do pełnienia przez nią określonych funkcji. Najczęstszymi objawami degradacji gleb są: pogorszenie właściwości **fizycznych** (np. nadmierne zagęszczenie gleb powodujące zniszczenie bądź pogorszenie struktury glebowej oraz warunków dla rozwoju roślin, niekorzystne zmiany stosunków wodnych gleby przez niewłaściwie działające systemy melioracyjne); **erozja wodna i wietrzna** powodująca straty gleby; pogorszenie właściwości **biologicznych** (zmniejszenie bioróżnorodności mikroorganizmów glebowych, zmniejszenie ilości i jakości próchnicy) i **chemicznych** (np. zakwaszanie bądź nadmierna alkalizacja gleby, zanieczyszczenie gleb substancjami chemicznymi bądź pierwiastkami, nadmierne obniżenie zawartości składników odżywczych lub

ich nadmiar). Skutki degradacji gleb mogą objawiać się **w spadku ich żyzności,** co z kolei może być przyczyną obniżenia plonowania roślin uprawnych.

Degradacja gleb może być przyczyną ponoszenia dodatkowych nakładów na przywrócenie prawidłowego ich funkcjonowania. W wyniku degradacji gleb użytkowanych rolniczo obniża się ich wartość rolnicza. W skrajnych przypadkach gleby zdegradowane stają się nieprzydatne dla produkcji rolnej.

Każda forma degradacji gleby w sposób bezpośredni lub pośredni przyczynia się do obniżenia żyzności gleb!

Ochrona gleby jest szczególnym obowiązkiem rolnika, dla którego stanowi ona warsztat pracy i podstawę utrzymania (Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej 2002).

Główne czynniki powodujące degradację gleb możemy podzielić na:

– naturalne – niewywołane działalnością człowieka, t.j.: erozja gleb, osuwiska, działalność wulkaniczna i tektoniczna;
– antropogeniczne – erozja wywołana przez stosowanie niewłaściwej agrotechniki, działalność przemysłową, nadmierną urbanizacją. (Poskrobko i in. 2007).

Nie wszystkie gleby są tak samo podatne na degradację, jednak nie ma gleb, które byłyby całkowicie odporne na czynniki degradujące. Gleby lekkie, zakwaszone, o niskiej zawartości próchnicy są bardziej podatne na degradację. Słabe właściwości sorpcyjne takich gleb stanowią istotny czynnik ograniczający ich żyzność i produkcyjność.

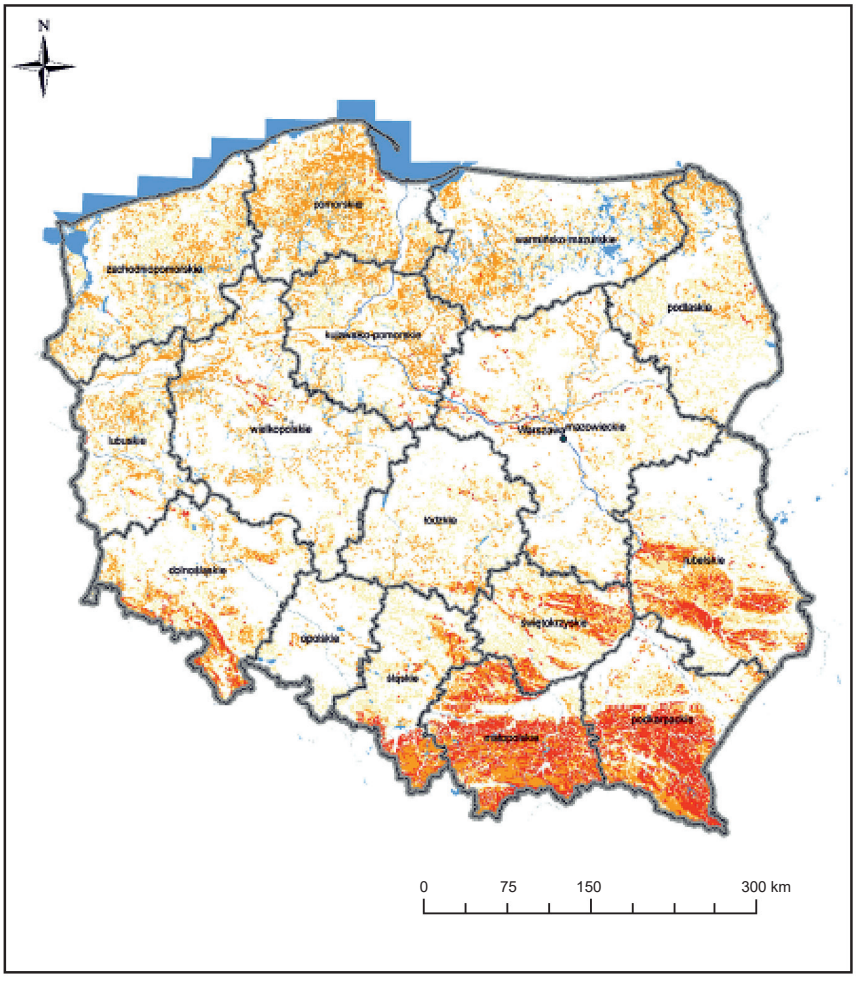
2. RODZAJE DEGRADACJI GLEB

2.1. EROZJA WODNA GLEB

Erozja gleby jest jednym z czynników degradujących środowisko przyrodnicze, a zwłaszcza rolniczą przestrzeń produkcyjną. Jest procesem, w wyniku którego następuje fizyczne niszczenie powierzchni gleby najczęściej przez wodę (erozja wodna powierzchniowa) oraz przez wiatr (erozja wietrzna). Jej skutki przejawiają się w niekorzystnych, przeważnie trwałych zmianach warunków przyrodniczych (rzeźby, gleb, stosunków wodnych, naturalnej roślinności) i warunków gospodarczo-organizacyjnych (deformowanie granic pól, rozczłonkowanie gruntów, pogłębianie dróg, niszczenie urządzeń technicznych). Zmiany takie prowadzą do obniżenia potencjału produkcyjnego ziemi i walorów ekologicznych krajobrazu (Józefaciuk i Józefaciuk 1996 i 1999). Jedną z głównych konsekwencji procesów erozji jest spadek zawartości i jakości próchnicy. Przyczynia się to do niszczenia struktury agregatowej oraz wzrostu zagęszczenia gleby. Na obszarach lessowych wraz ze wzrostem zerodowania gleby następuje trwałe obniżenie jej produktywności, nawet do 30% (Józefaciuk 1996). O rozmiarach degradowania środowiska przez erozję wodną

świadczą średnie roczne straty gleby, które dla Polski oszacowano na 76 Mg·km^{-2} (Józefaciuk i Józefaciuk 1992).

Przeprowadzone analizy wykazały, że ok. 33% obszaru naszego kraju jest zagrożone erozją wodną, szczególnie w województwach: małopolskim, podkarpackim, lubelskim i świętokrzyskim (rys. 1). Średnie straty gleby spowodowane tym procesem na gruntach ornych w Polsce wynoszą 1,61 t·ha^{-1}·rok^{-1} (Mocek 2016).



Legenda

granica państwa
granica województwa
główne rzeki
jeziora

Erozja wodna potencjalna

1 – erozja słaba
2 – erozja średnia
3 – erozja silna

Rys. 1. Potencjalne zagrożenie powierzchniową erozją wodną gleb obszaru Polski (Józefaciuk i Józefaciuk 1995)

Biorąc pod uwagę strukturę zagrożenia erozją wodną powierzchniową średnią i silną oraz strukturę występowania sieci wąwozowej o wskaźniku gęstości wąwozów powyżej 0,5 km·km^{-2}, na degradację procesami erozji wodnej najbardziej narażone są następujące tereny w jednostkach administracyjnych kraju:

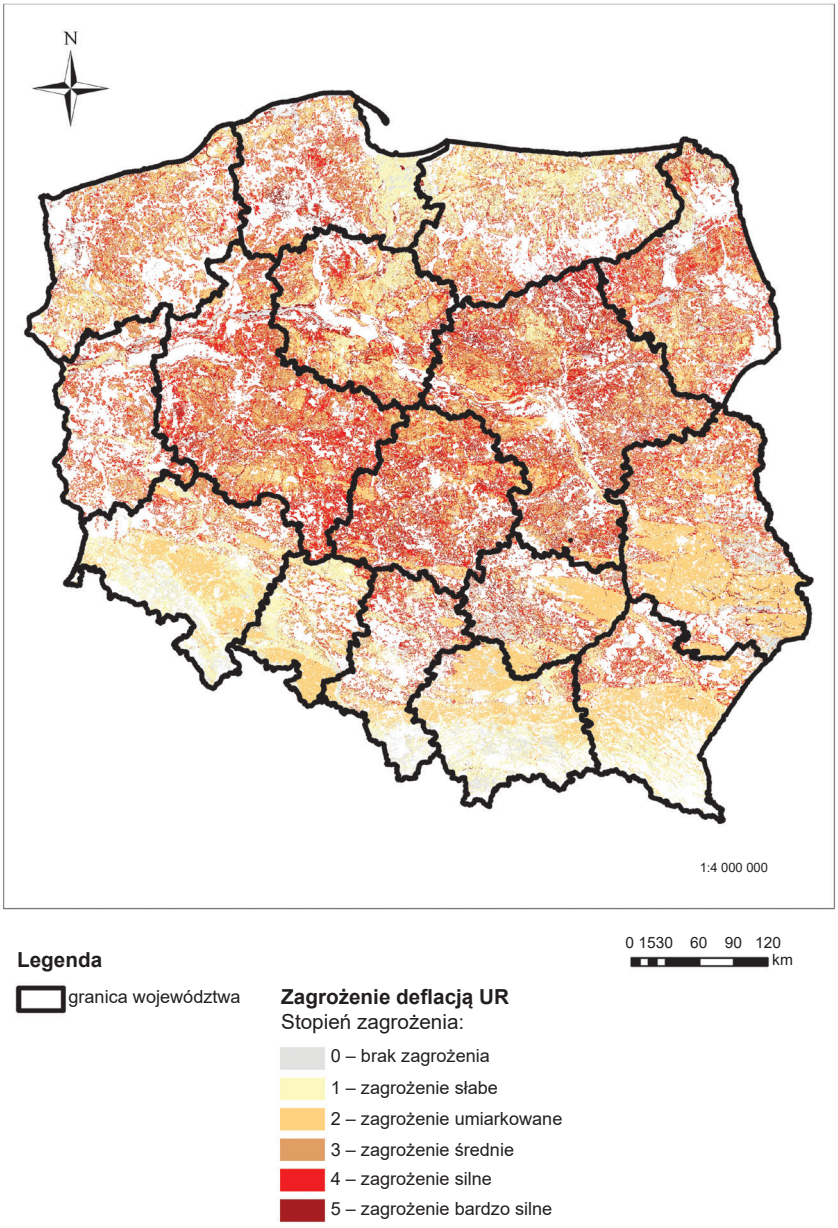
- województwo małopolskie – tereny wyżyn lessowych oraz tereny pogórzy i górskie w granicach powiatów: bocheńskiego, gorlickiego, krakowskiego, limanowskiego, miechowskiego, myślenickiego, nowosądeckiego, proszowickiego, suskiego, tarnowskiego, tatrzańskiego, wadowickiego;
- województwo podkarpackie – tereny pogórzy i górskie w granicach powiatów: bieszczadzkiego, brzozowskiego, dębickiego, jesielskiego, krośnieńskiego, przemyskiego, ropczycko-sędziszowskiego, strzyżowskiego;
- województwo lubelskie – tereny wyżynne w granicach powiatów: janowskiego, krasnystawskiego, kraśnickiego, lubelskiego, świdnickiego, zamojskiego;
- województwo świętokrzyskie – tereny wyżynne i górskie w granicach powiatów: kazimierskiego, ostrowieckiego, sandomierskiego;
- województwo dolnośląskie – tereny górskie w granicach powiatów: jeleniogórskiego i kłodzkiego;
- województwo śląskie – tereny górskie w granicach powiatów: cieszyńskiego, Jastrzębie Zdrój i wodzisławskiego.

We wszystkich wymienionych powiatach występuje pierwszy stopień pilności ochrony i przeciwdziałania erozji wodnej powierzchniowej oraz erozji wąwozowej (Nowocień i Wawer 2013).

2.2. EROZJA WIETRZNA GLEB

Zjawisko deflacji, czyli wywiewania przez wiatr drobnego materiału, takiego jak piasek czy pyły, ma największy wpływ na występowanie erozji wietrznej. Ponadto erozja wietrzna oprócz ścisłej zależności od zawartości w glebie frakcji piasku i pyłu zależy również od aktualnej wilgotności, pokrycia terenu przez roślinność oraz siły i czasu działania wiatru (Józefaciuk i in. 2018). Im bardziej gleby są przesuszone i pozbawione okrywy roślinnej podczas trwania silnych wiatrów, tym bardziej są narażone na erozję wietrzną.

Przeprowadzone przez Józefaciuka i in. (2018) analizy wykazały, że ok. 36% obszaru Polski, w tym 51,8% użytków rolnych jest zagrożonych erozją wietrzną w stopniach 3–5, w stopniu silnym i bardzo silnym – 37,5%, średnim – 14,3%, a w stopniu słabym – 24,1% (rys. 2).



Rys. 2. Zagrożenie erozją wietrzną użytków rolnych Polski (Józefaciuk i in. 2018)

Najbardziej zagrożone erozją wietrzną są województwa: wielkopolskie – ok. 77,6% ogólnego obszaru, w tym dominuje erozja silna (51,4% obszaru) nad średnią (22,2% obszaru); łódzkie – ok. 70,2% ogólnego obszaru, w tym erozja silna (44,3%

obszaru) i średnia (15,1% obszaru) oraz mazowieckie – ok. 70,1% ogólnego obszaru, w tym erozja silna (41,6% obszaru) oraz średnia (17,9% obszaru). Również silnie zagrożone erozją wietrzną w stopniach 3–5 są województwa: lubuskie (64,4%) – przeważa zagrożenie erozją silną, 41,4% ogólnego obszaru; podlaskie (58,3%) – przeważa zagrożenie erozją silną, 41,0% ogólnego obszaru; zachodniopomorskie (56,5%) – przeważa zagrożenie erozją silną, 34,3% ogólnego obszaru; pomorskie (54,5%) – przeważa zagrożenie erozją silną, 32,4% ogólnego obszaru; kujawsko-pomorskie (52,5%) – przeważa zagrożenie erozją silną, 32,0% ogólnego obszaru. Najmniej zagrożone erozją wietrzną w najsilniejszych stopniach 3–5 są województwa: dolnośląskie – 24,0% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 15,6%, a średnią 8%; podkarpackie – 24,8% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 18,5%, a średnią 5%; opolskie – 26,7% ogólnego obszaru, w tym erozją silną 15,5%, a średnią 10%.

2.3. ZAPOBIEGANIE EROZJI WODNEJ I WIETRZNEJ

Obszary zagrożone erozją gleb, zwłaszcza tereny z erozją średnią, silną i bardzo silną wymagają stosowania specjalnych działań ochronnych, jakimi są melioracje przeciwerozyjne. Chronią one gleby przed erozyjną degradacją, przyczyniają się również do walki z suszą, a także ograniczają występowanie powodzi (Józefaciuk i in. 2014).

Główne cele melioracji przeciwerozyjnych to:

- ograniczenie występowania i zmniejszenie nasilenia procesów erozyjnych;
- zachowanie potencjału produkcyjnego gleb i niedopuszczenie do jego niekorzystnych przemian;
- wydłużenie obiegu wody w krajobrazie i przeciwdziałanie deformacyjnym zmianom hydrografii i hydrologii cieków rzecznych;
- poprawienie ekotechnicznych warunków użytkowania ziemi, włącznie z rekultywacją gruntów zdewastowanych.

Podstawowymi zabiegami przeciwerozyjnymi są:

- rozmieszczenie przestrzenne użytków produkcyjnych i ochronnych stosownie do rzeźby terenu;
- wprowadzenie układu działek i pól umożliwiającego poprzeczno-stokową uprawę roli;
- stosowanie agrotechniki przeciwerozyjnej;
- planowanie dróg rolniczych z uwzględnieniem rzeźby terenu i ściśle skoordynowane z układem działek i pól oraz umacnianie erodowanych odcinków dróg;
- rekultywacja i zagospodarowanie nieużytków erozyjnych (np. wąwozów, stromych zboczy) oraz likwidowanie trudnej mikrorzeźby terenu;
- stosowanie urządzeń do rozpraszania i odprowadzania powierzchniowych spływów wody.

Pozytywne oddziaływanie zabiegów przeciwerozyjnych na produkcję rolną jest następujące:

- zapobieganie obniżaniu żyzności gleb i niekorzystnym zmianom właściwości fizykochemicznych oraz ubytkowi profilu gleby;
- przeciwdziałanie zakłócaniu stosunków wodnych w glebach i niekorzystnym zmianom hydrologii cieków wodnych oraz niszczeniu urządzeń melioracyjnych, a także zabagnianiu lub nadmiernemu osuszaniu gruntów;
- niedopuszczanie do rozczłonkowania rzeźby terenu przez wąwozy i inne formy erozyjne;
- zmniejszanie strat plonów.

Do najważniejszych zasad prawidłowej uprawy roli na gruntach narażonych występowaniem erozji należą:

- grunty na stokach o nachyleniu powyżej 20% (120°) powinny być trwale zadarnione lub zalesione;
- na gruntach o nachyleniu 10–20% (60°–120°) można prowadzić gospodarkę polową, ale przy regularnym stosowaniu zabiegów przeciwerozyjnych;
- grunty położone na stokach o nachyleniu do 10% (do 60°), zwłaszcza na długich skłonach, są słabiej zagrożone przez erozję wodną, ale wskazany jest tutaj specjalny sposób uprawy roli;
- drogi spływu wód opadowych należy zadarnić, a ruń trawiastą kosić przynajmniej dwukrotnie w okresie wegetacji;
- erozję można w znacznym stopniu ograniczyć, stosując płodozmiany przeciwerozyjne, w których skład powinny wchodzić rośliny bobowate drobnonasienne i ich mieszanki z trawami oraz rośliny ozime tzw. „zielone pola". W grupie roślin ozimych szczególnie polecane są rzepak, żyto i pszenżyto, które tworzą zwartą okrywę już w okresie jesiennym;
- po wcześnie zebranym przedplonie, po którym następuje roślina jara, należy przewidzieć uprawę poplonów ścierniskowych lub ozimych, które będą osłaniały glebę. Rośliny poplonowe najlepiej pozostawić nieprzyorane na okres zimy, w formie mulczu (np. na gleby słabsze: łubin żółty, seradelę facelię i żyto; na gleby średnie: groch siewny pastewny, słonecznik, łubin wąskolistny, gorczycę białą, rzodkiew oleistą, wykę ozimą; na gleby żyzne: bobik, wykę jadalną i rzepik ozimy);
- na gruntach ornych, położonych na stokach, wszystkie zabiegi uprawowe powinny być dokonywane w kierunku poprzecznym do nachylenia stoku. Orkę najlepiej wykonać pługiem obracalnym lub uchylnym, odkładając skiby w górę stoku;
- przy uprawie gleby położonej na zboczach korzystne jest zastąpienie uprawy płużnej uprawą bezorkową. Do uprawy gleby stosuje się wówczas kultywator z szerokimi łapami (gruber), a do uprawy przedsiewnej bierne zestawy uprawowe składające się z brony lub kultywatora i wału strunowego bądź pierścieniowego.
- na glebach zagrożonych erozją w stopniu silnym jako dodatkowy zabieg przeciwerozyjny poleca się głęboszowanie. Zabieg ten polega na dokonywaniu głę-

bokich nacięć w glebie i spulchnianiu podglebia, co zwiększa pojemność wodną gleby i ułatwia wsiąkanie wody do głębszych jej warstw. Głęboszowanie wykonuje się specjalnym narzędziem – głęboszem, wymagającym dużej siły uciągu. Zabieg ten jest kosztowny, ale jego wykonanie zaleca się w odstępach 3–4-letnich.

Do najskuteczniejszych zabiegów przeciw erozji wietrznej zalicza się (Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej 2002):

- zakładanie i pielęgnowanie śródpolnych pasów zadrzewień i zakrzaczeń;
- stałe utrzymywanie gleby pod okrywą roślinną (rośliny wieloletnie, „zielone pola");
- przykrywanie na okres wczesnej wiosny materiałami mulczującymi powierzchnie gleb przeznaczone pod rośliny późnego siewu lub sadzenia (ziemniak, kukurydza);
- **większość zabiegów agrotechnicznych chroniących glebę przed erozją wodną zapobiega również erozji wietrznej.**

3. OBNIŻENIE ZAWARTOŚCI MATERII ORGANICZNEJ ORAZ BIORÓŻNORODNOŚCI ORGANIZMÓW GLEBOWYCH

Ilość materii organicznej w glebach jest podstawowym wskaźnikiem oceny jakości gleb decydującym o ich właściwościach fizykochemicznych, takich jak zdolności sorpcyjne i buforowe oraz o procesach przemian biologicznych ważnych z punktu widzenia funkcjonowania siedliska, a określanych mianem aktywności biologicznej. Wysoka zawartość próchnicy w glebach jest czynnikiem stabilizującym ich strukturę, zmniejszającym podatność na zagęszczenie i degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej oraz wpływającym dodatnio na fizyczną jakość gleb (Niedźwiecki i in. 2006, Stuczyński i in. 2007). Natomiast nieracjonalne rolnicze wykorzystanie gleb może prowadzić do obniżenia w nich zawartości materii organicznej.

Rezolucja Parlamentu Europejskiego (Rezolucja PE 2007) wśród głównych zagrożeń dla prawidłowego funkcjonowania gleb wymienia m.in. spadek zawartości materii organicznej, ponieważ jej ubytek może powodować wiele niekorzystnych zjawisk związanych z zaburzeniem procesów chemicznych, fizycznych i biologicznych, które bezpośrednio wpływają na jakość gleb oraz jej żyzność (Ukalska-Jaruga i in. 2017).

Intensywne użytkowanie gleb w połączeniu z uproszczeniem płodozmianów oraz dominacją roślin zbożowych może prowadzić do ograniczenia ilości resztek organicznych wchodzących w cykl przemian próchnicy, a w konsekwencji do spadku jej zawartości w glebach. W ostatnich latach w niektórych regionach kraju obserwuje się wzrost powierzchni użytków rolnych wykorzystywanych przez gospodarstwa bezinwentarzowe, a więc pozbawionych dopływu nawozów naturalnych, które są

istotnym elementem kształtowania zasobów próchnicy glebowej. Wyniki oznaczeń zasobności gleb użytków rolnych w Polsce (w warstwie 0–25 cm) wskazują na duże zróżnicowanie zawartości próchnicy (0,5–10%). Średnia jej zawartość wynosi 2,2%. Według podziału stosowanego w Polsce, gleby o niskiej zawartości próchnicy (<1,0%) stanowią około 6% powierzchni użytków rolnych, o średniej (1,0–2,0%) – około 50%, zaś zasobne w próchnicę (>2,0%) – około 43% powierzchni użytków rolnych kraju (Stuczyński i in. 2007). Na szczeblu krajowym obowiązek utrzymania odpowiedniej dla naszych warunków glebowo-klimatycznych zawartości materii organicznej w glebie nakłada Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej (2002).

W Polsce podstawowymi nawozami organicznymi są nawozy naturalne, takie jak obornik i gnojowica. Ich produkcja zmniejsza się ze względu na stopniowy spadek pogłowia zwierząt hodowlanych. W roku 2013 produkcja obornika w Polsce wynosiła 80–90 mln ton, co daje około 5–6 ton na hektar użytków rolnych (GUS 2014). Ilość ta nie jest wystarczająca, aby utrzymać równowagę materii organicznej nawet na stałym poziomie (Kuś i Kopiński 2012) i dlatego musi być stosowane dodatkowe nawożenie organiczne, np. w postaci słomy bądź innych źródeł materii organicznej. Oznacza to, że w skrajnych przypadkach, aby zrekompensować ujemny bilans materii organicznej w gospodarstwie, 80% wyprodukowanej słomy powinno być przyorane, przy braku nawozów organicznych (Kuś 2006).

Minimalna zawartość próchnicy w glebach lekkich i średnich, które to przeważają w naszym kraju, powinna wynosić 2–3%. Taka ilość gwarantowałaby prawidłowy stan fizyczny gleb i świadczyłaby o poprawności przeprowadzanych zabiegów uprawowych (Gantzer i in. 1991, Mazur 1995, Wiater 2000).

3.1. ZAPOBIEGANIE SPADKOWI MATERII ORGANICZNEJ ORAZ BIORÓŻNORODNOŚCI MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH

Nagromadzaniu próchnicy i bioróżnorodności gleb sprzyja stosowanie obornika i nawozów organicznych, a także przyorywanie słomy (z dodatkiem azotu). Tak zwana ochronna uprawa gleby i regularne wapnowanie sprzyjają natomiast utrwalaniu zawartości próchnicy. Ochronna uprawa polega na stosowaniu zasady „tak dużo zabiegów uprawowych jak to jest konieczne, tak mało jak jest to możliwe" (Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej 2002).

W celu zachowania na odpowiednim poziomie, czy też zwiększenia zasobności gleb w próchnicę powinno stosować się następujące zasady:

1. Należy objąć ochroną grunty o bardzo wysokiej zawartości materii organicznej, takie jak gleby torfowe, niektóre murszowe czy naturalne bagna. Jest to szczególnie ważne w aspekcie potencjalnej mineralizacji ich masy organicznej. Dotyczy to przede wszystkim gleb torfowych z czynnym procesem torfotwórczym, które należałoby wyłączyć z intensywnego użytkowania rolniczego, zaprzestać eksploatacji torfów, utrzymywać odpowiednio wysoki poziom wód gruntowych

na trwałych użytkach zielonych, szczególnie znajdujących się na glebach organicznych.

2. W glebach użytkowanych rolniczo (szczególnie w glebach ornych) należy podejmować działania zwiększające zawartość materii organicznej, szczególnie w glebach o jej niskiej zawartości oraz w glebach zdegradowanych.

Wyżej wymienione działania powinny sprzyjać zatrzymywaniu próchnicy w glebie. Dlatego też, w aspekcie dobrej praktyki rolniczej należy rekomendować następujące procedury zalecane przez Goneta już w 2007 roku, szczególnie na gruntach ornych, do których należą:

1. Stosowanie zmianowań wzbogacających glebę w materię organiczną, z uwzględnieniem roślin bobowatych grubonasiennych i drobnonasiennych, traw i wsiewek, pamiętając o uregulowanym odczynie gleb. Takie postępowanie może prowadzić do redukcji strat składników odżywczych i polepszenia struktury gleb. Stosowanie nawozów zielonych może być limitowane dostępnością wody (w konkurencji między nawozem zielonym a plonem głównym). Z drugiej strony, polepszenie struktury gleby, również w głębszych warstwach, oraz zwiększenie zawartości materii organicznej powodują zwiększenie retencji wody, która jest dostępna dla roślin. Taka strategia jest szczególnie odpowiednia dla ochrony powierzchni gleby podatnej na erozję i korzystna dla redukcji strat azotu przez wymywanie.
2. Tworzenie stref buforowych na granicy pól uprawnych przyczyni się nie tylko do kumulacji materii organicznej, ale będzie sprzyjać ograniczeniu erozji, transportu składników odżywczych i pestycydów do wód powierzchniowych oraz przyczyni się do wzrostu bioróżnorodności.
3. Maksymalizacja wykorzystania resztek pożniwnych, które stanowią czyste, pozbawione zanieczyszczeń, wysokiej jakości źródło materii organicznej. Zgodnie z tym należy ograniczyć np. spalanie słomy i wypalanie ściernisk. Należy jednak pamiętać, że wykorzystując niektóre resztki pozbiorowe, np. buraka cukrowego i warzyw, należy uwzględnić termin ich wprowadzenia do gleby, ze względu na możliwość wymywania azotanów.
4. Minimalizacja zabiegów uprawowych, ze szczególnym uwzględnieniem wprowadzania systemów konserwujących. System konserwujący wprawdzie ma niewielki wpływ na wzrost zawartości materii organicznej, ale redukuje mineralizację materii organicznej, erozję wodną, polepsza fizyczne właściwości gleby oraz efektywność ekonomiczną rolnictwa, a także zwiększa bioróżnorodność gleby. System ten nie jest oczywiście przydatny w takich uprawach, jak buraka cukrowego i ziemniaka, ale zalecany w uprawie zbóż w monokulturze".

Ponadto:

5. Stosowanie egzogennej materii organicznej (EOM) – czyli takiej, która nie została wyprodukowana na danym polu (na obszarach użytkowanych rolniczo, takiej jak: nawozy organiczne, nawozy zielone, słoma, odpady z biogazowni rolniczych

itd., komposty, osady ściekowe spełniające kryteria stosowania do celów rolniczych bądź rekultywacyjnych).

6. Wprowadzanie rolnictwa ekologicznego na obszarach szczególnie cennych przyrodniczo, gdzie funkcje przyrodnicze mają większe znaczenie niż produkcyjne, głównie poprzez obniżenie nakładów, prawidłowy płodozmian i ekstensyfikację hodowli.
7. Stosowanie obornika i kompostów, a także przyorywanie resztek pożniwnych i uprawa roślin wieloletnich zwiększają liczebność dżdżownic, a przede wszystkim aktywność mikrobiologiczną gleby.

4. FIZYCZNA DEGRADACJA GLEB

Fizyczna degradacja gleb polega przede wszystkim na nadmiernym ich zagęszczeniu. Wywołane jest ono najczęściej zbyt dużą liczbą przejazdów maszynami rolniczymi po powierzchni pola przy nadmiernym uwilgotnieniu gleby, na skutek czego ulega zniszczeniu struktura gruzełkowa gleb, powodując pogorszenie warunków dla rozwoju roślin uprawnych. Fizyczna degradacja gleb to również nadmierne odwodnienia gruntów wywołane lejami depresyjnymi lub wadliwą melioracją.

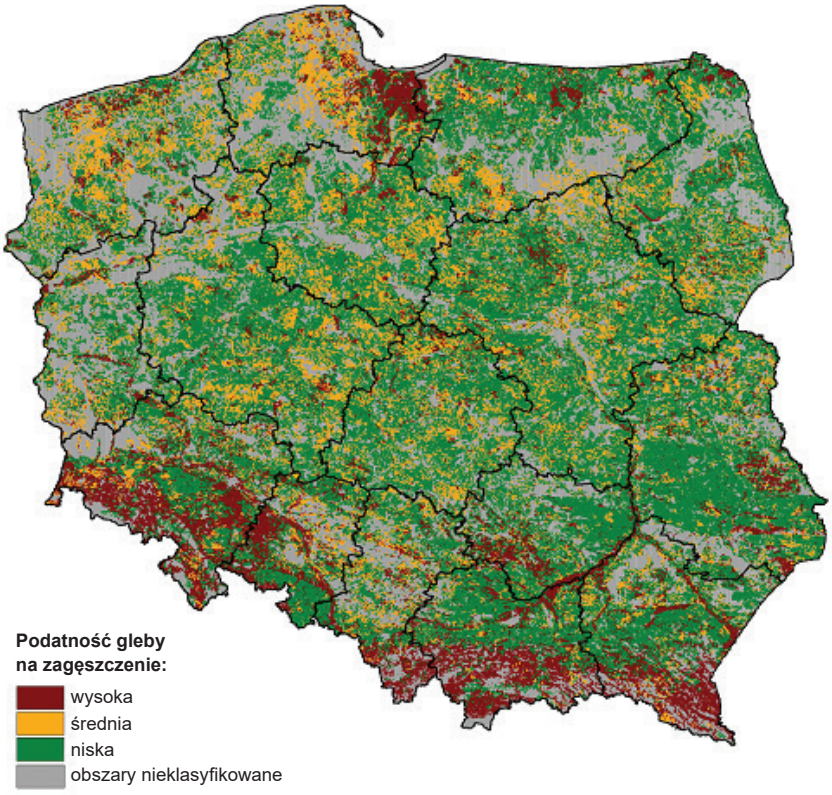
Pogarszanie się fizycznego stanu gleb uprawnych, w wyniku ich nadmiernego zagęszczania przez stosowanie ciężkiego sprzętu rolniczego i nieodpowiednie systemy uprawy roli, jest jednym z podstawowych problemów współczesnego rolnictwa (Czyż i in. 2001, Lipiec 2002, Czyż 2004, Lipiec i Rejman 2007, Czyż i Dexter 2009). Nadmierne zagęszczenie gleby ma ujemny wpływ na jej żyzność i aktywność biologiczną (Bednarz 1985, Czyż i Gajda 2008, Wolińska 2010).

Podatność gleb na zagęszczenie w dużej mierze zależy od uziarnienia gleb oraz zawartości materii organicznej. Gleby zawierające więcej cząstek ilastych są bardziej podatne na zagęszczenie. Z kolei materia organiczna obniża gęstość objętościową gleb (Dexter 2004, Pranagal 2011).

Nadmierne zagęszczenie gleb powoduje wiele niekorzystnych skutków środowiskowych i produkcyjnych, gdyż:

– zwiększa ciężar objętościowy gleby;
– uszkadza i zaburza strukturę gleby;
– zmniejsza napowietrzanie gleby;
– zmniejsza retencję wody w glebie i ilość wody dostępnej dla roślin;
– ogranicza szybkość przenikania wody (zmniejsza przewodność wody w glebie);
– powoduje wzrost spływu powierzchniowego i erozję gleby;
– zwiększa straty składników odżywczych;
– ogranicza rozwój korzeni;
– powoduje niedobory składników odżywczych dla roślin;
– zmniejsza wydajność upraw (ilość i jakość plonu);
– zmniejsza aktywność biochemiczną gleby (poziom katalityczny fosfataz).

Gleby o wysokiej podatności na zagęszczenie zajmują znacznie większy obszar naszego kraju niż dotychczas twierdzono; wynosi on 4 013 879 ha, co stanowi około 26% użytków rolnych w Polsce (rys. 3). Dużym udziałem gleb o wysokiej podatności na zagęszczenie charakteryzuje się pokrywa glebowa województw: małopolskiego, podkarpackiego i dolnośląskiego. Szczególnie w tych województwach ze względu na powszechne stosowanie ciężkiego sprzętu rolniczego zagęszczenie gleb może być istotnym czynnikiem pogarszającym warunki siedliskowe na użytkach rolnych (Czyż i in. 2013).



Rys. 3. Podatność gleb Polski na zagęszczenie (Stuczyński in. 2007)

4.1. ZAPOBIEGANIE DEGRADACJI FIZYCZNEJ GLEB

Wśród zalecanych działań ograniczających negatywne zjawisko nadmiernego zagęszczenia gleb najbardziej efektywne są:

– stosowanie konserwujących, uproszczonych systemów uprawy roli;
– zmniejszenie do minimum ruchu pojazdów rolniczych przy wysokiej wilgotności gleby;
– agregatowanie maszyn i zmniejszanie liczby przejazdów;

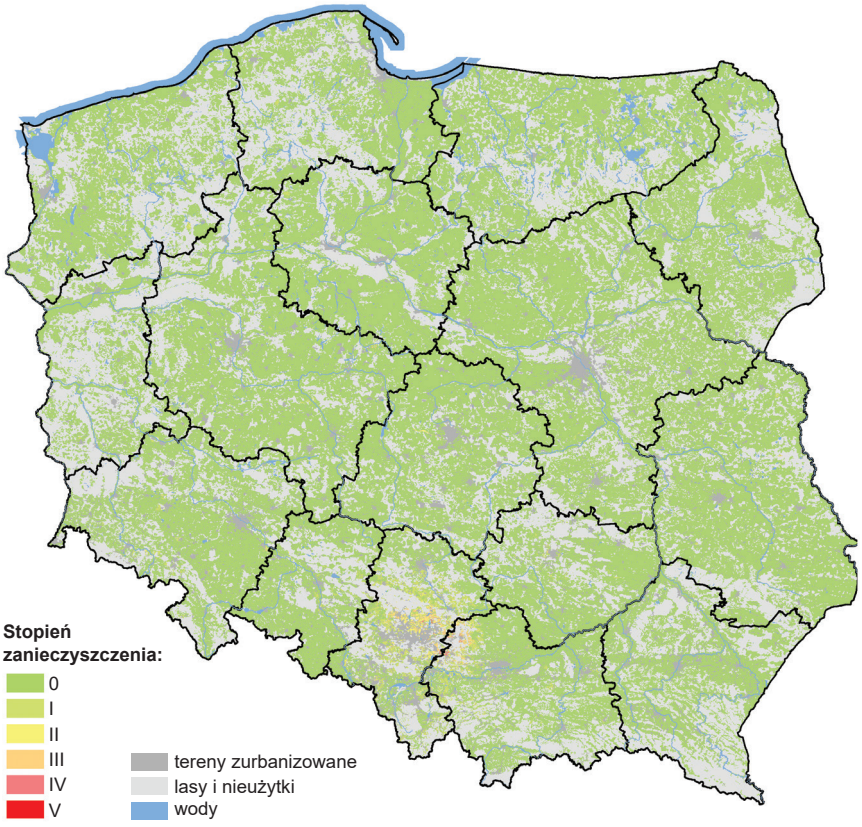
– używanie stałych ścieżek przejazdowych;
– stosowanie prawidłowego zmianowania roślin;
– stosowanie niskiego ciśnienia powietrza w ogumieniu;
– stosowanie bliźniaczych kół ciągników i zastępowanie ciągników kołowych gąsienicowymi;
– pogłębianie orki powinno być dokonywane stopniowo (do 1 cm rocznie) i tylko na glebach, których warstwa orna wykazuje optymalny odczyn i właściwą zawartość substancji organicznej. Pogłębiania orki nie zaleca się na glebach bardzo lekkich i lekkich, z reguły o małej zawartości substancji organicznej.

5. CHEMICZNA DEGRADACJA GLEB

W Polsce prawie 60% gleb stanowią użytki rolne, których główną funkcją jest produkcja żywności. Produkty żywnościowe pochodzące z obszarów zanieczyszczonych chemicznie mogą mieć negatywny wpływ na zdrowie ludzi i zwierząt. Pod względem środowiskowym obecność zanieczyszczeń może mieć istotne, negatywne oddziaływanie na pełnienie przez gleby funkcji siedliskowej dla szeregu organizmów glebowych i roślin (Carlon i in. 2007, Holoubek i in. 2009, Kabata-Pendias 2011). Pod względem składu chemicznego zanieczyszczenia dzielone są na nieorganiczne i organiczne. Największe zagrożenia gleb zanieczyszczeniami antropogenicznymi występują w regionach o największej emisji zanieczyszczeń pyłowych do atmosfery (Terelak i in. 2008, Maliszewska-Kordybach i in. 2009 i 2010, Siebielec i in. 2013). Rozkład zagrożeń pomiędzy poszczególnymi regionami jest przeważnie zróżnicowany, a ich poziom zależy od rodzaju i charakterystyki źródeł, takich jak: transport, zrzuty ścieków, emisje zanieczyszczeń do powietrza, jakość i dawki nawozów mineralnych, osadów ściekowych, obornika i innych odpadów organicznych stosowanych w celach nawozowych itp. (Ilnicki 2004). Imisja zanieczyszczeń z tych źródeł jest procesem powolnym, jednak zachodzącym stale, co prowadzi do stopniowej ich akumulacji w glebach, a wynikający stąd poziom degradacji chemicznej gleb jest przeważnie odwrotnie proporcjonalny do ich pojemności sorpcyjnej (piaski > gliny > gleby organiczne) (Ilnicki 2004). Do zanieczyszczeń chemicznych może dochodzić również w wyniku okresowych powodzi. Jest to szczególnie niebezpieczne w rejonach położonych w pobliżu źródeł emisji zanieczyszczeń, takich jak zakłady przemysłowe czy składowiska odpadów, natomiast na podstawie badań IUNG-PIB w Puławach w rejonach rolniczych takiego zagrożenia nie stwierdzano (Klimkowicz-Pawlas i in. 2012, Maliszewska-Kordybach i in. 2012). Aktualnie IUNG-PIB w Puławach dysponuje najobszerniejszą bazą danych o stanie zanieczyszczenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce.

5.1. OCENA ZAWARTOŚCI METALI W GLEBACH UŻYTKOWANYCH ROLNICZO W POLSCE

Na podstawie prowadzonego przez IUNG Puławy w latach 1992–1997 programu „Ocena zawartości metali ciężkich w glebach rolniczych w Polsce" dokonano oceny zawartości metali w glebach użytkowanych rolniczo. Ocenę przeprowadzono na podstawie wytycznych IUNG-u. Z uzyskanych danych wynika, że co najmniej 98% badanych gleb użytkowanych rolniczo można zaliczyć do niezanieczyszczonych przez metale ciężkie i niestwarzających zagrożenia pod względem możliwości przechodzenia metali do roślin (Maliszewska-Kordybach i in. 2013). Największą koncentrację gleb zanieczyszczonych stwierdzono na terenie województwa śląskiego, w którym dla przykładu aż 21,5% gleb użytkowanych rolniczo zostało ocenionych jako zanieczyszczone kadmem (II–V klasa zawartości wg wytycznych IUNG-u), w tym 4% w stopniu silnym lub bardzo silnym (rys. 4).



Rys. 4. Przestrzenna ocena stanu zanieczyszczenia gleb użytkowanych rolniczo kadmem (dane z lat 1992–1997; n = 48 600) (Smreczak i in. 2018)

Ocena poziomu zanieczyszczenia metalami oraz wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA) gleb ornych w Polsce dokonana na podstawie sytemu klasyfikacji tych gleb opracowanego w IUNG-u w Puławach oraz na postawie aktualnych regulacji prawnych wskazuje, że co najmniej 90% tych gleb można uznać za niezanieczyszczone.

Badania monitoringowe gleb użytkowanych rolniczo prowadzone na terenie naszego kraju od dwudziestu lat dostarczają kluczowych informacji na temat zawartości zanieczyszczeń, ich zmian w czasie oraz stanu innych właściwości gleb. Stanowią potwierdzenie, że zawartość substancji szkodliwych na przeważającym obszarze użytków rolnych jest niska i nie wpływa negatywnie na funkcje gleb oraz potencjał do produkcji wysokiej jakości żywności. W przypadku niektórych zanieczyszczeń, jak kadm, ołów czy benzo(a)piren zanotowano zmniejszenie ich maksymalnych zawartości, co wskazuje, że na obszarach najsilniej zanieczyszczonych sytuacja ulega stopniowej poprawie (Smreczak i in. 2018).

5.2. ZAPOBIEGANIE DEGRADACJI CHEMICZNEJ GLEB

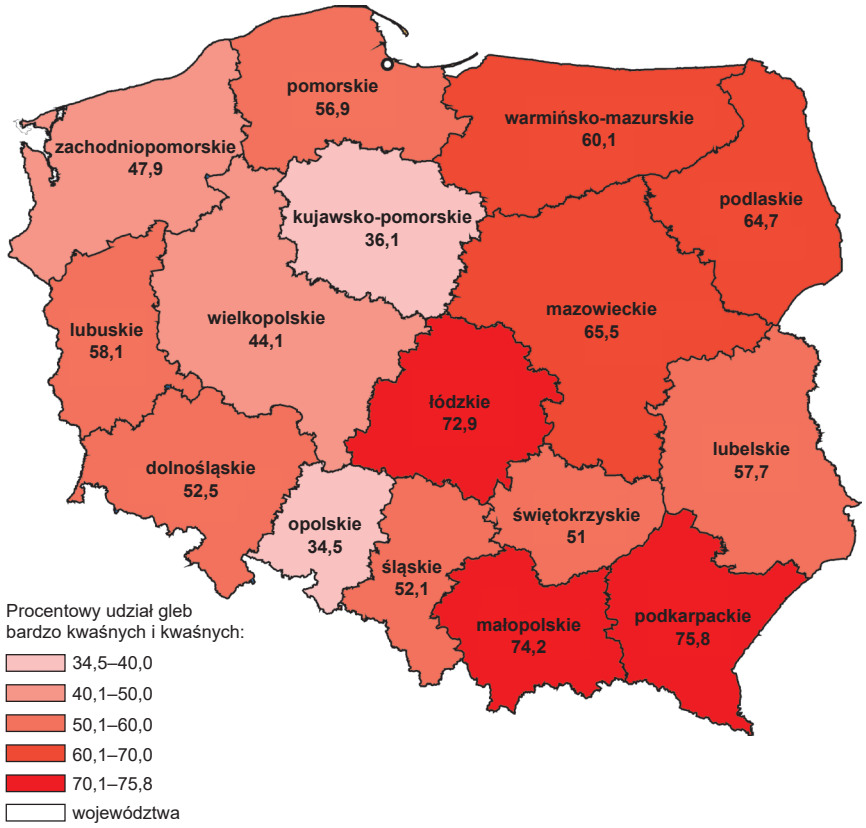
Do najważniejszych działań mogących ograniczyć wystąpienie degradacji chemicznej gleb należy zaliczyć:

- Regulowanie odczynu gleb, aby nie dopuścić do zakwaszenia bądź nadmiernej alkalizacji, co może w konsekwencji doprowadzić do znacznego wyczerpania bądź blokowania przyswajalnych form składników pokarmowych. Gleby takie wykazują małą produkcyjność i z trudem ulegają wzbogaceniu w składniki, nawet po zastosowaniu dużych dawek nawozów.
- Dbanie o odpowiedni poziom zawartości próchnicy w glebie, która dzięki dużemu kompleksowi sorpcyjnemu zwiększa odporność gleb na zanieczyszczania.
- Regulowanie odczynu gleb dla zwiększenia ich odporności na degradację chemiczną. Gleby użytków rolnych powinny wykazywać wartość pH w graniach od 5,0 do 7,0.

6. ZAKWASZENIE GLEB

Jednym z poważniejszych problemów, z jakim muszą zmagać się rolnicy w Polsce jest zakwaszenie gleb. Jest to jeden z głównych czynników limitujących produkcję roślinną (Filipek 2001, Lipiński 2005). Do zakwaszania gleb Polski przyczynia się polodowcowy charakter większości pokrywy glebowej naszego kraju. Szacuje się, że ponad 90% obszaru Polski zajmują gleby wytworzone ze skał osadowych, głównie okruchowych luźnych przyniesionych przez lodowce ze Skandynawii. W związku z tym, większość naszych gleb z natury jest silnie lub umiarkowanie zakwaszona (Filipek i Skowrońska 2013). Najliczniejszą grupę stanowią gleby bie-

licoziemne i brunatnoziemne, należące do typu gleb bielicowych i rdzawych, brunatnych kwaśnych i właściwych oraz gleb płowych. Gleby bielicoziemne powstały głównie z utworów piaszczystych w warunkach intensywnego przemywania i ługowania składników mineralnych z poziomów powierzchniowych do poziomów głębszych. Są to z natury gleby kwaśne i bardzo kwaśne, ubogie w próchnicę i składniki mineralne oraz o słabych właściwościach buforowych (Ochal i in. 2017) (rys. 5).



Rys. 5. Przestrzenne zróżnicowanie próbek gleb w klasach odczynu bardzo kwaśnego i kwaśnego (Ochal i in. 2017)

Przyrodnicze przyczyny zakwaszenia gleb zachodzą stale, ale stają się groźne dla agroekosystemów, gdy zostaną wsparte czynnikami antropogenicznymi. Zakwaszenie gleb powoduje szereg ujemnych skutków polegających na zmniejszeniu produktywności i żyzności gleby, ograniczeniu dostępności mineralnych składników pokarmowych dla roślin oraz na obniżeniu zdolności buforowych i odporności gleby na procesy prowadzące ostatecznie do ich degradacji (Boguszewski 1980, Ochal 2014). Za główne przyczyny antropogenicznego zakwaszenia uznaje się nawożenie nawozami azotowymi oraz emisje kwasotwórczych zanieczyszczeń powietrza SO_2,

NO_x i NH_3, które opadają na gleby w postaci suchego bądź mokrego depozytu – „kwaśnych deszczy" (Filipek 2005, Filipek i in. 2006, Filipek i Skowrońska 2013).

Negatywne skutki zakwaszenia gleb to:
- toksyczność glinu, manganu i wodoru dla roślin;
- wymywanie kationów zasadowych;
- zwiększenie dostępności metali w glebach zanieczyszczonych;
- obniżenie aktywności mikrobiologicznej;
- deficyty Ca, Mg i P u roślin;
- pogorszenie struktury gleby.

6.1. POTRZEBY WAPNOWANIA

Bazy danych IUNG-PIB w Puławach obrazują, że około 32,5% przebadanych próbek gleb charakteryzuje się potrzebami wapnowania koniecznymi, 17,2% – potrzebnymi, 13,4% – wskazanymi, 12% – ograniczonymi, a 25% – zbędnymi. Największymi potrzebami wapnowania koniecznymi i potrzebnymi odznaczają się województwa: małopolskie – 77,5%, podkarpackie – 73,4%, łódzkie – 59,7%, natomiast dolnośląskie, mazowieckie, śląskie, podlaskie, lubelskie, warmińsko-mazurskie – od 54,2 do 50,9%. Najmniejszymi potrzebami wapnowania charakteryzuje się województwo kujawsko-pomorskie – 26,5%. Średnio w Polsce według badań IUNG-PIB w Puławach około 49,7% przebadanych próbek gleb wymaga wapnowania koniecznego i potrzebnego, w porównaniu z danymi Krajowych Stacji Chemiczno-Rolniczych z lat 2012–2015 potrzeby te są wyższe o 15,7% (Ochal i in. 2017).

Oszacowane sumaryczne zapotrzebowania rolnictwa w Polsce na wapno wynosi około 31,0 mln ton CaO (około 62 mln ton w masie nawozów), w tym dla gleb bardzo kwaśnych o pH poniżej 5,1 – około 18,5 mln ton CaO (ok. 37 mln ton w masie). Zapotrzebowanie to powinno być zrealizowane w przeciągu najbliższych 4–6 lat (Ochal in. 2017). Gleba stanowi dobro ogólnonarodowe i jest zasobem, w tym przypadku, odnawialnym, jednak pod warunkiem należytego użytkowania. Jedną z tych inwestycji jest wapnowanie. Nawozy wapniowe mogą pochodzić z bardzo dobrych i bogatych krajowych złóż. Zwiększenie ich eksploatacji nie stanowi większego problemu technicznego (Ochal i in. 2017).

6.2. PRZECIWDZIAŁANIE ZAKWASZENIU GLEB

W celu utrzymania właściwego odczynu gleby, należy stosować się do poniższych zasad:
- regularnie, najlepiej raz w roku badać odczyn (pH) gleby w warstwie ornej;
- decyzję dotyczącą potrzeby wapnowania gleb podejmować na podstawie pomiaru pH gleby;
- wyznaczać optymalną dawkę wapna potrzebną do uregulowania odczynu gleby;
- wapnowanie gleby wykonywać w optymalnym terminie;

– wybierać odpowiednie wapno nawozowe (wapno węglanowe wapniowe i wapniowo-magnezowe, dolomitowe, wapno tlenkowe, substancje odpadowe zawierające wapń). Wapna tlenkowe szybko podnoszą pH, dlatego nie są zalecane na gleby lekkie i bardzo lekkie. Zbyt gwałtowne podniesienie odczynu gleb może negatywnie wpłynąć na poziom plonowania. Bezpieczniejsze w stosowaniu są wapna wapniowe, wapniowo-magnezowe czy dolomitowe.

7. PODSUMOWANIE

Niezbyt korzystne warunki glebowo-klimatyczne występujące na obszarze naszego kraju mają swoje odzwierciedlenie w wartości bonitacyjnej gruntów ornych. Ponad 70% gleb gruntów ornych zalicza się do średnich i słabych klas bonitacyjnych (dane IUNG-PIB w Puławach). Są to więc gleby z natury mało żyzne i wrażliwe na niekorzystne warunki klimatyczne. To sprawia, że gospodarowanie na nich wymaga od rolników znacznie większych nakładów pracy na utrzymanie żyzności i zapobieganie różnym formom degradacji, niż w przypadku gleb z natury żyznych. Nieodpowiedni sposób gospodarowania glebami może doprowadzić do pogorszenia ich żyzności, co w konsekwencji może sprawić, że cele produkcyjne nie zostaną osiągnięte bądź będą znacznie ograniczone. Jest to również niezwykle ważne w aspekcie zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego kraju, czy też w ograniczaniu skutków niekorzystnych zmian klimatycznych.

Dbałość o właściwe gospodarowanie glebami wynika również z wymogów stawianych rolnikom uzyskującym wsparcie finansowe ze środków UE. Wymogi te wskazują na główne kierunki poprawnego gospodarowania, w tym na przeciwdziałanie degradacji gleb poprzez zastosowanie odpowiednich działań dotyczących m.in. zmianowania upraw, gospodarowania resztkami pożniwnymi, nawożenia czy stosowania substancji odpadowych (Decyzja Komisji (UE) 2018/813).

Literatura:

1. Bednarz W.: Wpływ stopnia zagęszczenia gleby kołami ciągnika na jej aktywność biologiczną. Rocz. Nauk Rol., 1985, **76-C-1**: 9-23.
2. Błaszczyk M.: Mikrobiologia środowisk. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2010, s. 183.
3. Boguszewski W.: Wapnowanie gleb. PWRiL, Warszawa 1980, ss.176.
4. Carlon C., D`Alessandro M., Swartjes F.: Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonisation. In: JRC scientific and technical report EUR 22805 EN – 2007, C. Carlon (ed.). Luxemburg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007.
5. Czyż E.A.: Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. Soil Till. Res., 2004, **79(2)**: 153-166.

6. Czyż E.A., Dexter A.R.: Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. Int. Agroph., 2009, **23(4)**: 319-326.
7. Czyż E.A., Gajda A.M.: Zmiany parametrów jakości i żyzności gleby brunatnej właściwej pod wpływem stosowania konserwujących systemów uprawy roli. Międzynarodowa Konferencja Naukowa nt. „Nowe Trendy w Agrofizyce", Lublin, 10–11.06.2008, Wyd. Nauk. FRNA Lublin, 2008, ss. 58-59.
8. Czyż E.A., Łopatka A., Dexter A.R., Łysiak M., Stanek-Tarkowska J.: Podatność gleb na zagęszczenie. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **35(9)**: 57-95.
9. Czyż E.A., Tomaszewska J., Dexter A.R.: Response of spring barley to changes of compaction and aeration of sandy soil under model conditions. Int. Agroph., 2001, **15(1)**: 9-12.
10. Decyzja Komisji (UE) 2018/813 z dnia 14 maja 2018 r. w sprawie sektorowego dokumentu referencyjnego dotyczącego najlepszych praktyk zarządzania środowiskowego, sektorowych wskaźników efektywności środowiskowej oraz kryteriów doskonałości dla sektora rolnictwa na podstawie rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1221/2009 w sprawie dobrowolnego udziału organizacji w systemie ekozarządzania i audytu we Wspólnocie (EMAS). ss. 64
11. Dexter A.R.: Soil physical quality. Part I: theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 2004, **120**: 201-214.
12. FAO, http://www.fao.org/soils-2015/en/
13. Filipek T.: Przyrodnicze i antropogeniczne przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb. Nawozy i Nawożenie, 2001, **8**: 5-26.
14. Filipek T.: Dynamika antropogenicznych przyczyn zakwaszenia gleb w Polsce w ostatnich latach. Nawozy i Nawożenie, 2005, **23**: 67-83.
15. Filipek T., Fotyma M., Lipiński W.: Stan, przyczyny i skutki zakwaszenia gleb ornych w Polsce. Nawozy i Nawożenie, 2006, **27**: 7-38.
16. Filipek T., Skowrońska M.: Aktualnie dominujące przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce. Acta Agroph., 2013, **20(2)**: 283-294.
17. Gantzer C., Anderson S., Thompson A., Brown J.: Evaluation of soil loss after 100 years of soil and crop management. Agron. J., 1991, **83**: 74-77.
18. Gonet S.S.: Ochrona zasobów materii organicznej gleb. W: Rola materii organicznej w środowisku, S.S. Gonet i M. Markiewicz (red.). PTSH, Wrocław 2007, s. 7-29.
19. GUS: Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2014. GUS, Warszawa 2014, ss. 445.
20. Holoubek I., Dušek L., Sáňka M., Hofman J., Čupr P., Jarkovskỳ J., Zbíral J., Klánová J.: Soil burdens of persistent organic pollutants – Their levels, fate and risk. Part I. Variation of concentration ranges according to different soil uses and locations. Environ. Poll., 2009, **157**: 3207-3217.
21. Ilnicki P.: Polskie rolnictwo a ochrona środowiska. Wyd. AR w Poznaniu, 2004, ss. 481.
22. Józefaciuk A., Józefaciuk C.: Erozja agroekosystemów. Bibl. Monit. Środ., Warszawa 1995, ss. 168.
23. Józefaciuk A., Józefaciuk C.: Ochrona gruntów przed erozją. PIOŚ Warszawa, 1999, ss. 108.
24. Józefaciuk C., Józefaciuk A.: Struktura zagrożenia erozją wodną fizjograficznych krain Polski. Pam. Puł., 1992, **101**: 23-50.
25. Józefaciuk C., Józefaciuk A.: Erozja i melioracje przeciwerozyjne. Bibl. Monit. Środ., 1996, ss. 144.
26. Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: Erozja gleb w Polsce – skutki środowiskowe i gospodarcze, działania zaradcze. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2014, **44**: 1-264.

27. Józefaciuk A., Nowocień E., Wawer R.: Erozja wietrzna w Polsce – występowanie, skutki, działania zaradcze. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2018, **57**: 1-224.
28. Kabata-Pendias A.: Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., 2011, pp. 413.
29. Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B.: Application of preliminary stage of risk assessment procedure for agricultural soils: area affected by flood as a case study. J. Food Agric. Environ., 2012, **10**: 675-680.
30. Klimaszewski M.: Geomorfologia. PWN, Warszawa 1978, ss. 1098.
31. Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej, I. Duer, M. Fotyma, A. Madej (red.). Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwo Środowiska. Warszawa 2002, s. 83.
32. Kowaliński S.: Żyzność gleby. W: Gleboznawstwo. S. Zawadzki (red.). Wyd. IV. PWRiL, Warszawa 1999, s. 299-301.
33. Kuś J.: Możliwości zrównoważonego rozwoju specjalistycznych gospodarstw rolnych. Problemy Inżynierii Rolniczej, 2006, XIV, **2(52)**: 5-14.
34. Kuś J., Kopiński J.: Gospodarowanie glebową materią organiczną we współczesnym rolnictwie. Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, 2012, **2**: 5-26.
35. Lipiec J.: Wpływ stanu zagęszczenia gleby na wzrost i funkcjonowanie roślin. Acta Agroph., 2002, **63**: 49-62.
36. Lipiec J., Rejman J.: Gleba pod kołami. Academia, 2007, **3(11)**: 38-390.
37. Lipiński W.: Odczyn gleb Polski. Nawozy i Nawożenie, 2005, **23**: 33-40.
38. Maliszewska-Kordybach B., Klimkowicz-Pawlas A., Smreczak B., Stuczyński T.: Relationship between soil concentrations of PAHs and their regional emission indices. Water Air Soil Poll., 2010, **213**: 319-330.
39. Maliszewska-Kordybach B., Klimkowicz-Pawlas A., Smreczak B., Gałązka R.: Effect of flooding on contamination of agriculture soils with metals and PAHs: the middle Vistula Gap case study. Water Air Soil Poll., 2012, **223**: 687-697.
40. Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A.: Effects of anthropopressure and soil properties on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the upper layer of soils in selected regions of Poland. Appl. Geochem., 2009, **24**: 1918-1926.
41. Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A.: Zagrożenie zanieczyszczeniami chemicznymi gleb na obszarach rolniczych w Polsce w świetle badań IUNG-PIB w Puławach. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **35(9)**: 97-118.
42. Mazur T.: Stan i perspektywa bilansu substancji organicznej w glebach uprawnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.,1995, **421**a: 267-276.
43. Mocek A. (red.): Gleboznawstwo, Wyd. Naukowe PWN SA, Warszawa 2016, ss. 486-491.
44. Nowocień E., Wawer R.: Ocena struktury zagrożeń gleb erozją wodną w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2013, **35(9)**: 29-56.
45. Niedźwiecki J., Czyż E.A., Dexter A.R., Reszkowska A.: Effect of soil organic matter content on soil physical quality and implication for environmental protection. Int. Conf. "Soil protection strategy-needs approaches for policy support" 9–11 March 2006, IUNG-PIB, Puławy, pp. 106-108.
46. Ochal P.: Wapnowanie podstawowym elementem dobrych praktyk rolniczych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2014, **37(11)**: 9-18.
47. Ochal P., Jadczyszyn T., Jurga B., Kopiński J., Matyka M., Madej A., Rutkowska A., Smreczak B., Łysiak M.: Środowiskowe aspekty zakwaszenia gleb w Polsce. Raport Techniczny na zlecenie Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi, 2017, s. 43.

48. Pranagal J.: Stan fizyczny wybranych gleb Lubelszczyzny. Rozprawy Naukowe UP w Lublinie, 2011, **353**: 1-129.
49. Poskrobko B., Poskrobko T., Skiba K.: Ochrona biosfery. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2007, s. 153.
50. Prusinkiewicz Z.: Podstawowe pojęcia gleboznawcze. W: Badania ekologiczno-gleboznawcze, R. Bednarek, H. Dziadowiec, U. Pokojska i Z. Prusinkiewicz (red.). Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2004, s. 25-26.
51. Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 13 listopada 2007 r. w sprawie strategii tematycznej w dziedzinie ochrony gleby (2006/2293(INI)).P6_TA(2007)0504.
52. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B., Terelak H., Koza P., Łysiak M., Gałązka R., Pecio M., Miturski T., Hryńczuk B.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce latach 2010–2012. Bibl. Monit. Środ., Warszawa, 2013, ss. 196.
53. Stuczyński T., Kozyra J., Łopatka A., Siebielec G., Jadczyszyn J., Koza P., Doroszewski A., Wawer R., Nowocień E.: Przyrodnicze uwarunkowania produkcji rolniczej w Polsce. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, **7**: 77-115.
54. Smreczak B., Siebielec G., Ukalska-Jaruga A., Klimkowicz-Pawlas A.: Ocena zawartości kadmu, cynku i ołowiu oraz benzo(a)pirenu w glebach użytkowanych rolniczo – dwadzieścia lat monitoringu chemizmu gleb ornych Polski. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2018, **58(12)**: 81-95.
55. Terelak H., Stuczyński T., Motowicka-Terelak T., Maliszewska-Kordybach B., Pietruch C.: Monitoring chemizmu gleb ornych Polski w latach 2005–2007. Bibl. Monit. Środ., Warszawa 2008, ss. 135.
56. Ukalska-Jaruga A., Smreczak B., Strzelecka J.: Wpływ materii organicznej na jakość gleb użytkowanych rolniczo. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2017, **54(8)**: 25-39
57. Wiater J.: Wpływ nawożenia organiczno-mineralnego na bilans węgla organicznego. Fol. Univ. Agric. Stetin. 211, Agricultura, 2000, **84**: 515-520.
58. Wolińska A.: Aktywność dehydrogenazowa mikroorganizmów glebowych i dostępność tlenu w procesie reoksydacji wybranych mineralnych gleb Polski. Acta Agroph. Rozprawy i Monografie, 2010, **180**: 1-88.

II ROLA MIKROORGANIZMÓW W KSZTAŁTOWANIU ŻYZNOŚCI I ZDROWOTNOŚCI GLEBY

Beata Kowalska

Instytut Ogrodnictwa
Zakład Mikrobiologii
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
e-mail: beata.kowalska@inhort.pl

1. WSTĘP

Gleba należy do najważniejszych i zarazem najbardziej skomplikowanych środowisk naturalnych, w których rozwijają się drobnoustroje. Glebę zasiedla ogromna liczba drobnoustrojów, które stanowią 0,2% jej ciężaru i zajmują 1,33% jej objętości. W piętnastocentymetrowej warstwie gleby, na powierzchni jednego hektara, znajduje się 1,5–7,2 t biomasy mikroorganizmów – bakterii, grzybów, glonów, sinic oraz pierwotniaków (Kwaśna 2014). Najwięcej mikroorganizmów jest w profilu 10 cm od powierzchni oraz w ryzosferze (wokół korzeni roślin). Najczęściej występujące grzyby należą do gatunków z rodzajów: *Aspergillus, Mucor, Penicillium, Trichoderma, Acremonium, Candida, Rhizopus, Chrysosporium*. Spośród bakterii powszechnie występują: *Azotobacter, Xanthomonas*, *Agrobacterium, Sarcina*, *Pseudomonas, Bacillus*, *Arthrobacter, Corynebacterium, Brevibacterium*, *Serratia,* promieniowce z rodzajów: *Actinomyces, Nocardia, Streptomyces*. Większość mikroorganizmów pełni pozytywną rolę w środowisku glebowym. Bez ich udziału niemożliwe byłoby życie na Ziemi (Błaszczyk 2010, Kwaśna 2014, Bünemann i in. 2018, Frąc i in. 2018).

Mikroorganizmy glebowe pełnią wiele ważnych funkcji w glebie. Z punktu widzenia żyzności i produktywności gleby warto wymienić następujące:

- tworzenie struktury gleby;
- rozkład materii organicznej i uwalnianie do otoczenia pierwiastków biogennych, m.in. węgla, azotu, fosforu, siarki;
- uruchamianie nieprzyswajalnych form pierwiastków;
- wiązanie toksycznych substancji, np. metali ciężkich – rtęci, arsenu, kobaltu, cynku;
- przeprowadzanie procesu detoksykacji gleby, poprzez rozkład nadmiaru detergentów, pestycydów i innych substancji skażających środowisko;
- ochrona systemu korzeniowego roślin przed patogenami;
- produkcja metabolitów wtórnych, np. antybiotyków;
- udział w stymulacji wzrostu roślin poprzez wydzielanie enzymów i hormonów.

Udział mikroorganizmów w kształtowaniu i poprawie struktury gleby polega głównie na wytwarzaniu metabolitów i śluzów. Metabolity bakteryjne o charakterze śluzu, strzępki grzybów i promieniowców oraz tworzone przez mikroorganizmy związki humusowe spajają niewielkie gruzełki gleby w większe agregaty, które stwarzają lepsze warunki fizyczne do rozwoju bakterii tlenowych i korzeni roślin, stabilizują glebę, przeciwdziałają erozji, zwiększają przewietrzenie gleby i jej drenaż, zatrzymują wodę i zabezpieczają glebę przed wysychaniem, zwiększają zawartość rozpuszczalnych w wodzie związków organicznych i mineralnych oraz polepszają żyzność gleby (Bednarek i in. 2004).

2. TWORZENIE PRÓCHNICY

Bardzo istotną funkcją mikroorganizmów glebowych jest ich udział w tworzeniu **próchnicy**, której obecność jest podstawowym warunkiem wysokiej żyzności gleby. Próchnica jest to bezpostaciowa substancja organiczna powstająca w glebie w procesach biochemicznych. Proces tworzenia próchnicy nazywany jest **humifikacją**. Próchnica zawiera 45–65% węgla, 30–40% tlenu, 2–6% azotu oraz niewielkie ilości fosforu, wapnia, magnezu i siarki organicznej. Głównym produktem procesu humifikacji są frakcje związków o zbliżonych właściwościach, tj. kwasów huminowych, kwasów fulwowych i humin. Związki te powstają w procesach mikrobiologicznych z bardzo wielu substancji, głównie z ligniny, węglowodanów i związków azotowych. Efektywność tworzenia związków próchniczych zależy głównie od rodzaju substratu (uprawianej rośliny lub rodzaju nawożenia) i wyrażona jest poprzez tzw. współczynnik humifikacji (HI). Najwyższy dodatni HI stwierdzono dla łubinu i seradeli uprawianych na zielony nawóz – 40% oraz obornika – 35%; słomy zbóż – około 25%, resztek z kukurydzy – 15%, natomiast dla resztek pożniwnych z roślin okopowych – jedynie 8%. Zwykle próchnicy w glebie jest niedużo, jej ilość waha się od kilku procent do setnych procentu (Pałosz 2009, Pikuła 2015).

W procesie tworzenia próchnicy zaangażowanych jest wiele grup mikroorganizmów. Różnorodność i bogactwo ich gatunków, wielkość populacji oraz ich aktywność odgrywają istotną rolę w procesach humifikacji.

Zasoby próchnicy w glebie podlegają ciągłym i dynamicznym procesom przemian ilościowych i jakościowych. Zapewnienie ciągłości przemian próchnicy jest możliwe przy wysokiej aktywności mikrobiologicznej gleby oraz pod warunkiem cyklicznego dostarczania świeżej materii organicznej. Proces rozkładu próchnicy zachodzi intensywnie w warunkach: braku świeżej materii organicznej, niedostatku zaopatrzenia gleby w azot, wahań temperatury i wilgotności gleby, natlenienia i nawilgocenia gleby w czasie intensywnej uprawy mechanicznej oraz równoczesnego występowania białka i węglowodanów (Pałosz 2009, Pikuła 2015).

3. AKTYWNOŚĆ ENZYMATYCZNA MIKROORGANIZMÓW

Mikroorganizmy wydzielają do gleby bardzo dużo różnych enzymów, które są coraz częściej określane jako biologiczne wskaźniki żyzności i urodzajności gleby. Aktywność enzymatyczna gleby jest parametrem wiernie odzwierciedlającym stan środowiska glebowego i może być uznawana za wskaźnik ogólnej aktywności mikrobiologicznej. Jest ona często wykorzystywana w szacowaniu zmian zachodzących w środowisku glebowym pod wpływem substancji chemicznych.

W środowisku pól uprawnych szczególnie ważnymi enzymami są te, które biorą bezpośredni udział w degradacji celulozy, ksylanu, pektyny, ligniny, związków fe-

nolowych i innych składników komórek resztek roślinnych (Król i Smagacz 2016). Aktywność biologiczną gleby ocenia się często głównie na podstawie oddziaływania czterech enzymów: dehydrogenaz, fosfataz (kwaśna i zasadowa), ureazy i proteazy (Gałązka i Smreczak 2017). Enzymy glebowe uczestniczą w metabolizmie i są naturalnymi katalizatorami wielu ważnych procesów glebowych, takich jak:

- rozkład substancji organicznej uwalnianej do gleby podczas wegetacji roślin;
- reakcje powstawania i rozkładu próchnicy glebowej;
- uwalnianie i udostępnianie roślinom substancji mineralnych;
- wiązanie azotu cząsteczkowego;
- nitryfikacja i denitryfikacja;
- detoksykacja ksenobiotyków.

Dehydrogenazy stanowią liczną grupę oksydoreduktaz zlokalizowanych w cytoplazmie lub strukturach utworzonych z błon cytoplazmatycznych. Katalizują utlenianie związków organicznych. Niezależnie od stanu natlenienia gleby są elementem metabolizmu oddechowego ściśle związanego z wytwarzaniem energii biologicznie dostępnej. Oznaczenie aktywności tych enzymów w glebie jest wskaźnikiem intensywności metabolizmu oddechowego mikroorganizmów glebowych, głównie bakterii. Obserwowano ścisłą zależność pomiędzy aktywnością dehydrogenaz oraz zawartością materii organicznej, żyznością gleby i liczebnością mikroorganizmów glebowych (Brzezińska i Włodarczyk 2005, Król i Smagacz 2016).

Fosfatazy odgrywają ważną rolę w glebie, ponieważ stymulują przemiany organicznych związków fosforu w nieorganiczne fosforany (HPO_4^{-2} i $H_2PO_4^-$) bezpośrednio dostępne dla roślin i organizmów glebowych. Średnia zawartość fosforu w glebie wynosi około 0,05% (w/w), jednak tylko 0,1% jest dostępna dla roślin. Niedobór tego pierwiastka jest często uzupełniany poprzez stosowanie nawozów fosforowych. Jednak większość zastosowanego fosforu w formie nawozów nie jest dostępna dla roślin. Stosowanie z kolei nawozów w nadmiernych ilościach prowadzi do zanieczyszczenia środowiska, powodując skażenie wód gruntowych, eutrofizację zbiorników wodnych i utratę żyzności gleby. Dostępność fosforu może być czynnikiem ograniczającym rozwój roślin. Ze względu na fakt, że rośliny wykorzystują jedynie fosfor nieorganiczny, mineralizacja organicznych związków fosforu ma duże znaczenie w rolnictwie, jak również ekonomii. Mineralizacja fosforu organicznego jest głównie zjawiskiem mikrobiologicznym. Aktywność fosfataz jest dobrym wskaźnikiem potencjału mineralizacji fosforu organicznego oraz aktywności biologicznej gleby. Fosfatazy reagują także najszybciej na wzrost zawartości metali ciężkich w glebie. Dlatego też aktywność fosfataz jest przydatnym testem w przypadku zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi oraz dobrym wskaźnikiem zanieczyszczenia gleb substancjami ropopochodnymi (Bielińska 2005, Mocek-Płóciniak 2011, Król i Smagacz 2016).

Ureaza jest enzymem, który katalizuje reakcję hydrolitycznego rozkładu mocznika na amoniak i dwutlenek węgla, rozcinając wiązania amidowe C-N. Bakterie

wykorzystują mocznik jako źródło azotu. Mikroorganizmy wytwarzające ureazę to m.in. bakterie *Arthrobacter mobili*, *Sporosarcina pasteurii*, *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli*, *Proteus vulgaris*, bakterie z rodzaju *Pseudomonas* oraz grzyby *Rhizopus oryzae* i *Aspergillus flavus*. Aktywność tego enzymu w glebie jest skorelowana z zawartością organicznego węgla (Król i Smagacz 2016).

Enzymy proteolityczne katalizują reakcje rozpadu wiązań peptydowych z udziałem wody. W środowisku glebowym istotne znaczenie mają enzymy proteolityczne wytwarzane przez grzyby *Aspergillus oryzae*, *Fusarium oxysporum* oraz bakterie *Bacillus subtilis*, *Streptomyces griseus* i *S. rimosus* (Król i Smagacz 2016).

4. ROLA MIKROORGANIZMÓW W OBIEGU PIERWIASTKÓW

Gleba jest złożona z części mineralnych, organicznych i organizmów żywych. Zachodzi w niej wiele reakcji chemicznych i biochemicznych określanych jako **metabolizm gleby**. Ocenia się, że w około 80–90% za przebieg tego metabolizmu są odpowiedzialne mikroorganizmy.

Mikroorganizmy występujące w glebie można podzielić na dwie grupy:

– **autochtoniczne**, typowe dla środowiska glebowego, występują zawsze, nawet w glebach nieuprawianych,
– **allochtoniczne**, które bytują w glebie okresowo i rozwijają się po wprowadzeniu do gleby substancji organicznej.

Wśród autochtonów występują wszystkie grupy mikroorganizmów (archeony, bakterie, grzyby, wirusy) oraz glony i pierwotniaki. Przeważnie są to organizmy saprofityczne, bytujące na martwej substancji organicznej, tlenowe, rosnące powoli, niefermentujące sacharydów. Do autochtonów należą m.in. bakterie z rodzajów: *Bacteroides*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Leconostoc*, *Legionella*, *Azotobacter*, *Arthrobacter*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Clostridium*, *Rhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium*.

Organizmy allochtoniczne mogą okresowo przebywać w glebie w stanie anabiozy i gwałtownie rozwijać się w odpowiednich warunkach. Należą do nich bakterie z rodzajów: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Proteus, Corynebacterium* oraz różne gatunki mikroorganizmów termofilnych. Obecność mikroflory allochtonicznej jest ściśle związana z działalnością człowieka. Źródłem jej mogą być: odchody zwierząt i ludzi, ścieki bytowo-gospodarcze z gospodarstw rolnych, nawozy naturalne wzbogacające glebę w składniki organiczne (obornik, gnojowica, gnojówka, komposty roślinne), opady atmosferyczne zmywające obszary zamieszkałe przez ludzi oraz środowiska przemysłowe, zawierające mikroflorę patogenną, gryzonie i owady będące wektorami (przenośnikami) organizmów chorobotwórczych (Błaszczyk 2010).

4.1. PRZEMIANY WĘGLA

Mikroorganizmy glebowe posiadają zdolność do rozkładu resztek roślinnych trafiających do gleby. Materiał ten jest bogaty w polisacharydy, głównie w celulozę, hemicelulozy (ksylan, mannan, kwasy uronowe) i skrobię. Do drobnoustrojów celulolitycznych, mających kompleks enzymów rozkładających celulozę właściwą, należą przedstawiciele różnych grup mikroorganizmów glebowych. Jako pierwsze na celulozie rozwijają się grzyby, których enzymy mają dużą zdolność penetracji. Najczęściej są to gatunki z rodzajów: *Agaricus, Alternaria, Aspergillus, Penicillium, Fusarium*, *Chaetomium*, *Mycogone* oraz *Trichoderma*. W następnej kolejności pojawiają się bakterie, promieniowce i pierwotniaki. Bardzo aktywnie prowadzi ten proces większość bakterii śluzowych, np. *Cytophaga* i *Sporocytophaga*, z bakterii właściwych – *Cellfalcicula*, *Cellulomonas* i *Cellvibrio* oraz inne rodzaje, takie jak: *Achromobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*, *Pseudomonas*, a także promieniowce – *Micromonospora*, *Nocardia i Streptomyces*. Celuloza wprowadzona do gleby ulega rozkładowi mikrobiologicznemu w ciągu kilku miesięcy (Król i Smagacz 2016).

Hemicelulozę rozkładają mikroorganizmy produkujące enzymy hydrolityczne – ksylanazę, mannazę i glukanazę (fot. 1). Enzymy te są produkowane przez bardzo dużą grupę bakterii m.in. z rodzaju *Sporocytophaga* oraz niektóre gatunki z rodzaju *Clostridium*.

Fot. 1. Kolonie bakteryjne wyizolowane z gleby zdolne do rozkładu chityny na pożywce stałej (fot. B. Kowalska)

Skrobia hydrolizowana jest przez następujące enzymy: α-amylazę, β-amylazę, glukoamylazę, α-D-glukozydazę, pullulanazę, izomylazę oraz transferazę glukozową cyklodekstryn. Zdolność do produkcji tych enzymów posiadają bakterie (np. *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas* sp., *Thermococcus* sp.), promieniowce (np. *Streptomyces megasporus*) i grzyby (np. *Aspergillus oryzae*, *A. niger*, *Rhizopus* sp.) (Król i Smagacz 2016).

W glebie znajdują się liczne związki aromatyczne (lignina, pochodne fenolu, chinony), które wyróżniają się dużą odpornością na rozkład biologiczny. Tylko nieliczne mikroorganizmy posiadają taką zdolność. Są wśród nich m.in. bakterie *Bacillus* sp., *Escherichia coli*, *Azotobacter, Xanthomonas, Pseudomonas, Agrobacterium* oraz grzyby glebowe z rodzajów: *Aspergillus, Penicillium, Trichoderma, Chaetomium*. Mikroorganizmy te hydrolizują związki aromatyczne przy udziale enzymów lakaz i tyrozynazy. Warto podkreślić, że związki te, głownie ligniny, są głównymi prekursorami substancji humusowych wchodzących w skład próchnicy (Król i Smagacz 2017).

4.2. PRZEMIANY AZOTU

Azot jest pierwiastkiem biogennym szeroko rozpowszechnionym w przyrodzie. Występuje w formie cząsteczkowej, mineralnej i organicznej. Azot cząsteczkowy w postaci N_2 to gaz, główny składnik powietrza atmosferycznego (78%). Azot mineralny to jony: amonowy – NH_4^+, azotanowy (III) – NO_2^- i azotanowy (V) – NO_3^-, natomiast azot w formie organicznej wchodzi w skład m.in. aminokwasów, białek, kwasów nukleinowych, mocznika, witamin, chlorofilu i alkaloidów. Pierwiastek ten trafia do gleby z nawozami mineralnymi, resztkami roślinnymi, opadami, ale również na drodze biologicznego wiązania azotu atmosferycznego. W glebie nie ulega kumulacji, lecz podlega stratom w wyniku m.in. ulatniania się do atmosfery i wymywania do wód. Niemal całość, bo aż 99% azotu w glebie występuje w formie organicznej. Najwięcej azotu w glebach mineralnych znajduje się w poziomach próchnicznych. Pierwiastek ten ulega wielu przemianom, z których wszystkie przebiegają przy udziale mikroorganizmów. Procesy te to: proteoliza, amonifikacja, nitryfikacja, denitryfikacja, symbiotyczne i niesymbiotyczne wiązania azotu atmosferycznego (Kwaśna 2014).

Proteoliza jest procesem rozkładu białek polegającym na hydrolitycznym rozkładzie wiązania peptydowego, które jest wiązaniem amidowym występującym między aminokwasami. Drobnoustroje proteolityczne tworzą liczną grupę o zróżnicowanym składzie jakościowym. Wyróżniamy wśród nich grzyby, promieniowce i bakterie (m.in. *Bacillus, Clostridium, Proteus, Pseudomonas*).

Powstałe podczas proteolizy aminokwasy są rozkładane w glebie w procesie **amonifikacji**. Mikroorganizmy wydzielają enzymy – dezaminazy, które rozkładają aminokwasy do amoniaku szybko przekształcającego się w formę NH_4^+. W procesie amonifikacji uczestniczą liczne bakterie (*Bacillus* sp., *Clostridium* sp., *Proteus*

sp., *Pseudomonas* sp., *Serratia* sp., *Escherichia coli*), promieniowce oraz grzyby (Paśmionka 2017).

Z rolniczego punktu widzenia istotnym enzymem jest ureaza wytwarzana przez mikroorganizmy powszechnie występujące w glebie. Katalizuje ona reakcję hydrolitycznego rozkładu mocznika na amoniak i dwutlenek węgla. Mikroorganizmy wykorzystują mocznik jako źródło azotu. Coraz większą rolę w nawożeniu azotowym odgrywają inhibitory ureazy – produkty dostępne na rynku. Blokują one działanie enzymu ureazy, czego efektem jest zwiększenie dostępności azotu dla roślin dostarczanego w formie nawozów w okresie wiosennym (Król i Smagacz 2016).

Nitryfikacja to proces utleniania amoniaku do azotanów (III) i azotanów (V), który jest prowadzony przez bakterie nitryfikacyjne (*Nitrosomonas, Nitrosococcus, Nitrosospira, Nitrosolubus, Nitrobacter, Nitrospira*). Dla mikroorganizmów proces ten jest źródłem energii wykorzystywanej do wzrostu i rozwoju. Z rolniczego punktu widzenia nitryfikacja ma następujące znaczenie:

- zwiększa zawartość jonów azotanowych w glebie;
- zmniejsza kwasowość gleb;
- przyspiesza rozpuszczanie minerałów glebowych;
- dostarcza substratu dla denitryfikacji (Kwaśna 2014).

Niekorzystną stroną intensywnej nitryfikacji jest zwiększenie puli jonów azotanowych, które mogą być łatwo wymywane lub w trakcie denitryfikacji ulegać przemianom do związków gazowych i ulatniać się do atmosfery. Inhibitory nitryfikacji spowalniają ten proces i zmniejszają straty nawozów azotowych. Procesom nitryfikacyjnym sprzyjają właściwe zabiegi agrotechniczne, natlenianie, wapnowanie gleb kwaśnych, utrzymywanie gleb w dobrej kondycji, unikanie przesuszania gleb.

Denitryfikacja polega na redukcji azotanów (V) do azotu w formie gazowej – N_2, N_2O i NO (denitryfikacja całkowita) lub azotu amonowego (denitryfikacja częściowa). Przeprowadzana jest odpowiednio w warunkach beztlenowych lub względnie beztlenowych przez bakterie z rodzajów: *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Escherichia*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Thiobacillus*. Zdolność do denitryfikacji mają również niektóre grzyby, np. *Aspergillus nidulans* i *Fusarium oxysporum*. Z punktu widzenia uprawy roślin i stanu gleby denitryfikacja jest procesem niekorzystnym, ponieważ zmniejsza ilość przyswajalnego azotu w glebie.

Wiązanie azotu atmosferycznego umożliwia pobieranie azotu z powietrza i włączenie go do związków organicznych. Proces ten polega na redukcji azotu cząsteczkowego N_2 do jonu amonowego NH_3, który jest przekształcany w organiczną formę azotu. Zdolność tę posiadają tylko organizmy należące do *Procaryota*. Biologiczne wiązanie wolnego azotu ma duże znaczenie ze względów ekologicznych i ekonomicznych. Tą drogą zostaje związane około 175×10^6 ton N rocznie, z tego 70% przypada na azot związany w układach symbiotycznych, a pozostałe 30% na wiązanie niesymbiotyczne (Kwaśna 2014). Drobnoustroje wiążące azot z powietrza dzielimy na asymilatory:

- współżyjące z roślinami i uczestniczące w symbiotycznym wiązaniu azotu;

– swobodnie żyjące w środowisku naturalnym i biorące udział w niesymbiotycznym wiązaniu azotu.

Warto zaznaczyć, że azot związany biologicznie ma olbrzymie znaczenie szczególnie w rolnictwie.

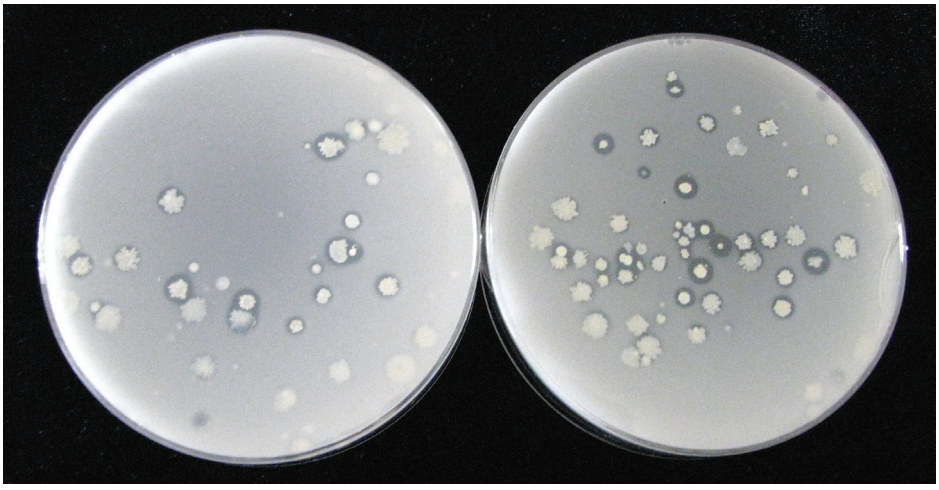
Symbiotyczne wiązanie azotu atmosferycznego w warunkach klimatycznych Polski przeprowadzają m.in. bakterie z rodzajów: *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium*. Współżyjąc z roślinami bobowatymi, wiążą 40–550 kg $N \cdot ha^{-1}$ rocznie (Kwaśna 2014). Dodatkowo bakterie te charakteryzują się dużą aktywnością biologiczną, np. *Rhizobium meliloti* wytwarza witaminę B_{12}, a inne gatunki rodzaju *Rhizobium* tworzą duże ilości biotyny (witaminy B_7).

Bakterie wiążące azot atmosferyczny, w wyniku chemotaksji (wytwarzania substancji chemicznych – flawonoidów) gromadzą się w ryzosferze roślin bobowatych i stąd wnikają do korzeni. Roślina wytwarza tryptofan, który na drodze dekarboksylacji i dezaminacji przekształca się w kwas indolilooctowy. Pod jego wpływem dochodzi do deformacji korzeni, co umożliwia wniknięcie bakterii do wnętrza. Bakterie wytwarzają wówczas tzw. nić infekcyjną, która wnika w tkankę korową korzeni gospodarza. Silnie namnażające się bakterie powodują pęknięcie nici i dochodzi do silnej kolonizacji warstwy korowej korzenia. Doprowadza to do powstania brodawek korzeniowych, w których wyróżnia się endodermę, korę brodawki oraz naczynia. Bakterie przekształcają się w bakteroidy. Są one 10–12-krotnie większe od komórek wegetatywnych i pozbawione zdolności rozmnażania. Lokują się w brodawkach. Każda z brodawek może zawierać 5–20 mld bakteroidów. W brodawkach wytwarzana jest leghemoglobina o czerwonym zabarwieniu. Jej obecność świadczy o skutecznie przebiegającym procesie wiązania azotu atmosferycznego. Leghemoglobina, wykazując silne powinowactwo do O_2, chroni nitrogenezę (kompleks enzymatyczny umożliwiający wiązanie azotu) przed nadmiarem tlenu z zewnątrz. Jednocześnie ułatwia ona stałą i efektywną dyfuzję tlenu do bakteroidów, które są niezbędne do produkcji energii w procesach oddechowych (Stasiak i in. 2016, Paśmionka 2017).

Wiązanie N_2 przez bakterie wolno żyjące przebiega przy udziale bakterii z rodzaju *Clostridium* (*C. pasteurianum*, *C. butyricum* i *C. acetobutylicum*), *Azotobacter* (*A. chroococcum*, *A. vinelandii*, *A. beijerinckii*, *A. paspali*), *Azospirillum*, *Azomonas* (*A. agilis*, *A. insignis*), *A. macrocytogenes*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Derxia*, *Achromobacter*, *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Aerobacter*, *Flavobacterium*. Bakterie te wiążą od około 1 do 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ rocznie, co stanowi 30% azotu przyswajanego na drodze biologicznej. Dodatkowo niektóre gatunki mają zdolność do wytwarzania substancji wzrostowych, które powodują lepszy rozwój i rozgałęzianie się systemu korzeniowego, a w związku z tym do usprawnienia gospodarki wodnej i pobierania soli mineralnych przez roślinę (Paśmionka 2017).

4.3. OBIEG FOSFORU

Fosfor jest jednym z podstawowych pierwiastków biogennych zarówno znajdujących się w strukturach komórkowych, jak i biorących udział w procesach metabolicznych. Fosfor mineralny występuje w glebie, ale także w skałach, osadach dennych wód, przeważnie w formie nierozpuszczalnej. Jest związany głównie z wapniem, magnezem, żelazem lub glinem. Ze względu na małą rozpuszczalność tych związków w wodzie, ich dostępność dla roślin i różnych organizmów jest ograniczona. Drobnoustroje posiadają zdolność do przekształcania fosforanów (V) w formę rozpuszczalną, czyniąc je dostępnymi dla różnych organizmów i roślin (fot. 2.). Należą do nich bakterie nitryfikacyjne, siarkowe, wytwarzające silne kwasy, takie jak azotowy (V) lub siarkowy (VI). Stopniowo rozpuszczane i uwalniane jony fosforanowe są przemieniane w estry oraz kwas fosforowy (V) i pobierane przez rośliny w postaci soli zasadowych. W uruchamianiu fosforu biorą udział bakterie m.in. z rodzajów: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Pantoea*, *Phyllobacterium* oraz grzyby glebowe z rodzajów: *Rhodotorula*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Streptomyces* i *Micromonospora* (Sharma i in. 2013).



Fot. 2. Kolonie bakteryjne wyizolowane z gleby zdolne do rozkładu związków fosforu na pożywce stałej (fot. B. Kowalska)

Fosfor w glebie występuje także w postaci połączeń organicznych w związkach pochodzących z obumarłych komórek roślin, zwierząt i drobnoustrojów, np. w fitynie (związek zapasowy w niektórych nasionach), kwasach nukleinowych i lipidach. Zdolność mineralizacji fosforu organicznego posiadają niektóre mikroorganizmy, głównie ryzosferowe. Proces rozkładu zachodzi przy udziale enzymów – fosfataz.

4.4. PRZEMIANY SIARKI

Drobnoustroje utleniające związki siarki podzielono na trzy grupy:

– **nitkowate bakterie siarkowe z rodzajów *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Thioploca*** – utleniają obecny w środowisku siarkowodór do siarki, którą odkładają w swoich komórkach, a przy braku H_2S utleniają siarkę do siarczanów (VI);

$$H_2S + 0{,}5\ O_2 = H_2O + S$$
$$2S + 3O_2 + 2H_2O = 2H_2SO_4$$

– **nienitkowate bakterie siarkowe**, do których należą **tlenowe pałeczki z rodzajów *Thiobacillus*** i ***Acidithiobacillus*** (tzw. tionowe bakterie siarkowe) – w warunkach tlenowych utleniają siarkę elementarną do siarczanów (VI) oraz tioniany.

Przykładowa reakcja przeprowadzana przez *Thiobacillus thiooxidans*:

$$S + 1{,}5O_2 + H_2O = H_2SO_4$$
$$Na_2S_2O_3 + 2O_2 + H_2O = 2NaHSO_4$$

Przemiana cyjanosiarczku amonu w siarczan amonu przeprowadzana przez *Thiobacillus thiocyanooxidans*:

$$NH_4CNS + 2O_2 + 2H_2O = (NH_4)2SO_4 + CO_2$$

– **bezwzględnie beztlenowe bakterie** – utleniają siarczki do siarki elementarnej lub siarczanów (VI).

– **fotosyntetyzujące bakterie siarkowe** reprezentowane przez *Chlorobium* i *Chromatium* – utleniają siarkę zgodnie z następującymi reakcjami:

$$2H_2S + CO_2 = (CH_2O) + 2S + H_2O$$
$$2S + 3CO_2 + 5H_2O = 3(CH_2O) + 2H_2SO_4$$
$$Na_2S_2O_3 + 2CO_2 + 3H_2O = 2(CH_2O) + Na_2SO_4 + H_2SO_4$$

W warunkach beztlenowych siarczany (VI) mogą być również redukowane do H_2S przez bakterie desulfurykacyjne należące m.in. do rodzajów *Desulfovibrio* i *Desulfotomaculum*, spotykane w glebach zalewowych (Kwaśna 2014, Król i Smagacz 2016).

Około 50–70% siarki znajduje się w glebie w postaci połączeń organicznych (np. aminokwasy, witaminy). Mineralizację organicznych połączeń siarki przeprowadzają bakterie z rodzajów: *Achromobacter*, *Bacillus*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Serratia* oraz grzyby z rodzaju *Aspergillus*. W warunkach tlenowych produktami mineralizacji są merkaptany (tioalkohole), a następnie siarczany (IV), tiosiarczany i siarczany (VI), natomiast w warunkach beztlenowych – siarkowodór i merkaptany (Kwaśna 2014).

4.5. PRZEMIANY ŻELAZA

Utlenianie i redukcja związków żelaza zachodzi w glebie na drodze mikrobiologicznej. Utlenianie żelaza Fe^{2+} do Fe^{3+} przeprowadzają bakterie żelaziste, uzyskując w ten sposób energię do asymilacji CO_2.

$$4FeCO_3 + O_2 + 6H_2O = 4Fe(OH)_3 + 4CO_2 + \text{energia}$$

Bakterie żelaziste dzielą się na nitkowate i nienitkowate. Nitkowate obejmują m.in. rodzaje: *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Cladothrix*. Tworzą one długie nitki składające się z pałeczek otoczonych wyraźną i grubą pochewką śluzową, w której odkłada się wodorotlenek żelaza. Do nienitkowanych bakterii zalicza się pałeczki *Gallionella ferriginea*, *Siderocapsa* oraz *Thiobacillus ferrooxidans* (Kwaśna 2014).

4.6. PRZEMIANY MANGANU

Mangan występuje w glebie w formach: rozpuszczalnego w wodzie Mn^{2+}, wymiennego Mn^{2+} i łatwo ulegającego redukcji MnO_2 (formy łatwo przyswajalne przez rośliny) oraz w postaci utlenionej (nieczynnej). Wiele bakterii żelazistych, np. z rodzaju *Thiobacillus* oraz niektóre grzyby mają zdolność utleniania i redukcji manganu. Utlenianie Mn^{2+} do Mn^{4+} prowadzi do unieruchomienia tego pierwiastka w glebie. Zdolność taką posiadają bakterie manganowe, m.in. *Leptothrix echinata*, *L. discophora*, *Metallogenium personatum.* Redukcję manganu przeprowadzają drobnoustroje, np. *Geobacter matallireducens*, *Shewanella putrefaciens i Desulfovibrio acetoxidans*. Niski potencjał oksydoredukcyjny gleby sprzyja redukcji, a wysoki – utlenieniu manganu (Król 2013).

5. BIOREMEDIACJA

Mikroorganizmy wykorzystywane są do detoksykacji zanieczyszczeń, biorą udział w procesie oczyszczania środowiska – bioremediacji. Przeprowadzają one rozkład substancji szkodliwych do mniej toksycznych, nietoksycznych, względnie całkowicie je eliminują. Po zakończeniu procesu, liczebność populacji drobnoustrojów maleje. Zaletą bioremediacji jest jej wysoka skuteczność, niskie koszty, a także brak zagrożeń dla środowiska (Błaszczyk 2007). Spośród całej palety zanieczyszczeń środowiska bioremediacja znalazła największe zastosowanie w przypadku likwidacji skażeń gruntów i wód podziemnych, czyli środowiska gruntowo-wodnego. Duże możliwości bioremediacyjne posiadają zwłaszcza grzyby mikroskopowe (tab. 1). Ich aktywność degradacyjna wykorzystywana jest w przypadku szczególnie toksycznych, trwałych i trudno biodegradowalnych zanieczyszczeń, także tych pochodzących z rolnictwa, m.in. ze środków ochrony roślin (Marchut-Mikołajczyk i in. 2013, Góralczyk i in. 2016, Kołwzan i in. 2018).

Tabela 1

Przykłady grzybów posiadających właściwości bioremediacyjne (Kołwzan i in. 2018)

Rodzaj rozkładanej substancji	Grzyby
Sulfentrazon	*Chrysosporium* sp., *Eupenicillium* sp., *Paecilomyces* sp.,
Fluometuron	*Trichoderma viride*, *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana*
Chloronitrofen	*Phlebia brevispora*
Alachlor	*Paecilomyces marquandii*
Endosulfan	*Chaetosartotya stromatoides*, *Aspergillus terricola*, *Aspergillus terreus*
Toksafen, lindan	*Phanerochaete chrysosporium*, *Trametes hirsute*, *Bjerkandera adusta*, *Pleurotus* sp.

Wysoką wydajność eliminacji barwników zaobserwowano także w hodowlach bakterii z rodzaju *Pseudomonas* spp., m.in. *P. stutzeri.* Niektóre szczepy tego gatunku zdolne są do rozkładu jednopierścieniowych (benzen) i wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, takich jak trichloroetylen, naftalen, antracen czy fenantren, które często są obecne w glebach zanieczyszczonych związkami ropopochodnymi (Król i in. 2007).

6. WPŁYW ZABIEGÓW AGROTECHNICZNYCH NA MIKROORGANIZMY GLEBOWE

Zabiegi agrotechniczne mają duży wpływ na liczbę, aktywność oraz bioróżnorodność mikroorganizmów glebowych. Prawidłowo przeprowadzone wpływają na poprawę żyzności gleby. Jednak błędy popełniane w ich wykonaniu, stosowanie nieracjonalnego nawożenia lub zbyt intensywne używanie chemicznych środków ochrony roślin, może spowodować zaburzenia w funkcjonowaniu całych agroekosystemów (Wolińska i in. 2017, Wolińska i in. 2018a, Baćmaga i in. 2019). Czynnikiem silnie modyfikującym rozwój mikroorganizmów glebowych jest sposób uprawy roli, który różnicuje właściwości mikrobiologiczne gleby. Stosowanie orki – poprzez straty wody, dekompozycję składników pokarmowych, przemieszczanie materii organicznej w głębsze warstwy profilu glebowego – może zaburzyć równowagę fizjologiczną mikroorganizmów w niszach ekologicznych, zmniejszyć ilość energii dostępnej dla drobnoustrojów, co może być przyczyną zmniejszenia ich liczebności i aktywności w glebie. Do zabiegów zwiększających aktywność biologiczną gleb należy stosowanie międzyplonów, resztek pożniwnych, nawozów naturalnych i organicznych oraz wdrażanie uproszczeń w zabiegach agrotechnicznych (Tomkowiak i in. 2017). Liczne badania wskazują także na korzystny wpływ uprawy uproszczonej (bezorkowej)

na aktywność enzymatyczną gleby. W czasie delikatnego zmurszania ziemi struktura gleby zostaje jedynie nieznacznie naruszona, dzięki czemu nie powstają zbyt duże straty w funkcjonowaniu ekosystemu, przy czym w głąb dostaje się znaczna ilość tlenu. Dostępność tlenu wpływa pozytywnie na aktywność enzymatyczną, jak i na biomasę drobnoustrojów (Tomkowiak i in. 2017, Wolińska i in. 2018b).

Uprawa roślin w monokulturze prowadzi do zubożenia gatunkowego oraz zdominowania środowiska przez pojedyncze gatunki mikroorganizmów, często przez patogeny roślin. Stosowanie zbyt małych dawek nawozów mineralnych powoduje pojawienie się zjawiska konkurencji o składniki pokarmowe między roślinami i mikroorganizmami. W przypadku nawożenia organicznego niewłaściwe proporcje węgla i azotu wprowadzonych do gleby z materiałem organicznym mogą zaburzyć procesy mikrobiologiczne i wywołać konkurencję o te składniki.

Środki ochrony roślin, szczególnie w sytuacjach, kiedy są stosowane niezgodnie z etykietą, mają niekorzystny wpływ na mikroorganizmy glebowe, zubożając ich skład jakościowy. Niebezpieczny jest zabieg fumigacji, który zabija patogeny roślin, ale przede wszystkim mikroorganizmy decydujące o jej żyzności, takie jak promieniowce, bakterie z rodzaju *Rhizobium*, bakterie nitryfikacyjne. Jedną z najważniejszych i najczęściej stosowanych grup środków ochrony roślin są fungicydy, używane do zapobiegania i zwalczania chorób roślin wywoływanych przez grzyby. Z uwagi na sezonowe występowanie chorób grzybowych, związki wykorzystywane do zwalczania grzybów patogennych dla roślin stosowane są na tym samym terenie co roku, często wielokrotnie podczas sezonu. Może to prowadzić do ich akumulacji w glebie, a w konsekwencji do negatywnego wpływu na funkcjonowanie tego środowiska (Baćmaga i in. 2019).

7. PODSUMOWANIE

Do najważniejszych funkcji mikroorganizmów glebowych należą: rozkład materii organicznej, uwalnianie pierwiastków, tworzenie struktury gleby, produkcja wtórnych metabolitów, udział w procesach detoksykacji środowiska, ochrona systemu korzeniowego oraz wspomaganie wzrostu roślin. Wszystkie te procesy najefektywniej przebiegają w glebie żyznej, o bogatej bioróżnorodności. Negatywne zjawiska, takie jak zanieczyszczenie środowiska, antropopresja czy zmiany klimatu wpływają ujemnie na całokształt procesów biologicznych zachodzących w glebie i mogą stanowić zagrożenie dla jej jakości.

Rola mikroorganizmów w utrzymaniu dobrej kondycji środowiska glebowego nabiera szczególnego znaczenia w kontekście pojawiających się zmian klimatu (ocieplenie, zmiany struktury opadów atmosferycznych, wzrost CO_2 w atmosferze, ekstremalne zjawiska pogodowe, kurczenie się kriosfery i wzrost poziomu morza). Anomalie te wywierają ogromny wpływ na rolnictwo i wymagają zmodyfikowanego

podejścia do metod nawadniania, sposobów nawożenia i ochrony roślin. Zmiany klimatyczne wpływają także w sposób bezpośredni i pośredni na interakcje zachodzące między mikroorganizmami oraz mikroorganizmami a roślinami. W konsekwencji mają one wpływ na ważne funkcje ekosystemu glebowego, takie jak magazynowanie dwutlenku węgla, produkcyjność, żyzność i urodzajność (Chakraborty i Newton 2011, Haugwitz i in. 2014, Classen i in. 2015, Abatenh i in. 2018). Zmiany klimatu mogą wpływać na skład gatunkowy mikrobiomu zasiedlającego korzenie roślin, a także na aktywność grzybów mykoryzowych i bakterii ryzosferowych PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria – bakterie promujące wzrost roślin). Dochodzi do liczebnościowych i jakościowych zmian w populacjach mikroorganizmów. W konsekwencji procesy wpływające na aktywność biologiczną i żyzność gleb mogą ulec intensyfikacji lub zahamowaniu (Compant i in. 2010, Abatenh i in. 2018).

Literatura:

1. Abatenh E., Gizaw B., Tsegaye Z., Tefera G.: Microbial function on climate change – a review. Environ. Pollut. Climate Change, 2018, **2(1)**: 147.
2. Baćmaga M., Wyszkowska J., Kucharski J.: The biochemical activity of soil contaminated with fungicides. J. Environ. Sci. Heal., 2019, **54(4)**: 252-262.
3. Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojska U., Prusinkiewicz Z.: Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2004, ss. 344.
4. Bielińska E.J.: Oznaczanie aktywności fosfataz. Acta Agroph., 2005, **3**: 63-74.
5. Błaszczyk M.: Mikrobiologia środowisk. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2010, ss. 400.
6. Błaszczyk M.: Mikroorganizmy w ochronie środowiska. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2007, ss. 196
7. Brzezińska M., Włodarczyk M.: Enzymy wewnątrzkomórkowych przemian redoks (oksydoreduktazy). Acta Agroph., 2005, **3**: 11-26.
8. Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L.: Soil quality – A critical review. Soil Biol. Biochem., 2018, **120**: 105-125.
9. Chakraborty S., Newton A.C.: Climate, change, plant diseases and food security: an overview. Plant Pathol., 2011, **60**: 2-14.
10. Classen A.T., Sundqvist M.K., Henning J.A., Newman G.S., Moore J.A.M., Cregger M.A., Moorhead L.C., Patterson C.M.: Direct and indirect effects of climate change on soil microbial and soil microbial-plant interactions: What lies ahead? Ecosphere, 2015, **6(8)**: 130.
11. Compant S., van der Heijden M.G.A., Sessitsch A.: Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. FEMS Microbiol. Ecol., 2010, **73**: 197-214.
12. Frąc M., Hannula S.E., Bełka M., Jędryczka M.: Fungal biodiversity and their role in soil health. Front. Microbiol., 2018, **9**: 1-707.
13. Gałązka A., Smreczak B.: Jakość gleb użytkowanych rolniczo i wskaźniki jej oceny. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2017, **53**: 1-123.
14. Góralczyk A., Jasińska A., Długoński J.: Mikroorganizmy w usuwaniu toksycznych barwników przemysłowych. Postęp. Mikrobiol., 2016, **55(4)**: 424-432.

15. Haugwitz M.S., Bergmark L., Prieme A., Christensen S., Beier C., Michelsen A.: Soil microorganisms respond to five years of climate change manipulations and elevated atmospheric CO_2 in a temperate health ecosystem. Plant Soil, 2014, **374**: 211-222.
16. Kołwzan B., Adamiak W., Dziubek A.M.: Możliwości zastosowania grzybów w technologiach oczyszczania i remediacji wybranych elementów środowiska. Ochrona Środowiska, 2018, **40(1)**: 3-20.
17. Król M.J.: Przemiany mikrobiologiczne potasu, magnezu, manganu i wapnia w glebie. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2013, **42**: 1-152
18. Król M.J., Perzyński A., Leśniak A.: *Pseudomonas stutzeri* – bakteria kolonizująca endoryzosferę roślin. Post. Nauk Rol., 2007, **1**: 81-91
19. Król M.J., Smagacz J.: Przegląd enzymów drobnoustrojów. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2016, **50**: 1-288.
20. Kwaśna H.: Mikrobiologia rolnicza. Wydaw. Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2014, ss. 390.
21. Marchut-Mikołajczyk O., Kwapisz E., Antczak T.: Enzymatyczna bioremediacja ksenobiotyków. Inż. Ochr. Środ., 2013, **16(1)**: 39-55
22. Mocek-Płóciniak A.: Wpływ metali ciężkich na mikroorganizmy oraz aktywność enzymatyczną gleby. Roczniki Gleboznawcze, 2011, **4**: 211-220
23. Pałosz T.: Rolnicze i środowiskowe znaczenie próchnicy glebowej i metodyka jej bilansu. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, 2009, s. 329-338.
24. Paśmionka I.: Mikrobiologiczne przemiany azotu glebowego. Kosmos, 2017, **66(2)**: 185-192.
25. Pikuła D.: Aspekty środowiskowe gospodarowania materią organiczną w rolnictwie/ Environmental aspects of managing the organic matter in agriculture. Studia Ekonomiczne i Regionalne/Economic and Regional Studies, 2015, **8(2)**: 98-112.
26. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A.: Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. SpringerPlus, 2013, **2**: 587.
27. Stasiak G., Mazur A., Koper P., Żebracki K., Skorupska A.: Symbioza rizobiów z roślinami bobowatymi (*Fabaceae*). Post. Mikrobiol., 2016, **55(3)**: 289-299.
28. Tomkowiak A, Starzyk J., Kosicka-Dziechciarek D., Karwatka K.: Wpływ systemów uprawy roli na stan mikrobiologiczny gleby. Nauka Przyr. Technol., 2017, **11(4)**: 355-364.
29. Wolińska A., Górniak D., Zielenkiewicz U., Goryluk-Salmonowicz A., Kuźniar A., Stępniewska Z., Błaszczyk M.: Microbial biodiversity in arable soils is affected by agricultural practices. Int. Agrophys., 2017, **31**: 259-271.
30. Wolińska A., Kuźniar A., Zielenkiewicz U., Banach A., Błaszczyk M.: Indicators of arable soils fatigue – Bacterial families and genera: A metagenomic approach. Ecol. Indic., 2018a, **93**: 490-500.
31. Wolińska A., Banach A., Szafranek-Nakonieczna A., Stępniewska Z., Błaszczyk M.: Easily degradable carbon – an indicator of microbial hotspots and soil degradation. Int. Agrophys., 2018b, **32**: 123-131.

III ZNACZENIE MIKROORGANIZMÓW W ROZWOJU ROŚLIN

Urszula Smolińska

Instytut Ogrodnictwa

ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
e-mail: urszula.smolinska@inhort.pl

1. WSTĘP

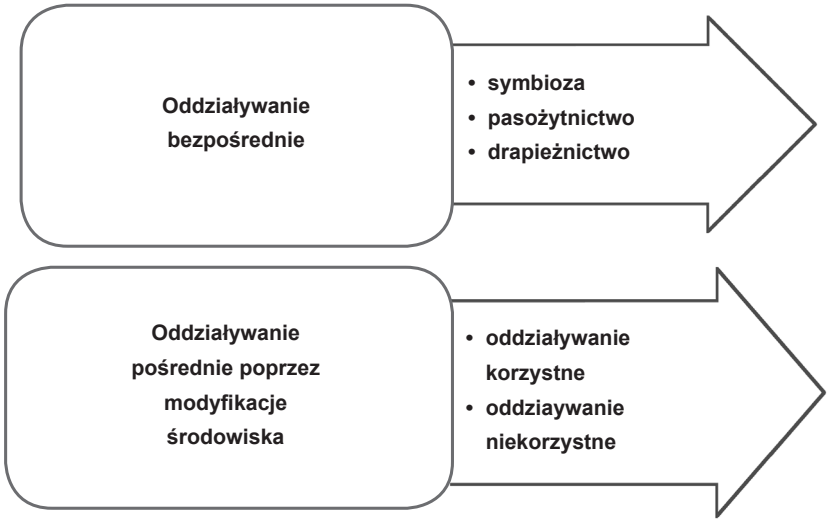
Mikroorganizmy glebowe odgrywają ogromne znaczenie w rozwoju roślin (Mendes i in 2013, Kucharska i Wachowska 2014). Rozkładając i mineralizując materię organiczną, umożliwiają obieg pierwiastków. Mikroorganizmy poprzez wytwarzanie kwasów organicznych i nieorganicznych biorą udział w wietrzeniu minerałów, powodując ich rozkład oraz uczestniczą w tworzeniu związków humusowych determinujących żyzność gleb (Paul i Clark 2000, Ciopińska i Bezak-Mazur 2018). Największe znaczenie dla roślin mają mikroorganizmy znajdujące się w strefie przykorzeniowej – ryzosferze (De-la-Pena i Loyola-Vargas 2014, Jacoby i in. 2017). Korzenie roślin wydzielają do gleby różnorodne związki organiczne: cukry, białka, kwasy organiczne, aminokwasy, związki aromatyczne i inne, służące jako źródło substancji odżywczych. Ilość wydzielanych substancji zależy od rodzaju i wieku rośliny; największa jest u szybko rosnących młodych roślin. Służą one za pożywienie mikroorganizmom, kształtując ich skład w otoczeniu rośliny. W 1 gramie gleby ryzosferowej może znajdować się nawet 10^{12} komórek bakterii oraz mnóstwo form propagacyjnych grzybów: strzępki, zarodniki oraz długożyjące formy przetrwalne, takie jak sklerocja czy chlamydospory. Znajdują się tam także inne mikroorganizmy – grzyby, pierwotniaki, nicienie i inne. W porównaniu z glebami bez roślin, gleba wokół korzeni jest środowiskiem stosunkowo bogatym w związki odżywcze i mikroorganizmów jest tam zwykle więcej niż w strefie pozbawionej roślinności. W ciągu swojego życia przeprowadzają one wiele reakcji biochemicznych, uwalniając do podłoża proste związki pobierane przez rośliny.

Mikroorganizmy uczestniczą w tworzeniu właściwej gruzełkowatej struktury gleby (Li i in. 2018), ponieważ wiele bakterii i grzybów mykoryzowych wytwarza śluzowe, „lepkie" metabolity wydzielane na zewnątrz, które umożliwiają spajanie małych cząstek (gruzełek) gleby w większe agregaty przez strzępki grzybów i promieniowców. Tworzą się w ten sposób warunki do rozwoju mikroorganizmów tlenowych oraz lepszego wzrostu korzeni roślin, zwiększając przewietrzanie gleby.

Skład i liczebność mikroorganizmów glebowych są determinowane wieloma czynnikami. Największy wpływ na ich populacje ma gatunek roślin rosnących w danym roku i w latach poprzednich. Istotny jest także rodzaj gleby, zwłaszcza jej kwasowość, zawartość substancji organicznej czy struktura. Czynniki abiotyczne, takie jak wilgotność i temperatura bezpośrednio wpływają na tempo namnażania się mikroorganizmów oraz pośrednio determinują wzrost roślin oraz ilość i jakość związków chemicznych wydzielanych przez korzenie do gleby. Człowiek poprzez stosowane metody agrotechniczne, rodzaj nawożenia czy pestycydy także wpływa istotnie na skład mikroorganizmów w glebach uprawnych (Ishaq 2017).

2. WZAJEMNE ODDZIAŁYWANIE MIKROORGANIZMÓW

Wszystkie mikroorganizmy znajdujące się w sąsiedztwie każdej rośliny wpływają wzajemnie na siebie **bezpośrednio** oraz **pośrednio poprzez modyfikacje środowiska** (rys. 1). Są to interakcje zarówno pozytywne, jak i negatywne (Klimek i in. 2010, Jankowska i Swędrzyńska 2016).



Rys. 1. Rodzaje oddziaływań mikroorganizmów w środowisku glebowym (opracowanie własne)

Najbardziej znanym przykładem bezpośredniego oddziaływania dwóch różnych organizmów jest **symbioza**, np. współżycie roślin bobowatych z bakteriami *Rhizobium* czy symbioza roślin z grzybami mykoryzowymi. Jest to układ, w którym zarówno mikroorganizmy, jak i organizm wyższy, w tym przypadku roślina, odnoszą korzyści. Innym przykładem bezpośredniego oddziaływania jest **pasożytnictwo** – zjawisko, w którym mikroorganizm żywi się komórkami, tkankami lub płynami ustrojowymi drugiego, zwykle większego organizmu zwanego żywicielem. Przykładem pasożytów wśród drobnoustrojów są np. grzyby czy bakterie patogeniczne żyjące na roślinach i wywołujące różnorodne choroby. **Drapieżnictwo** to zjawisko, w którym jeden organizm (drapieżca) żywi się drugim, powodując śmierć ofiary. Przykładem drapieżnictwa mogą być pierwotniaki żywiące się mikroorganizmami.

Jak wspomniano powyżej, mikroorganizmy zasiedlające glebę oddziałują na siebie wzajemnie i na rośliny poprzez fizyczną bądź chemiczną modyfikację środowiska. To pośrednie oddziaływanie może być dla nich korzystne (mutualistyczne) bądź niekorzystne (antagonistyczne) (tab. 1).

Tabela 1

Rodzaje oddziaływań pośrednich między mikroorganizmami (opracowanie własne)

Oddziaływania korzystne (mutualistyczne)			
Wykorzystywanie przez jedne mikroorganizmy substancji wytwarzanej przez inne w nadmiarze	Współżycie mikroorganizmów beztlenowych z tlenowcami	Wykorzystywanie wytwarzanych przez mikroorganizmy witamin, aminokwasów lub innych związków biologicznie aktywnych	
Oddziaływania niekorzystne (antagonistyczne)			
Konkurencja między mikroorganizmami o pokarm i miejsce do zasiedlenia	Nagromadzenie toksycznych związków, np. kwasów organicznych, amoniaku, siarkowodoru	Wytwarzanie antybiotyków	Wytwarzanie enzymów litycznych, np. celulaz, chityn, proteaz

3. ROLA MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH W ROZWOJU ROŚLIN

Bakterie i grzyby znajdujące się w glebie, zwłaszcza w ryzosferze, odgrywają istotną rolę w rozwoju roślin oraz ograniczaniu rozwoju szkodników i patogenów (Pociejowska i in. 2014, Grzegorczyk i in. 2015). Znanych jest wiele mechanizmów, za pomocą których mogą one wywierać korzystny wpływ na zdrowotność roślin. Jednym z najważniejszych jest **stymulacja wzrostu roślin** prowadząca do zwiększenia biomasy. Bakterie glebowe posiadają zdolność do produkcji fitohormonów, takich jak auksyny, gibereliny, cytokininy, kwasu abscysynowego i jasmonowego oraz deaminazy ACC. Wpływa to m.in. na zwiększenie masy korzeni, a rozwój korzeni bocznych i włośników stymuluje pobieranie składników odżywczych i wody. Mikroorganizmy glebowe mogą polepszać kondycję roślin poprzez udostępnianie im niektórych związków odżywczych. Szczególne znaczenie mogą mieć bakterie posiadające zdolność rozpuszczania nierozpuszczalnych związków fosforowych i przekształcania ich w formy dostępne dla roślin. Na glebach o odczynie kwaśnym, a takich jest w Polsce najwięcej, tworzą się nierozpuszczalne związki, które zmniejszają pulę fosforu ruchomego (przyswajalnego). Niektóre bakterie (np. z rodzajów *Bacillus*, *Acidiothiobacillus*, *Pseudomonas*) znajdujące się w glebie mogą wytwarzać znaczne ilości kwasów organicznych, które rozpuszczają trudno dostępne formy fosforu. Zdolność bakterii do rozpuszczania tych związków jest bardzo zróżnicowana, ponieważ poszczególne gatunki wydzielają różne kwasy organiczne mogące z różną intensywnością wpływać na ten proces (Ciopińska i Bezak-Mazur 2018).

Ogromne znaczenie dla zdrowotności roślin ma zjawisko **konkurencji** o miejsce i składniki odżywcze pomiędzy mikroorganizmami patogenicznymi a saprotroficznymi. Przykładem organizmu szybko namnażającego się w środowisku dzięki zdolności do wykorzystywania wielu różnorodnych związków, a także tolerancji na szeroki zakres pH są grzyby z rodzaju *Trichoderma* (Hermosa i in. 2012). Dzięki tym cechom, a także zdolności do wytwarzania wielu różnorodnych enzymów hydrolitycznych i związków o właściwościach toksycznych grzyby te mogą tworzyć naturalną barierę wobec patogenów roślin (fot. 1–3). Aby lepiej przetrwać w środowisku, niektóre mikroorganizmy mogą wytwarzać biofilm, specyficzną wielokomórkową strukturę powstającą w wyniku chemicznego „porozumiewania" się mikroorganizmów za pomocą chemicznych sygnałów (*quorum sensing*). Utworzenie biofilmu zwiększa szanse na przeżycie, ponieważ w takim skupisku mikroorganizmy są bardziej odporne na niekorzystne warunki środowiska (Grzegorczyk i in. 2015).

Fot. 1. Antagonistyczne działanie grzyba *Trichoderma* dodanego do gleby zakażonej patogenem *Rhizoctonia solani* na przykładzie sałaty (strona lewa – podłoże zakażone *R. solani*; strona prawa – podłoże zakażone *R. solani* oraz wzbogacone *Trichoderma*) (fot. U. Smolińska)

Fot. 2. Stymulacja wzrostu roślin pietruszki przez grzyby z rodzaju *Trichoderma* (strona lewa – grzyb *Trichoderma* dodany do podłoża; strona prawa – kontrola) (fot. B. Kowalska)

Fot. 3. Stymulacja wzrostu roślin ogórka przez grzyby z rodzaju *Trichoderma* (strona lewa – kontrola; strona prawa – grzyb *Trichoderma* dodany do podłoża) (fot. M. Szczech)

W strefie korzeniowej często występuje deficyt wolnych jonów żelaza ze względu na bardzo niską rozpuszczalność kompleksów żelaza oraz duże zapotrzebowanie wśród mikroorganizmów i roślin. W tych warunkach niektóre mikroorganizmy syntetyzują siderofory, chelatory o wysokim powinowactwie do jonów żelaza, które mogą być dostępne dla mikroorganizmów i roślin. Dzięki temu może następować hamowanie wzrostu patogenów nieposiadających takich zdolności. Innym znanym przykładem jest konkurencja o węgiel między patogenicznymi i niepatogenicznymi szczepami *Fusarium oxysporum.* Obecność tych ostatnich ogranicza populację patogenów i zmniejsza występowanie fuzarioz. Szczególnie istotne znaczenie dla stymulacji wzrostu roślin mają mikroorganizmy symbiotyczne, takie jak *Rhizobium* umożliwiające wiązanie azotu atmosferycznego czy grzyby mykoryzowe.

Innym zjawiskiem mającym znaczenie dla zdrowotności roślin jest **mykoparazytyzm.** Wiele mikroorganizmów wydziela do otaczającego je środowiska enzymy lityczne, np. chitynazy, glukanazy, proteazy i inne. Działanie tych enzymów może prowadzić do rozkładu (degradacji) ściany komórkowej grzybów patogenicznych zarówno strzępek, jak i form przetrwalnych, np. sklerocjów. Przykładem grzybów o silnych właściwościach mykoparazytycznych są grzyby z rodzaju *Trichoderma* (Smolińska i in. 2016) czy *Coniothyrium minitans*, pasożytujący sklerocja *Sclerotinia sclerotiorum.* Grzyb ten jest wykorzystywany w zwalczaniu zgnilizny twardzikowej w wielu rejonach świata (Smolińska i Kowalska 2018).

Negatywny wpływ na rozwój patogenów roślin mają **antybiotyki** wytwarzane przez niektóre mikroorganizmy glebowe. Rodzaj i efektywność działania antybiotyków, a także zdolność do ich produkcji jest zmienna nawet w obrębie tego samego gatunku. Niestety działanie antybiotyków jest silnie uzależnione od biotycznych (np. inne mikroorganizmy) i abiotycznych (temperatura, wilgotność, pH i inne) warunków panujących w glebie. Negatywne działanie antybiotyków na mikroorganizmy patogeniczne może występować w niewielkich niszach i tylko wówczas, gdy zagęszczenie produkujących je bakterii jest znaczące. Antybiotyki mogą być wytwarzane przez bakterie, np. z rodzaju *Bacillus* czy *Pseudomonas* oraz grzyby strzępkowe i drożdże. Spośród grzybów szczególną zdolnością do syntezy tego typu związków charakteryzują się szczepy *Trichoderma*, jednak ich rodzaj, liczba i efektywność działania zależy od gatunku, izolatu oraz warunków, w jakich rosną.

Niektóre mikroorganizmy glebowe obecne w strefie korzeniowej, a także żyjące w powierzchniowych ich tkankach, mogą indukować w roślinach **odporność na patogeny typu ISR** (ang. induced systemic resistance) (Ghorbanpour i in. 2018). Odporność ta jest konsekwencją szeregu zmian strukturalnych zachodzących w tkankach roślin, m.in.: wzrost zawartości kallozy, lignin i związków fenolowych w ścianach komórkowych epidermy oraz w przestrzeniach międzykomórkowych. Następuje zwiększona produkcja związków o działaniu toksycznym w stosunku do patogenów, wzrost zawartości enzymów chitynazy, peroksydazy, oksydazy polifenolowej oraz zwiększona produkcja fitoaleksyn. Mikroorganizmy różnią się znacz-

nie zdolnością do indukcji odporności systemicznej w roślinach. Właściwości te wykazuje wiele izolatów grzybów strzępkowych z rodzaju *Trichoderma*, drożdży *Candida* czy bakterii z rodzajów *Bacillus* i *Pseudomonas*.

3.1. MIKROORGANIZMY KORZYSTNE DLA ROŚLIN

3.1.1. Mykoryza

Ogromne znaczenie dla rozwoju roślin ma ich symbioza z grzybami mykoryzowymi (Berruti i in. 2016, Jas i Małolepsza 2017, Chen i in. 2018). Zjawisko to zachodzi w strefie korzeniowej roślin. Ze względu na stopień zależności między symbiontami, mykoryzy można podzielić na cztery grupy: mykoryza zewnętrzna ektotroficzna i endotroficzna (arbuskularna), które występują najczęściej oraz rzadsze – ektendomykoryza i mykoryza perytroficzna. **Mykoryza ektotroficzna** występuje u ok. 10% roślin. Jest najczęstszym typem mykoryzy wśród leśnych roślin drzewiastych strefy umiarkowanej. Grzyby tworzące ten rodzaj mykoryzy należą do gromady podstawczaków i workowców. **Mykoryza endotroficzna** jest tworzona głównie z roślinami zielnymi, w tym z niemal wszystkim roślinami użytkowanymi rolniczo. Występuje we wszystkich glebach uprawnych w Polsce. Grzyby glebowe tworzące mykoryzę tego typu zalicza się do rzędu *Glomales.* Zarówno rośliny, jak i grzyby mykoryzowe „porozumiewają" się ze sobą za pomocą chemicznych przekaźników sygnałowych. Rośliny zapoczątkowują związek mykoryzowy z grzybami, wydzielając do gleby specyficzne cząsteczki, stigolaktony, które stymulują kiełkowanie zarodników i wzrost strzępek grzybowych. Jednym z czynników stymulujących wytwarzanie cząstek sygnałowych przez roślinę może być niedobór związków mineralnych w glebie, zwłaszcza fosforanów.

W ektomykoryzie komórki grzyba wnikają między ściany komórek korzenia, oplatają je, tworząc sieć połączeń międzykomórkowych służącą do wymiany substancji odżywczych między grzybem a rośliną. Korzeń pokryty jest mufką grzybniową, od której odchodzą w głąb gleby zewnętrzne strzępki zwane grzybnią ekstrametrykalną. U rośliny z ektomykoryzą włośniki zanikają, a korzenie przybierają charakterystyczny wygląd, odmienny od korzeni roślin niemykoryzowanych.

Grzyby mykoryzy endotroficznej przenikają do wnętrza komórek korzeni przez włośniki albo przez inne komórki epidermy. Wewnątrz tych komórek tworzą charakterystyczne, drzewkowate struktury – arbuskule, które umożliwiają wymianę substancji odżywczych między rośliną-gospodarzem a grzybem oraz vesikule – rozdęte na końcach strzępki magazynujące lipidy. W mykoryzie endotroficznej włośniki nie zanikają i nie tworzy się mufka jak w mykoryzie ektotroficznej.

Na zewnątrz rośliny strzępki grzyba przerastają glebę na dalsze odległości. Następuje więc ogromny wzrost ogólnej zdolności absorpcyjnej korzenia (Mai i in. 2019). Grzyby mykoryzowe zwiększają efektywność pobierania i translokacji wody

i składników mineralnych, zwłaszcza fosforu, azotu, siarki, miedzi czy cynku do rośliny (Gahan i Schmalenberger 2014). W zamian otrzymują od rośliny węglowodany, produkty fotosyntezy. Zewnętrzne strzępki grzyba mykoryzowego wytwarzają glomalinę, glikoproteinę o lepiących właściwościach, co przyczynia się do tworzenia właściwej, gruzełkowatej struktury gleby. W mykoryzowanej roślinie zmienia się ilość i rodzaj wydzielanych do środowiska wydzielin korzeniowych, a to z kolei wpływa na skład mikroorganizmów w ryzosferze. Mykoryza zmniejsza wrażliwość roślin na niekorzystne warunki środowiska, np. przesuszenie czy zawartość metali ciężkich w glebie. Grzyby mykoryzowe ograniczają choroby roślin za pomocą różnorodnych mechanizmów (French 2017). Jednym z nich jest wytwarzanie antybiotyków ograniczających populacje organizmów patogenicznych. Grzyby mykoryzowe mogą konkurować z patogenami o pożywienie oraz indukować w roślinie produkcję związków działających niekorzystnie na patogeny, np. fenole. Mufka występująca na korzeniach z ektomykoryzą może stanowić mechaniczną barierę ochronną przed patogenem.

3.1.2. Mikroorganizmy wiążące azot atmosferyczny

Ograniczona dostępność związków azotowych w glebie często jest głównym czynnikiem ograniczającym wzrost roślin. W glebie związki te ulegają przemianom, takim jak symbiotyczne i niesymbiotyczne wiązanie azotu atmosferycznego, proteoliza, amonifikacja, nitryfikacja i denitryfikacja, których większość przebiega przy udziale mikroorganizmów (Martyniuk i Oroń 2007, Paśmionka 2017, Jones i in. 2018). W atmosferze azot występuje w postaci gazowej N_2, nieprzyswajalnej dla roślin. Mikroorganizmy potrafią redukować azot atmosferyczny do jonów amonowych (formy dostępnej dla roślin) w procesie zwanym biologicznym wiązaniem azotu (Łyszcz i Gałązka 2016). Zdolność tę posiadają jedynie bakterie i archeony określane jako diazotrofy. Proces ten mogą przeprowadzać bakterie wolno żyjące w środowisku, np. *Azotobacter* spp., *Azospirillum* spp. *Clostridium* spp., i jest to tzw. **niesymbiotyczne wiązanie azotu** (Martyniuk i Martyniuk 2003, Gałązka i in. 2015). Wiążą one 10–50 kg $N \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$. Dużo wydajniej przeprowadzają ten proces bakterie będące w symbiozie z roślinami, zwłaszcza z bobowatymi (*Fabaceae*) (Stasiak i in 2016). **Symbiotyczne wiązanie azotu** przeprowadzają bakterie brodawkowe, potocznie nazywane rizobiami (Stasiak i in. 2016). Należą one do α- i β-proteobakterii (ok. 90 gatunków), z których najbardziej znane to *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia* czy promieniowce z rodzaju *Frankia*. W symbiozie bakterii z roślinami obydwa organizmy odnoszą znaczące korzyści. Mikroorganizm dostarcza roślinie związki azotowe, natomiast roślina dostarcza bakteriom powstające w fotosyntezie węglowodany i inne związki. Symbioza bakterii z roślinami często wykazuje wysoki stopień specyficzności. Niektóre bakterie posiadające szeroki zakres gospodarza, mogą tworzyć brodawki na wielu gatunkach roślin bobowatych.

Są też takie, które oddziałują na jeden gatunek, jak np. *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii*, który zakaża jedynie gatunki koniczyny.

Symbiotyczne wiązanie azotu jest bardzo złożonym procesem wymagającym skoordynowanego działania bakterii i rośliny (Stasiak i in. 2016). W efekcie tych działań na włośnikach korzeniowych roślin bobowatych bakterie tworzą brodawki zawierające przekształcone bakterie – bakteroidy. Bakteroidy wiążą azot atmosferyczny wykorzystywany zarówno przez bakterie, jak i roślinę. Proces ten zachodzi przy pomocy kompleksu enzymów zwanych nitrogenazą. Wysoka aktywność nitrogenazy jest utrzymywana dzięki zapewnieniu bakteriom odpowiednio niskiego stężenia tlenu w brodawkach korzeniowych i stałego źródła energii w formie kwasów dikarboksylowych uzyskiwanych w procesie fotosyntezy zachodzącej w roślinach-gospodarzach. Uprawne rośliny bobowate mogą związać od 40 do 550 kg $N \cdot ha^{-1}$ i dzięki symbiozie z bakteriami wymagają 35–60% mniej energii w porównaniu z uprawami, w których stosuje się nawozy mineralne.

Na efektywność wiązania azotu może wpływać wiele czynników, m.in. rodzaj gleby, odczyn, zasolenie, metale ciężkie, niektóre nawozy czy pestycydy oraz stosowanie nawozów organicznych (Paśmionka 2017).

3.2. MIKROORGANIZMY GLEBOWE NIEKORZYSTNE DLA ROŚLIN

Mikroorganizmy patogeniczne, zwłaszcza grzyby i bakterie, zasiedlające glebę są szczególnie trudne do zwalczania, ponieważ brak jest skutecznych i ekonomicznie opłacalnych metod ich usuwania (Kowalska i in. 2017). Spośród nich szczególnie groźne są grzyby tworzące formy przetrwalne, takie jak sklerocja, chlamydospory czy oospory. Duże problemy stwarzają także patogeny bakteryjne, które praktycznie są nie do usunięcia z zakażonych plantacji bez zastosowania kosztownych i często szkodliwych dla środowiska metod.

Oprócz typowych patogenów, które zasiedlają tkanki rośliny-gospodarza i wywołują objawy chorobowe lub jego śmierć w glebie mogą nagromadzać się tzw. niekorzystne mikroorganizmy (ang. DRMO – Deleterious Rhizosphere Microorganisms). Należą do nich mikroorganizmy, które ograniczają wzrost roślin bez wywoływania charakterystycznych objawów chorobowych. Mikroorganizmy z tego samego rodzaju w zależności od sytuacji lub gatunku mogą być „korzystne" lub „niekorzystne" dla roślin. Przykładem są bakterie z rodzaju *Pseudomonas*, które efektywnie zasiedlają glebę, silnie konkurują o składniki odżywcze z mikroorganizmami patogennymi dla roślin (m.in. o żelazo, wytwarzając siderofory), produkują dużą liczbę związków biologicznie czynnych (antybiotyki, HCN, enzymy lityczne), a także wytwarzają regulatory wzrostu, np. etylen, auksyny, gibereliny. Bakterie *Pseudomonas* wytwarzają dużą ilość polimerów, przyczyniając się do agregacji cząsteczek gleby. W wyjątkowych sytuacjach, np. wskutek braku zmianowania, bakterie te mogą wytwarzać w nadmiernej ilości, jako produkt wtórnego metabolizmu, kwas cyjanowo-

dorowy (HCN). Związek ten obniża wzrost roślin wskutek hamowania metabolizmu energetycznego zachodzącego w korzeniach (Jankowska i Swędrzyńska 2016).

4. PODSUMOWANIE

Wszystkie mikroorganizmy glebowe wpływają wzajemnie na siebie i rośliny bezpośrednio oraz pośrednio poprzez modyfikacje środowiska. Są to interakcje zarówno pozytywne (np. mykoryza), jak i negatywne (choroby roślin). Gleba „zdrowa" to gleba, w której zróżnicowane zespoły mikroorganizmów pozostają w dynamicznej równowadze, nie pozwalając na dominację mikroorganizmów patogenicznych lub DRMO. Zwiększanie bioróżnorodności pomnaża liczebność „korzystnych" mikroorganizmów oraz ogranicza możliwości nadmiernego namnażania się mikroorganizmów szkodliwych dla roślin uprawnych. Największe znaczenie dla roślin mają mikroorganizmy znajdujące się w strefie przykorzeniowej – ryzosferze. Odgrywają one istotną rolę w rozwoju roślin oraz ograniczaniu rozwoju szkodników i patogenów.

Literatura:

1. Berruti A., Lumini E., Balestrini R., Bianciotto V.: Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: Let's benefit from past successes. Front. Microbiol., 2016, **6**: 1559.
2. Chen M., Arato M., Borghi L., Nouri E., Reinhardt D.: Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi – from ecology to application. Front. Microbiol., 2018, **9**: 1270.
3. Ciopińska J., Bezak-Mazur E.: Phosphorus solubilizing bacteria-review article. Structure and Environment, 2018, **10(3)**: 278-287.
4. De-la-Pena C., Loyola-Vargas M.: Biotic interactions in the rhizosphere: a divers cooperative enterprise for plant productivity. Plant Physiol., 2014, **166**: 701-719.
5. French K.E.: Engineering mycorrhizal symbioses to alter plant metabolism and improve crop health. Front. Microbiol., 2017, **8**: 1403.
6. Gahan J., Schmalenberger A.: The role of bacteria and mycorrhiza in plant sulfur supply. Front. Plant Sci., 2014, **5**: 723.
7. Gałązka A., Bigos J., Siebielec S.: Promowanie wzrostu roślin przez bakterie z rodzaju *Azospirillum* oraz ich zastosowanie w rolnictwie. Pol. J. Agron., 2015, **23**: 48-62.
8. Ghorbanpour M., Omidvari M., Abbaszadeh-Dahaji P., Omidvar R., Kariman K.: Mechanisms underlying the protective effects of beneficial fungi against plant diseases. Biol. Control, 2018, **117**: 147-157.
9. Grzegorczyk M., Szalewicz A., Żarowska B., Połomska K., Wątorek W., Wojtatowicz M.: Drobnoustroje w biologicznej ochronie roślin przed chorobami grzybowymi. Acta Sci. Pol., Biotechnologia, 2015, **14**: 19-42.
10. Hermosa R., Viterbo A., Chet I., Monte E.: Plant beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. Microbiology, 2012, **158**: 1-25.
11. Ishaq S.L.: Plant-microbial interactions in agriculture and the use of farming systems to improve diversity and productivity. AIMS Microbiology, 2017, **3**: 335-353.

12. Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A., Kopriva S.: The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition – current knowledge and future directions. Front. Plant Sci., 2017, **8**: 1617.
13. Jankowska M., Swędrzyńska D.: Analiza oddziaływań wybranych drobnoustrojów w środowisku glebowym. Kosmos, 2016, **65**: 49-55.
14. Jas K., Małolepsza U.: Podziemna komunikacja – nowe elementy szlaków sygnałowych arbuskularnej symbiozy mikoryzowej. Post. Mikrobiol., 2017, **56**: 275-281.
15. Jones D.L., Magthab E.A., Gleeson D.B., Hill P.W., Sanchez-Rodriguez A.R., Roberts P., Ge T., Murphy D.V.: Microbial competition for nitrogen and carbon is as intense in the subsoil as in the topsoil. Soil Biol. Biochem., 2018, **117**: 72-82.
16. Klimek B., Stefanowicz A.M., Woch M.W., Jaźwa M.: Czy istnieje związek między bioróżnorodnością roślin i mikroorganizmów glebowych? Kosmos, 2010, **59**: 589-598.
17. Kowalska B., Smolińska U., Szczech M., Winciorek J.: Application of organic waste material overgrown with *Trichoderma atroviride* as a control strategy for *Sclerotinia sclerotiorum* and *Chalara thielavioides* in soil. J. Plant Prot. Res., 2017, **57**: 205-211.
18. Kucharska K., Wachowska U.: Mikrobiom liści roślin uprawnych. Post. Mikrobiol., 2014, **53(4)**: 352-359.
19. Li F., Xue Ch., Qiu P., Liu Y., Shi J., Shen B., Yang X., Shen Q.: Soil aggregate size mediates the responses of microbial communities to crop rotation. Eur. J. Soil Biol., 2018, **88**: 48-56.
20. Łyszcz M., Gałązka A.: Proces biologicznego wiązania azotu atmosferycznego. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2016, **49**: 59-70.
21. Mai W., Xue X., Feng G., Yang R., Tian Ch.: Arbuscular mycorrhizal fungi – 15-Fold enlargement of the soil volume of cotton roots for phosphorus uptake in intensive planting conditions. Eur. J. Soil Biol., 2019, **90**: 31-35.
22. Martyniuk S., Martyniuk M.: Occurence of *Azotobacter* spp. in some Polish soils. Pol. J. Environ. Stud., 2003, **12**: 371-374.
23. Martyniuk S., Oroń J.: Bioróżnorodność mikrobiologiczna gleb na przykładzie bakterii wiążących azot atmosferyczny – oddziaływanie wybranych zabiegów agrotechnicznych. Fragm. Agron., 2007, **24(4)**: 18-23.
24. Mendes R., Garbeva P., Raaijmakers J.M.: The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. FEMS Microbiol. Rev., 2013, **37**: 634-663.
25. Paul A., Clark F.E.: Mikrobiologia i biochemia gleb. Wyd. UMCS, Lublin 2000, ss. 400
26. Paśmionka I.: Mikrobiologiczne przemiany azotu glebowego. Kosmos, 2017, **66**:185-192.
27. Pociejowska M., Natywa M., Gałązka A.: Stymulacja wzrostu roślin przez bakterie PGPR. Kosmos, 2014, **63**: 603-610.
28. Smolińska U., Kowalska B., Kowalczyk W., Szczech M., Murgrabia A.: Eradication of *Sclerotinia sclerotiorum* sclerotia from soil using organic waste materials as *Trichoderma* fungi carriers. J. Hortic. Res., 2016, **24**: 101-110.
29. Smolińska U., Kowalska B.: Biological control of the soil-borne fungal pathogen *Sclerotinia sclerotiorum* a review. J. Plant Pathol., 2018, **100**: 1-12.
30. Stasiak G., Mazur A., Koper P., Żebracki K., Skorupska A.: Symbioza Rizobiów z roślinami bobowatymi (*Fabaceae*). Post. Mikrobiol., 2016, **55(3)**: 289-299.

IV BIORÓŻNORODNOŚĆ MIKROBIOLOGICZNA
ZNACZENIE I ZAGROŻENIA

Magdalena Frąc

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego
Polskiej Akademii Nauk
Zakład Badań Systemu Gleba-Roślina
ul. Doświadczalna 4
20-290 Lublin
e-mail: m.frac@ipan.lublin.pl

1. WSTĘP

Znaczenie życia biologicznego w środowisku glebowym to temat, który w ostatnich latach jest bardzo mocno dyskutowany wśród naukowców oraz praktyków stykających się na co dzień z uprawą gleby, oceną jej żyzności, urodzajności i wartości produkcyjnej. Ten obszar badawczy rozwija się bardzo intensywnie i dynamicznie, dzięki coraz to nowym osiągnięciom metodycznym, opracowywanym nowym technikom, które są wykorzystywane do prowadzenia badań nad bioróżnorodnością różnych środowisk, zwłaszcza glebowego, w którym większość mikroorganizmów wciąż nie jest poznana i stanowi tzw. „czarną skrzynkę". Wiemy, że są one obecne w glebie i uczestniczą w wielu procesach, jednakże konieczne są dalsze badania umożliwiające poznanie tego szalenie interesującego świata mikroorganizmów glebowych, szczególnie interakcji zachodzących między organizmami agroekosystemów.

Pojęcie różnorodności biologicznej jest złożone i może być rozpatrywane w wielu aspektach. Poniższy schemat (rys. 1) przedstawia podstawowe pojęcia wykorzystywane w bioróżnorodności, takie jak: różnorodność biologiczna, życie biologiczne gleb, a także trzy poziomy bioróżnorodności w ujęciu ekologicznym.

Rys. 1. Pojęcia wykorzystywane w badaniach bioróżnorodności (opracowanie własne)

Bioróżnorodność to rozmaitość organizmów żywych w środowisku lądowym, morskim i innych ekosystemach wodnych. Obejmuje ona różnorodność w obrębie gatunku i pomiędzy gatunkami. Z kolei życie biologiczne gleb to termin o znaczeniu podobnym, ale jest bardziej szczegółowy i odnosi się do zbiorowisk organizmów

danego systemu glebowego. Bioróżnorodność możemy rozpatrywać na trzech podstawowych poziomach, jako: różnorodność genetyczną związaną z wymianą genów, mutacjami, horyzontalnym transferem genów w środowisku; różnorodność gatunkową odnoszącą się do bogactwa i zróżnicowania gatunkowego oraz różnorodność ekosystemową, którą stanowi rozmaitość ekosystemów w środowisku glebowym, również w zależności od różnych typów gleb, ich składu granulometrycznego czy uprawianej rośliny.

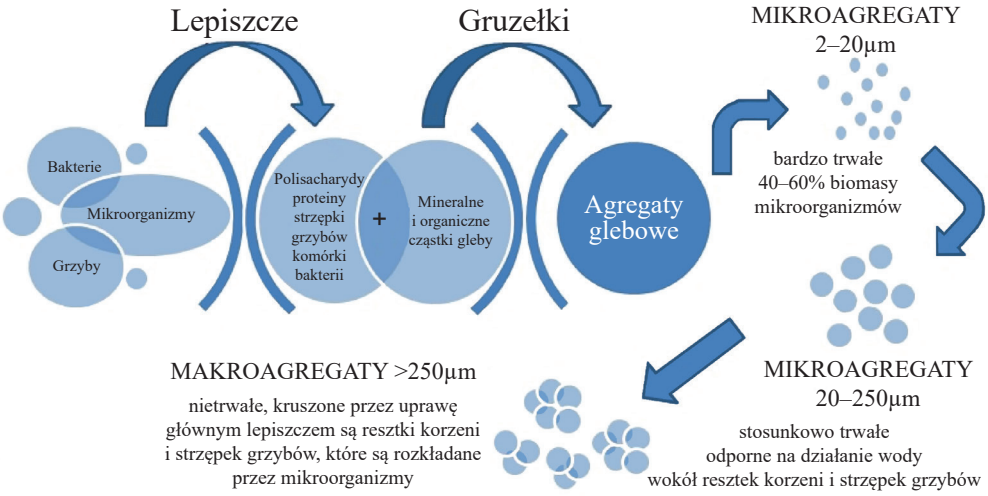
Gleba jest środowiskiem życia dla ogromnej liczby różnych organizmów. Dodatkowo organizmy glebowe występują bardzo licznie w tym środowisku. Jednakże poziom ich obfitości i różnorodności jest odmienny w poszczególnych glebach. Różnice te wynikają z czynników wpływających na różnorodność biologiczną gleb, do których można zaliczyć zawartość materii organicznej, strukturę gleby czy stosowane zabiegi agrotechniczne. Badania dowodzą, że na 1 m^2 użytku zielonego występuje około: 100 miliardów komórek bakterii (10 000 gatunków), 50 km strzępek grzybów (100 gatunków), 100 000 komórek pierwotniaków (100 gatunków), 10 000 osobników nicieni (100 gatunków), 1 000 osobników niesporczaków, skoczogonków i roztoczy (100 gatunków) oraz łącznie 100 osobników, w tym 10 gatunków makro- i megafauny, takiej jak: dżdżownice, mrówki, równonogi, pareczniki, płazy, gady, ssaki i ptaki (Jeffery i in. 2010).

2. ROLA RÓŻNORODNOŚCI MIKROBIOLOGICZNEJ W ŚRODOWISKU GLEBOWYM

Znaczenie różnorodności mikrobiologicznej jest niezwykle ważne w środowisku glebowym ze względu na to, że to mikroorganizmy wspierają produkcję żywności i biomasy, a ich bogactwo gatunkowe zapewnia stabilność ekologiczną ekosystemów i adaptację do warunków stresowych. W warunkach stresu rozwój wyspecjalizowanych mikroorganizmów wspomaga wzrost i rozwój roślin. Coraz częściej prowadzone są badania dotyczące mikrobiomu glebowego i roślinnego oraz ich interakcji, w celu poszukiwania odmian, które są zdolne do egzystowania i łatwiejszego przystosowania się do specyficznych czynników stresowych, między innymi poprzez umiejętność przyciągania mikroorganizmów pożytecznych występujących w środowisku glebowym (Marasco i in. 2012). Mikroorganizmy, ze względu na ogromną różnorodność, pełnią szereg funkcji w agroekosystemach. Do najważniejszych z nich, prowadzących do podniesienia żyzności i wartości produkcyjnej gleb, należą: rozkład i mineralizacja substancji organicznej, uwalnianie składników pokarmowych z trudno dostępnych źródeł, obieg pierwiastków w środowisku, tworzenie struktury gleby, tworzenie próchnicy w glebie, wspomaganie wzrostu i ochrona roślin oraz detoksykacja i bioremediacja środowiska glebowego (Jeffery i in. 2010, Komisja Europejska 2010).

Różnorodność mikroorganizmów, które syntetyzują liczne enzymy oraz posiadają określone geny, sprawia, że bakterie i grzyby biorą udział praktycznie we

wszystkich etapach obiegu składników pokarmowych w środowisku glebowym. To bogactwo mikroorganizmów glebowych przyczynia się do powstawania próchnicy, ponieważ bakterie i grzyby poprzez produkcję określonych metabolitów, biomasy i enzymów uczestniczą w procesach syntezy i tworzenia prekursorów związków humusowych (Gołębiowska 1975, Paul i Clark 2000). Jedną z kluczowych funkcjonalnych ról różnorodności biologicznej gleby jest jej bezpośredni wkład w tworzenie przestrzennej, gruzełkowatej struktury. Wykorzystanie gleby i zarządzanie jej powierzchnią, w zależności od struktury, jaką posiada dzięki działalności organizmów glebowych, należy do krytycznych aspektów zarządzania ekosystemami glebowymi, ponieważ to różnorodność biologiczna środowiska glebowego w dużej mierze determinuje stopień i sposób jego wykorzystania (Havlicek i Mitchell 2014). Sinice, glony i porosty aktywnie uczestniczą w początkowych etapach kształtowania się gleby. Zdolność asymilacji i fotosyntezy, a czasem wiązania wolnego azotu pozwala im na egzystowanie w początkowych, ubogich, pionierskich warunkach, które z czasem ulegają przekształceniu pod wpływem tworzonych przez nie związków organicznych (Paul i Clark 2000, Bednarek i in. 2004, Komisja Europejska 2010,). Dzięki różnorodności i działalności mikroorganizmów glebowych powstają różne typy agregatów glebowych, w których lepiszczem są komórki bakterii i strzępki grzybów, a także polisacharydy syntetyzowane przez drobnoustroje, zapewniające stabilność i nadające odpowiednią strukturę gleby (rys. 2). Korzyści z poprawy struktury gleby, bezpośrednio związanej z utrzymaniem bioróżnorodności, szczególnie w otoczeniu rolniczym obejmują: zmniejszone ryzyko erozji, lepszą penetrację korzeni oraz lepszy dostęp do wilgotności gleby i składników odżywczych, łatwiejsze kiełkowanie ze względu na zmniejszone zaskorupienie powierzchni oraz większą infiltrację, retencję i dostępność wody dzięki poprawie porowatości (Komisja Europejska 2010, Jeffery i in. 2010).



Rys. 2. Podział agregatów glebowych (opracowanie własne)

Bioróżnorodność środowiska glebowego wpływa również na wzrost i funkcjonowanie roślin. W czasie kiełkowania nasion i wzrostu roślin mikroorganizmy ryzosferowe namnażają się w zwiększonym tempie, umożliwiając szybszy rozwój rośliny poprzez dostarczanie składników odżywczych. Ponadto mikroorganizmy ryzosferowe syntetyzują fitohormony, tj. auksyny, gibereliny i cytokininy, wpływające na rozwój roślin, a także powodują obniżenie poziomu etylenu niekorzystnie wpływającego na ukorzenianie roślin (Paul i Clark 2000, Torsvik i Øvreås 2002, Nannipieri i in. 2003).

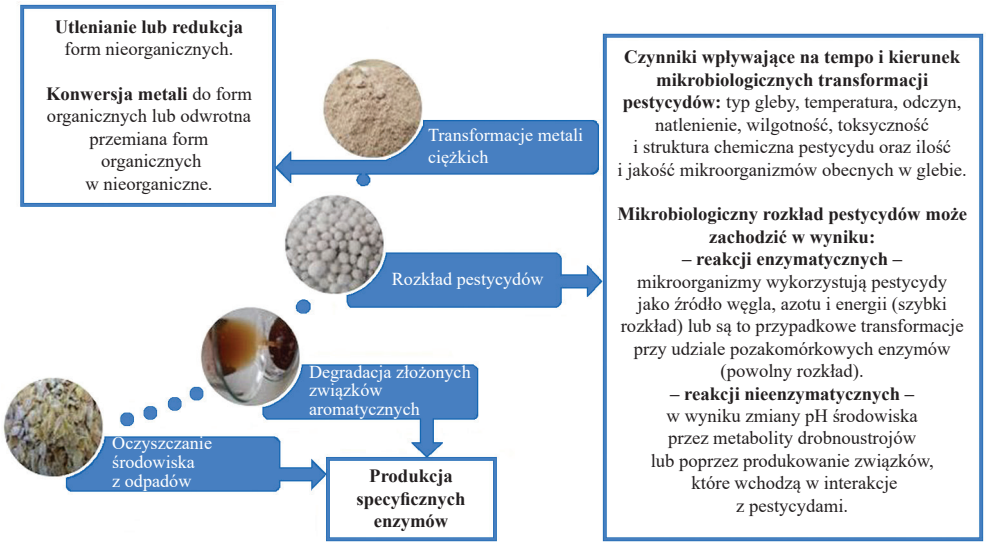
Zanieczyszczenie środowiska glebowego różnego typu odpadami, związkami aromatycznymi czy metalami ciężkimi wpływa na zmiany różnorodności mikroorganizmów w glebie, powodując uaktywnienie mikroorganizmów odpornych na czynniki stresowe. Adaptacja mikroorganizmów do wzrostu w warunkach stresowych powoduje dominację wyspecjalizowanych grup bakterii i grzybów, które uczestniczą w detoksykacji i bioremediacji środowiska glebowego poprzez udział w oczyszczaniu środowiska z odpadów, degradacji złożonych związków aromatycznych czy transformacjach metali ciężkich (rys. 3). Stosowanie pestycydów stanowiących grupę związków chemicznych pochodzenia naturalnego i syntetycznego, które wykorzystywane są w rolnictwie do zwalczania szkodników, chorób grzybowych i chwastów wpływa na równowagę w środowisku glebowym, w tym na różnorodność funkcjonalną i strukturalną zespołów mikroorganizmów, powodując ich selekcję i dostosowanie do czynników stresowych. Rozkład pestycydów zachodzi głównie na drodze mikrobiologicznej, jak również może być spowodowany reakcjami fotochemicznymi (rozkład pod wpływem światła słonecznego) i chemicznymi (utlenianie, redukcja, hydroliza). Drobnoustroje poprzez rozkład preparatów ochrony roślin, zwłaszcza tych, które są związkami organicznymi, przyczyniają się do szybszej detoksykacji środowiska. Należy też zwrócić uwagę na fakt, że produkty rozpadu mogą być niekiedy bardziej toksyczne niż związek wyjściowy. Tempo i kierunek mikrobiologicznych transformacji pestycydów zależą od wielu czynników, takich jak: typ gleby, temperatura, odczyn, natlenienie, wilgotność, toksyczność i struktura chemiczna pestycydu oraz bioróżnorodność, w tym liczba i jakość mikroorganizmów obecnych w glebie (Aislabie i Lloyd-Jones 1995, Parte i in. 2017).

Mikrobiologiczny rozkład pestycydów może zachodzić w wyniku:

- reakcji enzymatycznych – mikroorganizmy wykorzystują pestycydy jako źródło węgla, azotu i energii (szybki rozkład) lub są to przypadkowe transformacje przy udziale pozakomórkowych enzymów (powolny rozkład);
- reakcji nieenzymatycznych – w wyniku zmiany pH środowiska przez metabolity drobnoustrojów lub poprzez produkowanie związków, które wchodzą w interakcje z pestycydami.

Degradacja pestycydów *in situ* zależy w dużej mierze od bioróżnorodności, w tym obecności, liczby i poziomu aktywności mikroorganizmów posiadających odpowiednią zdolność enzymatyczną lub metaboliczną. Bioróżnorodność i aktywność mikroorganizmów zdolnych do degradacji pestycydów zależy również od wie-

lu czynników środowiskowych, do których można zaliczyć: rodzaj gleby, wilgotność, temperaturę czy pH (Aislabie i Lloyd-Jones 1995). Niekiedy w wyniku przekształceń pestycydów tworzone są nowe związki, w skład których wchodzą same pestycydy lub ich metabolity, które zmieniają profil fizjologiczny mikroorganizmów, a tym samym wpływają na ich bioróżnorodność (Paul i Clark 2000, Jeffery i in. 2010, Komisja Europejska 2010).



Rys. 3. Udział mikroorganizmów w detoksykacji i bioremediacji (opracowanie własne)

Od różnorodności mikroorganizmów środowiska glebowego zależą również transformacje metali ciężkich, które przebiegają z udziałem wyspecjalizowanych grup mikroorganizmów przeprowadzających reakcje utleniania lub redukcji form nieorganicznych, a także uczestniczą w transformacjach metali ciężkich obejmujących konwersję metali do form organicznych lub przemiany form organicznych w nieorganiczne (Paul i Clark 2000).

3. BIORÓŻNORODNOŚĆ A USŁUGI EKOSYSTEMÓW GLEBOWYCH

Na bioróżnorodność środowiska glebowego ma wpływ wiele czynników, do których można zaliczyć między innymi stosowanie różnych systemów uprawy, w tym uprawy zerowej, międzyplonów, zmianowania, roślin okrywowych, a także aplikację obornika, kompostów czy innych rodzajów egzogennej materii organicznej (Frąc i in. 2015 i 2018). Wprowadzenie do środowiska różnorodnych nawozów czy innych źródeł materii organicznej powoduje selekcję mikroorganizmów poprzez do-

stępność substratów dla określonych grup drobnoustrojów, które z kolei degradują te związki przy pomocy enzymów. Prowadzi to do modyfikacji substratu, zmiany warunków środowiskowych i pojawienia się innych związków i grup mikroorganizmów zdolnych do ich wykorzystania (Puglisi i in. 2006). Funkcje gleby, a także usługi ekosystemu glebowego są nierozerwalnie związane z bioróżnorodnością danego środowiska. Im jest ona większa, tym więcej usług ekosystemowych i funkcji może pełnić dana gleba. Ze względu na szereg interakcji i zależności zachodzących w zbiorowiskach mikroorganizmów, należy podkreślić, że wraz z ubożeniem bioróżnorodności danego środowiska zmniejsza się liczba możliwych funkcji pełnionych przez daną glebę, do których należy m.in. obieg składników pokarmowych, regulacja zmian klimatu, produkcja żywności czy paliw, oczyszczanie wód i środowiska, sekwestracja węgla, schronienie dla organizmów, źródło nowych związków farmaceutycznych czy dziedzictwo kulturowe (Komisja Europejska 2010). Mikrobiologia i biochemia gleby są ze sobą ściśle powiązane, ponieważ to mikroorganizmy przeprowadzają wiele procesów w środowisku glebowym, a od ich bioróżnorodności i aktywności zależą transformacje materii organicznej, krążenie pierwiastków w środowisku, produkcja żywności i poprawa jakości środowiska. Dzięki temu mikroorganizmy mają swój udział w usługach ekosystemowych, w tym tzw. usługach ekosystemów glebowych, do których należą usługi wspierające, udostępniania, regulacyjne i kulturowe (Power 2010). Usługi wspierające związane są z tworzeniem gleby, produkcją pierwotną, obiegiem węgla oraz składników pokarmowych. Tworzenie gleby następuje w wyniku wietrzenia skały macierzystej i procesów glebotwórczych, w których uczestniczą porosty, a także wiele bakterii i grzybów produkujących kwasy organiczne. Produkcja pierwotna związana jest z działalnością cyjanobakterii i glonów, a także, w sposób pośredni, bakterii symbiotycznych z rodzaju *Rhizobium*. Rozkład substancji organicznej obejmuje etapy fizyczne (rozdrabnianie, mieszanie) i biochemiczne (rozkład enzymatyczny i degradacja nieenzymatyczna), które przeprowadzane są odpowiednio przez makrofaunę, głównie dżdżownice, krocionogi, termity, mrówki i larwy owadów oraz bakterie, archeony, grzyby, pierwotniaki i nicienie (Bender i in. 2016). Mikroorganizmy poprzez zaangażowanie w przebieg wielu procesów zachodzących w środowisku glebowym uczestniczą w obiegu azotu, fosforu, siarki, żelaza, manganu oraz innych metali i pierwiastków śladowych. W proces wiązania azotu cząsteczkowego zaangażowane są wolno żyjące asymilatory azotu, głównie z rodzajów *Azospirillum* i *Azotobacter*, a także symbiotyczne z rodzaju *Rhizobium*. Proces amonifikacji przeprowadzany jest przez wiele bakterii glebowych, nitryfikacja przebiega m.in. z udziałem bakterii z rodzajów *Nitrosomonas* i *Nitrobacter*, a proces denitryfikacji zachodzi przy zaangażowaniu bakterii z rodzaju *Pseudomonas*. W obiegu azotu uczestniczą również grzyby mykoryzowe m.in. z rodzaju *Hymenoscyphus*. Wśród bakterii i grzybów rozpuszczających fosfor można wyróżnić m.in. *Bacillus* spp., *Aspergillus* spp. oraz grzyby mykoryzowe, takie jak: *Glomus macrocarpum*, *Gigaspora margarita* czy

Glomus intraradices (Komisja Europejska 2010). Do usług udostępniania należy tworzenie agregatów glebowych, zatrzymywanie wody, zapewnienie schronienia, różnorodności biologicznej, żywności, biomateriałów i surowców.

Gleba, dzięki bogactwu gatunkowemu i bioróżnorodności, jest rezerwuarem dla procesów adaptacyjnych i ewolucyjnych, w które zaangażowane są wszystkie organizmy, w tym wiele nieznanych dotąd mikroorganizmów (Power 2010, Robertson i in. 2014). Bioróżnorodność mikroorganizmów w środowisku glebowym sprawia, że gleba jest również źródłem nowych biotechnologicznych związków farmaceutycznych i antybiotyków (Ling i in. 2015). Ponadto mikroorganizmy, dzięki ogromnej różnorodności funkcjonalnej i zdolności adaptacyjnych, uczestniczą w dostarczaniu żywności poprzez wspomaganie upraw roślin uprawnych i przemysłowych. Regulacyjne usługi ekosystemowe, w których uczestniczą mikroorganizmy glebowe, związane są z oczyszczaniem wody poprzez mikrobiologiczną degradację ksenobiotyków i eliminację patogenów (Robertson i in. 2014). Wszystkie organizmy uczestniczą w regulacji emisji gazów cieplarnianych, głównie CO_2, a wyspecjalizowane grupy mikroorganizmów, odpowiednio metanogeny (np. *Methanococcus* sp.) i metanotrofy (np. *Methylococcus* sp.), regulują emisję i pochłanianie CH_4 (Walkiewicz i Brzezińska 2019). Ekosystemy glebowe, dzięki dużej bioróżnorodności i zaangażowaniu wszystkich organizmów żywych, mogą świadczyć również szereg usług kulturowych, w tym poznawczych, rekreacyjnych, edukacyjnych i związanych z dziedzictwem kulturowym (Jeffery i in. 2014). Wymienione procesy przeprowadzane przez mikroorganizmy odgrywają istotną rolę w środowisku glebowym, jednakże, jak dotąd, większość mikroorganizmów nie została wyhodowana w warunkach laboratoryjnych, a ich funkcje wciąż nie są rozpoznane (Jansson i Hofmockel 2018).

4. BIORÓŻNORODNOŚĆ A INTERAKCJE MIKROORGANIZMÓW ŚRODOWISKA GLEBOWEGO

Chociaż sekwencjonowanie metagenomowe umożliwia poznanie mikrobiomu glebowego, identyfikację mikroorganizmów czy uzyskanie informacji na temat genów funkcjonalnych, to dane te dotyczą mikroorganizmów o różnych stanach fizjologicznych. Interakcje w środowisku glebowym obejmują różne oddziaływania, od współpracy metabolicznej między mikroorganizmami w związkach syntroficznych, po konkurencję o dostęp do składników odżywczych. Mikrobiota roślin ma wpływ na wytwarzanie bioaktywnych metabolitów produkowanych przez roślinę, a współpraca między roślinami a milionami drobnoustrojów, a także między samymi mikroorganizmami wymaga intensywnej komunikacji (Berg i in. 2017). Dzięki mechanizmowi *quorum sensing*, umożliwiającemu komunikację między komórkami bakterii, w którym dochodzi do regulacji ekspresji genów w spo-

sób zależny od zagęszczenia komórek występujących w danym środowisku, możliwa jest komunikacja nie tylko wewnątrzgatunkowa, ale również międzygatunkowa bakterii, a nawet ich oddziaływania z organizmami wyższymi. Mechanizm ten jest zaangażowany w wiele różnych procesów komórkowych, takich jak: synteza toksyn, enzymów, polisacharydów czy antybiotyków, a ponadto ma znaczenie w regulacji bioróżnorodności w środowisku glebowym, zwłaszcza różnorodności funkcjonalnej i metabolicznej (Jansson i Hofmockel 2018). Mikroorganizmy glebowe komunikują się ze sobą i ze swoim środowiskiem za pomocą różnych sygnałów chemicznych – molekuł sygnalnych zwanych autoinduktorami, które pełnią najważniejszą rolę w mechanizmie *quorum sensing*. Cząsteczki te przemieszczają się z cytoplazmy na zewnątrz komórki i wraz ze wzrostem liczby bakterii w danym środowisku dochodzi do ich akumulacji, a po przekroczeniu wartości progowej, dochodzi do zmiany ekspresji genów i efekt metaboliczny jest obserwowany we wszystkich komórkach populacji bakteryjnej (Lipa i in. 2017). Jednak niewiele badań określiło specyficzne interakcje metaboliczne i sygnalizacyjne między członkami społeczności mikroorganizmów glebowych zapewniające kontrolowanie ich bioróżnorodności w środowisku. Metagenomika pozwala jedynie przewidywać funkcjonalność społeczności mikroorganizmów, a kolejnym etapem zmierzającym do wyjaśnienia interakcji zachodzących między mikroorganizmami w środowisku glebowym jest zrozumienie funkcjonowania metafenomu (Jansson i Baker 2016). Poznanie metafenomu, umożliwiające zrozumienie dystrybucji i różnorodności mikroorganizmów środowiska glebowego, obejmuje określenie stanu fizjologicznego gatunków występujących w glebie i interakcji metabolicznych między członkami społeczności mikroorganizmów. Należy podkreślić, że życie w glebie koncentruje się w tzw. mikroniszach, „wyspach" czy „punktach", w których znajdują się mikroorganizmy, które ewoluowały, dostosowując się do specyficznych, często niekorzystnych warunków środowiskowych (Ponomarova i Patil 2015). Dla przykładu, wykorzystywany często proces tzw. oddychania gleby nie pokazuje szczegółowych reakcji molekularnych, bioróżnorodności mikrobiologicznej i interakcji zachodzących w konsorcjach mikroorganizmów glebowych, ale w sposób ogólny informuje o ekologicznym stanie gleby i aktywności biologicznej, jest jednak wynikiem połączonych interakcji metabolicznych między różnorodnymi mikroorganizmami glebowymi i roślinami. Komunikacja między konsorcjami odbywa się w obrębie porów, które są wypełnione wodą, dając możliwość dyfuzji chemicznych molekuł sygnalnych i metabolitów, umożliwiając interakcje w ramach poszczególnych konsorcjów, co wpływa na zmiany bioróżnorodności. Strzępki grzybów mogą stanowić swojego rodzaju pomost między konsorcjami, a wirusy glebowe odgrywają jeszcze nieokreśloną rolę w regulacji metafenomu glebowego. Gdy gleby stają się bardziej suche, komunikacja między mikroorganizmami zostaje ograniczona, a życie mikrobiologiczne koncentruje się w obrębie poszczególnych agregatów glebowych i jednocześnie zmienia się różnorodność mikroorganizmów w stronę gatunków odpornych na stres suszy, co przekłada się również na zmniejszenie oddychania gleby (Jansson i Hofmockel 2018).

5. ZNACZENIE RÓŻNORODNOŚCI MIKROBIOLOGICZNEJ W OCHRONIE ROŚLIN

Znaczenie bioróżnorodności mikrobiologicznej jest bardzo ważne w ochronie roślin. Różnorodność mikroorganizmów składających się na mikrobiom roślin odgrywa kluczową rolę zarówno w utrzymaniu zdrowia roślin, jak i zdrowotności ekosystemu. Chociaż mikrobiom roślinny jest podzielony na określone części oddziałujące z różnymi mikroorganizmami bytującymi wewnątrz komórek roślinnych – mikroorganizmami endofityczymi, to istnieje również ścisły związek pomiędzy mikrobiomem roślinnym a ekosystemem, w tym mikrobiomem znajdującym się na styku rośliny i powietrza czy gleby, który reprezentowany jest przez różnorodne mikroorganizmy bytujące na powierzchni roślin zarówno ich części nadziemnych, jak i podziemnych. Fyllosfera i wszystkie nadziemne organy połączone są z atmosferą i znajdują się na styku stałej wymiany z mikrobiomem powietrza, co powoduje zmiany bioróżnorodności mikrobiologicznej roślin. Natomiast ryzosfera reprezentuje zależności roślinno-glebowe i to z niej materia organiczna i różne związki sygnałowe migrują do głębszych warstw gleby, ułatwiając długotrwałe procesy mineralizacji i inne procesy zachodzące w środowisku glebowym z udziałem różnorodnych mikroorganizmów. Oba mikrosiedliska występujące na powierzchni roślin, fyllosfera i ryzosfera, charakteryzują się większą różnorodnością mikroorganizmów niż ich odpowiedniki wewnętrzne zasiedlane przez mikroorganizmy endofityczne, ponieważ na powierzchni roślin oprócz mikrobioty epifitycznej występują też mikroorganizmy towarzyszące, znajdujące się w danym środowisku przypadkowo lub przez krótki czas, podczas gdy endosfera kolonizowana jest przez specjalnie przystosowane mikroorganizmy prezentujące wewnętrzny fitomikrobiom (Berg i in. 2017). Szybki rozwój narzędzi „omicznych" zwiększył dostęp do poznania mikrobiomu roślin, a w konsekwencji do identyfikacji jego powiązań z chorobami i do kontroli tych chorób (Bender i in. 2016). Zdrowe rośliny są związane ze swoimi mikroorganizmami dzięki współpracy metabolicznej i wymianie sygnałów, hormonów i składników odżywczych. Choroby charakteryzują się natomiast zaburzeniami w pracy mikrobiomu – tzw. dysbiozą, np. odpowiedzią określonych drobnoustrojów, które mogą działać jak antagoniści, ale także oddziaływać synergistycznie w stosunku do patogenów, nasilając postęp choroby i jej objawy. Zmiany bioróżnorodności mikrobiologicznej, w tym brak pewnych mikroorganizmów w mikrobiomie roślinnym czy glebowym również prowadzi do zachwiania równowagi ekologicznej i stanu dysbiozy i może wspierać wybuchy chorób roślin. Mikrobiom każdej rośliny tworzy swoistą sieć, w której interakcje między mikroorganizmami mają kluczowe znaczenie podczas inwazji patogenów i mogą stanowić środki biokontroli. Dlatego też, inwazje drobnoustrojów mogą powodować zmiany w mikrobiomie, tak że np. endofity mogą być zaangażowane do kontrolowania patogenów roślinnych w ten sam sposób, niezależnie od pierwotnie pełnionych przez nie funkcji (Berg i in. 2017). Wśród różnych rodzajów mikroor-

ganizmów, które żyją w wierzchniej warstwie gleby, grzyby i bakterie zasługują na szczególną uwagę, ponieważ są najbardziej rozpowszechnione i mogą być pożyteczne lub zdolne do zakażenia rośliny, w zależności od gatunku, rośliny żywicielskiej i warunków środowiska. Większość mikroorganizmów środowiska glebowego uważana jest za mikroorganizmy pożyteczne dla roślin ze względu na:

- współżycie z korzeniami roślin (np. grzyby mykoryzowe, bakterie symbiotyczne, endofity);
- rozkład glebowej materii organicznej i zwiększenie dostępności podstawowych składników pokarmowych dla roślin;
- pasożytowanie na mikroorganizmach chorobotwórczych lub ograniczanie ich wzrostu poprzez inne rodzaje interakcji, takie jak konkurencja o niszę ekologiczną i składniki odżywcze czy produkcja toksycznych metabolitów.

Fitopatogeny glebowe mogą występować w glebie, na powierzchni roślin czy w resztkach roślinnych jako saprofity. Mogą tworzyć formy przetrwalne, chlamydospory, sklerocja i oospory, które są w stanie przeżyć w glebie od kilku tygodni do kilku lat. Choroba roślin występuje, gdy spełnione są następujące warunki: obecność patogenu i podatnego gospodarza oraz sprzyjające warunki środowiskowe. Glebowe fitopatogenne bakterie i grzyby są odpowiedzialne za różne choroby roślin (warzyw, owoców, zbóż, kwiatów, drzew), które są problemem dla upraw rolniczych całego świata (Bender i in. 2016). Różnorodność mikroorganizmów stanowi kluczowy czynnik w zapobieganiu chorobom i może być wykorzystywana jako biomarker w strategiach ochrony roślin (Berg i in. 2017). Opracowanie ukierunkowanych i predykcyjnych podejść do biokontroli jest możliwym rozwiązaniem opartym na analizie mikrobiomu roślinnego i glebowego. Połączone strategie hodowli i biokontroli są bardzo pożądane dla utrzymania bioróżnorodności i zdrowotności ekosystemu glebowego (Berg i in. 2017). Oprócz bioróżnorodności również duża biomasa mikroorganizmów oraz wysoka ich aktywność stwarzają niekorzystne warunki dla rozwoju patogenów roślinnych.

Bioróżnorodność mikroorganizmów jest złożona, gdyż mikroorganizmy mogą ze sobą konkurować, jedne mogą hamować rozwój innych, ale także mogą współpracować ze sobą lub innymi organizmami. Wiele badań potwierdza symbiotyczny związek między mikroorganizmami a roślinami. Mikroorganizmy, poprzez zapewnienie bioróżnorodności, w tym odpowiednich wyspecjalizowanych grup, gatunków czy szczepów, mogą stymulować kiełkowanie i wzrost roślin, zapobiegać chorobom oraz promować odporność na stres i poprawiać ogólną witalność roślin (Bender i in. 2016). Podejście oparte na symbiozie roślina–mikroorganizmy w celu poprawy tolerancji na stresy biotyczne i abiotyczne obejmuje wiele zalet i zależy od bioróżnorodności mikrobiologicznej. Mikroorganizmy symbiotyczne często są zdolne do nadawania tolerancji na stres szerokiej gamie różnych gospodarzy roślinnych. Wiele bakterii promujących wzrost roślin może przynosić korzyści zarówno roślinom jednoliściennym, jak i dwuliściennym (Coleman-Derr i Tringe 2014). Na przykład bakteria z rodzaju *Achromobacter*, wyizolowana z suchego koryta rzecznego w po-

łudniowym Izraelu, była w stanie zwiększyć odporność na zasolenie i suszę zarówno u roślin papryki, jak i pomidora (Mayak i in. 2004). Podkreślić należy, że zdolność do przenoszenia rozwiązań odporności na stres z jednego gatunku rośliny na inny za pomocą inokulum mikrobiologicznego może zaoszczędzić wiele lat wysiłku w hodowli roślin. Mikroorganizmy pobudzające wzrost roślin często nadają im tolerancję na więcej niż jeden rodzaj stresu abiotycznego i/lub biotycznego (Coleman-Derr i Tringe 2014), a rośliny uprawiane na glebach słabych i jałowych zazwyczaj narażone są na działanie wielu czynników stresowych. Wykazano na przykład, że rośliny rzodkiewnika pospolitego w symbiozie z bakterią *Paenibacillus polymyxa* mają zwiększoną tolerancję na suszę, a także lepszą odporność na atak patogenów (Timmusk i Wagner 1999). Ponadto różnorodne konsorcja mikroorganizmów można dostosować do określonych warunków środowiskowych, a gatunki mikroorganizmów występujących w symbiozie z roślinami stanowią ogromny rezerwuar informacji genetycznej związanej z gospodarzami bytującymi w środowiskach narażonych na różne stresy biotyczne i abiotyczne, co sprawia, że te mikroorganizmy mogą łatwiej adaptować się do warunków stresowych i powodować zmiany bioróżnorodności w celu nadania roślinie tolerancji na określony czynnik stresowy (Coleman-Derr i Tringe 2014). Dlatego też w celu opracowania nowatorskich środków biotechnologicznych do zastosowania w rolnictwie, optymalnym miejscem do poszukiwania mikroorganizmów promujących wzrost roślin, które nadają odporność na określony stres środowiskowy, są gleby, na których stres ten występuje regularnie. Ponadto coraz częściej stosowane są różnego typu biopreparaty stymulujące rozwój mikroorganizmów w celu zwiększenia różnorodności mikrobiologicznej oraz ochrony roślin przed niekorzystnym działaniem patogenów (Malusá i in. 2012, Pylak i in. 2019). Przykładem są mikroorganizmy antagonistyczne – *Trichoderma* sp., które podczas pasożytniczego działania uwalniają enzymy lityczne, które trawią ścianę komórkową patogenu i czasami przenikają do grzybni gospodarza. Działanie to prowadzi do całkowitej degradacji komórek m.in. patogennych grzybów z rodzaju *Rhizoctonia* (Jeffery i in. 2010, Komisja Europejska 2010, Frąc 2012, Frąc i in. 2018).

6. FUNKCJE RÓŻNORODNOŚCI GRZYBÓW W ŚRODOWISKU GLEBOWYM

Różnorodność grzybów występujących w środowisku glebowym pozwala zaliczyć je do organizmów saprofitycznych, mykoryzowych, patogenicznych, endofitycznych, pasożytniczych, mutualistycznych, alergennych, produkujących enzymy oraz grzybów antagonistycznych. Bioróżnorodność grzybów glebowych również zapewnia szereg usług ekosystemowych związanych z transformacją materii organicznej, obiegiem pierwiastków, formowaniem i zachowaniem struktury gleby, biologiczną regulacją populacji, poprawą stosunków wodnych czy aktywności

enzymatycznej. Znanych jest wiele czynników wpływających na populacje grzybów w środowisku glebowym, zwłaszcza interakcje gleba–grzyb–roślina–mikroorganizmy. Zaliczyć można do nich przede wszystkim obecność substancji bioaktywnych, flawonoidów, fenoli, peptydów, fitoaleksyn czy strigolaktonów, a także stosowane praktyki rolnicze, żyzność i typ gleby oraz obecność patogenów (Bender i in. 2016, Berg i in. 2017, Köberl i in. 2017, Frąc i in. 2018). W badaniach zbiorowisk grzybów niezwykle istotną rolę odgrywa podejście interdyscyplinarne obejmujące współpracę pomiędzy naukowcami zajmującymi się mikrobiologią, mykologią, gleboznawstwem, agronomią, a także genetyką, biochemią, filogenetyką i bioinformatyką. Takie podejście może zapewnić wyjaśnienie mechanizmów, interakcji i funkcji w zbiorowiskach grzybów w środowisku glebowym. Grzyby, ze względu na ich ogromną różnorodność i wrażliwość na różne czynniki, mogą być bioindykatorami jakości gleb. Wykorzystywane są zwłaszcza jako wskaźniki ich zdrowotności. Wśród pożytecznych grzybów należy wymienić saprotrofy, grzyby mykoryzy arbuskularnej (*Glomus* spp.), endofity (*Beauveria bassiana*) czy grzyby antagonistyczne (*Trichoderma* spp.). Do wskaźników słabej jakości i zdrowotności gleb należy natomiast obecność grzybów fitopatogenicznych, m.in. z rodzaju *Verticillium*, *Phytophthora* czy *Fusarium* (Frąc 2012, Frąc i in. 2018). W dobie dużego zagrożenia upraw przez rodzime oraz pojawiające się coraz to nowe, wprowadzone m.in. z materiałem roślinnym obce gatunki fitopatogenów, jak np. *Pilidium lythri* (Karimi i in. 2016), bardzo ważne jest poznanie bioróżnorodności grzybów i innych mikroorganizmów występujących w danym środowisku i dlatego konieczne jest opracowywanie nowych, szybkich testów i metod diagnostyki mikroorganizmów pożytecznych i patogenicznych dla roślin. Wykorzystują one szereg technik biologii molekularnej, w tym łańcuchową reakcję polimerazy (PCR), ilościową łańcuchową reakcję polimerazy (qPCR), amplifikację wykorzystującą zapętlenie (LAMP), czy sekwencjonowanie następnej generacji (NGS) (Panek i Frąc 2018 i 2019, Malarczyk i in. 2019). W metodach opartych na technikach biologii molekularnej wykorzystywanych do badania bioróżnorodności i diagnostyki mikroorganizmów wciąż dużym wyzwaniem jest dobór i optymalizacja odpowiednich metod izolacji DNA z materiału porażonego (części roślin i owoców) czy gleby będącej potencjalnym rezerwuarem niektórych mikroorganizmów fitopatogenicznych lub pożytecznych. W tym celu wykorzystywanych jest wiele metod opartych na mechanicznej dezintegracji komórek w połączeniu z działaniem czynnikami biochemicznymi, lizującymi ściany komórkowe i uwalniającymi kwasy nukleinowe. Jednakże zastosowanie tych metod wciąż wymaga udoskonalania w celu zastosowań przemysłowych wykorzystywanych do monitorowania i badań przesiewowych wielu próbek na plantacjach roślin uprawnych czy w zakładach przetwórczych, w celu jak najszybszej identyfikacji czynnika chorobowego bądź detekcji mikroorganizmów antagonistycznych. Jedną z ostatnio opracowanych metod jest nowa technologia opierająca się na mikroigłach znajdujących się na plastrze wielkości znaczka pocztowego. Jest on wykonany z niedrogiego polimeru i z jednej strony posiada setki drobnych igieł, które wbijają

się w roślinę, a po zdjęciu plastra i spłukaniu wodnym roztworem buforowym materiał genetyczny zmywany jest do sterylnego pojemnika (Paul i in. 2019). Ujednolicenie postępowania w trakcie izolacji DNA daje możliwość prostego poboru próbek przez rolników, standaryzacji metody i uzyskania powtarzalnych wyników, jednakże kolejne etapy detekcji i diagnostyki muszą być prowadzone w laboratorium. Standaryzacja metod molekularnych jest niezwykle ważna podczas badań obejmujących porównanie bioróżnorodności mikroorganizmów wielu siedlisk, w tym plantacji owoców, sadów, pól uprawnych czy pastwisk.

7. ZAGROŻENIA DLA BIORÓŻNORODNOŚCI

Zagrożenia utraty bioróżnorodności stanowią znaczy problem ostatnich lat. Wśród zagrożeń wymienia się najczęściej zmiany klimatu, erozję, zubożenie zasobów glebowej materii organicznej, intensyfikację rolnictwa czy zmiany użytkowania gruntów. Rolnicy opiekujący się znaczną częścią gruntów mogą odegrać kluczową rolę w ochronie różnorodności biologicznej gleby poprzez narzędzia i techniki, jakie wybierają w swojej pracy. Do zabiegów sprzyjających zwiększeniu różnorodności biologicznej gleb należą: **ściółkowanie**, którego rolą jest zatrzymywanie ciepła, zabezpieczenie wilgotności, zapobieganie erozji, budowanie struktury; **przykrycie gleby resztkami organicznymi** o odpowiednim stopniu rozkładu, które stanowią źródło składników odżywczych i pełnią funkcję przy poprawie struktury gleby; **dobór upraw i stosowanie płodozmianu**, wpływające na ochronę przed szkodnikami i dostarczanie składników pokarmowych oraz **zagospodarowanie obrzeży i granic pól** (Jeffery i in. 2010, Komisja Europejska 2010).

8. METODY BADANIA RÓŻNORODNOŚCI MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH

Narzędzia i metody badania różnorodności mikroorganizmów glebowych służą określaniu:

- różnorodności funkcjonalnej zespołów grzybów (FF Plates);
- różnorodności funkcjonalnej zespołów mikroorganizmów beztlenowych (AN Plates);
- różnorodności funkcjonalnej mikroorganizmów glebowych (ECO Plates);
- aktywności enzymatycznej gleby;
- zawartości DNA w glebie, zróżnicowania genetycznego zbiorowisk mikroorganizmów glebowych, detekcji patogenów (analiza polimorfizmu terminalnych fragmentów restrykcyjnych – t-RFLP, elektroforeza w gradiencie czynnika denaturującego – DGGE, analiza polimorfizmu fragmentów amplifikowanych – AFLP, PCR, qPCR, LAMP, NGS);

- profilu metabolicznego oraz fenotypu mikroorganizmów (Gianfreda i Ruggiero 2006, Frąc 2012, Frąc i in. 2018, Schloter i in. 2018).

Komórki mikroorganizmów, roślin i zwierząt obecnych w glebie uwalniają enzymy. Na ogół ich aktywność obniża się w niższych warstwach gleby i jest skorelowana z aktywnością mikrobiologiczną i poziomem C i N organicznego w glebie. Zwraca się również uwagę na aktywność enzymów w poszczególnych frakcjach gleby. Badania te mogą być użyteczne w poznaniu wpływu różnych frakcji gleby na mikroorganizmy i aktywność enzymów zasocjowanych z mineralno-organicznymi cząstkami gleby. Ważna jest również aktywność enzymów w ryzosferze gleby i ich akumulacja właśnie w strefie korzeniowej (Gianfreda i Ruggiero 2006). Znanych jest wiele czynników wpływających na aktywność enzymów glebowych. Do najważniejszych można zaliczyć:

- pH – każdy enzym charakteryzuje się optymalnym pH dla maksimum swojej aktywności. Aktywność enzymów na ogół wzrasta ze wzrostem pH gleby, z wyjątkiem fosfatazy kwaśnej;
- zasolenie – wykazano negatywny wpływ akumulacji rozpuszczalnych soli w glebie na aktywność enzymów glebowych. Wiele aktywności enzymów glebowych obniża się wraz ze wzrostem zasolenia;
- metale ciężkie i pestycydy – na ogół wpływ zanieczyszczeń organicznych jest okresowy i zależy od zdolności mikroorganizmów do adaptacji i ich degradacji. W przeciwieństwie do nich toksyczne metale mogą pozostawać w glebie przez dłuższy czas, wyrządzając szkody w populacji mikroorganizmów, co ma negatywny wpływ na bilans i aktywność procesów przebiegających w środowisku glebowym. Metale ciężkie wpływają na aktywność enzymów przez modyfikację konformacji białka, interakcje z aktywnymi grupami białek i zahamowanie syntezy enzymu.

Często aktywność pojedynczych lub wielu enzymów jest badana do oszacowania żyzności i jakości gleb (Gianfreda i Ruggiero 2006, Puglisi i in. 2006). Aktywność dehydrogenazy i β-glukozydazy należy do czułych wskaźników zmian w glebowej substancji organicznej (Nannipieri i in. 2003, Gianfreda i Ruggiero 2006, Schloter i in. 2018).

Gleba jest największym źródłem bioróżnorodności na Ziemi. Użycie technik molekularnych pozwoliło odróżnić i monitorować kompleksowo populacje mikroorganizmów w środowisku glebowym. Główne narzędzia wykorzystywane do poznania struktury populacji mikroorganizmów oparte są na metodzie PCR, a ostatnio rozwijane narzędzia metagenomiczne bazują na metodach sekwencjonowania następnej generacji, obejmujących sekwencjonowanie w technologii nanopor, illumina czy pirosekwencjonowanie (Fakruddin i in. 2013, Buermans i den Dunnen 2014, Raza i Ameen 2017). Markery genetyczne – geny, kodujące białka zaangażowane w funkcjonowanie komórek, są odpowiedzialne za aktywność specyficznych grup mikroorganizmów uczestniczących w wiązaniu azotu, brodawkowaniu czy degradacji ksenobiotyków. Badania różnorodności życia mikrobiologicznego gleb wskazu-

ją, że w 1 g gleby występuje kilka tysięcy odrębnych typów genomów mikroorganizmów (Nannipieri i in. 2003, Puglisi i in. 2006). Molekularne techniki używane są do wykrywania genów funkcjonalnych obecnych w populacjach mikroorganizmów glebowych, aby określić potencjalne funkcje mikroorganizmów występujących w glebie związane ze stymulacją wzrostu roślin, powstrzymaniem choroby, nitryfikacją, wiązaniem azotu, denitryfikacją czy rozkładem różnych związków (Bender i in. 2016). Pomimo wielu badań dotyczących funkcjonalnej i taksonomicznej różnorodności i aktywności konieczne są dalsze badania dotyczące procesów zaangażowanych w rozkład i recykling związków. Wiele genów funkcjonalnych wykorzystuje się do detekcji kluczowej aktywności mikrobiologicznej, aby określić strukturę i funkcję mikrobiomu glebowego. Biologiczna kontrola i zdolność mikroorganizmów do odpowiedzi na różne czynniki, takie jak zanieczyszczenie czy praktyka rolnicza uwarunkowane są obecnością odpowiednich genów. Różne geny zaangażowane są w badanie bioremediacji związków ropopochodnych czy oporności na antybiotyki. Inne ważne geny aktywności mikrobiologicznej dotyczące odpowiedzi bezpośrednio związanej z żyznością i obiegiem kluczowych składników odżywczych to geny zaangażowane w obieg węgla i azotu. Również detekcja genów funkcjonalnych mikroorganizmów patogenicznych w środowisku glebowym jest bardzo ważnym zagadnieniem w monitorowaniu zdrowotności gleb, a tym samym roślin (Paul i Clark 2000, Torsvik i Øvreås 2002, Nannipieri i in. 2003, Schloter i in. 2018).

Organizmy glebowe stanowią około jednej czwartej różnorodności biologicznej na świecie, jednak często zaniedbuje się ich ochronę. Dotychczas zidentyfikowano tylko 1% mikroorganizmów żyjących w glebie (Komisja Europejska 2010, Jeffery i in. 2010). Ze względu na to, że bioróżnorodność mikroorganizmów ma kluczowe znaczenie dla funkcji, jakie pełni gleba, wpływając na żyzność i wartość produkcyjną środowiska glebowego, należy chronić bioróżnorodność ekosystemów glebowych.

9. PODSUMOWANIE

- Bogata różnorodność biologiczna jest źródłem korzyści dla żyzności i wartości produkcyjnej gleb, a także pełni ważną rolę w łagodzeniu zmian klimatycznych, dostarczaniu biomasy, żywności, surowców i antybiotyków.
- Bioróżnorodność mikroorganizmów, w tym zmiany mikrobiomu gleby, endosfery i ryzosfery stanowią ważny element w ochronie roślin oraz ich odporności na stresy abiotyczne i biotyczne w rolnictwie, gdyż mikroorganizmy pobudzające wzrost roślin są w stanie przynosić korzyści wielu gatunkom gospodarzy roślinnych i oferować lepszą jednoczesną tolerancję na szereg środowiskowych czynników stresowych.
- Nowa wizja rolnictwa z zapewnieniem wysokiej żyzności i produkcyjności gleb coraz częściej obejmuje powiązania agroekosystemu z bioróżnorodnością mikrobiologiczną, szczególnie z mikrobiomem glebowym i roślinnym w celu zwięk-

szenia odporności określonych upraw roślin na szkodniki, patogeny, niedobór wody czy składników pokarmowych, a także wykorzystania możliwości zarządzania uprawami roślin w połączeniu z bioróżnorodnością gleby w zależności od miejsca, warunków i czynników środowiskowych.

- Większość funkcji i procesów występujących w glebie napędzanych jest przez organizmy żywe, jednakże perspektywy badawcze dotyczą szczegółowych badań metafenomu glebowego obejmującego analizę mikrobiomu, proteomu, transkryptomu i metabolomu w celu zrozumienia interakcji, dystrybucji i różnorodności mikroorganizmów w środowisku glebowym.

Literatura:

1. Aislabie J., Lloyd-Jones G.: A review of bacterial degradation of pesticides. Aust. J. Soil Res., 1995, **33**: 925-942.
2. Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojska U., Prusinkiewicz Z.: Badania ekologiczno-gleboznawcze. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2004, s. 21-43.
3. Bender S.F., Wagg C., van der Heijden M.G.A.: An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends Ecol. Evol., 2016, **31(6)**: 440-452. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016.
4. Berg G., Köberl M., Rybakova D., Müller H., Grosch R., Smalla K.: Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. FEMS Microbiol. Ecol., 2017, **93(fix050)**: 1-9.
5. Buermans H.P.J., den Dunnen J.T.: Next generation sequencing technology: Advances and applications. Bioch. Biophys. Acta, 2014, **1842**: 1932-1941. http://dx.doi.org/10.1016/j.bbadis.2014.06.015.
6. Coleman-Derr D., Tringe S.G.: Building the crops of tomorrow: advantages of symbiont-based approaches to improving abiotic stress tolerance. Frontiers in Microbiology, 2014, **5(283)**: 1-6.
7. Fakruddin, Mazumdar R.M., Chowdhury A., Hossain N., Mahajan S., Islam S.: Pyrosequencing – a next generation sequencing technology. World Appl. Sci. J., 2013, **24(12)**: 1558-1571. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.12.2972.
8. Frąc M., Gryta A., Oszust K., Šarapatka B., Bilińska-Wielgus N., Brzezińska M., Čáp L., Poláková P., Malý S.: Wpływ egzogennej materii organicznej (EOM) na różnorodność funkcjonalną i genetyczną mikroorganizmów. W: Badania egzogennej materii organicznej w celu bezpiecznego stosowania do gleby, S. Malý, G. Siebielec (red.). 2015, ss. 81-103.
9. Frąc M., Hannula S.E., Bełka M., Jędryczka M.: Fungal biodiversity and their role in soil health. Front. Microbiol., 2018, **9**: 1-707.
10. Frąc M.: Ocena mikologiczna osadu z oczyszczalni ścieków mleczarskich oraz jego wpływ na różnorodność funkcjonalną mikroorganizmów glebowych. Acta Agroph. Monographiae, 2012, ss. 141.
11. Gianfreda L., Ruggiero P.: Enzyme activities in soil. In: Nucleic acids and proteins in soil, P. Nannipieri, K. Smalla (eds). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006, pp. 257-310, https://doi.org/10.1007/3-540-29449-X_12.
12. Gołębiowska J.: Mikrobiologia Rolnicza. PWRiL, 1975.

13. Havlicek E., Mitchell E.A.D.: Soils Supporting Biodiversity. In: Interactions in soil: promoting plant growth, biodiversity, community and ecosystems, J. Dighton and J.A. Krumins (eds). Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014, **1**: 27-58.
14. Jansson J.K., Baker E.S.: A multi-omic future for microbiome studies. Nat. Microbiol., 2016, **1**: 1-3.
15. Jansson J.K., Hofmockel K.S.: The soil microbiome – from metagenomics to metaphenomics. Curr. Opin. Microbiol., 2018, **43**: 162-168.
16. Jeffery S., Gardi C., Jones A., Montanarella L., Marmo L., Miko L., Ritz K., Peres G., Römbke J., van der Putten W.H.: European atlas of soil biodiversity. European Commission, Luxembourg. 2010, pp. 128.
17. Karimi K., Arzanlou M., Babai-Ahari A., Pertot I.: Biological and molecular characterisation of *Pilidium lythri,* an emerging strawberry pathogen in Iran. Phytopathologia Mediterranea, 2016, **55(3)**: 366-379.
18. Komisja Europejska, Fabryka życia. Dlaczego różnorodność biologiczna gleby jest tak istotna. Luksemburg, 2010, s. 1-24.
19. Ling L.L., Schneider T., Peoples A.J., Spoering A.L., Engels I., Conlon B.P., Mueller A., Schäberle T.F., Hughes D.E., Epstein S., Jones M., Lazarides L., Steadman V.A., Cohen D.R., Felix C.R., Fetterman K.A., Millett W.P., Nitti A.G., Zullo A.M., Chen C., Lewis K.: A new antibiotic kills pathogens without detectable resistance. Nature, 2015, **517**: 455-459.
20. Lipa P., Kozieł M., Janczarek M.: Zjawisko *Quorum Sensing* bakterii Gram-ujemnych: cząsteczki sygnałowe i inhibitory oraz ich potencjalne zastosowanie terapeutyczne. Postępy Biochemii, 2017, **63(4)**: 242-260.
21. Malarczyk D., Panek J., Frąc M.: Alternative molecular-based diagnostic methods of plant pathogenic fungi affecting berry crops – a review. Molecules, 2019, **24(7)**: 1-25.
22. Malusá E., Sas-Paszt L., Ciesielska J.: Technologies for beneficial microorganisms inocula used as biofertilizers. Sci. World J., 2012, **491206**: 1-12.
23. Marasco R., Rolli E., Ettoumi B., Vigani G., Mapelli F., Borin S., Abou-Hadid A.F., El-Behairy U.A., Sorlini C., Cherif A., Zocchi G., Daffonchio D.: A drought resistance-promoting microbiome is selected by root system under desert farming. PLoS One, **7(10):** e48479.
24. Mayak S., Tirosh T., Glick B.R.: Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomato and peppers. Plant Sci., 2004, **166**: 525-530.
25. Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M.T., Landi L., Pietramellara G., Renella G.: Microbial diversity and soil functions. Eu. J. Soil Sci., 2003, **54**: 655-670.
26. Panek J., Frąc M.: Development of a qPCR assay for the detection of heat-resistant *Talaromyces flavus*. Internat. J. Food Microbiol., 2018, **270**: 44-51.
27. Panek J., Frąc M.: Loop-mediated isothermal amplification (LAMP) approach for detection of heat-resistant *Talaromyces flavus* species. Scientific Reports, 2019, **1-8(9)**: 5846. https://doi.org/10.1038/s41598-019-42275-x.
28. Parte S.G., Mohekar A.D., Kharat A.S.: Microbial degradation of pesticide: A review, Afr. J. Microbiol. Res., 2017, **11(24)**: 992-1012.
29. Paul E.A., Clark F.E.: Mikrobiologia i biochemia gleb. UMCS, 2000, ss. 389.
30. Paul R., Saville A.C., Hansel J.C., Ye Y., Ball C., Williams A., Chang X., Chen G., Gu Z., Ristaino J.B., Wei Q.Ł.: Extraction of plant DNA by microneedle patch for rapid detection of plant diseases. ACS Nano, 2019, **13(6)**: 6540-6549.
31. Ponomarova O., Patil K.R.: Metabolic interactions in microbial communities: untangling the Gordian knot. Curr. Opin. Microbiol., 2015, **27**: 37-44.

32. Power A.G.: Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. Phil. Trans. R. Soc. B, 2010, **365**: 2959-2971.
33. Puglisi E., Del Re A.A.M., Rao M.A., Gianfreda L.: Development and validation of numerical indexes integrating enzymatic activities of soils. Soil Biol. Biochem., 2006, **38**: 1673-1681.
34. Pylak M., Oszust K., Frąc M.: Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit. Rev. Environ. Sci. Biotechnol., 2019, **18(3)**: 597-616. https://doi.org/10.1007/s11157-019-09500-5
35. Raza S., Ameen A.: Nano pore Sequencing Technology: A Review. Int. J. Adv. Sci. Res., 2017, **3(8)**: 90-95.
36. Robertson G.P., Gross K.L., Hamilton S.K., Landis D.A., Schmidt T.M., Snapp S.S., Swinton S.M.: Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. BioScience, 2014, **64(5)**: 404-415.
37. Schloter M., Nannipieri P., Sorensen S.J., van Elsas J.D.: Microbial indicators for soil quality. Biol. Fert. Soils, 2018, **54(1)**: 1-10.
38. Timmusk S., Wagner E.G.H.: The plant-growth-promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* induces changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression: a possible connection between biotic and abiotic stress responses. Mol. Plant Microbe Interact., 1999, **12**: 951-959.
39. Torsvik V., Øvreås L.: Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. Curr. Opin. Microbiol., 2002, **5(3)**: 240-245.
40. Walkiewicz A., Brzezińska M.: Interactive effects of nitrate and oxygen on methane oxidation in three different soils. Soil Biol. Biochem., 2019, **133**: 116-118, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.001.

V PATOGENY GLEBOWE
SKĄD SIĘ BIORĄ I JAK Z NIMI WALCZYĆ?

Czesław Ślusarski

Instytut Ogrodnictwa
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
e-mail: czeslaw.slus@O2.pl

1. PATOGENY NAJCZĘŚCIEJ WYSTĘPUJĄCE W GLEBACH ZDEGRADOWANYCH, UŻYTKOWANYCH OGRODNICZO

W tradycyjnej uprawie roślin ogrodniczych w glebie lub w substratach organicznych zakażone podłoże jest źródłem wielu chorób, zwłaszcza wywoływanych przez właściwe, polifagiczne patogeny glebowe, czyli chorobotwórcze drobnoustroje atakujące wiele gatunków roślin. Od kilku lat narastający problem w tunelowej uprawie papryki stanowi *Phytophthora capsici* – bardzo groźny patogen atakujący wszystkie części rośliny, ale przede wszystkim powodujący masowe zamieranie roślin (fot. 1–2). Spośród wielu patogenów można wymienić np. *Sclerotinia sclerotiorum* (fot. 3), *Verticillium dahliae*, (fot. 4–5) *Colletotrichum coccodes*, *Cylindrocarpon destructans*, *Fusarium oxysporum*, *F. solani* (fot. 6), *Phomopsis sclerotioides*, *Phytophthora* spp., *Phoma* spp., *Pyrenochaeta lycopersici*, *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani*, *Thielaviopsis basicola* itp. (Ślusarski 2008). W wielu gospodarstwach poważnym problemem są także nicienie, głównie guzaki korzeniowe (*Meloidogyne* spp.) i korzeniaki (*Pratylenchus* spp.), a w uprawach pomidorów w tunelach foliowych również mątwik ziemniaczany (*Globodera rostochiensis*). Obecność pasożytniczych nicieni w glebie – zwłaszcza z rodzajów *Pratylenchus* i *Globodera* – często bywa niezauważana przez długi okres czasu, gdyż rozpoznanie ich występowania na podstawie objawów na korzeniach nie jest łatwe, a ponadto na nadziemnych częściach roślin w zasadzie nie tworzą się specyficzne symptomy. Poważnym i częstym problemem są patogeniczne bakterie glebowe, np. *Streptomyces scabies* posiadający wiele roślin żywicielskich, m.in. warzywa korzeniowe, buraki ćwikłowe, ziemniaki, brukiew, rzepa, rzodkiew, rzodkiewka, pasternak i inne, oraz bakteria *Erwinia carotovora* wywołująca mokrą zgniliznę wielu roślin uprawnych.

Fot. 1. Korzenie papryki silnie porażone przez *Phytophthora capsici* (fot. C. Ślusarski)

Fot. 2. Zamieranie roślin papryki wywołane przez *Phytophthora capsici* (fot. C. Ślusarski)

Fot. 3. Zgnilizna twardzikowa na pomidorze (fot. C. Ślusarski)

Fot. 4. Wertycylioza truskawki (fot. C. Ślusarski)

Fot. 5. Zgnilizna i próchnienie podstawy łodygi oraz korzeni ogórka (*F. solani*) (fot. C. Ślusarski)

Fot. 6. Wertycylioza, zbrunatnienie wiązek (fot. C. Ślusarski)

Charakterystyczną cechą wymienionych patogenów i nicieni jest to, że zasadniczo, z wyjątkiem chorób powodowanych przez *Pythium i Phytophthora*, w uprawach pod osłonami zwalczanie ich w trakcie okresu wegetacji nastręcza bardzo poważne trudności lub jest wręcz niemożliwe. Metody i sposoby zwalczania patoge-

nów glebowych są zupełnie inne niż w przypadku zwalczania patogenów nalistnych. Odmienna jest również strategia ochrony przed chorobami monocyklicznymi, czyli wywoływanymi przez patogeny odbywające na porażonej roślinie jeden cykl rozwojowy i chorobami policyklicznymi – mającymi wiele cyklów życiowych w ciągu roku. Dla zwalczania pierwszej grupy chorób pierwszorzędne znaczenie ma wykonywanie zabiegów silnie redukujących poziom inokulum pierwotnego, gdyż stopień redukcji inokulum decyduje o opóźnieniu wystąpienia choroby. Natomiast w walce z chorobami policyklicznymi redukcja pierwotnego inokulum ma o wiele mniejsze znaczenie, a znacznie ważniejsze jest wykonywanie zabiegów ograniczających tempo szerzenia się choroby (Gilligan 2003, Termorshuizen i Jeger 2014).

Najważniejszym czynnikiem odpowiedzialnym za geograficzne rozprzestrzenianie się patogenów glebowych jest materiał rozmnożeniowy: nasiona, sadzonki, cebulki i różne organy roślinne wykorzystywane do rozmnażania wegetatywnego. Istotny wpływ na rozprzestrzenianie fitopatogenów i szkodników ma międzynarodowy obrót materiałem roślinnym. Z praktyki ogrodniczej znanych jest szereg przypadków wprowadzenia do Polski z importowanym materiałem rozmnożeniowym wielu chorób roślin, niejednokrotnie wcześniej nienotowanych w kraju. W obrębie gospodarstwa lub najbliższej okolicy istotnymi i częstymi źródłami pierwotnej infekcji są: propaguły drobnoustrojów przebywające w glebie przy nieobecności rośliny żywicielskiej, zakażone resztki roślinne w glebie lub na elementach konstrukcyjnych szklarni, porażone inne rośliny będące gospodarzami okolicznościowymi, zakażona woda lub pożywki hydroponiczne, struktury drobnoustrojów przenoszone z wiatrem, zwierzęta i owady będące wektorami patogenów, zakażone maszyny rolnicze i pojazdy, a także pracownicy i osoby odwiedzające gospodarstwo. Rozprzestrzenianie się czynników chorobotwórczych w okresie wegetacyjnym odbywa się przez powietrze (anemochoria), wodę (hydrochoria), przy udziale owadów i zwierząt (zoochoria) oraz człowieka (antropochoria). Przykładem rozprzestrzeniania się patogenów glebowych na zasadzie anemochorii może być rozsiewanie z prądami powietrza zarodników różnych form specjalnych *Fusarium oxysporum*, tworzących się na powierzchni tkanek porażonych roślin. Ruchy wód gruntowych, a także woda spływająca na powierzchni gleby po ulewnych deszczach lub po intensywnym nawadnianiu zraszającym, mogą przenosić gatunki grzybów rodzajów *Fusarium* i *Verticillium* oraz gatunki grzybopodobnych lęgniowców *Pythium* i *Phytophthora* (hydrochoria). Muchówki, takie jak ziemiórki i brzegówki, bardzo często występujące w szklarniach z uprawami hydroponicznymi, są istotnymi wektorami form specjalnych *Fusarium oxysporum* (Gillespie i Menzies1993) oraz różnych gatunków *Pythium* i *Phytophthora.*

2. METODY UMOŻLIWIAJĄCE HAMOWANIE ROZWOJU I ROZPRZESTRZENIANIA PATOGENÓW GLEBOWYCH

2.1. METODY AGROTECHNICZNE I GENETYCZNE

Powszechnie uważa się, że najpewniejszym sposobem radzenia sobie z agrofagami jest przewidywanie i unikanie ich występowania, co umożliwia szereg prostych działań profilaktycznych.

Higiena i zdrowy materiał roślinny

Higiena ma istotne znaczenie w uprawach pod osłonami, gdzie utrzymanie jej jest o wiele łatwiejsze niż w uprawach polowych. Duże znaczenie fitosanitarne ma wczesne usuwanie ze szklarni resztek roślinnych i porażonych roślin, czyszczenie i odkażanie narzędzi i sprzętu używanego w czasie produkcji, dezynfekcja szklarni i elementów jej wyposażenia – łącznie z systemem nawadniania, a także zapewnienie, że zakażona gleba lub narzędzia nie są wprowadzane do systemu uprawy lub przenoszone z jednej szklarni do drugiej. Ograniczenie wprowadzenia materiału infekcyjnego do szklarni może także spowodować zakaz wstępu osób postronnych do pomieszczeń uprawowych. Należy również mieć pewność, że woda używana do podlewania – zwłaszcza pobierana z basenów lub ujęć powierzchniowych, jest wolna od czynników chorobotwórczych. Pierwszorzędne znaczenie dla zdrowotności roślin na miejscu stałej uprawy ma użycie nasion i rozsady całkowicie wolnych od fitopatogenów. Jest to szczególnie ważne w hydroponicznych systemach uprawy roślin szklarniowych z wykorzystaniem sztucznych substratów, np. wełny mineralnej.

Zmianowanie

W gospodarstwach specjalizujących się w uprawie pod osłonami jednego lub nawet kilku gatunków warzyw zmianowanie ma bardzo małe znaczenie fitosanitarne i praktycznie nie jest stosowane. Ponadto w uprawach pod osłonami w podłożu często występują patogeny polifagiczne, np. *Sclerotinia sclerotiorum*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp., *Verticillium* spp., w stosunku do których zmianowanie nie jest skuteczne, gdyż atakują one wiele gatunków roślin. Starannie zaplanowany płodozmian może mieć natomiast duże znaczenie w uprawach polowych.

Kształtowanie mikroklimatu w pomieszczeniu uprawowym

Uprawy szklarniowe stanowią jedyny agroekosystem, w którym można modyfikować warunki środowiska, oczywiście pod warunkiem, że obiekt posiada odpowiednie wyposażenie techniczne i kontrolno-pomiarowe, najlepiej sterowane komputerowo (Radojević i in. 2014). Kształtowanie podstawowych parametrów mikroklimatu w szklarni, czyli temperatury i wilgotności powietrza, umożliwia wysoce

skuteczną ochronę przed szeregiem chorób atakujących nadziemne części roślin, takich jak szara pleśń, brunatna plamistość liści pomidora, czarna zgnilizna zawiązków i pędów roślin dyniowatych, mączniak rzekomy sałaty itp. Natomiast mikroklimat w tunelach foliowych, zwłaszcza bez stałego systemu grzewczego i górnego lub bocznego wietrzenia, charakteryzuje się dużymi wahaniami temperatury i wysoką wilgotnością powietrza, co jest wynikiem samej konstrukcji tunelu i właściwości folii. W tych warunkach chemiczne zwalczanie fungicydami szybko szerzących się chorób (np. zarazy ziemniaka na pomidorze, szarej pleśni) jest bardzo trudne, zwłaszcza w przypadku pochmurnej i wilgotnej pogody.

Metody uprawy i zabiegi pielęgnacyjne

Zastępowanie tradycyjnej uprawy pomidorów i ogórków w glebie uprawami bezglebowymi w substratach mineralnych (w Polsce najczęściej jest to wełna mineralna) lub w małej objętości substratów organicznych odizolowanych od macierzystego gruntu, stanowi bardzo skuteczną metodę ochrony przed właściwymi patogenami glebowymi. Uprawa w wełnie mineralnej praktycznie wyeliminowała występowanie niektórych groźnych chorób odglebowych, np. ryzoktoniozy, korkowatości korzeni pomidora, czarnej zgnilizny korzeni dyniowatych, a w przypadku oberżyny i papryki – wertycyliozy. Jednakże uprawy hydroponiczne stwarzają wręcz idealne warunki do rozwoju grzybopodobnych lęgniowców tworzących zarodniki pływkowe (zoospory), które ewolucyjnie są doskonale przystosowane do środowiska wodnego.

Odmiany odporne i szczepienie

Odmiany odporne stanowią w praktyce niezwykle ważny element ochrony roślin przed chorobami, a w przypadku wirusów jest to w zasadzie jedyny sposób uniknięcia problemów z tymi patogenami. Wśród warzyw szklarniowych najwięcej odmian o kompleksowej odporności na choroby spotykamy u pomidorów. Obecnie prawie standardem u odmian pomidora jest odporność na wirusa mozaiki pomidora, fuzaryjne więdnięcie pomidora (2 rasy *Fol*), wertycyliozę, brunatną plamistość liści (5 ras). Dość powszechna jest również odporność na fuzariozę zgorzelową (*Forl*), szarą plamistość liści (*Stemphylium* spp.) i nicienie (*Meloidogyne* spp.), natomiast dość rzadka – na korkowatość korzeni pomidora. Dostępne są również odmiany odporne na wirusa brązowej plamistości liści pomidora (TSWV) i żółtej kędzierzawki liści pomidora (TYLCV). Większość odmian ogórków szklarniowych posiada odporność na parcha dyniowatych. Dostępne są również odmiany odporne lub tolerancyjne na korynesporozę dyniowatych, mączniaka prawdziwego i rzekomego ogórka. Są także odmiany tolerancyjne na wirusa mozaiki ogórka (CMV) i żółtej mozaiki cukinii (ZYMV). Do uprawy sałaty pod osłonami należy wybierać odmiany o odporności na jak największą liczbę ras *Bremia lactucae* – sprawcę mączniaka rzekomego sałaty. Przy uprawie oberżyny i papryki należy pamiętać, że dotychczas nie są dostępne odmiany odporne na wertycyliozę, chorobę szczególnie groźną dla tych

roślin, a szczepienie traktowane jest jako jedyny sposób walki z tą chorobą (Bogescu i in. 2014, Gilardi i in. 2014). Trzeba jednak zaznaczyć, że odporność zazwyczaj warunkowana jest jednym genem, co może prowadzić do powstawania nowych ras patogenów. W pewnych warunkach środowiska może również dojść do przełamania odporności. Niejednokrotnie cechy użytkowe odpornych odmian pomidorów są gorsze niż odmian podatnych. Stąd też, w celu przezwyciężenia tego problemu, wartościowe odmiany wrażliwe szczepione są na podkładkach odpornych. Fitosanitarne i gospodarcze znaczenie szczepienia jest największe w przypadku uprawy ogórków i oberżyny.

2.2. METODY FIZYCZNE

Z metod fizycznych najbardziej znane jest termiczne odkażanie ziemi polegające na ogrzewaniu gleby lub różnych substratów za pomocą nasyconej lub przegrzanej pary wodnej, mieszaniny parowo-powietrznej, prądu elektrycznego lub tzw. pasteryzatora płomieniowego.

Parowanie gleby

Istnieje szereg metod i systemów parowania gleby, różniących się energochłonnością, pracochłonnością, wydajnością, czyli czasem koniecznym do odkażenia jednostki powierzchni oraz efektywną głębokością odkażania gleby. Tradycyjnie podłoże ogrzewano do temperatury 90–95°C w celu osiągnięcia efektu zbliżonego do sterylizacji. Jednakże takie parowanie już od dawna traktowane jest jako zbyt drastyczna ingerencja w biocenozę gleby. Z ekologicznego punktu widzenia korzystniejsza jest pasteryzacja gleby polegająca na ogrzaniu ziemi do temperatury 70–72°C i utrzymaniu jej przez 30 minut, co jest najczęściej wystarczające do zwalczenia większości patogenów. Najlepsze wykorzystanie pary (około 80%) jest w przypadku parowania ziemi w pojemnikach; sprawność parowania wgłębnego (np. grzebień parowy, perforowane rury zakopane na stałe w ziemi) wynosi 40–62%, a sprawność parowania powierzchniowego (pod folią termoodporną) od 25 do 40%. W Holandii stosowane jest parowanie gleby pod zmniejszonym ciśnieniem. Przy tym systemie para jest wprowadzana pod termoodporną powłokę i wciągana do gleby w wyniku podciśnienia wytworzonego w glebie przez wentylator, który wysysa powietrze z gleby poprzez zakopane na głębokości 55–60 cm perforowane rury polipropylenowe. Ta metoda parowania jest bardziej ekonomiczna w porównaniu z innymi metodami, bowiem wymaga dostarczenia około 115 000 $kJ \cdot m^{-2}$, podczas gdy nakład energetyczny przy tradycyjnym parowaniu wgłębnym wynosi przeciętnie 170 000 kJ, a przy parowaniu powierzchniowym dochodzi nawet do 200 000 $kJ \cdot m^{-2}$ (Runia 2000).

Aktywne parowanie gleby

Ten system parowania gleby został opracowany we Włoszech, na Uniwersytecie w Pizzie na początku tego wieku (Peruzzi i in. 2011). System polega na wprowadzeniu w trakcie parowania gleby substancji (tlenek wapnia CaO lub wodorotlenek potasu KOH), która, łącząc się z parą wodną, wywołuje reakcję egzotermiczną, produkując dodatkowe ilości energii cieplnej, zgodnie z poniższymi równaniami:

$$CaO + H_2O \leftrightarrows Ca(OH)_2 \quad (\Delta H_r = -63{,}7\ kJ \cdot mol^{-1}\ CaO)$$

$$KOH \leftrightarrows K^+ + OH^- \quad (\Delta H_r = -57{,}6\ kJ \cdot mol^{-1}\ KOH)$$

Dodatkowe ciepło uzyskane z reakcji egzotermicznej zostaje uwolnione do gleby, dzięki czemu maksymalna temperatura uzyskana w glebie po zabiegu jest wyższa, niż po zastosowaniu samej pary wodnej. Przeprowadzone w Polsce próby parowania gleby tym systemem nie przyniosły oczekiwanej efektywności tego zabiegu.

Solaryzacja gleby

Z innych stosowanych w praktyce fizycznych metod walki z agrofagami glebowymi należy wymienić solaryzację gleby polegającą na wykorzystaniu promieniowania słonecznego do ogrzewania gleby przykrytej przez kilka tygodni przezroczystą folią (Katan i DeVay 1991). Metoda ta stosowana jest dość powszechnie w okresie lata w krajach o ciepłym klimacie (np. w basenie Morza Śródziemnego). Z badań przeprowadzonych w Izraelu wynika, że wysoka skuteczność solaryzacji uzyskiwana jest wtedy, gdy gleba na głębokości 10, 15, 20 i 30 cm osiąga temperaturę odpowiednio: 47, 45, 43 i 39°C.

Promieniowanie mikrofalowe

Wprawdzie możliwość wykorzystania promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2450 MHz do zwalczania patogenów glebowych i chwastów znana jest od wielu lat, lecz metoda ta nie znalazła zastosowania w praktyce rolniczej.

Kilka natomiast metod fizycznych znalazło zastosowanie w recyrkulacyjnych (zamkniętych) systemach hydroponicznych do eliminacji chorobotwórczych mikroorganizmów z pożywki (Runia 1995).

Dezynfekcja termiczna

Dezynfekcja termiczna pożywek hydroponicznych polega na krótkotrwałym ogrzewaniu pożywki (10–30 sekund) powracającej z systemu uprawy w specjalnych wymiennikach ciepła do temperatury 95°C, a następnie jej schłodzeniu i przepompowaniu do oddzielnego zbiornika.

Promieniowanie UV

Skuteczną i ekonomiczną metodą odkażania recyrkulowanej pożywki hydroponicznej jest stosowanie promieni ultrafioletowych (UV) o długości fali 254 nm. Pożywka przeznaczona do dezynfekcji wprowadzana jest do cylindra (modułu) dezynfekcyjnego i przepływa między stalową ścianą cylindra a znajdującą się w środku rurą ze szkła kwarcowego, wewnątrz której umieszczona jest lampa UV o mocy 60–110 W. Do zabicia poszczególnych grup mikroorganizmów wymagane są dawki promieniowania UV od 40 do 250 $mJ \cdot m^{-2}$. W praktyce w celu eliminacji chorobotwórczych grzybów najczęściej stosowane są dawki rzędu 100–120 $mJ \cdot m^{-2}$ (Runia 1995).

Powolne filtrowanie przez piasek

Stosowanie w zamkniętych systemach hydroponicznych specjalnych filtrów piaskowych do powolnego przesączania pożywki skutecznie eliminuje większość patogenów stanowiących zagrożenie przy tym systemie uprawy (Wohanka 1995). Niemniej jednak w praktyce filtry piaskowe wykorzystywane są zazwyczaj do oczyszczania pożywki przed poddaniem jej odkażaniu wyżej wymienionymi metodami.

2.3. METODY CHEMICZNE

Fumigacja gleby

Chemiczne odkażanie gleby fumigantami, czyli środkami działającymi w fazie gazowej, jest skuteczną i ekonomicznie uzasadnioną metodą walki ze zmęczeniem gleby wywołanym czynnikami biotycznymi. Niewątpliwą zaletą fumigantów jest ich szerokie spektrum działania (grzybobójcze, nicieniobójcze, owadobójcze i chwastobójcze), co umożliwia jednoczesne zwalczanie różnych grup agrofagów glebowych. O zachowaniu się fumigantu w glebie decydują jego właściwości fizyczne, szczególnie:

- prężność par – wyrażana w mmHg lub kPa – im wyższa, tym większa lotność i szybsza dyfuzja;
- temperatura wrzenia – im niższa, tym szybsza dyfuzja w glebie i krótszy okres zalegania w podłożu w ilościach fitotoksycznych;
- stała Henry'ego – oznacza wagowy stosunek koncentracji fumigantu w wodzie glebowej do koncentracji w powietrzu glebowym. Im niższa wartość tego współczynnika (wyrażonego w formie bezwymiarowej), tym szybsza dyfuzja w glebie i krótszy okres trwania fitotoksycznego działania następczego. Wartość stałej Henry'ego wzrasta w niższych temperaturach;
- masa cząsteczkowa – szybkość dyfuzji gazu jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z jego gęstości, a jest proporcjonalna do masy cząsteczkowej.

Wadą tej grupy środków jest wysoka fitotoksyczność, co zmusza do stosowania ich na kilka tygodni przed siewem lub sadzeniem roślin. Po wycofaniu bromku metylu z powszechnego użycia, w Polsce aktualnie dostępne są dwa fumiganty metyloizotiocyjanianowe (MITC) do kompleksowej dezynfekcji gleby w polu i podłoża pod osłonami: Basamid w postaci mikrogranulatu oraz Nemasol 510 SL w postaci płynnej. Substancją aktywną pierwszego środka jest dazomet (2-tiono-3,5-dimetylotetrahydro-1,3,5-tiodazyna), a drugiego – metam sodowy (N-metyloditiokarbaminian sodu). W wyniku rozkładu tych związków w glebie powstaje ta sama substancja aktywna – lotny izotiocyjanian metylu (MITC). Charakterystyczną cechą fumigantów MITC jest stosunkowo długi okres fitoprewencji, czyli zalegania w podłożu produktów rozkładu tych środków w ilościach fitotoksycznych. Czas, jaki musi upłynąć od zastosowania dazometu lub metamu sodowego do siewu lub sadzenia roślin, zależy głównie od temperatury podłoża i jest tym dłuższy, im niższa jest temperatura podłoża. Gdy ziemia ma 20, 15, 10 lub 6°C, okres ten wynosi odpowiednio 14–17, 18–24, 25–35 i 40–50 dni. Należy jednak zaznaczyć, że biocydowa skuteczność fumigantów MITC bywa zmienna, gdyż ich działanie w bardzo dużym stopniu zależy od warunków środowiska glebowego (temperatury, wilgotności, pH, składu mechanicznego, zawartości substancji organicznej), przebiegu pogody oraz techniki wykonania zabiegu. Szczególnie duży wpływ na końcowy efekt fumigacji podłoża ma technika stosowania metamu sodowego.

Najważniejsze warunki stosowania fumigantów MITC są następujące:

- przeprowadzenie odkażania gleby należy wcześniej zaplanować;
- temperatura odkażanego podłoża 10–25°C (minimalna 6°C);
- na 10–14 dni przed zabiegiem glebę należy obficie nawodnić. Jest to warunek wstępny uzyskania wysokiej skuteczności biologicznej;
- w czasie stosowania wilgotność wierzchniej warstwy gleby (10–15 cm) powinna wynosić 50–65% polowej pojemności wodnej w przypadku metamu sodowego i 60–70% w przypadku dazometu;
- gleba musi być wolna od resztek roślinnych;
- na krótko przed i tuż po zabiegu nie stosować obornika i innych materiałów organicznych oraz wapna palonego i azotniaku;
- standardowa głębokość wprowadzenia środka powinna wynosić 20 cm, a 30 cm w przypadku grzybów powodujących uwiądy i gnicie korzeni;
- należy zapewnić równomierną dystrybucję preparatu w odkażanej warstwie podłoża;
- w uprawach polowych najodpowiedniejszym terminem wykonania odkażania jest wczesna jesień – do połowy października;
- równomierne wymieszanie dazometu z glebą zapewnia użycie rotacyjnej łopaty mechanicznej z obrotową broną sprężynową lub glebogryzarki o L lub C-kształtnych zębach przy 200–240 obrotach noży na minutę;

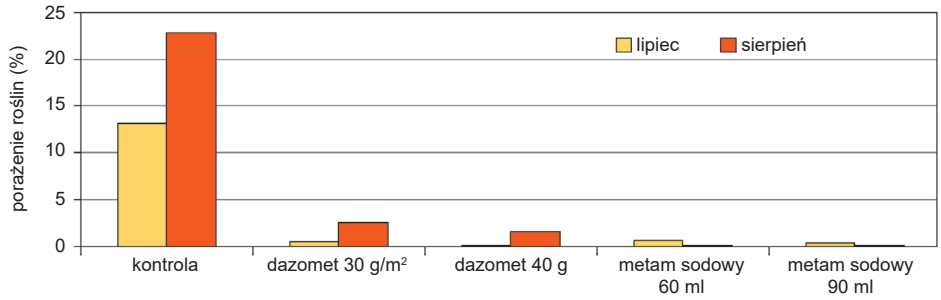
- odkażanie gleby metamem sodowym mogą wykonywać jedynie przeszkolone ekipy fumigacyjne (fot. 7–9);
- po zastosowaniu fumigantów MITC należy zabezpieczyć powierzchnię gleby przed zbyt szybkim ulatnianiem się gazów poprzez: wałowanie gładkim wałem lub włókowanie, umiarkowane deszczowanie lub najlepiej przykrycie folią i pozostawienie przez 5–20 dni w tym stanie (okres ekspozycji) do czasu pierwszego przewietrzania, czyli spulchniania gleby.

Fumigacja gleby w wystarczającym stopniu łagodzi skutki zmęczenia gleby wywołanego czynnikami biotycznymi, co ilustruje rysunek 1.

Fot. 7. Kompaktowy inżektor rotacyjny do pracy na małych polach (fot. C. Ślusarski)

Fot. 8. Aplikator do metamu sodowego typu Forigo (fot. C. Ślusarski)

Fot. 9. Wysokowydajny inżektor rotacyjny o szer. roboczej 3 m (fot. C. Ślusarski)



Rys. 1. Porażenie roślin truskawki przez *V. dahliae* w lipcu i sierpniu 2011 r. na poletkach odkażanych i nieodkażanych – kontrolnych (opracowanie własne)

Wyniki badań prowadzonych w byłym Instytucie Warzywnictwa w Skierniewicach (obecnie Instytut Ogrodnictwa) wskazują, że łączenie chemicznej dezynfekcji gleby z innymi metodami walki z patogenami glebowymi, np. metodą genetyczną, biologiczną, biotechniczną bądź agrotechniczną, jest w pełni uzasadnione zarówno z punktu widzenia skuteczności zwalczania określonej choroby, jak i poziomu plonu lub jego jakości. W doświadczeniach prowadzonych w warunkach silnego zakażenia gleby grzybem *Pyrenochaeta lycopersici* wykazano, że również odmiany pomidora szklarniowego odporne na *P. lycopersici* korzystnie reagowały na fumigację gleby wykonywaną w celu zwalczenia tego grzyba. Celowe okazało się także łączenie odkażania gleby ze szczepieniem pomidorów i oberżyny na podkładkach odpornych.

Plony uzyskiwane w kombinacjach obejmujących oba zabiegi były istotnie wyższe niż w wariantach uwzględniających samo szczepienie lub samo odkażanie. Szczególnie korzystnie na integrację tych metod reagowała oberżyna. Traktowanie odkażonej gleby biopreparatami zawierającymi antagonistyczne grzyby *Trichoderma* spp. lub *Fusarium oxysporum* 047 istotnie poprawiało skuteczność fumigacji gleby w zwalczaniu korkowatości korzeni pomidora. W trzyletnich doświadczeniach demonstracyjnych wykazano, że odkażanie ziemi dazometem w połączeniu ze stosowaniem grzyba *Trichoderma asperellum* B35 (Vital Plus) w czasie produkcji rozsady korzystniej wpływało na plon papryki uprawianej w tunelach foliowych niż użycie samego dazometu (Ślusarski i Pietr 2009). Również w polowej uprawie kapusty, pomidora i selera traktowanie rozsady tych warzyw grzybem *T. asperellum* zwiększało efektywność odkażania gleby dazometem (Ślusarski i Pietr 2003).

Stosowanie fumigantów poprzez system nawadniania kropelkowego

„Fumigacja kropelkowa", czyli stosowanie płynnych fumigantów gleby poprzez systemy nawadniania kroplowego (tzw. chemigacja) jest stosunkowo nowym sposobem chemicznego odkażania gleby. Spośród znanych płynnych fumigantów, takich jak np. 1,3-dichloropropen, chloropikryna, disiarczek dimetylu czy metam sodowy,

tylko ten ostatni środek (Nemasol 510 SL) jest całkowicie rozpuszczalny wodzie i może być bez ograniczeń mieszany z wodą oraz aplikowany przez systemy nawadniające na glebę uprzednio przykrytą folią – najlepiej gazoszczelną typu VIF (fot. 10). Pozostałe wymienione fumiganty wykazują bardzo słabą rozpuszczalność w wodzie. Aby 1,3-dichloropropen, chloropikryna, disiarczek dimetylu mogły być stosowane przez deszczownie kropelkowe, muszą być dostępne w postaci koncentratu do sporządzania emulsji wodnej (formulacja EC) i zawierać pewną ilość specjalnych emulgatorów (zwykle 4–6%) umożliwiających mieszalność z wodą. Stosowanie fumigantów poprzez deszczownie kropelkowe wykazuje szereg zalet w porównaniu z metodą inżekcji (wstrzykiwania do gleby nierozcieńczonego fumigantu przy użyciu specjalnego aplikatora ciągnikowego), a mianowicie: bardziej równomierną dystrybucję środka w glebie, ograniczone ulatnianie się do atmosfery par środka chemicznego, możliwość użycia niższych dawek dezynfektanta, ograniczone ryzyko ekspozycji wykonujących zabieg na lotne produkty rozkładu środka oraz niższy koszt zabiegu (Ajwa i Trout 2004).

Fot. 10. Stosowanie metamu sodowego poprzez system nawadniania kroplowego (fot. C. Ślusarski)

Analiza wyników szeregu prac dotyczących wpływu ilości wody na dystrybucję fumigantów w glebie wskazuje, że ilość wody użytej w procesie chemigacji powinna wynosić ponad 35 mm, a nawet do 50 mm (Ajwa i Trout 2004, Chellemi i in. 2011), aby osiągnąć głęboką penetrację fumigantu i dobre zwalczenie agrofagów glebowych. Niemniej jednak badania własne nad efektywnością chloropikryny stosowanej poprzez nawadnianie kroplowe w uprawie papryki (Ślusarski i Spotti 2016) wykazały, że ilość użytej wody (25 lub 33 $l \cdot m^{-2}$) nie miała istotnego wpływu na skuteczność tego zabiegu. Koncentracja fumigantu w wodzie do podlewania powinna mieścić się w granicach 350–2000 $mg \cdot l^{-1}$. Należy zaznaczyć, że w uprawach pod osłonami metam sodowy może być stosowany wyłącznie metodą chemigacji.

Sekwencyjne stosowanie fumigantów

Sekwencyjne stosowanie fumigantów jest kolejnym sposobem zwiększania skuteczności fumigacji gleby. Polega to na łącznym wprowadzaniu do gleby dwóch fumigantów o różnym zakresie skuteczności zwalczania poszczególnych grup agrofagów i wystąpieniu synergistycznego działania między tymi substancjami prowadzącego do polepszenia bicydowego efektu zabiegu. Aby uzyskać poprawę skuteczności zabiegu, konieczna jest dobra znajomość zgodności chemicznej łącznie stosowanych fumigantów. Od dawna wiadomo, że znane chlorowcowane fumiganty, jak 1,3-dichloropropen (1,3-D), chloropikryna (Pic), bromek metylu, jodek metylu i bromek propargylu wykazują chemiczną niezgodność z metamem sodowym wprowadzonym do gleby w krótkim odstępie czasu po zastosowaniu jednej z tych substancji. Wykazano, że łączne stosowanie 1,3-D + Pic z metamem sodowym skutkowało całkowitym zanikiem wprowadzonej chloropikryny i 20–38% 1,3-D w ciągu 8 godzin i brakiem skuteczności (Guo i in. 2005). W Belgii wykazano, że łączenie dazometu z 1,3-dichloropropenem lub disiarczkiem dimetylu (DMDS) powodowało synergistyczne działanie w zwalczaniu *Rhizoctonia solani*, *Sclerotinia minor* i *S. sclerotiorum* na sałacie. Jednak łączne stosowanie fumigantów nie wydaje się być optymalnym sposobem odkażania gleby zarówno pod względem ekonomicznym, jak i nadmiernej chemizacji środowiska glebowego.

Przyspieszony rozkład MITC w glebie

Wielokrotne odkażanie tej samej gleby środkami generującymi MITC może doprowadzić do zbyt szybkiego rozkładu w glebie tej biologicznie aktywnej substancji. Efektem tego może być istotne ograniczenie lub nawet brak biocydowego działania MITC. Powtarzające się stosowanie dazometu lub metamu sodowego powoduje, zależnie od typu gleby, skrócenie okresu połowicznego rozkładu MITC od 5 do 30 godzin i szybkie ulatnianie się z gleby gazowych produktów degradacji tej substancji, zwłaszcza w wyższych temperaturach (Di Primo i in. 2003). Wykazano, że redukcja skuteczności MITC wiąże się z szybkim mikrobiologicznym rozkładem, wynikającym z nagromadzenia się populacji bakterii glebowych zdolnych do przeżycia zabiegu fumigacji, a następnie rozkładających te fumiganty. Właściwości te przypisywane są bakteriom z rodziny *Oxalobacteraceae* i bakteriom mającym zdolność do rozkładu wiązania rodankowego (N=C=S) obecnego w cząsteczce MITC. Zjawisko to może mieć poważne konsekwencje praktyczne, zwłaszcza w tych krajach UE, w których dopuszczone są tylko fumiganty generujące MITC i nie ma możliwości zamiennego stosowania fumigantów o innym składzie chemicznym. Sygnały od praktyków systematycznie stosujących, np. Basamid, donoszące o zmniejszającej się efektywności zwalczania werticyliozy i fytoftorozy w uprawach papryki pod osłonami, wydają się sugerować, że zjawisko przyspieszonego rozkładu MITC występuje już w Polsce.

Fitotoksyczne działanie następcze po odkażeniu generatorami MITC

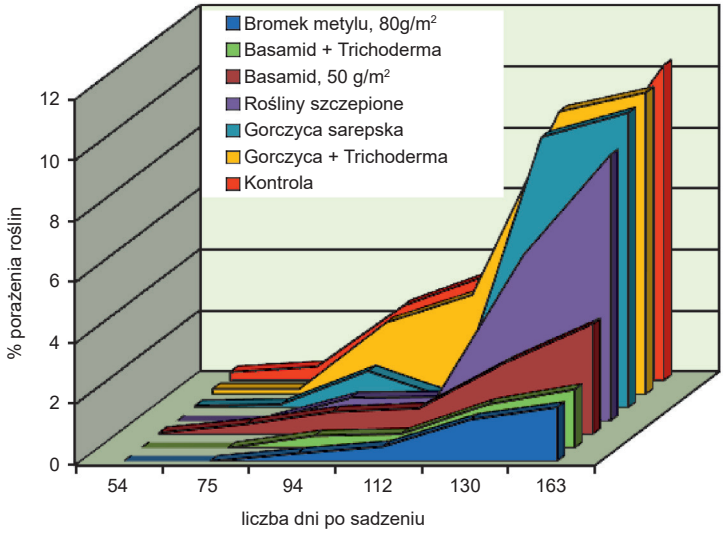
Fitotoksyczność MITC może wystąpić w dwóch przypadkach: zbyt wczesnego wysiewu nasion lub sadzenia roślin do odkażonej gleby bez upewnienia się, czy gazowe produkty rozkładu metamu sodowego lub dazometu ulotniły się już z gleby lub uszkodzenia roślin na polu sąsiadującym z odkażaną glebą, z której nastąpiło niekontrolowane ulatnianie się gazowego MITC. Ten drugi przypadek obserwowany jest dość rzadko i jest trudny do przewidzenia. Może to być wynikiem współdziałania między przebiegiem pogody (temperatura powietrza i gleby, siła i kierunek wiatru), właściwościami fizycznymi MITC i techniką wykonania zabiegu (Buzzo 2003). Autorowi znane są dwa przypadki uszkodzenia młodych roślin truskawek rosnących w odległości około 15–40 m od brzegu pola odkażanego metamem sodowym oraz jeden przypadek uszkodzenia liści u dwóch z czterech odmian sadzonek czarnej porzeczki, nawet w odległości do 110 m od brzegu odkażanego pola o powierzchni 2 ha. Również Buzzo (2003) donosi o uszkodzeniach sadzonek sosny (*Pinus banksiana*) w odległości 120 m od brzegu pola traktowanego metamem sodowym. Przypadki te oraz inne opisane w literaturze wskazują na konieczność ustanowienia odpowiednio dużych stref ochronnych przy wykonywaniu odkażania pól fumigantami na bazie izotiocyjanianu metylu.

Okazuje się, że pary MITC są bardzo silnie fitotoksyczne i powodują uszkodzenia wrażliwych roślin już w stężeniu kilku ppb (części na miliard), a więc znacznie poniżej progu wyczuwalności, który zależnie od wrażliwości oceniającego osobnika leży w granicach od 0,2 do 8,0 ppm (części na milion). Stąd też wykonujący zabieg nie jest w stanie rozpoznać czyhającego zagrożenia. Wykazano, że inżekcja metamu sodowego połączona z wałowaniem wierzchniej warstwy gleby redukowała ulatnianie się MITC do około 2% zastosowanej dawki. Juzwik (2008) wykazała, że po zastosowaniu metamu sodowego w dawce 700 $l \cdot ha^{-1}$, poprzez opryskiwanie powierzchni gleby i natychmiastowe wymieszanie glebogryzarką, straty MITC do atmosfery w ciągu 14 dni po zabiegu nie przekraczały 3% zastosowanej dawki zarówno w przypadku przykrycia gleby folią, jak i wałowania gleby w połączeniu z deszczowaniem po zabiegu. Podobne wyniki uzyskali Wang i in. (2005), stosując metam sodowy w dawce 686 $l \cdot ha^{-1}$. W przypadku braku zabezpieczania powierzchni gleby przed ulatnianiem się lotnych produktów rozkładu metamu sodowego (wałowanie lub deszczowanie) emisja MITC do atmosfery może dochodzić do 38% zastosowanej dawki.

2.4. METODY BIOLOGICZNE

Metody biologicznej ochrony roślin przed chorobami obejmują introdukcję antagonistycznych mikroorganizmów do systemu uprawy lub stosowanie wyciągów roślinnych bądź innych produktów naturalnych (np. chitozan). Panuje zgodna opinia, że możliwości biologicznego zwalczania patogenów przy użyciu biopropara-

tów zawierających antagonistyczne grzyby lub bakterie są zdecydowanie większe w uprawach pod osłonami niż w polowych (Paulitz i Belanger 2001). W doświadczeniach prowadzonych w byłym Instytucie Warzywnictwa w Skierniewicach uzyskano dość dobrą skuteczność biopreparatów na bazie *Trichoderma asperellum* B35 (Vital Plus), *Pythium oligandrum* (Polyversum) oraz *Streptomyces griseoviridis* (Mycostop) w zwalczaniu patogenów glebowych na ogórkach i pomidorach szklarniowych, uprawianych w wełnie mineralnej. Okazało się również, że w warunkach produkcyjnych zabiegi niechemiczne (szczepienie na podkładce, stosowanie samej gorczycy sarepskiej lub w połączeniu z użyciem grzyba *Trichoderma*) okazały się mało skuteczne w ograniczaniu wertycyliozy papryki (rys. 2).



Rys. 2. Wpływ chemicznych i niechemicznych zabiegów fitosanitarnych na porażenie papryki w tunelach foliowych przez *Verticillium dahliae* (opracowanie własne)

Głównymi czynnikami ograniczającymi szerokie stosowanie środków biologicznej ochrony roślin są: ich umiarkowana skuteczność, duża zależność organizmów antagonistycznych od warunków środowiska i związana z tym zmienność działania ochronnego oraz oddziaływanie na jednego lub najwyżej kilka patogenów. Ponadto w krajach UE istotnym czynnikiem ograniczającym jest konieczność stosowania takiej samej procedury rejestracyjnej dla środków biologicznych jak dla pestycydów. Sytuacja ta powoduje, że niewielkie firmy biotechnologiczne zaangażowane w tworzenie nowych biopreparatów nie są w stanie udźwignąć bardzo wysokich opłat rejestracyjnych. Antagonistyczne mikroorganizmy są bardzo wartościowym elementem integrowanego zwalczania chorób roślin w uprawach pod osłonami i polowych. Wyniki wielu doświadczeń jednoznacznie wskazują, że wprowadzanie organizmów antagonistycznych do podłoża poddanego uprzednio chemicznej lub termicznej

dezynfekcji jest w pełni uzasadnione, gdyż powoduje przedłużenie i zwiększenie ochronnego działania zabiegów dezynfekcyjnych. Próby biologicznego zwalczania patogenów glebowych poprzez introdukcję biopreparatów do nieodkażanych podłoży szklarniowych lub gleb w polu, a więc zasiedlonych przez liczne zespoły mikroorganizmów, zazwyczaj kończą się niepowodzeniem. Antagonista ma niewielkie szanse na skuteczne konkurowanie z rodzimymi drobnoustrojami już obecnymi w podłożu.

Spośród najważniejszych wad biologicznej walki z chorobami odglebowymi najczęściej wymieniane są następujące czynniki:

- wąskie spektrum działania;
- duża zależność od warunków środowiska;
- konieczność utrzymania odpowiedniej liczebności populacji wprowadzonego czynnika walki biologicznej może łączyć się z potrzebą powtórnej introdukcji w trakcie uprawy;
- może zachodzić potrzeba kontrolowania i regulowania pH, temperatury i wilgotności podłoża;
- w wielu krajach biologiczne środki ochrony roślin wymagają takiej samej procedury rejestracyjnej jak konwencjonalne pestycydy (Dyrektywa UE 91/414), co jest głównym czynnikiem ograniczającym szersze stosowanie walki biologicznej w praktyce.

3. PODSUMOWANIE

W intensywnej produkcji ogrodniczej, w gruncie i pod osłonami, patogeny glebowe w istotnym stopniu przyczyniają się do pogarszania zdrowotności roślin i redukcji plonów. Powyżej przedstawiono metody fizyczne, agrotechniczne, niechemiczne, chemiczne i biologiczne, umożliwiające hamowanie rozwoju oraz rozprzestrzeniania patogenów glebowych, przy czym metody fizyczne znajdują zastosowanie głównie w uprawach pod osłonami. W Polsce aktualnie dostępne są dwa fumiganty metyloizotiocyjanianowe (MITC) do kompleksowej dezynfekcji gleby w polu i pod osłonami: Basamid (dazomet) w postaci mikrogranulatu oraz Nemasol 510 SL (metam sodowy) w postaci płynnej. Nadmieniono, że wielokrotne odkażanie tej samej gleby środkami generującymi MITC może doprowadzić do szybkiego, mikrobiologicznego rozkładu w glebie tej aktywnej substancji, efektem czego może być istotne ograniczenie lub nawet brak biocydowego działania MITC. Sygnały od praktyków o zmniejszającej się efektywności zwalczania Basamidem wertycyliozy i fytoftorozy w uprawach papryki pod osłonami sugerują, że zjawisko przyspieszonego rozkładu MITC występuje już w Polsce. Istotny wpływ na skuteczność fumigacji gleby ma technika wykonania zabiegu. Stosowanie płynnych fumigantów poprzez deszczownie kropelkowe – obowiązkowe pod osłonami – wykazuje szereg zalet w porówna-

niu z metodą inżekcji, czyli wstrzykiwania do gleby nierozcieńczonego fumigantu przy użyciu specjalnego aplikatora. Podkreślono, że pary MITC odznaczające się dużą lotnością są bardzo silnie fitotoksyczne i powodują uszkodzenia wrażliwych roślin już w stężeniu kilku ppb (części na miliard), a więc znacznie poniżej progu wyczuwalności, który zależnie od wrażliwości oceniającego osobnika leży w granicach od 0,2 do 8,0 ppm (części na milion). Objawy uszkodzenia roślin obserwowano nawet w odległości 110–120 m od brzegu fumigowanego pola. Świadczy to o konieczności odpowiedzialnego przeprowadzania zabiegu fumigacji. Wyniki badań prowadzonych w byłym Instytucie Warzywnictwa w Skierniewicach wskazują, że integracja chemicznej dezynfekcji gleby z innymi metodami walki z patogenami glebowymi, np. metodą genetyczną, biologiczną, biotechniczną bądź agrotechniczną, jest w pełni uzasadniona.

Literatura

1. Ajwa H.A., Trout T.: Drip application of alternative fumigants to methyl bromide for strawberry production. HortScience, 2004, **39**: 1707-1715.
2. Bogescu M., Doltu M., Sora D.: Prevention and control of soilborne diseases an nematodes in eggplant crop by grafting plants combined with soil fumigation. Acta Hortic., 2014, **1044**: 331-336.
3. Buzzo R.J.: Phytotoxicity with metam sodium. W: National proceedings: forest and conservation nursery associations – 2002, L.E. Riley, R.K. Dumroese, T.D. Landis (technical coordinators). Ogden, UT:USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Proceedings RMRS, 2003, P-**28**: 79-83.
4. Chellemi D.O., Ajwa H.A., Sullivan D.A., Alessandro R., Gilreath J.P., Yates S.R.: Soil fate of agricultural fumigants in raised-bed, plasticulture systemsin the southeastern United States. J. Environ. Qual., 2011, **40**: 1-11.
5. Di Primo P., Gamliel A., Austerwile M., Steiner B., Beniches M., Peretz-Alon I., Katan J.: Accelerated degradation of metam-sodium and dazomet in soil: characterization and consequences for pathogen control. Crop Prot., 2003, **22**: 635-646.
6. Dyrektywa UE 91/414. Zastąpiona przez: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1107/2009 z dnia 21 października 2009 r. dotyczące wprowadzania do obrotu środków ochrony roślin i uchylające dyrektywy Rady 79/117/EWG i 91/414/EWG, s. 76.
7. Gilardi G., Demarchi S., Maranto G., Gullino M.L., Galibardi A.: Success and failures of grafting pepper against soil-borne pathogens. Acta Hortic., 2014, **1044**: 67-71.
8. Gillespie D.R., Menzies J.G.: Fungus gnats vector *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici.* Ann. Appl. Biol., 1993, **123**: 539-544.
9. Gilligan C.: Modeling of soilborne pathogens. Ann. Rev. Phytopathol., 2003, **21**: 45-64.
10. Guo M., Yates S. R., Papiernik S.K., Zheng W.: Incompatibility of metam sodium with halogenated fumigants. Pest Manag. Sci., 2005, **61**: 467-476.
11. Juzwik J.: Methyl isothiocyanate and chloropicrin concentrations in bareroot forest nursery soils and above soil surface treatment following fumigation. USDA Forest Service Proceedings, 2008, RMRS-P-**57**: 38-45.

12. Katan J., DeVay J.E.: Soil solarization. CRC Press, Boca Raton, FL, 1991.
13. Lee Y.S., Lee M.W.: Ecology of soil-borne pathogens in crop fields. In: Modern trends in applied terrestrial ecology, R.S. Ambasht, N.K. Ambasht (eds). Springer, Boston, MA, 2002, pp. 51-68.
14. Paulitz T.C., Belanger R.R.: Biological control in greenhouse systems. Annu. Rev. Phytopathol., 2001, **39**: 103-133.
15. Peruzzi A., Raffaelli M., Ginanni M., Fontanelli M., Frasconi C.: An innovative self-propelled machine for soil disinfection using steam and chemicals in an exothermic reaction. Biosystems Engineering, 2011, **110**: 434-442.
16. Radojević N., Kostadinović D., Vlajković H., Veg E.: Microclimate control in greenhouses. FME Transactions, 2014, **42**: 167-171.
17. Runia W.T.: A review of possibilities for disinfection of recirculation water from soilless cultures. Acta Hortic.,1995, **382**: 221-229.
18. Runia W.T.: Steaming methods for soils and substrates. Acta Hortic., 2000, **532**: 15-123.
19. Ślusarski C.: Alternatives for the replacement of methyl bromide as a soil fumigant in Poland. In: Alternatives to replace methyl bromide for soil-borne pest control in East and Central Europe, R. Labrada (red.). FAO-UNEP, Rome, 2008, pp. 59-94.
20. Ślusarski C., Pietr S.J.: Validation of chemical and non-chemical treatments as methyl bromide replacements in field grown cabbage, celeriac and tomato. Veg. Crops Res. Bul., 2003, **58**: 113-126.
21. Ślusarski C., Pietr S.J.: Combined application of dazomet and *Trichoderma asperellum* as an efficient alternative to methyl bromide in controlling the soil-borne disease complex of bell pepper. Crop Prot., 2009, **28**: 668-674.
22. Ślusarski C., Spotti C.: Efficacy of chloropicrin application by drip irrigation in controlling the soil-borne diseases of greenhouse pepper on commercial farms in Poland. Crop Prot., 2016, **89:** 216-222.
23. Termorshuizen A.J., Jeger M.J.: Assessing inoculum of soilborne plant pathogens: Theory and practice in decision-making for soil disinfestation. Acta Hortic., 2014, **1044**: 75-80.
24. Wang D., Juzwik J., Fraedrich S.W., Spokas K., Zhang Y., Koskinen W.C.: Atmospheric emissions of methyl isothiocyanate and chloropicrin following soil fumigation and surface containment treatment in bare-root forest nurseries. Can. J. For. Res., 2005, **35**: 1202-1212.
25. Wohanka W.: Disinfection of recirculating nutrient solution by slow sand filtration. Acta Hortic., 1995, **382**: 246-255.

VI JAK PRZYWRACAĆ ŻYZNOŚĆ GLEB?

Wojciech Stępień

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Zakład Chemii Rolniczej
ul. Nowoursynowska 159
02-776 Warszawa
e-mail: wojciech_stepien@sggw.pl

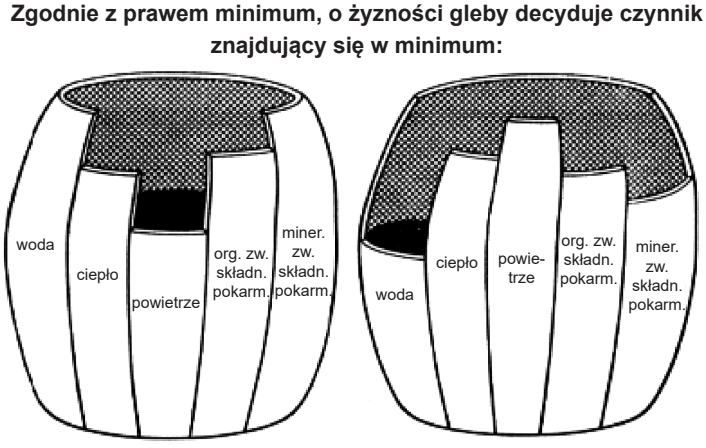
1. ŻYZNOŚĆ GLEB

Żyzność gleb można zdefiniować jako współudział gleby we wzroście, rozwoju i plonowaniu roślin, przejawiający się w zdolności gleby do przekazywania bytującym roślinom składników pokarmowych, wody, powietrza, energii na podstawie określonych właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych.

Ocena żyzności opiera się na określeniu reakcji roślin na warunki stwarzane przez glebę. Czynniki warunkujące żyzność gleb to (Grzebisz 2012):

- budowa morfologiczna – właściwości morfologiczne profilu glebowego, miąższość gleby i poziomu próchnicznego;
- właściwości fizyczne – skład granulometryczny, struktura i tekstura, porowatość, układ porów, właściwości termiczne, wodne i powietrzne (woda i powietrze jako czynniki antagonistyczne);
- właściwości chemiczne i fizykochemiczne – zasobność w składniki pokarmowe, zawartość substancji toksycznych, pH, $CaCO_3$, skład kompleksu sorpcyjnego, właściwości sorpcyjne, buforowość;
- właściwości biochemiczne i biologiczne – zawartość substancji organicznej, zwłaszcza próchnicy, skład edafonu, aktywność biologiczna gleby, produkcja CO_2.

Wszystkie te składniki wzajemnie na siebie oddziałują, uzupełniają się i kompleksowo wpływają na stan żyzności gleby. O żyzności gleby decyduje czynnik znajdujący się w minimum, np. gleby wytworzone z iłów są mniej żyzne od gleb gliniastych lub pyłowych (pomimo większej zasobności w składniki pokarmowe) z uwagi na niekorzystne warunki wodno-powietrzne. Niedostatek powietrza jest tu czynnikiem występującym w minimum – czynnikiem hamującym (Kowaliński 1999) (rys.1).



Rys. 1. „Beczka Liebiga". Działanie będących w minimum czynników określających żyzność (po lewej stronie – gleba ciężka, po prawej – lekka) (Kowaliński 1999)

Podstawowym parametrem określanym przy ocenie żyzności gleby jest jej zasobność. Określa się ją jako sumaryczną zawartość w glebie składników pokarmowych roślin (mikro- i makroelementów), próchnicy i właściwości gleb wpływających na dostępność tych składników dla roślin. Na łatwość pobierania składników pokarmowych wpływają następujące właściwości gleb:

- skład granulometryczny;
- skład mineralny;
- zawartość substancji organicznej;
- odczyn;
- potencjał oksydoredukcyjny;
- właściwości sorpcyjne;
- zespoły organizmów glebowych.

Podstawowym zabiegiem poprawiającym zasobność gleb jest nawożenie. Celem nawożenia jest:

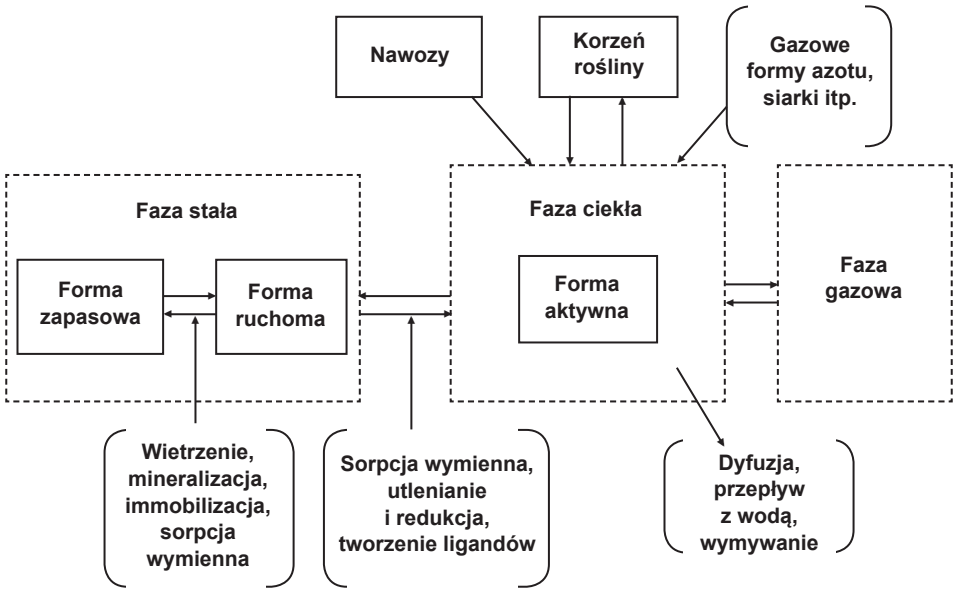
- zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe umożliwiające uzyskanie optymalnego poziomu plonowania przy wysokiej efektywności nawożenia, co gwarantuje opłacalność produkcji i dbałość o środowisko;
- zabezpieczenie optymalnego poziomu żyzności gleb;
- zabezpieczenie właściwej jakość produktów roślinnych (bezpieczeństwo żywności);
- zminimalizowanie strat składników nawozowych poza układ gleba–roślina, a tym samym ograniczenie ujemnego wpływu na środowisko.

Na rysunku 2 przedstawiono procesy przemian składników pokarmowych w glebie decydujące z jednej strony o wzroście ich dostępności dla roślin, z drugiej zaś o możliwości ich strat przez wymywanie. Rośliny pobierają składniki pokarmowe w formie jonowej, to znaczy z roztworu glebowego. Jeżeli składniki te nie zostaną pobrane, to w okresie jesienno-zimowym mogą ulec wymyciu, co przyczynia się do zanieczyszczenia wód powierzchniowych i głębinowych. Dlatego, zwiększając zasobność gleb, należy jednocześnie zwiększyć ich zdolność sorpcyjną, aby ograniczyć straty składników pokarmowych. Największy wpływ na zdolności sorpcyjne gleb ma optymalna zawartość próchnicy oraz optymalny odczyn gleby.

Podstawowe zasady, jakimi należy kierować się przy opracowywaniu planu nawożenia w rolnictwie zrównoważonym, aby poprawić (przywrócić) żyzność gleby, to:

1. Dążenie do maksymalnego wykorzystania składników pokarmowych ze wszystkich źródeł.
2. Utrzymanie żyzności gleby na optymalnym poziomie.
3. Zasada maksymalnego wykorzystania składników pokarmowych przez rośliny przy minimalnej emisji do środowiska.
4. Zasada przestrzegania wartości biologicznej plonu.

5. Stosowanie nawozów azotowych w dawkach podzielonych, dostosowanych do rytmu pobierania azotu przez uprawianą roślinę.
6. Stosowanie zrównoważonego nawożenia organicznego i mineralnego.



Rys. 2. Procesy decydujące o przyswajalności składników (opracowanie własne)

Przy ustaleniu poziomu nawożenia należy:
- wiedzieć, jaka jest zawartość przyswajalnych składników pokarmowych w glebie;
- wiedzieć, jak duży ma być plon rośliny uprawnej;
- uwzględnić pozostałości składników po przedplonie;
- zdecydować najpierw, na którym polu i w jakiej dawce zostanie zastosowane nawożenie organiczne.

Częstym błędem popełnianym przez rolników jest przywiązywanie mniejszej wagi do utrzymania przynajmniej średniej zasobności gleb w przyswajalne formy fosforu, potasu i magnezu, a skupianie się jedynie na nawożeniu azotem. Dlatego, aby zapewnić dobrą efektywność azotu, co zabezpiecza środowisko przed jego ujemnymi skutkami, bardzo ważne jest dostosowanie poziomu nawożenia P<K, Mg do stosowanych dawek azotu.

Podstawowym wskaźnikiem oceny jakości gleb jest zawartość próchnicy. Decyduje ona o właściwościach fizykochemicznych gleb, takich jak zdolności sorpcyjne i buforowe oraz o procesach przemian biologicznych ważnych z punktu widzenia funkcjonowania siedliska, a określanych mianem aktywności biologicznej (Gonet 2007).

Główne funkcje próchnicy to:
- udział w tworzeniu gleb i kształtowaniu ich właściwości;
- udział w obiegu biologicznym pierwiastków;
- dostarczanie pierwiastków biogennych dla roślin;
- dostarczanie energii i węgla dla drobnoustrojów glebowych;
- udział w procesie wymiany jonowej;
- oddziaływanie na wzrost i rozwój roślin.

Dodatkowymi funkcjami próchnicy są:
- wpływ na rozpuszczanie i migracje pierwiastków;
- regulacja buforowych właściwości gleb;
- działanie ochronne;
- regulacja potencjału redoks;
- wiązanie pestycydów itp.;
- hamowanie rozwoju niektórych patogenów glebowych.

Wysoka zawartość próchnicy w glebach jest czynnikiem stabilizującym ich strukturę, zmniejszającym podatność na zagęszczenie oraz degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej. Zachowanie zasobów próchnicy glebowej jest istotne nie tylko ze względu na utrzymanie produkcyjnych funkcji gleb, ale również z punktu widzenia roli gleb w sekwestracji (wiązaniu) dwutlenku węgla z atmosfery przyczyniającej się do zmniejszenia efektu cieplarnianego (Kuczuk 2017). Intensywne użytkowanie gleb w monokulturach niszczy strukturę gleb, prowadzi do nadmiernej aeracji siedlisk oraz mineralizacji próchnicy i uwalniania dużych ilości dwutlenku węgla do atmosfery. Ubytek próchnicy jest ważnym wskaźnikiem pogorszenia warunków siedliskowych oraz żyzności gleb. Intensywne użytkowanie gleb, w połączeniu z uproszczeniem płodozmianów oraz dominacją roślin zbożowych, może prowadzić do ograniczenia ilości resztek organicznych wchodzących w cykl przemian próchnicy, a w konsekwencji do spadku jej zawartości w glebach (Powlson i in. 2011). W ostatnich latach w niektórych regionach kraju obserwuje się wzrost powierzchni użytków rolnych wykorzystywanych przez gospodarstwa bezinwentarzowe, a więc pozbawionych dopływu nawozów naturalnych, które są istotnym elementem kształtowania zasobów próchnicy glebowej. Wyniki oznaczeń zasobności gleb użytków rolnych w Polsce (w warstwie 0–25 cm) wskazują na duże zróżnicowanie zawartości próchnicy (0,5–10%). Średnia zawartość wynosi 2,2%. Według podziału stosowanego w Polsce, gleby o niskiej zawartości próchnicy (<1,0%) stanowią około 6% powierzchni użytków rolnych, a o średniej (1,1–2,0%) – około 50%, natomiast zasobne w próchnicę (>2,0%) – około 33% powierzchni użytków rolnych kraju. W okresie ostatnich 20 lat na bilans glebowej materii organicznej ujemnie (niekorzystnie) wpłynęły:
- zmniejszenie udziału wieloletnich roślin pastewnych w strukturze zasiewów;
- duże zmniejszenie pogłowia i obsady zwierząt;
- postępująca specjalizacja gospodarstw i koncentracja produkcji zwierzęcej, wymuszone czynnikami ekonomicznymi.

Zalecenia i propozycje nowych rozwiązań w zakresie gospodarki glebową materią organiczną należy dostosowywać do realiów konkretnego gospodarstwa (przedsiębiorstwa) rolnego. Istotną rolę w kształtowaniu bilansu materii organicznej oprócz metod tradycyjnych (płodozmiany, poplony, wykorzystanie resztek pożniwnych) będą odgrywały alternatywne źródła w postaci różnego rodzaju odpadów.

Odpady są postrzegane jako atrybut współczesnej cywilizacji. Szacuje się, że w krajach wysoko rozwiniętych przy wzroście liczby ludności rocznie 1–2%, produkcja przemysłowa rośnie o 4–6% i w podobnym tempie zwiększa się ilość wytwarzanych w ciągu roku odpadów (Manczarski 2018). Z historycznego punktu widzenia na każdym etapie rozwoju cywilizacji poszukiwano nowych sposobów, aby powtórnie je wykorzystać. Spośród wielu kierunków przetwarzania odpadów szczególne miejsce mają technologie ukierunkowane na przyrodnicze ich wykorzystanie, głównie na cele nawozowe i poprawę właściwości gleb użytkowanych rolniczo (Bień i in. 2011). Przyrodnicze wykorzystanie odpadów jest ważnym elementem gospodarki obiegu zamkniętego.

W wyniku działalności człowieka zarówno tej związanej z jego bytowaniem, jak i z działalnością przemysłową oraz rolniczą powstaje wiele różnorodnych materiałów odpadowych. Odpady ze względu na możliwości ich wykorzystania dzielimy na odpady przejściowe – pozostałości poprodukcyjne, które mogą być ponownie użyte w danym lub innym obiegu produkcyjnym po nieznacznych procesach przetwórczych i odpady końcowe – nadające się tylko do unieszkodliwienia. Ze względu na pochodzenie odpady dzielimy na (Rosik-Dulewska 2008):

- odpady komunalne – pochodzące z gospodarstw domowych, ulic, placów, zakładów usługowych, rzemieślniczych;
- odpady przemysłowe – pochodzące z technologicznych procesów produkcyjnych wraz z odpadami bytowo gospodarczymi z terenu zakładów przemysłowych;
- rolnicze – pochodzące z zakładów rolniczych, szczególnie z dużych ferm hodowlanych.

Odpady przemysłowe związane są z działalnością różnych gałęzi przemysłu (górnictwo, hutnictwo, przemysł energetyczny, przemysł chemiczny, przemysł drzewny itp.). Do tej grupy odpadów zaliczyć można popioły ze spalania węgla, odpadowe frakcje węgla brunatnego, różne odpady o właściwościach odkwaszających itp. Odpady te ze względu na swoje właściwości mają zastosowanie głównie do poprawy właściwości fizycznych gleb uprawnych, a także do ich odkwaszania. Wśród odpadów przemysłowych do przyrodniczego wykorzystania nadają się głównie odpady przemysłu energetycznego, szczególnie popioły ze spalania węgla brunatnego, a także odpadowy miał z węgla brunatnego. Mają one znaczenie dla poprawy właściwości fizycznych gleb piaszczystych. Ważną grupę wśród odpadów przemysłowych stanowią odpady, które ze względu na obecność związków zasadowych ($CaCO_3$, $MgCO_3$, CaO, MgO itp.) wykorzystywane są do odkwaszania gleb nadmiernie zakwaszonych.

Odpady komunalne powstają na obszarach miast i wsi. Występują w postaci ciekłej i stałej. Związane są z bytowaniem ludzi, handlem, usługami itp. Przykładowo do grupy tej można zaliczyć takie odpady, jak: osady ściekowe z oczyszczalni ścieków, śmieci z miast i obszarów wiejskich, biomasę odpadową z terenów zielonych. Do grupy tej można także zaliczyć ścieki bytowo-gospodarcze. Odpady komunalne z uwagi na wysoką zawartość substancji organicznej (30–50%) i obecność składników nawozowych wykorzystywane są do wytwarzania kompostów, które po spełnieniu odpowiednich norm jakościowych mogą być wykorzystywane do rekultywacji gruntów zdegradowanych przez przemysł (gorszej jakości) oraz nawożenia użytków rolnych (lepszej jakości).

Odpady rolnicze nie były dotychczas traktowane jako odrębna grupa. Wzrost intensywności gospodarowania, nasilająca się specjalizacja produkcji rolniczej, powstanie przemysłowych ferm produkcji zwierzęcej, kombinatów szklarniowych, pieczarkarni czy biogazowni uzasadniają potrzebę wyodrębnienia odpadów rolniczych jako oddzielnej grupy wymagającej odpowiedniego uzdatnienia przed wykorzystaniem do celów nawozowych na użytkach rolnych.

Do celów nawozowych najlepiej nadają się odpady biodegradowalne (Aziz i in. 2018). Pod tym pojęciem rozumie się wszystkie odpady ulegające tlenowemu lub beztlenowemu rozkładowi. Do odpadów ulegających biodegradacji zalicza się głównie odpady komunalne i rolnicze oraz niektóre przemysłowe. Z odpadów biodegradowalnych obecnie największa ilość do zagospodarowania to osady ściekowe, odpady z przemysłu rolno-spożywczego, a także odpady rolnicze z dużych ferm oraz produkcji pieczarek.

2. KIERUNKI PRZETWARZANIA (UZDATNIANIA) ODPADÓW BIODEGRADOWALNYCH NA PRODUKTY NAWOZOWE

Odpady mogą być stosowane w rolnictwie bez wstępnego przygotowania, jeżeli spełniają wymogi jakościowe podawane w rozporządzeniach Ministra Środowiska, Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi oraz Ministra Gospodarki. Jeśli normy nie są spełnione, odpady powinny być poddane procesowi uzdatniania z wykorzystaniem różnych, mniej lub bardziej skomplikowanych technologii.

Współcześnie opracowano wiele innowacyjnych technologii i sposobów uzdatniania odpadów, umożliwiając w coraz doskonalszy sposób ich powtórne wykorzystanie jako surowca nadającego się do przetworzenia na produkt użyteczny. Sprzyja temu obecne ustawodawstwo, w świetle którego termin „odpad" ma w dużym stopniu charakter względny. Jeśli dla określonego odpadu opracuje się technologię lub sposób jego przetworzenia na produkty lub surowce użyteczne, wówczas przestaje on być odpadem. Spośród wielu kierunków przetwarzania odpadów szczególne miejsce mają technologie ukierunkowane na przyrodnicze ich wykorzystanie, głównie na cele nawozowe i poprawę właściwości gleb użytkowanych rolniczo (Bień i in.

2011). Głównymi celami uzdatniania (przetwarzania) odpadów w celu ich przyrodniczego zagospodarowania są:

- poprawa właściwości fizycznych;
- zmniejszenie uciążliwości odorowej;
- eliminacja zagrożeń higieniczno-sanitarnych.

Najczęściej obecnie stosowaną technologią przetwarzania i uzdatniania odpadów do celów nawozowych jest kompostowanie. Proces ten można przeprowadzić tradycyjnymi metodami w każdym gospodarstwie. Jednak coraz częściej jest on prowadzony z wykorzystaniem nowoczesnych technologii w specjalnie zbudowanych w tym celu zakładach przetwórczych (Jędrczak 2007, Pilarski i Pilarska 2009). W zakładach tych z materiałów odpadowych po procesie kompostowania produkuje się nawozy organiczne lub organiczno-mineralne, które po uzyskaniu zgody Ministerstwa Rolnictwa o Rozwoju Wsi są wprowadzane do obrotu handlowego.

Zalety kompostowania:

- jednoczesna utylizacja kilku odpadów organicznych;
- zapewnienie higienizacji odpadów pod względem sanitarno-epidemiologicznym;
- szacuje się, że w procesie kompostowania może zmniejszyć się ilość odpadów o 30–50%;
- technologie kompostowania są sprawdzone w skali technicznej, dostępne i stosunkowo łatwe oraz ekonomicznie uzasadnione w eksploatacji;
- pozyskiwanie pełnowartościowego nawozu o wartości nawozowej zbliżonej do obornika.

Przebieg procesu kompostowania w znacznym stopniu uzależniony jest od stosunku C:N w kompostowanych materiałach. Stosunek węgla do azotu powinien kształtować się na poziomie 25–40:1. Optymalny do kompostowania stosunek C:N w odpadach organicznych powinien wynosić 20–30:1. Gdy stosunek C:N w kompostowanych materiałach przekracza wartość 30:1, następuje opóźnienie procesów rozkładu. Przy stosunku C:N w odpadach mniejszym niż 20:1 obserwowane są starty azotu. Stosunek węgla do azotu w masie przeznaczonej do kompostowania można uregulować, mieszając ze sobą materiały o szerokim stosunku C:N (słoma, trociny, kora drzew itp.) z materiałami o wąskim stosunku C:N (fekalia, odchody zwierząt, pomiot ptasi, odpady z rzeźni itp.).

Struktura surowca przeznaczonego do kompostowania powinna zapewniać optymalne warunki do rozwoju mikroorganizmów tlenowych w całej kompostowanej masie. Składniki masy kompostowej powinny być rozdrobnione i dokładnie ze sobą wymieszane. Dokładne rozdrobnienie surowców przeznaczonych do kompostowania, głównie drewna i zdrewniałych części roślin, zapewnia zwiększenie podatności masy roślinnej na rozkład mikrobiologiczny, dokładne wymieszanie wszystkich kompostowanych składników, zwiększenie dostępności powietrza atmosferycznego do całej kompostowanej masy. Podczas całego procesu kompostowania powinna być utrzymywana optymalna zawartość wody w kompostowanej masie (50–60%), co

zapewnia odpowiednie napowietrzenie i wilgotność niezbędną do rozwoju mikroorganizmów tlenowych oraz prawidłowy wzrost i przebieg temperatury podczas kompostowania. Utrzymywanie optymalnej wilgotności masy kompostowej uzyskuje się dzięki uzupełnianiu niedoborów wody oraz mieszanie masy kompostowej. Przesuszenie jej spowalnia procesy biochemiczne oraz rozkład i humifikację związków organicznych. Nadmiar wody natomiast ogranicza dostęp tlenu do masy kompostowej i stwarza warunki do beztlenowego rozkładu substancji organicznych oraz utrudnia utrzymanie optymalnej temperatury. Napowietrzanie masy kompostowej jest niezbędne w procesie kompostowania niezależnie od zastosowanej technologii. Stosowane są różne sposoby mechanicznego napowietrzania masy kompostowej w bioreaktorach oraz różne technologie przekładania masy kompostowej w pryzmach. Temperatura w masie kompostowanej jest wynikiem przemian biochemicznych, jakim podlegają substancje organiczne. Przy zapewnieniu odpowiednich do kompostowania warunków (rozdrobnienie, wilgotność, napowietrzenie masy kompostowej), temperatura bardzo szybko osiąga wartość optymalną dla procesu kompostowania, tj. 60–75°C, która zapewnia zniszczenie bakterii chorobotwórczych i jaj pasożytów jelitowych.

W zależności od przyjętych kryteriów można zastosować wiele różnych sposobów kompostowania. Najczęściej wyróżniamy kompostowanie w systemie otwartym (w pryzmach lub brykietach) lub w systemie zamkniętym (bioreaktory) z przemieszczaniem kompostowanej biomasy (kompostowanie tunelowe, kontenerowe, bębnowe). Przykłady sposobów kompostowania przedstawiono na fotografiach 1–3.

Fot. 1. Napowietrzanie pryzmy z wykorzystaniem przerzucarki zaczepianej (fot. W. Stępień)

Fot. 2. Napowietrzanie pryzmy z wykorzystaniem samojezdnej przerzucarki do pryzm kompostowych (https://agrex-eco.pl/przerzucarka-do-pryzm/)

Fot. 3. Kompostowanie w pryzmach z wymuszanym napowietrzaniem (www.o2compost.com)

3. WYKORZYSTANIE ODPADÓW DO PRODUKCJI NAWOZÓW I POLEPSZACZY GLEBOWYCH DO NAWOŻENIA GLEB I ROŚLIN

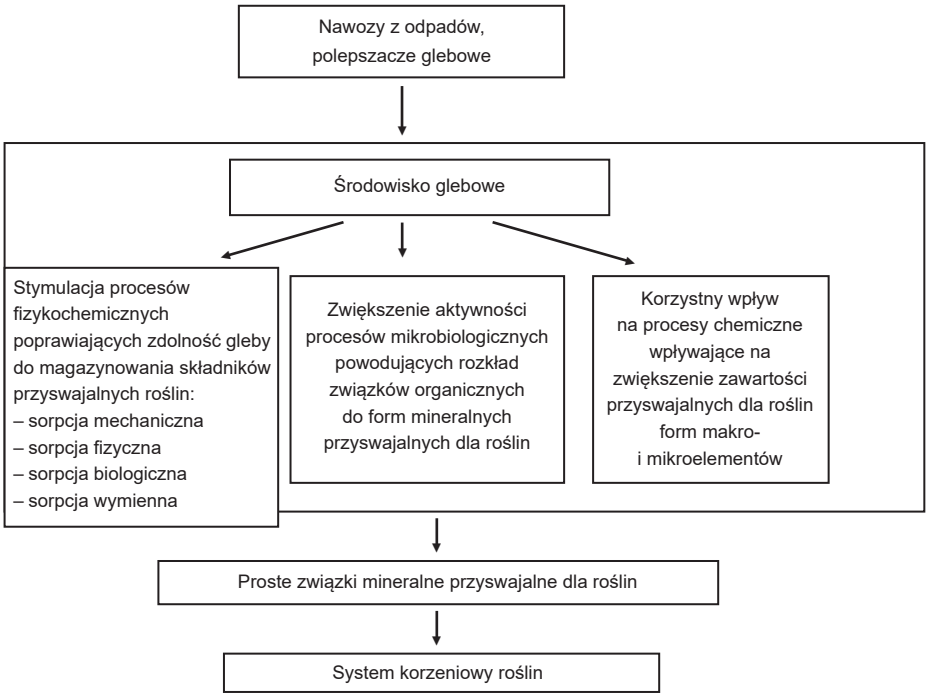
Przedstawiona wyżej charakterystyka różnych odpadów organicznych i nieorganicznych wskazuje, że ich bezpośrednie stosowanie do nawożenia może być kłopotliwe ze względu na ich właściwości fizyczne i chemiczne. Część odpadów jest zbyt mokra, inne są zbyt suche i pyliste. Zawartość materii organicznej oraz podstawowych składników pokarmowych jest zróżnicowana. Poza tym nawozy wytworzone z odpadów powinny mieć taką formę fizyczną, aby można je było równomiernie wysiać na glebę nowoczesnymi maszynami używanymi w rolnictwie. Dlatego, aby spełnić te wymogi, najczęściej tworzy się kompozycje nawozowe z wykorzystaniem kilku różnych odpadów o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych. Przy ustalaniu składu nawozów bierze się pod uwagę wymagania różnych gatunków roślin, pod które te nawozy mają być stosowane oraz właściwości gleb, inne nawozy proponuje się na gleby lekkie słabo próchniczne, a inne na gleby ciężkie. Inne pod rośliny sadownicze, pod zboża, a jeszcze inne pod rośliny okopowe. Oddzielną grupę stanowią nawozy do odkwaszania gleb.

Stosowanie odpadów na użytkach rolnych obok korzyści, jakie z tego osiągamy, związane jest z ryzykiem zanieczyszczenia nie tylko wód podziemnych i gleb, ale może także stanowić czynnik ryzyka dla jakości wytworzonych płodów rolnych. Stosowanie odpadów jako materiałów nawozowych na użytkach rolnych musi więc uwzględniać nie tylko korzyści społeczne (pozbycie się odpadów) i gospodarcze (walory nawozowe odpadów), ale także, co jest nie mniej ważne, zapewnić bezpieczeństwo środowiska i płodów rolnych. Aby materiały odpadowe można było bezpiecznie wykorzystać w rolnictwie, muszą być odpowiednio stosowane, w ustalonych dawkach i terminach agrotechnicznych. Należy podkreślić, że postęp badań w zakresie przyrodniczego wykorzystania odpadów tworzy z jednej strony nowe możliwości ich użycia, ale z drugiej rozpoznawane są coraz lepiej złożone, długofalowe interakcje, jakim odpady podlegają w środowisku glebowym. Skutkuje to odpowiednimi zmianami w systemach prawnych, normach i technologiach ich stosowania, zapewniając coraz lepsze bezpieczeństwo ich nawozowego stosowania na użytkach rolnych. Dany odpad w zależności od tego, jaki rodzaj nawozu chcemy produkować musi spełnić określone wymogi prawne (Dz.U. nr 119, poz. 756, 2008).

4. GLEBA JAKO UKŁAD UMOŻLIWIAJĄCY WYKORZYSTANIE ODPADÓW

W ekosystemach naturalnych zarówno wodnych, jak i glebowych odbywa się obieg pierwiastków tworzących materię organiczną i nieorganiczną. Jednym z głównych ogniw tego obiegu jest biologiczny rozkład substancji organicznych do pros-

tych związków mineralnych, dwutlenku węgla i wody, który najintensywniej zachodzi w warunkach tlenowych. Odpady organiczne zastosowane w formie nawozów naturalnych lub organicznych w wyniku działalności mikrobioty glebowej zostają przetworzone na składniki mineralne i glebową substancję organiczną (rys. 3). Składniki mineralne, w tym także składniki biogenne, jako składniki pokarmowe roślin są pobierane i przetwarzane na biomasę roślinną, co w efekcie eliminuje lub silnie ogranicza ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych. Glebowa substancja organiczna stanowi nie tylko substrat energetyczny dla mikroorganizmów glebowych, co istotnie przyczynia się do wzrostu ich aktywności i tym samym sprawności procesów, ale co jest nie mniej ważne, zwiększa pojemność układu koloidalnego gleby. Powoduje to zwiększenie zdolności gleby do zatrzymywania jonów, co ma istotne znaczenie dla poprawy jej funkcji „filtracyjnej", chroniącej wody gruntowe przed zanieczyszczeniem oraz jej funkcji „magazynującej" wobec składników pokarmowych roślin. Kwestia ta jest szczególnie istotna dla gleb lekkich o małej pojemności sorpcyjnej. Również stosowanie odpadów przemysłowych na użytki rolne poprzez zwiększenie zawartości frakcji silnie rozdrobnionych (pył, ił koloidalny) poprawia zdolności sorpcyjne gleby oraz poprzez wnoszenie związków alkalizujących przyczynia się do odkwaszenia gleb nadmiernie zakwaszonych.



Rys. 3. Schemat obrazujący wpływ produktów nawozowych wytworzonych z odpadów na aktywność naturalnych procesów zachodzących w środowisku glebowym (opracowanie własne)

Podstawowym problemem polskiego rolnictwa jest zakwaszenie gleb, które jest jednym z głównych czynników ograniczających produkcję roślinną. W roku 2017 udział gleb o różnym stopniu zakwaszenia przedstawiał się następująco: gleby o odczynie bardzo kwaśnym – 28,9%, kwaśnym – 28,3%, lekko kwaśnym – 22,4%. Natomiast gleby o odczynie obojętnym i zasadowym stanowiły odpowiednio: 12,5% oraz 7,9% (Ochal i in. 2017). Kwasowość jest jedną z najbardziej istotnych właściwości gleb decydujących o przebiegu wielu procesów glebowych. Wpływa bezpośrednio i pośrednio na nagromadzanie substancji organicznej gleby, jak również na przyswajalność składników pokarmowych. Zarządzanie zakwaszeniem gleby jest niezwykle istotne z punktu widzenia obiegu pierwiastków w środowisku, ich dostępności dla roślin, a w rezultacie plonowania roślin uprawnych (Filipek i Skowrońska 2013).

W warunkach glebowo-klimatycznych Polski obserwujemy zjawisko systematycznego zakwaszania się gleb. Przyczyn tego zjawiska może być wiele. Wyróżniamy naturalne i antropogeniczne czynniki zakwaszania gleb (Smreczak i Łysiak 2017).

Do czynników naturalnych można zaliczyć:

- wymywanie jonów zasadowych (głównie Ca^{2+} i Mg^{2+}) w głąb profilu glebowego przez wody opadowe (w warunkach klimatu umiarkowanego opady przewyższają transpirację i parowanie z powierzchni gleb);
- na glebach mineralnych hydroliza jonów glinu $[Al(H_2O)_3]^{3+}$;
- mineralizacja glebowej materii organicznej – powstają tlenki kwasowe;
- wietrzenie minerałów glebowych, w wyniku czego do środowiska glebowego uwalniane są jony H^+ i Al^{3+};
- pobieranie składników pokarmowych przez korzenie roślin i wynos z plonami;
- działalność mikroorganizmów glebowych, np. nitryfikacja jonów NH_4^+.

Do przyczyn antropogenicznych zakwaszania gleb można zaliczyć:

- kwaśne deszcze, sucha depozycja związków siarki (S_xO_y) i azotu (N_xO_y i NO_x);
- stosowanie nawozów mineralnych o odczynie kwaśnym.

Jedyną możliwością poprawienia stanu zakwaszenia gleb w naszych warunkach klimatycznych jest systematyczne ich wapnowanie. Nawozy wapniowe i wapniowo-magnezowe do odkwaszania gleby muszą mieć odczyn zasadowy. Są to tlenki lub sole z kwasem węglowym lub krzemowym.

Obecność wymienionych grup związków stanowi kryterium podziału tej grupy nawozów na:

- węglanowe – $Ca\ CO_3$ lub $CaCO_3 + MgCO_3$;
- tlenkowe – CaO lub CaO + MgO;
- mieszane – węglanowo-tlenkowe;
- inne – krzemianowe ($CaSiO_3$ lub $CaSiO_3 + MgSiO_3$), wodorotlenkowe.

Nawozy te po wprowadzeniu do gleby podlegają szeregu przemianom, które ogólnie dają się określić jako procesy rozpuszczania, dysocjacji i hydrolizy. Po-

wstające w tych procesach jony wapnia i magnezu reagują z kompleksem sorpcyjnym gleby, wypierając z niego jony wodoru, które w roztworze są neutralizowane. W nawozach tlenkowych wodór jest wiązany w formie wody, natomiast w nawozach węglanowych w formie kwasu węglowego, którego ilość w glebie w danej temperaturze i wilgotności jest stała. Dodatkowy kwas węglowy rozpada się na wodę i dwutlenek węgla. Proces odkwaszania formą węglanową wapnia przebiega powoli, dlatego też nawozy typu węglanowego należą do wolno działających. Powolność reakcji odkwaszania, a tym samym szybkość zmian właściwości środowiska glebowego, jest z wielu powodów korzystna, zwłaszcza na glebach lekkich o niewielkich właściwościach buforowych. Z tego powodu nawozy typu węglanowego nadają się do odkwaszania gleb lekkich. Przemiany nawozów tlenkowych, zwłaszcza w fazie rozpuszczania, są bardzo szybkie i w krótkim czasie pochłaniają spore ilości wody. Powoduje to gwałtowne zmiany w glebie, dlatego nawozy tego typu nadają się na gleby ciężkie, dobrze zbuforowane. Na glebach lekkich o małych właściwościach buforowych mogą spowodować przejściowe niekorzystne zmiany struktury, zakłócenia w życiu mikroorganizmów glebowych, dostępności składników mineralnych i wody. Aby te niekorzystne działanie zniwelować na glebach lekkich, należy je stosować w okresie optymalnego uwilgotnienia gleby (późną jesienią lub wczesną wiosną).

Jak już wcześniej wspomniano, wapnowanie korzystnie wpływa na szeroko rozumianą żyzność gleby. Aby ten zabieg przyniósł oczekiwany efekt, musi być przeprowadzony bardzo starannie. Pierwszą podstawową rzeczą, jaką trzeba wykonać jest pobór reprezentatywnej próbki glebowej. Pobrana próbka glebowa musi możliwie najlepiej odzwierciedlać faktyczny stan odczynu gleby na badanym polu. Kolejnym bardzo ważnym elementem jest ustalenie optymalnej dawki wapna. Zależy ona od obecnego stanu zakwaszenia, kategorii agronomicznej gleby i oczekiwanego odczynu. Wartość odczynu zależy od wymagań uprawianego gatunku roślin. Najczęściej przyjmuje się, że odkwaszamy glebę do odczynu obojętnego. W tym przypadku dawkę wapna ustalamy na podstawie kwasowości hydrolitycznej. Jeżeli chcemy, aby gleba była słabo kwaśna, to stosujemy dawkę niższą niż wyliczoną na podstawie kwasowości. Jeżeli chcemy, aby była zasadowa, dawkę odpowiednio zwiększamy.

Miejsce wapnowania w zmianowaniu zależy od gatunku uprawianej rośliny oraz możliwości organizacyjnych i wymagań agrotechniki. Najlepszym terminem stosowania wapnowania jest zespół uprawek pożniwnych po sprzęcie zbóż, ze względu na możliwość dobrego wymieszania wysianego wapna z glebą. Jeżeli nie stosuje się obornika lub gnojowicy, można wapnować pole w zespole jesiennych uprawek przedsiewnych przed orką siewną lub przed orką przedzimową. Nawozy wapniowe możemy wysiewać również w okresie wiosennym. W całej agrotechnice wapnowania należy pamiętać o kilku podstawowych rzeczach. Zakwaszanie się gleb jest procesem ciągłym, naturalnym, ale poprzez zabieg wapnowania możemy tym procesem sterować. Bardzo ważne jest regularne kontrolowanie pH gleby. Wapno po wysiewie

należy wymieszać z glebą. Nie należy łączyć zabiegu wapnowania z jednoczesnym wywożeniem i przyorywaniem nawozów naturalnych (obornik, gnojowica), a także stosowaniem nawozów fosforowych i azotowych zawierających azot w formie amonowej N-NH_4.

5. POSUMOWANIE

Aby zachować i poprawić bioróżnorodność i żyzność gleby należy:
- dążyć, aby grunty orne były pokryte roślinami możliwie przez większość roku;
- zredukować uprawę płużną;
- przesunąć uprawę płużną z jesieni na wiosnę;
- stosować nawożenie organiczne uzupełnione mineralnym;
- obliczać bilans składników nawozowych w gospodarstwie – i/lub na powierzchni pola;
- unikać stosowania nawozów mineralnych i naturalnych w okresach podwyższonego ryzyka strat składników pokarmowych;
- wdrażać ulepszone technologie stosowania nawozów naturalnych i mineralnych (wgłębna aplikacja nawozów lub szybkie przykrycie glebą nawozów naturalnych płynnych i mineralnych azotowych);
- unikać stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka, zgodnie z wymogami Kodeksu Dobrej Praktyki Rolniczej (2004);
- utrzymywać optymalny odczyn gleby poprzez systematyczne wapnowanie oraz dbać o jej strukturę.

W zachowaniu żyzności gleb ważnym elementem współczesnego rolnictwa jest wykorzystanie do celów nawozowych odpadów biodegradowalnych. Jest to znaczący element gospodarki obiegu zamkniętego. Wiele odpadów zarówno ulegających biodegradacji, jak i mineralnych może być wykorzystywanych w rolnictwie, ponieważ ich właściwości fizyczne, jak i skład chemiczny (np. wysoka zawartość materii organicznej, składników pokarmowych, frakcji iłu i pyłu itp.) powodują, że wywierają one korzystny wpływ na właściwości gleby oraz wzrost i plonowanie roślin uprawnych. Jednak ich przyrodnicze wykorzystanie często obwarowane jest wieloma ograniczeniami wynikającymi z Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (Dz.U. poz. 132, 2015). Przy przyrodniczym wykorzystywaniu odpadów należy uwzględnić między innymi następujące zalecenia:
- Preferowane technologie uzdatniania odpadów biodegradowalnych do celów przyrodniczego wykorzystania to kompostowanie, piroliza i produkcja biogazu.

- Wszystkie współczesne technologie wykorzystywane do uzdatniania odpadów w celu ich nawozowego wykorzystania muszą zapewnić możliwość nadania wytworzonym produktom nawozowym odpowiedniej formy fizycznej, tak aby mogły być bezpiecznie magazynowane, transportowane (odory i inne) i wprowadzane do gleby przez nowoczesne siewniki nawozowe oraz wieloczynnościowe agregaty uprawowe.
- Dobór składników i sposób przetwarzania powinien dążyć do tego, aby powstające produkty (nawozy) były odpowiednio dedykowane z uwzględnieniem właściwości gleb i potrzeb pokarmowych roślin.

Literatura:

1. Aziz S.Q., Omar I.A., Mustafa J.S.: Design and study for composting process site. International Journal of Engineering Inventions, 2018, **7**: 9-18.
2. Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M.: Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. Inż. Ochr. Środ., 2011, **14(4)**: 375-384.
3. Dz.U. nr 119 poz. 756, 2008: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.
4. Dz.U. poz. 132, 2015: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10.
5. Filipek T., Skowrońska M.: Aktualnie dominujące przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce. Acta Agroph., 2013, **20(2)**: 283-294.
6. Gonet S.S.: Ochrona zasobów materii organicznej. W: Rola materii organicznej w środowisku, S.S. Gonet, M. Markiewicz (red.). PTSH, Wrocław 2007, ss. 7-29.
7. Grzebisz W.: Żyzność i produktywność gleb W: Produkcja roślinna – środowisko i podstawy agrotechniki. Cz. I, wyd. II, Hortpress, Warszawa 2012, ss. 175.
8. https://agrex-eco.pl/przerzucarka-do-pryzm
9. https://www.o2compost.com
10. Jędrczak A.: Biologiczne przetwarzania odpadów. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2007, ss. 456.
11. Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Warszawa 2004, ss. 98.
12. Kowaliński S.: Żyzność gleby. W: Gleboznawstwo, S. Zawadzki (red.). wyd. IV, PWRiL, Warszawa 1999, ss. 568.
13. Kuczuk A.: The worth of soil organic matter – energy-nutritional approach. J. Res. Appl. Agr. Eng., 2017, **62(3)**: 201-207.
14. Manczarski P.: Mechaniczno-biologiczne przetwarzanie i składowanie odpadów w świetle nowo obowiązujących przepisów. W: Zarządzanie gospodarką odpadami. Wyd. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, 2018, s. 117-143.
15. Ochal P., Jadczyszyn T., Jurga B., Kopiński J., Matyka M., Madej A., Rutkowska A., Smreczak B., Łysiak M.: Środowiskowe aspekty zakwaszenia gleb w Polsce. Wyd. IUNG-PIB, Puławy 2017, ss. 43.
16. Pilarski K., Pilarska A.: Parametry procesu kompostowania. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 2009, **1**: 16-17.

17. Powlson D.S., Whitmore A.P., Goulding K.W.T.: Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. Eur J. Soil Sci., 2011, **62**:42-55.
18. Rosik-Dulewska C.: Podstawy gospodarki odpadami. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2008, ss. 378.
19. Smreczak B., Łysiak M.: Środowiskowe aspekty zakwaszenia gleb w Polsce. IUNG-PIB, Puławy 2017, ss. 43

VII PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE MIKROORGANIZMÓW W ROLNICTWIE

Anna Gałązka

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa
Państwowy Instytut Badawczy w Puławach
Zakład Mikrobiologii Rolniczej

ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
e-mail: agalazka@iung.pulawy.pl

1. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA WZROST I ROZWÓJ MIKROORGANIZMÓW GLEBOWYCH

Gleba zasiedlana jest przez różnorakie gatunki mikroorganizmów. Urodzajna gleba zawiera nawet miliardy bakterii w przeliczeniu na 1 g świeżej masy gleby (Badura 2004, Gałązka i in. 2016). Skład mikroorganizmów może być istotnym wyznacznikiem tempa rozkładu materii organicznej i obiegu składników pokarmowych oraz ich dostępności w glebach. Udział bakterii i grzybów w kształtowaniu żyzności i zdrowotności gleby jest powszechnie znany, ponieważ to właśnie mikroorganizmy glebowe odgrywają główną rolę w mineralizacji materii organicznej, udostępnianiu roślinom składników pokarmowych, powstawaniu humusu glebowego, ograniczaniu patogenów i wielu innych (Badura 2004, Bielińska i in. 2013). Mikroorganizmy glebowe odgrywają istotną rolę w przemianach wielu pierwiastków w przyrodzie. Biorą udział nie tylko w przemianach węgla i azotu, lecz także w przemianach fosforu, potasu, siarki i żelaza. Oddziaływanie drobnoustrojów na krążenie tych pierwiastków polega na mineralizacji związków organicznych lub na przekształcaniu związków mineralnych z form nieprzyswajalnych dla roślin w związki przyswajalne. Mikroorganizmy mogą też pobierać z gleby oraz nagromadzać w swoich komórkach mineralne związki fosforu, potasu, siarki i żelaza (Bowles i in. 2014, Woźniak i Gałązka 2019). Najważniejsze czynniki wpływające na wzrost i rozwój mikroorganizmów glebowych przedstawiono na rysunku 1.

Rys. 1. Czynniki wpływające na rozwój mikroorganizmów glebowych (opracowanie własne)

2. ROLA MIKROORGANIZMÓW W ŚRODOWISKU GLEBOWYM

Biomasa mikroorganizmów w glebach stanowi około 90% całej biomasy organizmów żyjących w tym środowisku, ponadtoaż 92% dwutlenku węgla (CO_2) powstającego w glebach ma pochodzenie mikrobiologiczne (Bowles i in. 2014). Dane te świadczą o dużej aktywności metabolicznej i ogromnym znaczeniu mikroorganizmów dla większości procesów zachodzących w środowisku glebowym (rys. 2). Do najważniejszych funkcji organizmów glebowych, które stanowią także najważniejsze funkcje wykorzystywane w produkcji biopreparatów należą:

- **rozkład i mineralizacja materii organicznej**;
- **rozkład i detoksykacja różnych substancji zanieczyszczających gleby;**
- **ograniczanie rozwoju szkodników i patogenów roślin**; **wiązanie azotu oraz tworzenie układów symbiotycznych z roślinami**;
- **uwalnianie trudno rozpuszczalnych form fosforu w glebie**.

Rys. 2. Rola mikroorganizmów w środowisku glebowym (opracowanie własne)

Mikroorganizmy glebowe są zdolne do wykorzystywania zarówno organicznych źródeł fosforu, jak też mineralizacji trudno rozpuszczalnych związków fosforu w związki biodostępne dla roślin (Khan i in. 2007). Z resztkami roślinnymi i zwierzęcymi dostają się do gleby organiczne związki fosforu, takie jak: fityna, fosfolipidy i fosfoproteidy. Drobnoustroje w glebie mineralizują te związki, uwalniając z nich jony fosforanowe (Bowles i in. 2014), które, jako rozpuszczalne w wodzie, mogą być pobierane przez drobnoustroje i rośliny. Zdolność do pobierania fosforu mineralnego w formie rozpuszczalnej jest u drobnoustrojów cechą powszechną. Po-

nieważ w procesie mineralizacji fosfor uwalniany jest w ilościach przekraczających zapotrzebowania mikroroganizmów, znaczna jego część wykorzystywana jest przez rośliny. Podobnie przy pobieraniu fosforu z nawozów mineralnych, drobnoustroje tylko w małym stopniu konkurują z roślinami (Gałązka i in. 2017). Mikroorganizmy, które najwydajniej uruchamiają fosfor z jego różnych nierozpuszczalnych związków określamy skrótem PSB (ang. *Phosphate Solubilizing Bacteria*). Wśród bakterii PSB najczęściej izolowane są mikroorganizmy należące do rodzajów: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Aerobacter*, *Xanthomonas* (Khan i in. 2007).

Żyzność gleby jest to zespół fizycznych, chemicznych i biologicznych jej właściwości zapewniających roślinom odpowiednie warunki do wzrostu (Bielińska i in. 2013). W związku z ogromną rolą, jaką spełnia glebowa materia organiczna oraz z proekologicznymi technologiami uprawy roślin poszukuje się nowych, ekologicznych metod, których celem będzie m.in. zwiększenie żyzności gleby poprzez poprawę jej parametrów fizycznych, chemicznych i biologicznych, czego przełożeniem byłby wzrost zawartości substancji organicznej, lepsze plonowanie roślin oraz poprawa parametrów jakościowych plonu (Gałązka i Kocoń 2015a i 2015b). Do takich metod zaliczyć można, jak się wydaje, próby kształtowania żyzności gleby z wykorzystaniem preparatów mikrobiologicznych. Efektywność tworzonych konsorcjów mikroorganizmów opiera się na działaniu odpowiednio dobranych mikroorganizmów, które mogą wspólnie rozwijać się w mieszaninach hodowlanych i są ze sobą kompatybilne fizjologicznie (Zydlik i Zydlik 2008) (rys. 3.).

Rys. 3. Znaczenie mikroorganizmów glebowych w kreowaniu żyzności gleby (opracowanie własne)

3. PREPARATY MIKROBIOLOGICZNE

Rozwój badań mikrobiologicznych na przełomie XX i XXI wieku doprowadził do wyodrębnienia i zidentyfikowania wielu ważnych grup mikroorganizmów glebowych, a także coraz dokładniejszego poznawania ich biologii, ekologii, fizjologii oraz kluczowej roli w przeprowadzaniu wyżej wymienionych procesów. Na przełomie tych lat rozwijały się również badania nad wykorzystywaniem różnych grup pożytecznych drobnoustrojów w praktyce rolniczej. W efekcie tych badań opracowano i wdrożono do produkcji w różnych krajach liczne **biopreparaty**, wśród których dominują **preparaty wykorzystywane w biologicznej ochronie roślin**, czyli zawierające w swoim składzie mikroorganizmy antagonistyczne lub pasożytnicze w stosunku do patogenów i szkodników roślin, oraz mniej liczne **szczepionki stymulujące aktywność mikrobiologiczną gleb** lub korzystnie oddziałujące na wzrost i plonowanie roślin, np. **biopreparaty zawierające mikroorganizmy symbiotyczne** (bakterie brodawkowe dla roślin bobowatych oraz grzyby mykoryzowe).

Wzrastająca świadomość konieczności ograniczania nadmiernej chemizacji rolnictwa spowodowała, że zwiększyło się zainteresowanie naturalnymi środkami produkcji stosowanymi w rolnictwie (Javaid 2006, Javaid i in. 2008). Jedną z koncepcji jest wykorzystanie mikroorganizmów. Liczne gatunki bakterii i grzybów wspomagają wzrost roślin, a także mogą je chronić przed stresowymi czynnikami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi, jakimi są organizmy patogeniczne. Właściwości te zostały wykorzystane do produkcji **bionawozów**, **biostymulatorów** lub **biologicznych środków ochrony roślin**, których czynnikiem aktywnym są mikroorganizmy. Rynek dla tego typu preparatów rośnie ze względu na coraz większe zainteresowanie producentów oraz możliwość stosowania w uprawach gatunków roślin o dużym znaczeniu gospodarczym. Środki oparte na działaniu żywych organizmów mają jednak swoje ograniczenia, a wiedza odbiorców na temat ich właściwości jest w dalszym ciągu niewystarczająca. Najczęściej dostępne na rynku preparaty mikrobiologiczne przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wybrane preparaty mikrobiologiczne dostępne na rynku krajowym (opracowanie własne)

UŻYŹNIACZE GLEBOWE ZAWIERAJĄCE MIKROORGANIZMY	
Nazwa produktu; opis producenta*	**Producent**
Bactim Słoma – biopreparat przyspieszający rozkład resztek pozbiorczych oraz poprawiający zasobność gleby w dostępne dla roślin składniki pokarmowe i próchnicę. Bakterie *Bacillus subtilis* szczep B00105 oraz *Bacillus licheniformis* szczep B00106.	Intermag
Biogen Rewital – zawiera mikrobiologiczny kompozyt niepatogennych bakterii oraz pożywkę startową.	Biogen

cd. tab. 1

UŻYŹNIACZE GLEBOWE ZAWIERAJĄCE MIKROORGANIZMY	
Nazwa produktu; opis producenta*	**Producent**
Ema5 – specjalnie przygotowana kompozycja mikroorganizmów na bazie SCD ProBio Original® poddana dodatkowej fermentacji z octem winnym i alkoholem, charakteryzująca się silnym działaniem w ograniczaniu lub eliminowaniu patogenów grzybowych oraz niektórych szkodników.	ProBiotics Polska
Em 5 – biologiczny preparat wzmacniający odporność roślin, odstraszający szkodniki i ograniczający rozwój pleśni. Kompozycja naturalnych składników fermentowanych z Efektywnymi Mikroorganizmami (EM), wzmacnia odporność roślin na ataki patogenów.	Greenland Technology
EmFarma – środek, który swoim działaniem poprawia jakość i zdrowotność wszystkich systemów biologicznych. Pożyteczne mikroorganizmy w nim występujące wzajemnie się wspierają i jako zespół wypierają chorobotwórczą mikroflorę, zmieniając kierunek procesu mikrobiologicznego na regenerujący albo rewitalizujący w miejscu ich użycia.	ProBiotics Polska
EmFarma Plus – wzbogacona w bakterie fototropowe kompozycja mikroorganizmów, dzięki czemu skuteczniej niż EmFarma™ przyspiesza rozkład materii organicznej i zwiększa dostępność składników mineralnych, w tym głównie azotu.	ProBiotics Polska
EM Naturalnie Aktywny – płynny nawóz organiczny, trwale poprawiający strukturę i żyzność gleby. Zawiera skoncentrowaną dawkę Efektywnych Mikroorganizmów EM® i Azotobakter.	Greenland Technology
Fosfor Bacter – preparat bakteryjny podnoszący poziom dostępnego fosforu w glebie. Zawiera wolnożyjące bakterie glebowe, odblokowuje niedostępne dla roślin pokłady fosforu w glebie.	Agrarius
Humus Active Uniwersalny – zawiera Pozytywe Mikroorganizmy pochodzące z uszlachetnionego przez dżdżownice kalifornijskie obornika zwierząt kopytnych z nieintensywnych gospodarstw rolnych.	EKODARPOL
MG Mikroorganizmy Glebowe – bakteryjny użyźniacz doglebowy polepszający strukturę i urodzajność gleby. Zawiera następujące mikroorganizmy: *Cellulomonas cellulans*, *Bacillus subtili*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus*, *Azotobacter vinelandi*, *Azospirillum lipoferum*, *Pediococcus acidilactici*, *Pseudomonas fluorescens*.	Polsil
Mikrofosfat – preparat z mikroorganizmami.	Polsil
Rewital Plus – preparat oparty na bakteriach glebowych występujących w środowisku naturalnym.	Bio-Gen
Rhizosum N – produkt, który w swoim składzie zawiera mikroorganizmy zdolne do wiązania azotu atmosferycznego – bakterie *Azotobacter vinelandii*.	Agrosimex
UGmax Użyźniacz Glebowy – jest naturalnym płynnym koncentratem zawierającym mikroorganizmy oraz makro- i mikroelementy.	Bogdan

cd. tab. 1

SZCZEPIONKI BAKTERYJNE ZAWIERAJĄCE BAKTERIE SYMBIOTYCZNE *RHIZOBIUM*	
Nitroflora	Mykoflor
Rhizobium	Bio-Gen
NITRAGINA	IUNG-PIB; Wałcz
Wykaz produktów naturalnych innych niż nawozy i środki poprawiające właściwości gleby, które mogą być stosowane w rolnictwie ekologicznym w celu wytworzenia produktów rolnych wysokiej jakości zgodnie z art. 16 ust. 5 rozporządzenia Rady nr 834/2007.	
SE/8/2018; **BioGarden** Bacto-Tech sp. z o.o. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus.*	
SE/9/2018 **Bactofos** Bacto-Tech sp. z o.o. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus.*	
SE/10/2018 **BactoRol** Plus Bacto-Tech sp. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus.*	
SE/11/2018 **PANORAMIX Kukurydza** Koppert Polska Sp. z o.o. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus* i grzyby *Trichoderma* sp.	
SE/12/2018 **PANORAMIX Zboża** Koppert Polska Sp. z o.o. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus* i grzyby *Trichoderma* sp.	
SE/18/2018 **BAKTO KOMPLEKS** Przedsiębiorstwo Usługowo-Handlowe „CHEMIROL" Sp. z o.o. Preparat mikrobiologiczny zawierający bakterie z rodzaju *Bacillus.*	

*Opis producenta zgodnie z informacją przedstawioną na stronie internetowej produktu

Nawozy z krajów spoza UE oraz krajowe zgłaszane do dopuszczenia krajowego wymagają opinii jednostek badawczych i są wydawane przez:

- Instytut Nawozów Sztucznych (INS) – właściwości chemiczne, pierwiastki toksyczne (As,Cd, Hg, Pb);
- Instytuty rolnicze, w tym Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (IUNG –PIB, Puławy) (ocena przydatności do nawożenia) (Dz.U. z 2008 r., nr 119, poz. 765, § 9). Ponadto na stronie internetowej IUNG-PIB można skorzystać z internetowej wyszukiwarki nawozów i środków wspomagających uprawę roślin (http://www.ipm.iung.pulawy.pl).

Preparaty z mikroorganizmami pożytecznymi (tzw. Efektywne Mikroorganizmy – pod różnymi nazwami) są obecnie dość szeroko stosowane w praktyce rolniczej (Daily i Stewart 1999, Janas 2009, Mayer i in. 2010). Na rynku dostępne są również preparaty mikrobiologiczne wykorzystywane do stymulowania wzrostu i plonowania niektórych roślin uprawnych, a przykładami takich biopreparatów są szczepionki zawierające bakterie symbiotyczne roślin bobowatych (dawniej motylkowatych) oraz szczepionki stosowane w leśnictwie do mykoryzacji sadzonek w szkółkach drzew. W ostatnim dziesięcioleciu w handlu bardzo dobrze rozwinęła się także gałąź produkcyjna preparatów mikrobiologicznych, które reklamowane są jako środki

poprawiające nie tylko mikrobiologiczne właściwości gleb, ale także żyzność gleb i plonowanie roślin. W naszym kraju szczepionki rizobiowe, a także inne preparaty mikrobiologiczne dopuszczane są do obrotu przez MRiRW po spełnieniu wymogów stosownej procedury rejestracyjnej. W odniesieniu do preparatów mikrobiologicznych, a także innych produktów określanych jako środki poprawiające właściwości gleby, rejestrowanych na potrzeby rolnictwa ekologicznego, procedura rejestracyjna jest jeszcze bardziej łagodna, ponieważ nie stawia ona wymogu prowadzenia badań potwierdzających skuteczność rolniczą tych produktów.

Technologia wytwarzania szczepionek obejmuje następujące etapy:

- zgromadzenie kolekcji różnych szczepów drobnoustrojów;
- kontrolowanie czystości i jakości (efektywności symbiotycznej) tych szczepów;
- wieloetapowe rozmnażanie mikroorganizmów i kontrolowanie czystości uzyskiwanej biomasy;
- przygotowywanie jałowego nośnika (drobno zmielony torf, węgiel brunatny, płynna melasa);
- mieszanie biomasy bakterii z nośnikiem i konfekcjonowanie szczepionki.

Uwaga! Kupując preparaty zawierające mikroorganizmy, należy zwrócić szczególną uwagę na m.in. opis producenta, skład, termin przydatności do użycia, warunki przechowywania produktu, opis stosowania, ograniczenia stosowania, w tym interakcje ze środkami chemicznymi. Producent powinien także przedstawić wyniki badań danego preparatu i jego skuteczność w warunkach doświadczeń polowych minimum 2–3-letnich.

Szczepienie roślin bakteriami endofitycznymi może okazać się w przyszłości jeszcze jednym sposobem praktycznego zwiększania plonów upraw rolnych niezależnie od tego, czy korzystny wpływ takich zabiegów dotyczy wiązania azotu atmosferycznego, produkcji fitohormonów itd., czy też innych, nieodkrytych do tej pory skutków oddziaływania tych bakterii na rośliny. Bakterie endofityczne są najbardziej różnorodną i znaczącą ekologicznie grupą bakterii na naszej planecie. W jej skład wchodzą różnego rodzaju bakterie, z których najliczniejszą grupę stanowią bakterie z rodzaju ***Pseudomonas*** (około 245 gatunków) i ***Burkholderia*** (około 66 gatunków). Na świecie jest około 300 000 gatunków roślin, z których każda jest skolonizowana przez jedną lub kilka endofitycznych bakterii. Mają one proste wymagania odżywcze i dużą aktywność metaboliczną, co pozwala im skutecznie konkurować z innymi mikroorganizmami (Kucharski i Jastrzębska 2005). Ich stała obecność w ryzosferze prowadzi do zmian w funkcjonowaniu systemu korzeniowego, co w rezultacie objawia się zwiększeniem plonów, ponieważ mogą oddziaływać w różny sposób na wzrost i zdrowotność rośliny, z którą żyją w asocjacji. Problemem pozostaje więc

określenie warunków pozwalających na maksymalne wykorzystanie zdolności tych mikroorganizmów odgrywających niewątpliwie znaczącą rolę w rolnictwie. Lepsze poznanie drobnoustrojów ryzosferowych i endoryzosferowych zbóż da możliwość ich praktycznego wykorzystania i może być częścią tak ujętego nowoczesnego rolnictwa. Asocjacja bakterii endofitycznych z ich roślinnymi gospodarzami ma przede wszystkim wpływ na wzrost roślin. Endofityczne bakterie mogą oddziaływać w różny sposób na wzrost i zdrowotność rośliny, z którą żyją w asocjacji nawet w zanieczyszczonym środowisku glebowym (Klama i in. 2010). Odbywa się to przede wszystkim przez wytwarzanie fitohormonów lub enzymów wpływających i regulujących metabolizm w roślinie, takich jak etylen, kwas 1-aminocyklopropano-1-karboksylowy (ACC), deaminazy, auksyny, kwas indolilooctowy (IAA) lub cytokininy. Bakterie endofityczne były zawsze przedmiotem dużego zainteresowania nie tylko naukowców, ale również i rolników. Żyją one w asocjacji z korzeniami wielu roślin (np. zboża, kukurydza, trawy i inne), mają zdolność nie tylko wiązania azotu atmosferycznego, ale również wytwarzania substancji wzrostowych, które powodują lepszy rozwój i rozgałęzianie systemu korzeniowego. W związku z tym usprawniona jest gospodarka wodna i pobieranie soli mineralnych przez roślinę (Gałązka i in. 2016, Woźniak i Gałązka 2019). Dzięki tym właściwościom mogą wpływać na zwiększenie plonów.

Bakterie endofityczne stymulują wzrost i rozwój roślin (np. przez wytwarzanie fitohormonów) i z tego powodu przyczyniają się do zwiększenia plonów. Niektóre szczepy tych bakterii są zdolne do indukowania substancji przeciwgrzybowych i przeciwbakteryjnych w szczepionych roślinach. Jednak chyba największe zainteresowanie w asocjacji roślina–endofity dotyczy nie tylko możliwości wytwarzania fitohormonów, takich jak auksyny (kwas inodolilooctowy), gibereliny i cytokininy, ale wykorzystania w praktyce rolniczej zdolności wiązania azotu atmosferycznego przez mikroorganizmy żyjące w asocjacji z rośliną (Woźniak i Gałązka 2019). Azot związany biologicznie ma olbrzymie znaczenie w rolnictwie. Jest on wykorzystywany przez rośliny w około 100%, podczas gdy z nawozów mineralnych rośliny wykorzystują nie więcej niż 50% N. Jednak udział wiązania N_2 niektórych bakterii endofitycznych (np. *Azospirillum* czy *Herbaspirillum*) w zaspokajaniu ich zapotrzebowania azotowego jest niewielki.

Z kolei preparaty oparte na technologii Efektywnych Mikroorganizmów (tzw. „Em-y") są mieszanką pożytecznych mikroorganizmów, w skład których wchodzą m.in. bakterie fotosyntetyzujące, bakterie kwasu mlekowego, promieniowce, drożdże, grzyby, a także często wybrane makro- i mikroelementy (Khaliq i in. 2006, Muthaura i in. 2010). Wszystkie te środki, choć ich skład różni się, mają ten sam cel – poprawić właściwości chemiczne oraz biologiczne gleby. Dotychczasowy stan wiedzy odnośnie wpływu preparatów z pożytecznymi organizmami na poprawę żyzności gleby i jakości plonu czerpany jest głównie z badań komercyjnych, zlecanych różnym instytucjom przez poszczególne firmy zajmujące się produkcją

i dystrybucją tych środków oraz częściowo z fragmentarycznych badań naukowych, które nie są jednoznaczne (Shah i in. 2001, Martyniuk i Księżniak 2011). W wielu ośrodkach badawczych podejmowane są badania w celu poszerzenia wiedzy w tym zakresie oraz próby wypracowania stanowiska naukowców w kwestii efektywności działania preparatów mikrobiologicznych.

Preparaty oparte na mikroorganizmach (bakteriach i grzybach) aplikowane są do gleby, czyli do środowiska charakteryzującego się bardzo dużą złożonością różnego rodzaju oddziaływań, w tym antagonistycznych, oraz ogromną konkurencyjnością o energię i składniki odżywcze pomiędzy drobnoustrojami glebowymi i innymi organizmami bytującymi w glebie (Gałązka i Kocoń 2015a i 2015b). Gleba jest także środowiskiem o dużej zmienności czynników abiotycznych (wilgotność, temperatura, odczyn, zabiegi agrotechniczne), które bardzo istotnie wpływają na przeżywalność i skuteczność organizmów wprowadzanych do gleby (Badura 2004, Gałązka i in. 2016). Warto też dodać, że choć zakres praktycznego wykorzystywania biopreparatów w ochronie roślin jest ciągle mały, ma on jednak tendencje wzrostowe. Zwiększające się zapotrzebowanie na biopreparaty związane jest prawdopodobnie z rozwojem proekologicznych metod uprawy roślin, w tym rolnictwa ekologicznego.

4. PODSUMOWANIE

Wielu autorów podkreśla, że w warunkach polowych trudno jest uzyskać pozytywne efekty stosowania preparatów mikrobiologicznych, głównie ze względu na skomplikowane interakcje między organizmami glebowymi oraz oddziaływanie bardzo zmiennych warunków pogodowych i abiotycznych właściwości gleb na rozwój mikroorganizmów glebowych. Liczebność mikroorganizmów wprowadzanych do gleby jest zwykle redukowana do poziomu naturalnego. Każda gleba w warunkach naturalnych zasiedlona jest przez drobnoustroje, które przystosowały się do życia w danej glebie i skolonizowały w niej wszystkie dostępne i umożliwiające egzystencję nisze ekologiczne. Urodzajne, żyzne gleby zawierają w 1 g świeżej masy setki milionów, a nawet miliardy samych bakterii. Ich liczebność i aktywność uwarunkowana jest wieloma czynnikami. Głównym czynnikiem ograniczającym ich rozwój jest zawartość dostępnej materii organicznej. W glebie substancja organiczna ulega szeregom przemian przeprowadzanym przez różne grupy drobnoustrojów, a ich tempo uzależnione jest od warunków klimatycznych, struktury gleby oraz stopnia zanieczyszczenia środowiska glebowego. Dotychczasowy stan wiedzy odnośnie wpływu preparatów z pożytecznymi organizmami na poprawę żyzności gleby i jakości plonu czerpany jest głównie z badań komercyjnych, zlecanych różnym instytucjom przez poszczególne firmy zajmujące się produkcją i dystrybucją tych środków oraz częściowo z fragmentarycznych badań naukowych, które nie są jednoznaczne. Stąd też szerzenie wiedzy w tym względzie oraz próby wypracowania stanowiska pracowni-

ków naukowych w kwestii efektywności działania preparatów mikrobiologicznych jest bardzo ważne. Ścisła współpraca i wymiana doświadczeń pomiędzy praktyką rolniczą a środowiskiem naukowym może przynieść wiele korzyści i wpłynąć na racjonalne i rozsądne stosowanie preparatów mikrobiologicznych w rolnictwie.

Literatura:

1. Badura L.: Czy znamy wszystkie uwarunkowania funkcji mikroorganizmów w ekosystemach lądowych. Kosmos. Probl. Nauk Biol., 2004, **53**: 373-379.
2. Bielińska E.J., Futa B., Bik-Mołodzińska M., Szewczuk M., Sugier D.: The impact of fertilizing agents on the enzymatic activity of soils. J. Res. Appl. Agr. Eng., 2013, **58(3)**: 15-19.
3. Bowles T.M., Acosta-Martínez V., Calderón F., Jackson L.E.: Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. Soil Biol. Bioch., 2014, **68**: 252-262.
4. Daily M.J., Stewart D.P.C.: Influence of Effective Microorganisms (EM) on vegetative production and carbon mineralization – a preliminary investigation. J. Sustain. Agr., 1999, **14**:15-25.
5. Dz.U. nr 119, poz. 765, 2008: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.
6. Gałązka A., Łyszcz M., Abramczyk B., Furtak K., Grządziel J., Czaban J., Pikulicka A.: Bioróżnorodność środowiska glebowego – Przegląd parametrów i metod w analizach różnorodności biologicznej gleby. Monografie i Rozprawy Naukowe, Puławy 2016, **49**: 1-100.
7. Gałązka A., Gawryjołek K., Kocoń A.: The effect of same microbial products on basic biological activities of soil under cereals crop. Plant Soil Environ., 2017, **63(3)**: 111-116.
8. Gałązka A., Kocoń A.: Ocena efektywności działania preparatów z mikroorganizmami pożytecznymi na aktywność enzymatyczną gleb. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015a, **45(19)**: 143-154.
9. Gałązka A., Kocoń A.: Wpływ preparatów z mikroorganizmami pożytecznymi na liczebność i biomasę mikroorganizmów glebowych. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015b, **45(19)**: 127-142.
10. Janas R.: Możliwości wykorzystania efektywnych mikroorganizmów w ekologicznych systemach produkcji roślin uprawnych. Probl. Inż. Rol., 2009, **3**: 111-119.
11. Javaid A.: Foliar application of effective microorganisms on pea as an alternative fertilizer. Agronom. Sustain. Dev., 2006, **26***:* 257-262.
12. Javaid A., Bajwa R., Anjum T.: Effect of heat-sterilization and EM (effective microorganisms) application on wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in organicamended sandy loam soil. Cereal Res. Commun., 2008, **36**: 489-499.
13. Khaliq A., Abbasi M.K., Hussain T.: Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan. Bioresour. Technol., 2006, **97**: 967-972.
14. Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A.: Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: a review. Agronom. Sustain. Dev., 2007, **27**: 29-43.
15. Klama J., Jędryczka M., Wiśniewska H., Gajewski P.: Ocena stopnia rozwoju oraz kondycji fizjologicznej ozimych roślin pszenicy i rzepaku w uprawie z zastosowaniem Efektywnych Mikroorganizmów. Nauka-Przyroda-Technologie, 2010, **6(4)**: 79-81.
16. Kucharski J., Jastrzębska E.: Rola efektywnych mikroorganizmów w kształtowaniu właściwości mikrobiologicznych gleby. Inż. Ekol., 2005, **12**: 295-297.

17. Martyniuk S., Księżak J.: Ocena pseudomikrobiologicznych preparatów stosowanych w uprawie roślin. Pol. J. Agron., 2011, **6**: 27-33.
18. Mayer J., Scheid S., Widmer F., Fließbach A., Oberholzer H.R.: How effective are Effective microorganisms (EM)'? Results from a field study in temperate climate. Appl. Soil Ecol., 2010, **46**: 230-239.
19. Muthaura C., Musyimi D.M., Ogar J.A., Okello S.V.: Effective microorganisms and their influence on growth and yield of pigweed (*Amaranthus dubians*). J. Agric. Biol. Sci., 2010, **5(1)**: 17-22.
20. Shah S. H., Saleem M. F., Shahid M.: Effect of different fertilizers and Effective Microorganisms on growth, yield and quality of maize. Int. J. Agric. Biol., 2001, **3(4)**: 378-379.
21. Zydlik P., Zydlik Z.: Impact of biological effective microorganisms (EM) preparations on some physico-chemical properties of soil and the vegetative growth of apple-tree rootstocks. Nauka -Przyroda-Technologie, 2008, **2(1)**: 1-4.
22. Woźniak M., Gałązka A.: Mikrobom ryzosfery i jego korzystny wpływ na rośliny – aktualna wiedza i perspektywy. Post. Mikrobiol., 2019, **58(1)**: 59-69.

VIII DBAŁOŚĆ O STAN SANITARNY UPRAW

BEZPIECZNA ŻYWNOŚĆ

Magdalena Szczech

Instytut Ogrodnictwa
Zakład Mikrobiologii
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice
e-mail: magdalena.szczech@inhort.pl

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach zmienił się styl życia, a także żywienia ludzi. Zdrowa dieta powinna składać się z produktów o wysokiej jakości, zawierających składniki korzystne dla właściwego funkcjonowania organizmu, a jednocześnie wolne od wszelkich szkodliwych substancji, m.in. pozostałości pestycydów, nadmiaru azotanów i chorobotwórczych mikroorganizmów. W codziennej diecie zaleca się większe spożycie produktów roślinnych, szczególnie świeżych warzyw i owoców. Jedzenie ich w dużej ilości jest skutecznym sposobem zapobiegania chorobom cywilizacyjnym XXI wieku: otyłości, cukrzycy, chorobom krążenia oraz nowotworom. Według rekomendacji WHO, każdy codziennie powinien zjadać co najmniej 400 g warzyw i owoców, najlepiej na surowo (Tuomisto i in. 2017). Jednak zwiększona konsumpcja surowych produktów jest również powodem wzrostu odnotowanych na całym świecie przypadków zatruć pokarmowych (Cellejón i in. 2015, Alegbeleye i in. 2018). Powodem zatruć są zazwyczaj skażenia mikrobiologiczne wywoływane głównie przez bakterie (*Salmonella* spp., *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter* spp., *Staphylococcus* spp., *Bacillus cereus*), a także wirusy (rotawirusy, norowirusy, wirus zapalenia wątroby typu A) i pasożyty (Rajwar i in. 2016, Alegbeleye i in. 2018). Najwięcej zatruć powodowanych jest przez bakterie chorobotwórcze. Mikroorganizmy te rozwijają się w przewodzie pokarmowym zwierząt stałocieplnych, a także człowieka i wraz z odchodami lub produktami odzwierzęcymi mogą przedostać się do środowiska i na rośliny. Dzięki postępowi technologicznemu obecnie możliwe jest szybkie wykrywanie patogenów w żywności. Pomimo to, ze względu na krótki okres trwałości świeżych produktów roślinnych, rozpoznanie źródła zachorowań może nastąpić już po fakcie sprzedaży skażonej partii towaru, bez możliwości jego wycofania i uchronienia kolejnych konsumentów przed zatruciem. Dlatego:

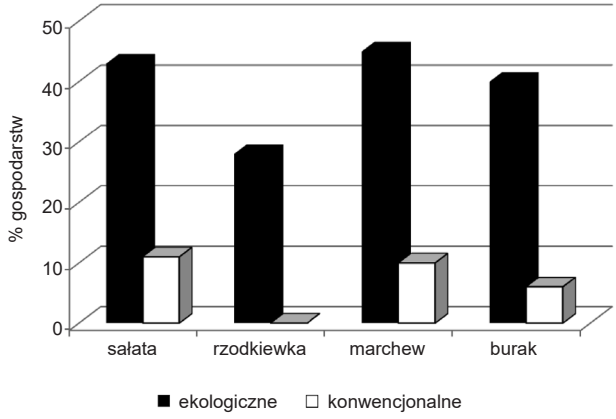
Bardzo ważna jest dbałość o stan sanitarny warzyw i owoców już w czasie uprawy w polu i dalej, podczas ich przygotowywania do sprzedaży i dystrybucji.

2. ŹRÓDŁA SKAŻENIA ROŚLIN PRZEZ CHOROBOTWÓRCZE MIKROORGANIZMY

Skażenie upraw przez mikroorganizmy chorobotwórcze może odbywać się różnymi drogami (rys. 1): przez pobieranie tych mikroorganizmów z zanieczyszczonej gleby i wód gruntowych, przez stosowanie „surowego" lub źle przygotowanego obornika i kompostów, z zanieczyszczonej wody stosowanej do podlewania i oprysków lub wody zalewającej pola podczas opadów, przez skażenie odchodami zwierząt gospodarskich lub przez dzikie zwierzęta, mogą być także przenoszone przez owady lub wraz z osadami z powietrza.

Rys. 1. Główne źródła skażeń mikroorganizmami chorobotwórczymi dla człowieka w uprawach roślin (opracowanie własne)

Najczęstszymi źródłami skażeń mikrobiologicznych w uprawach są nieprawidłowo stosowane i przygotowane **nawozy naturalne**, takie jak obornik, gnojowica, a także komposty z dodatkiem świeżych odchodów i skażona woda. W latach 2010–2014, w badaniach prowadzonych w Instytucie Ogrodnictwa w Skierniewicach, oceniano skażenia mikrobiologiczne warzyw w certyfikowanych gospodarstwach ekologicznych i gospodarstwach konwencjonalnych położonych na terenie całej Polski. W ciągu pięciu lat badań pozyskano około 800 prób warzyw. Materiał roślinny analizowano pod względem zasiedlenia przez różne grupy mikroorganizmów będących wskaźnikami stanu sanitarnego żywności (Szczech i in. 2014 i 2018). Analizy wykazały różnice głównie w zagęszczeniu bakterii z grupy coli i *Escherichia coli*. Znacznie więcej tych bakterii, szczególnie *E. coli*, znajdowano na warzywach ekologicznych (rys. 2).



Rys. 2. Obecność *E. coli* w uprawach ekologicznych i konwencjonalnych, w latach 2010–2014 (Szczech i in. 2014)

Analiza liczebności bakterii *E. coli* w odniesieniu do nawożenia pozwoliła stwierdzić, że skażenia bakteriami fekalnymi w uprawach ekologicznych były

związane z niewłaściwym stosowaniem nawozów naturalnych, m.in.: używaniem obornika niedokładnie przekompostowanego, kompostów z dodatkami odchodów zwierzęcych, dokarmianiem roślin tzw. „gnojówkami" lub roztworami odchodów zwierzęcych. W gospodarstwach konwencjonalnych, gdzie najczęściej stosowane było nawożenie mineralne, bakterie te były wykrywane na roślinach bardzo rzadko i to głównie na sałacie. Nie jest jednak wykluczone, że problem ten może zaistnieć w produkcji integrowanej w przypadku zwiększenia udziału nawożenia organicznego, szczególnie z użyciem nawozów odzwierzęcych.

Należy podkreślić, że nawozy naturalne (obornik, gnojówka, gnojowica) mają bardzo pozytywny wpływ na glebę. Zwiększają one zawartość materii organicznej i dostępnych dla roślin składników pokarmowych, poprawiają strukturę gleby, pojemność wodną oraz aktywują mikroflorę glebową. Zastosowanie w uprawach nawożenia organicznego, w tym nawozami naturalnymi, będzie zwiększać się ze względu na rosnący problem utraty produktywności gleb związany z nadmierną mineralizacją warstwy próchnicznej, zaburzeniami struktury gleby i niekorzystnymi zmianami mikrobiologicznymi zachodzącymi w środowisku glebowym (Trivedi i in. 2016). Mikroorganizmy odgrywają kluczową rolę w utrzymaniu żyzności i budowaniu właściwej struktury gleby, która również odpowiada za retencję wody w glebie, a także mają ogromny wpływ na wzrost i zdrowotność roślin. Wszelkie zmiany prowadzące do zubożenia bioróżnorodności i ograniczenia aktywności mikroorganizmów naturalnie zasiedlających glebę skutkują spadkiem jej żyzności i selekcją w kierunku rozwoju organizmów szkodliwych (Cavicchioli i in. 2019). Osłabiona bioróżnorodność mikrobiologiczna w środowisku rolniczym może również stwarzać lepsze warunki dla rozwoju mikroorganizmów patogenicznych dla ludzi, które bez naturalnej konkurencji ze strony licznych grup organizmów glebowych mogą mieć sprzyjające warunki do rozwoju i adaptacji w warunkach glebowych (Mendes i in. 2013, Nithya i Babu 2017). Nawożenie organiczne, w przeciwieństwie do mineralnego, ma pozytywny wpływ na parametry jakościowe gleby i aktywność mikroorganizmów glebowych, dzięki czemu zwiększa jej naturalną oporność wobec szkodliwych organizmów (Zhen i in. 2014, Bai i in. 2018).

W uprawie roślin najlepszym źródłem materii organicznej w glebie są nawozy naturalne. Mogą one jednak zawierać mikroorganizmy i organizmy pasożytnicze szkodliwe dla ludzi. Liczba i rodzaj patogenów w odchodach zależą od gatunku zwierzęcia, jego wieku, stanu zdrowia, a także diety i higieny w gospodarstwie. W oborniku czy gnojowicy, w odpowiednich warunkach, bakterie chorobotwórcze mogą przeżyć przez kilkanaście tygodni, a nawet przez kilkanaście miesięcy (Alegbeleye i in. 2018). Mikroorganizmy te mogą przedostać się dalej do wody lub gleby, powodując skażenie tych środowisk. Dlatego bardzo ważne jest stosowanie nawozów naturalnych, które zostały poddane zabiegom ograniczającym ryzyko dalszego transferu patogenów do środowiska (np. długotrwałe składowanie, kompostowanie, wapnowanie w przypadku gnojowicy), a także stosowanie tych nawozów w odpowiednich terminach i zgodnie z obowiązującymi rozporządzeniami.

Stosowanie świeżych nawozów stałych lub płynnych, a także źle przygotowanych kompostów stanowi w produkcji roślinnej duże ryzyko skażeń mikrobiologicznych. Dlatego należy dążyć do eliminowania organizmów chorobotwórczych znajdujących się w nawozach organicznych jeszcze przed ich aplikacją do gleby.

Zagospodarowanie obornika i gnojowicy do celów rolniczych jest limitowane przepisami znajdującymi się w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dn. 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego stosowania nawozów (Dz.U. nr 80 poz. 479, 2008) oraz w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dn. 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz.U. nr 119 poz. 765, 2008). Zgodnie z tymi przepisami nawozy naturalne można stosować od 1 marca do 30 listopada. Po zastosowaniu należy je wymieszać z glebą na polu najpóźniej następnego dnia. Gnojowicy nie można stosować bliżej niż 20 m od zbiorników i źródeł wody, a także na glebach zalanych, na glebach, gdzie poziom wody jest wyższy niż 1,2 m od powierzchni, oraz podczas opadów deszczu.

Gnojówkę i gnojowicę powinno stosować się na nieobsianą glebę, najlepiej w okresie wczesnej wiosny. Te płynne nawozy mogą być stosowane do pogłównego nawożenia tylko niektórych roślin (użytki zielone, wieloletnie uprawy polowe). Również używanie różnych wyciągów z kompostów czy tzw. „gnojówek" z fermentowanych roślin z dodatkiem zwierzęcych odchodów, np. kurzych, może być źródłem skażenia, szczególnie gdy są aplikowane w formie oprysków i używane do podlewania w celu „dokarmiania" roślin.

Nie dopuszcza się używania nawozów naturalnych pogłównie na rośliny przeznaczone do bezpośredniego spożycia przez ludzi i zwierzęta. Najlepiej stosować je pod rośliny o długim okresie wegetacji. Szczególną ostrożność należy zachować przy użyciu płynnych nawozów naturalnych.

Kolejnym, bardzo częstym źródłem skażeń mikrobiologicznych w uprawach jest **zanieczyszczona woda**. Powszechnie przyjmuje się, że w warunkach europejskich zanieczyszczenie wód jest podstawowym zagrożeniem dla środowiska i produkcji rolnej. Głównymi czynnikami zanieczyszczającymi wodę są: azotany skażające wody gruntowe, związki azotu i fosforu powodujące eutrofizację wód, pozostałości środków ochrony roślin lub leków weterynaryjnych, a także czynniki biologiczne mogące przenikać do wód gruntowych i powierzchniowych (Tombini Decol i in. 2017, Alegbeleye i in. 2018). Woda jest najczęściej zanieczyszczana poprzez niewłaściwie odprowadzane ścieki, nieczyszczone zbiorniki, wycieki ze zbiorników lub miejsc składowania nawozów naturalnych, odchody zwierząt gospodarskich i dzikich lub wody spływające ze skażonych pól. Należy wobec tego sprawdzać możliwości wystąpienia takich zanieczyszczeń i im zapobiegać, gdyż woda stosowana w uprawie roślin powinna być dobrej jakości. Szczególnie woda do oprysków

lub mycia roślin powinna spełniać standardy wody pitnej. Jest to szczególnie ważne w przypadku warzyw i owoców, które są jedzone świeże.

Jakość mikrobiologiczna wody używanej do nawadniania roślin, stosowanej podczas zabiegów ochrony roślin, a także podczas mycia, sortowania oraz przy pakowaniu produktów roślinnych jest niezwykle istotna dla zachowania właściwego stanu sanitarnego tych produktów. Nawet niewielka ilość odchodów w wodzie może stanowić zagrożenie dla zdrowia.

W rolnictwie używane są wody gruntowe i powierzchniowe, duże znaczenie mają także wody opadowe. Zazwyczaj w wodach gruntowych mikroorganizmy chorobotwórcze nie powinny występować ze względu na naturalny mechanizm filtrujący gleby. Jednak w niektórych przypadkach konstrukcja i głębokość studni, lokalizacja źródła wody, rodzaj podłoża, częstotliwość opadów i odległość od źródeł potencjalnych skażeń może mieć wpływ na jakość wody. Znacznie bardziej narażone na skażenia są wody powierzchniowe, ponieważ mogą one wejść w bezpośredni kontakt z odciekami ze składowisk stałych i płynnych odchodów zwierzęcych, szczególnie podczas opadów (Ahmed i in. 2012, Ferguson i in. 2012).

Duży wpływ na stopień zanieczyszczenia gleby i upraw wodą irygacyjną mają: źródło wody, sposoby nawadniania, a także rodzaj upraw i stosowanych zabiegów agrotechnicznych. Sposoby i miejsca gromadzenia wody oraz system jej transportu na pole też mają ogromne znaczenie, gdyż mogą tam przedostać się i rozwijać szkodliwe mikroorganizmy (Alegbeleye i in. 2018). Znacznie większe ryzyko skażenia wiąże się z nawadnianiem za pomocą zraszaczy niż z podlewaniem powierzchni gleby np. za pomocą systemu kroplującego lub z nawadnianiem podpowierzchniowym, które ograniczają kontakt nadziemnych, jadalnych części roślin z wodą irygacyjną (Pachepsky i in. 2011). Pora i termin nawadniania również mają duży wpływ na ewentualny stopień skażenia upraw. Stwierdzono np. zwiększone ryzyko kontaminacji roślin podlewanych nocą (Kisluk i Yaron 2012). Nie powinno się również podlewać roślin na krótko przed zbiorem, ponieważ bardziej prawdopodobny jest wtedy zbiór produktów zawierających żywe patogeny.

Dotkliwe susze w uprawach powodują, że w wielu przypadkach nawadnianie jest konieczne, aby uzyskać plon. Należy ograniczać ryzyko kontaminacji roślin poprzez stosowanie racjonalnych metod nawadniania wodą o dopuszczalnej jakości sanitarnej oraz stosować zabiegi agrotechniczne, dzięki którym zwiększa się dostępność wody dla roślin. Wyższa temperatura gleby sprzyja również rozwojowi patogenów.

Zmiany klimatyczne, które są przyczyną m.in. zmniejszenia częstotliwości i wielkości opadów, powodują w naszym kraju w ostatnich latach dotkliwe niedobory wody. Problematyczne staje się nawadnianie pól i utrzymanie wilgotności gleby na poziomie, który nie powoduje zahamowania wzrostu roślin. W takich sytuacjach proponowane jest gromadzenie wody opadowej, a także wtórne odzyskiwanie wody wcześniej użytkowanej, a nawet wody ze ścieków. Pewne możliwości istnieją, jeśli uprzednio taka woda zostanie poddana oczyszczeniu i odkażeniu. Jednak podlewanie tą wodą bez wcześniejszych zabiegów sanityzujących wiąże się z dużym ryzykiem, ponieważ występuje w niej duże zagęszczenie mikroorganizmów chorobotwórczych (Alegbeleye i in. 2018).

Ważnym czynnikiem w zachowaniu bezpieczeństwa żywności jest zdrowie i higiena pracowników zaangażowanych w produkcję rolną.

Mikroorganizmy chorobotwórcze, takie jak *Shigella* spp., *E. coli* O157:H7, wirus wywołujący żółtaczkę pokarmową typu A i norowirusy mogą być łatwo roznoszone drogą „oralno-fekalną" przez pracowników, którzy są nosicielami tych patogenów. Dlatego osoby, które mają objawy chorobowe (m.in. biegunkę, wymioty) nie powinny mieć kontaktu z żywnością podczas zbioru, przygotowywania produktów i ich sprzedaży. Ponadto w gospodarstwach rolnych konieczne jest utrzymywania czystości i porządku oraz dbanie o warunki higieniczne dla pracowników. Wymagania te zostały dokładnie określone w Kodeksie Dobrych Praktyk Rolniczych (2004).

3. PRZEŻYWALNOŚĆ PATOGENÓW W RÓŻNYCH ŚRODOWISKACH

Ponieważ mikroorganizmy chorobotwórcze rozwijają się głównie w przewodach pokarmowych zwierząt stałocieplnych, uważa się, że ich żywotność po przedostaniu się do środowiska takiego jak gleba czy woda, jest krótka. Okazało się jednak, że tak nie jest. Mikroorganizmy te mogą przeżyć i rozwijać się w tych warunkach przez długie miesiące. W związku z tym mogą być obecne w uprawach przez cały okres wegetacji, aż do zbioru, stwarzając ryzyko rozprzestrzeniania skażeń w produkcji żywności.

Mikroorganizmy chorobotwórcze dla człowieka są zdolne do przeżycia w glebie, wodzie i na roślinach.

Stwierdzono, że w glebie nawożonej obornikiem bakterie *E. coli* O157:H7 mogą zachować żywotność przez ponad dwieście dni, a bakterie *Salmonella* nawet trzysta dni (Nicholson i in. 2005, Fan i in. 2009). Z kolei w wodzie mogą przeżyć około dwóch miesięcy (Fan i in. 2009). Oznacza to, że w sprzyjających okolicznościach bakterie patogeniczne mogą utrzymywać się w warunkach polowych na tyle długo, aby stanowić źródło skażenia jadalnych części roślin.

Jeszcze dłużej patogeny mogą być żywotne w odchodach zwierząt, w oborniku i gnojowicy. Według danych Fan i in. (2009), *E. coli* może być wykrywana w oborniku nawet po 600 dniach, a w gnojowicy może przeżyć 365 dni, *Salmonella* może przeżyć w oborniku 261 dni, a w gnojowicy 114 dni. Z kolei według danych zgromadzonych przez Alegbeleye i in. (2018) *E. coli* może przeżyć w nawozach naturalnych ok. 130 dni, *Salmonella* spp. – ok. 180 dni, *Campylobacter* spp. – ok. 140 dni, a *Listeria* spp. – ok. 80 dni. Przeżywalność patogenów w oborniku i gnojowicy zależy w dużej mierze od składu chemicznego tych materiałów (np. zawartości amoniaku), pH, wilgotności (oborniki), a przede wszystkim od temperatury. Generalnie wzrost temperatury skraca żywotność patogenów. Dlatego kompostowanie, podczas którego następuje silny wzrost temperatury, jest dobrą metodą redukcji chorobotwórczych mikroorganizmów w nawozach naturalnych.

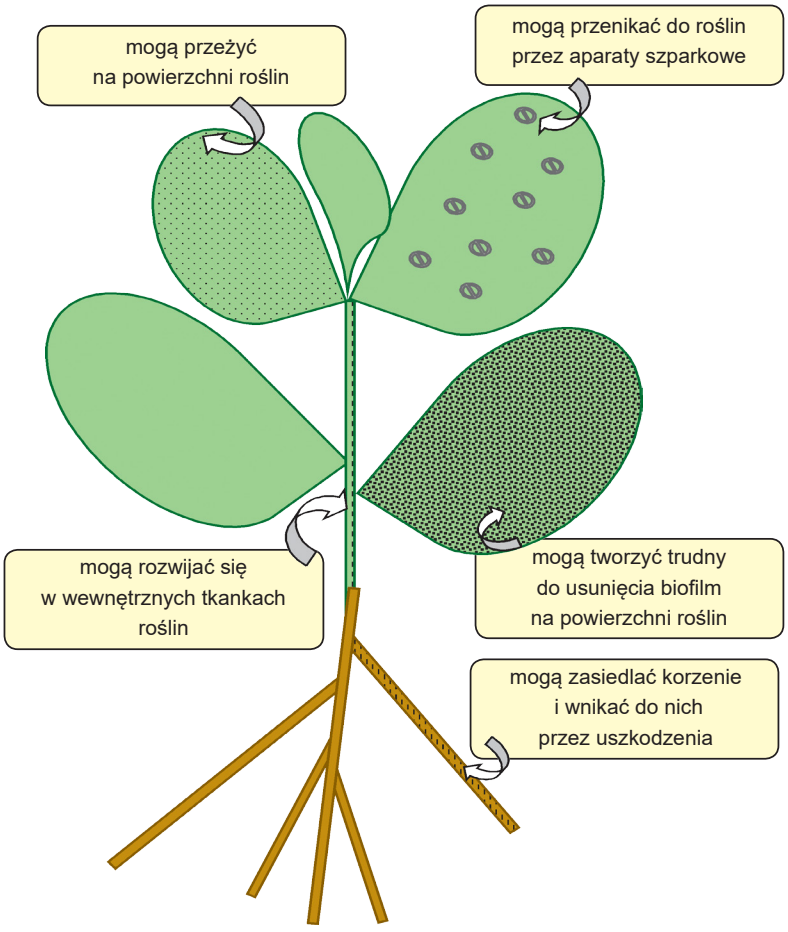
Z czasem populacja patogenów w składowanych odchodach zwierzęcych, a także skażonej glebie i wodzie ulega obniżeniu do poziomu niezagrażającego uprawom, o ile nie ma „świeżego" dopływu patogenicznych mikroorganizmów. Dlatego dłuższe składowanie obornika i gnojowicy przed zastosowaniem oraz wydłużenie czasu pomiędzy aplikacją nawozów naturalnych lub kompostów a zbiorem roślin, szczególnie przeznaczonych do bezpośredniej konsumpcji, daje szansę na zmniejszenie populacji patogenów. W Stanach Zjednoczonych, zgodnie z USDA (National Organic Program), zaleca się stosowanie nawozów naturalnych najwcześniej na 90 dni przed zbiorem roślin, których części jadalne nie mają bezpośredniego kontaktu z ziemią lub które mają krótki okres wegetacji oraz na 120 dni przed zbiorem roślin o dłuższym okresie wegetacji. W Kanadzie natomiast zaleca się okres od 12 do 15 miesięcy między zastosowaniem nawozów a zbiorem owoców i warzyw mających kontakt z glebą (Olaimat i Holley 2012).

Im większy kontakt mają części roślin ze skażoną glebą, tym większy stopień zanieczyszczenia. Najsilniej zanieczyszczone są warzywa korzeniowe i liściowe, najmniej owoce rosnące na drzewach. Analizując informacje dostępne w literaturze, można stwierdzić, że gatunkami roślin najbardziej narażonymi na skażenia i będącymi źródłem zatruć są: sałata i inne warzywa liściowe, np. szpinak, zioła, a także ogórki, pomidory, marchew i melony (Fan i in. 2009, Matthews 2014).

Mycie i odkażanie roślin tylko częściowo eliminuje mikroorganizmy.

Podczas mycia produktów roślinnych w wodzie usuwany jest brud, resztki pestycydów, wydzieliny uszkodzonych komórek, które mogą przyspieszać psucie produktu oraz tylko część mikroorganizmów. Mycie powoduje usunięcie głównie tych mikroorganizmów, które znajdują się na powierzchni rośliny. Jednak cechy morfologiczne roślin, takie jak: pokrycie powierzchni woskami, naturalne pęknięcia i nierówności, włoski czy mechaniczne uszkodzenia utrudniają usunięcie mikroorganizmów. Ponadto bakterie mogą tworzyć skupiska ściśle przylegające do powierzchni organów roślin zwane biofilmem, który jest trudny do usunięcia nawet przy użyciu środków odkażających (Mandrell 2009, Ryser i in. 2009).

Niektóre bakterie, w tym patogeniczne dla ludzi, mogą przenikać do wnętrza roślin, np. z nasion, poprzez korzenie, aparaty szparkowe czy uszkodzenia (rys. 3). Przenikaniu bakterii do wnętrza roślin sprzyjają warunki stresowe, takie jak susza, ekstremalne temperatury, intensywne żerowanie szkodników lub inne czynniki środowiskowe osłabiające wzrost i odporność roślin. Bakterie chorobotwórcze dla ludzi i zwierząt nie tylko mogą przenikać do wnętrza roślin, ale mogą się w nich przemieszczać i przetrwać aż do zbiorów. Bakterie *E. coli* i *Salmonella* wykrywano w tkankach owoców (jabłka, melony, pomarańcze), w pomidorach, kiełkach i warzywach liściowych (Ryser i in. 2009). Teplitski i in. (2011) udowodnili, że uszkodzenia powodowane przez patogeny roślin przyczyniają się do zwiększenia wnikania bakterii chorobotwórczych *Salmonella* i *E. coli* O157:H7 do tkanek roślin. Bakterie patogeniczne, które zasiedlą wewnętrzne tkanki roślin są trudne do eliminacji. Dlatego tak ważne jest zachowanie właściwych warunków sanitarnych nie tylko po zbiorach, ale także podczas uprawy roślin.



Rys. 3. Mikroorganizmy chorobotwórcze na/w roślinach (opracowanie własne)

4. JAK OGRANICZAĆ RYZYKO SKAŻEŃ MIKROBIOLOGICZNYCH

Liczbę patogenów w odchodach można zredukować dzięki składowaniu ich przez co najmniej kilka miesięcy przed użyciem. Szybciej ten efekt można uzyskać, utrzymując wyższą temperaturę (ok. 37°C). Stwierdzono, że aplikacja obornika, które „dojrzewały" co najmniej przez 6 miesięcy przed użyciem czterokrotnie zmniejszała ryzyko skażenia produktów roślinnych (Mukherjee i in. 2007).

Bardzo dobrym sposobem ograniczenia ryzyka skażeń mikrobiologicznych związanych z zastosowaniem oborników jest ich kompostowanie. Ze względów sanitarnych podczas kompostowania obornika należy:

- usytuować kompost z dala od ujęć wody pitnej oraz stosowanej do podlewania;
- zabezpieczyć to miejsce, tak aby „wycieki" z kompostu nie zanieczyszczały wód gruntowych;
- przygotować pryzmę kompostową o objętości zapewniającej uzyskanie i utrzymanie wysokiej temperatury podczas aktywnej fazy termicznej;
- utrzymać wysoką temperaturę w kompostowanym materiale (60–70°C);
- natleniać kompostowaną masę, co sprzyja wznowieniu fazy termicznej i intensyfikuje rozkład, a także zmniejsza ryzyko przeżycia organizmów chorobotwórczych.

Niekompletny lub niewłaściwie przeprowadzony proces kompostowania może prowadzić do skażenia gleby. Najczęściej popełniane błędy podczas kompostowania obornika to:

- zbyt niska temperatura w pryzmie lub nie do końca przeprowadzony proces termiczny, co powoduje, że mikroorganizmy chorobotwórcze mogą przeżyć, a kompostowany obornik może stanowić źródło skażenia gleby i roślin;
- zbyt mała pryzma, co może powodować powolny wzrost temperatury, która finalnie jest za niska, aby wyeliminować szkodliwe organizmy;
- dodawanie świeżego obornika do przekompostowanego, co powoduje jego wtórne skażenie.

W przypadku gnojowicy higienizację można przeprowadzić metodami biologicznymi, fizycznymi lub chemicznymi (Skowron i in. 2015). Najprostszą metodą uzdatniania gnojowicy jest jej składowanie. Metoda ta wykorzystuje brak zdolności większości bakterii patogennych i pasożytów do namnażania poza organizmem gospodarza. Podlegają one naturalnej eliminacji podczas składowania przez kilka, do kilkudziesięciu tygodni. Niska temperatura wydłuża ten okres. Kolejną metodą biologiczną jest fermentacja metanowa, podczas której podwyższa się temperatura gnojowicy. Podobnie działa napowietrzanie, w wyniku którego następuje utlenianie substancji organicznych i wzrost temperatury. Najczęściej stosowana metoda chemiczna higienizacji gnojowicy to wapnowanie (tlenek lub wodorotlenek wapnia). W gnojowicy wywoływana jest silna reakcja egzotermiczna prowadząca do wzrostu temperatury do 55–60°C. Ponadto wapnowanie powoduje gwałtowne podwyższe-

nie odczynu. W wyniku tego procesu możliwa jest eliminacja 95–100% patogenów. Wapnowana gnojowica może być wykorzystywana w rolnictwie do celów nawozowych i wpływa szczególnie korzystnie na stan gleb kwaśnych. Metoda termiczna – pasteryzacja, polegająca na podgrzewaniu gnojowicy w temperaturze ok. 70°C przez co najmniej godzinę, wymaga specjalnej aparatury i jest stosowana tylko w sytuacjach podwyższonego zagrożenia epidemiologicznego.

Sposoby zapobiegania skażeniom wody można znaleźć w Kodeksie Dobrej Praktyki Rolniczej (2004).

Aby zapobiegać skażeniom mikrobiologicznym wody, należy przestrzegać poniższych zasad:

- nawozy naturalne płynne i stałe przechowywać w szczelnych zbiornikach lub na płytach usytuowanych w odpowiedniej odległości od studni i innych źródeł zaopatrzenia w wodę;
- pojemność płyty gnojowej lub zbiorników na płynne odchody zwierzęce powinna zapewniać możliwość gromadzenia i przechowywania tych materiałów przez okres co najmniej 6 miesięcy;
- nie należy przechowywać obornika w pryzmach polowych, gdyż prowadzi to do zanieczyszczenia wód gruntowych;
- ciała padłych zwierząt nie mogą być zakopywane na terenie gospodarstwa lub w pryzmach obornika czy kompostu;
- zabronione jest odprowadzanie ciekłych nieczystości i ścieków z gospodarstw bezpośrednio do wód powierzchniowych oraz rozlewanie ich na pola;
- nie wolno stosować nawozów naturalnych na terenach zalewanych wodą;
- nawozów naturalnych nie należy stosować w odległości mniejszej niż 20 m od stref ochronnych źródeł i ujęć wody, brzegu zbiorników oraz cieków wodnych.

Stosowanie odpowiednich zabiegów agrotechnicznych może zmniejszyć ryzyko skażeń mikrobiologicznych w uprawach.

Jedną z metod zmniejszania skażeń mikrobiologicznych może być dobór odmian roślin o zwiększonej odporności na patogeny oraz o mniejszym zapotrzebowaniu na wodę i bardziej odpornych na suszę, co ograniczy konieczność podlewania i kontakt z wodą. Korzystne mogą być również zabiegi wspomagające zatrzymywanie wody w glebie (uprawa roślin ozimych, ściółkowanie gleby, zatrzymywanie resztek pożniwnych w glebie, stosowanie międzyplonów), racjonalne nawożenie potasem regulujące gospodarkę wodną roślin, a także wszelkie zabiegi prowadzące do poprawy struktury i właściwości retencyjnych gleby. Dbałość o jakość i żyzność gleby jest istotnym czynnikiem wpływającym na jej aktywność biologiczną. Zwiększenie liczebności i aktywności mikroorganizmów korzystnych dla roślin w ogólnej puli mikroorganizmów glebowych lub endofitycznych (zasiedlających tkanki roślin) po-

woduje istotne ograniczenie populacji organizmów patogennych dla ludzi (Mendes i in. 2013, Nithya i Babu 2017).

Dbałość o utrzymanie porządku i odpowiednich warunków sanitarnych w gospodarstwie.

Dobre Praktyki Rolnicze (Kuś i Jończyk 2005) określają poniższe wymagania w zakresie utrzymywania czystości i porządku w gospodarstwie rolnym:

- obecność zabezpieczonych miejsc lub pojemników do gromadzenia odpadów komunalnych wytworzonych na terenie gospodarstwa;
- zapewnienie pracownikom dostępu do czystej toalety oraz do czystej wody do mycia rąk zarówno na terenie gospodarstwa, jak i w pobliżu plantacji;
- toalety powinny być zaprojektowane w sposób zapewniający higieniczne usuwanie odchodów i zanieczyszczeń oraz gwarantujące brak przecieków do wód gruntowych, powierzchniowych;
- toalety powinny być regularnie myte i dezynfekowane;
- pracownicy powinni myć ręce przed przystąpieniem do pracy w polu i po korzystaniu z toalety;
- sprzęt używany do zbioru, transportu, przechowywania i przetwórstwa owoców i warzyw powinien być myty i dezynfekowany;
- uprawy i przechowywane produkty roślinne powinny być zabezpieczone przed zwierzętami gospodarskimi, insektami, gryzoniami i ptakami.

5. PROBLEM ODPORNOŚCI NA ANTYBIOTYKI BAKTERII PATOGENICZNYCH Z PRODUKCJI ZWIERZĘCEJ

Stosowanie antybiotyków na szeroką skalę w chowie zwierząt spowodowało, że w ich odchodach pojawiają się szczepy bakterii patogenicznych odpornych na jeden lub więcej antybiotyków. W odchodach wydalane są również pozostałości antybiotyków, które wraz z kałem i moczem przedostają się do środowiska. Szacuje się, że może tam trafić nawet 58% podanej dawki antybiotyku (Xie i in. 2018). Wśród zwierząt gospodarskich najwięcej antybiotyków podaje się świniom, dlatego najwięcej bakterii odpornych na ich działanie wykrywa się w oborniku świńskim, ale także w odchodach z ferm drobiu (Chajęcka-Wierzchowska i in. 2017, Xie i in. 2018). W wyniku silnej selekcji naturalnej pojawiają się szczepy odporne na antybiotyki. W tkankach zwierząt lub w wodzie i glebie, gdzie przedostały się z odchodami, stężenie antybiotyków często występuje w stopniu subinhibicyjnym, czyli niższym niż toksyczne. Taka koncentracja antybiotyków hamuje wzrost drobnoustrojów, ale wzmaga mutacje, w wyniku których rozwijają się bakterie odporne. Odporność ta może być nabywana i przekazywana na drodze horyzontalnego transferu genów. To zjawisko przyczynia się do rozprzestrzeniania antybiotykoodporności również

wśród szczepów środowiskowych (Zabłotni i Jaworski 2014). Niektóre szczepy charakteryzują się odpornością na więcej niż jeden antybiotyk.

Odporne na antybiotyki bakterie mogą trafić do środowiska rolniczego wraz z odchodami w nawozach naturalnych, w wyniku horyzontalnego transferu genów (bakterie z odchodów mogą przekazywać odporność bakteriom żyjącym w glebie lub wodzie). Antybiotyki obecne w nawozach naturalnych mogą powodować presję selekcyjną w glebie w kierunku rozwijania się szczepów bakterii odpornych.

Zjawisko antybiotykoodporności dotyczy często powszechnych w środowisku bakterii z rodzaju *Enterococcus* (Chajęcka-Wierzchowska i in. 2017). Takie bakterie z gleby lub wody mogą przedostać się na rośliny i być powodem skażenia żywności, głównie świeżej i gotowej do spożycia. Ze względu na duże zdolności adaptacyjne, bakterie te wprowadzane z pożywieniem są w stanie kolonizować przewód pokarmowy. Problemem mogą być tu mikroorganizmy odporne na antybiotyki stosowane w leczeniu ludzi, gdyż w rezultacie może to wpłynąć na zmniejszenie skuteczności terapii antybiotykowych (Chajęcka-Wierzchowska i in. 2017).

Rozprzestrzenianie w środowisku rolniczym i skażenie żywności bakteriami opornymi na antybiotyki stosowane również w leczeniu ludzi może wpłynąć na zmniejszenie skuteczności terapii antybiotykowych.

6. PODSUMOWANIE

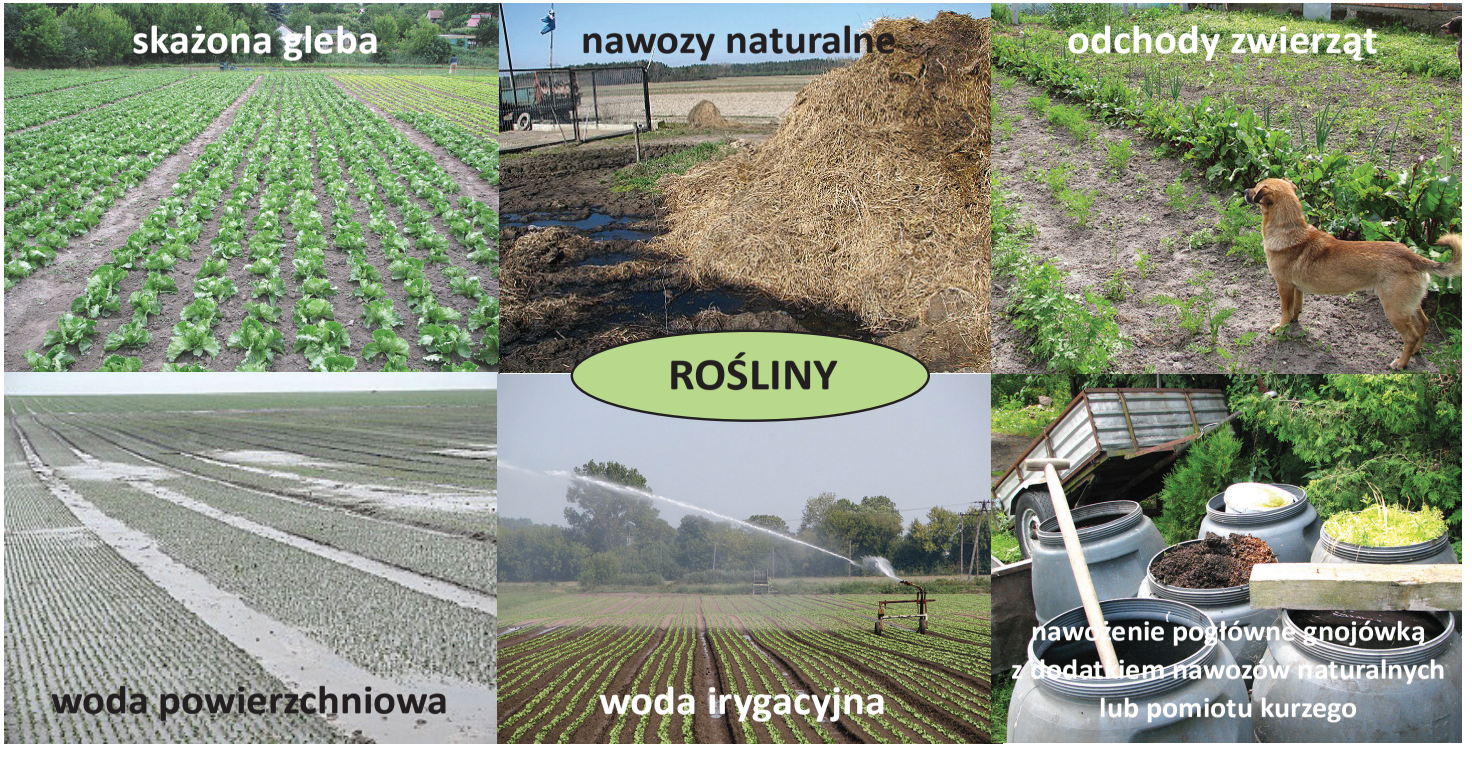
Znaczący wzrost spożycia warzyw i owoców świeżych lub mało przetworzonych, centralizacja produkcji minimalnie przetworzonej żywności w dużych zakładach, a także globalizacja handlu tymi produktami zwiększa ryzyko występowania skażeń chorobotwórczymi bakteriami. Mikroorganizmy te mogą kolonizować zewnętrzną powierzchnię roślin, ale mogą również wnikać wewnątrz tkanek i są trudne do usunięcia za pomocą mycia, a nawet środków odkażających. Niewielka część skażonego materiału może być powodem zanieczyszczenia całej partii produktu. Aby ograniczać ryzyko kontaminacji żywności, należy dbać o jakość sanitarną roślin już na etapie produkcji podstawowej, czyli na etapie ich uprawy, a także podczas ich przygotowywania do sprzedaży i dystrybucji. Przede wszystkim konieczne jest zachowanie higieny w gospodarstwach i zapobieganie przedostawaniu się chorobotwórczych mikroorganizmów do środowisk, które mogą stanowić źródło skażenia roślin. Takimi źródłami w uprawach są głównie woda, gleba i skażone nawozy naturalne. Trzeba zdawać sobie sprawę, że chorobotwórcze dla ludzi i zwierząt mikroorganizmy, po przedostaniu się do środowiska, mogą zaadaptować się do życia poza organizmem zwierzęcym i przetrwać nawet przez kilkanaście miesięcy. Dlatego ważne jest, żeby nie dopuszczać do skażenia gleby i wody przez odchody zwierząt, a nawozy naturalne poddawać zabiegom sanitarnym (np. składowanie i kompostowanie) i stosować zgodnie z zaleceniami w Kodeksie Dobrej Praktyki Rolniczej.

Literatura:

1. Ahmed W., Richardson K., Sidhu J.P.S., Toze S.: *Escherichia coli* and *Enterococcus* spp. in rainwater tank samples: comparison of culture-based methods and 23S rRNA gene quantitative PCR assays. Environ. Sci. Technol., 2012, **46**: 11370-11376.
2. Alegbeleye O.O., Singleton I., Sant'Ana A.S.: Sources and contamination routes of microbial pathogens to fresh produce during field cultivation: a review. Food Microbiol., 2018, **73**: 177-208.
3. Bai Z. et al.: Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. Agr. Ecosyst. Environ., 2018, **265**: 1-7.
4. Callejón R.M., Rodríguez-Naranjo M.I., Ubeda C., Hornedo-Ortega R., Garcia-Parilla M.C., Troncoso A.M.: Reported foodborne outbreaks due to fresh produce in the United States and European Union: trends and causes. Foodb. Pathog. Dis., 2015, **12(1)**: 32-38.
5. Cavicchioli R. et al.: Scientists' warnings to humanity: microorganisms and climate change. Nat. Rev. Microbiol., 2019, **17**: 569-589.
6. Chajęcka-Wierzchowska W., Zadernowska A., Łaniewska-Trokenheim Ł.: Odporność na antybiotyki bakterii z rodzaju *Enterococcus* występujących w żywności. Kosmos, 2017, **66(1)**: 67-79.
7. Dz.U. nr 80, poz. 479, 2008: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 16 kwietnia 2008 r. w sprawie szczegółowego stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania.
8. Dz.U. nr 119, poz. 765, 2008: Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu.
9. Fan X., Niemira B.A., Doona Ch. J., Feeherry F.E., Garvani R.B. (eds): Microbial safety of fresh produce. Willey-Blackwell, 2009, pp. 446.
10. Ferguson A.S. et al.: Comparison of fecal indicators with pathogenic bacteria and rotavirus in groundwater. Sci. Total Environ., 2012, **431**: 314-322.
11. Kisluk G., Yaron S.: Presence and persistence of *Salmonella enterica* serotype Typhimurium in the phyllosphere and rhizosphere of spray-irrigated parsley. Appl. Environ. Microb., 2012, **78(11)**: 4030-4036.
12. Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Warszawa 2004, ss. 98.
13. Kuś J., Jończyk K.: Dobra Praktyka Rolnicza w gospodarstwie rolnym. Materiały szkoleniowe. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Radomiu, 2005, s. 42.
14. Mandrell, R.E.: Enteric human pathogens associated with fresh produce: sources, transport, and ecology. In: Microbial safety of fresh produce, X. Fan, B.A. Niemira, C.J. Doona, F.E. Feeherry, R.B. Gravani (eds). Wiley-Blackwell Publisher, 2009, pp. 5-41.
15. Matthews K.R.: Leafy vegetables. In: The produce contamination problem. Causes and solutions, G.M. Sapers, E.B. Solomon, K.R. Matthews (eds), 2014, pp. 187-206.
16. Mendes R., Garbeva P., Raaijmakers J.M.: The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. FEMS Microbiol. Rev., 2013, **37**: 634-663.
17. Mukherjee A., Speh D., Diez-Gonzalez F.: Association of farm management practices with risk of *Escherichia coli* contamination in pre-harvest produce grown in Minnesota and Wisconsin. Int. J. Food Microbiol., 2007, **120**: 296-302.
18. Nicholson F.A., Groves S.J., Chambers B.J.: Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. Bioresource Technol., 2005, **96**: 135-143.

19. Nithya A., Babu S.: Prevalence of plant beneficial and human pathogenic bacteria isolated from salad vegetables in India. BMC Microbiol., 2017, **17**:64.
20. Olaimat A.N., Holley R.A.: Factors influenced the microbial safety of fresh produce: a review. Food Microbiol., 2017, **32(1)**: 1-19.
21. Pachepsky Y., Shelton D.R., McLain J.E., Patel J., Mandrell R.E.: Irrigation waters as a source of pathogenic microorganisms in produce: a review. Adv. Agron., 2011, **113(7)**: 75-141.
22. Rajwar A., Srivastva P., Sahgal M.: Microbiology of fresh produce: route of contamination, detection methods, and remedy. Crit. Rev. Food Sci., 2016, **56**: 2383-2390.
23. Ryser E.T., Hao J., Yan Z.: Internalization of pathogens in produce. In: Microbial safety of fresh produce, X. Fan, B.A. Niemira, C.J. Doona, F.E. Feeherry, R.B. Gravani (eds.). Wiley-Blackwell Publisher, 2009, pp. 55-80.
24. Skowron K., Bauza-Kaszewska J., Kaczmarek A., Budzyńska A., Gospodarek E.: Mikrobiologiczne aspekty gospodarowania gnojowicą. Post. Mikrobiol., 2015, **54(3)**: 235-249.
25. Szczech M., Kowalska B., Smolińska U., Kosson R., Szwejda-Grzybowska J., Tuszyńska M.: Monitorowanie skażeń mikrobiologicznych i mikotoksycznych warzyw produkowanych w gospodarstwach ekologicznych i konwencjonalnych. W: Zdrowa żywność: mikrobiologiczne bezpieczeństwo w produkcji rolniczej, M. Szczech, U. Smolińska, B. Kowalska, R. Kosson, J. Szwejga-Grzybowska, M. Tuszyńska (red.). Skierniewice 2014, ss. 5-13.
26. Szczech M., Kowalska B., Smolińska U., Maciorowski R., Oskiera M., Michalska A.: Microbial quality of organic and conventional vegetables from Polish farms. Internat. J. Food Microbiol., 2018, **286**: 155-161.
27. Teplitski M., Warriner K., Bartz J., Schneider K.R.: Untangling metabolic and communication networks: interactions of enterics with phytobacteria and their implications in produce safety. Trends Microbiol., 2011, **19**: 121-127.
28. Tombini Decol L., Sopeña Casarin L., Hessel C.T., Fösch Batista A.C., Allende A., Tondo E.C.: Microbial quality of irrigation water used in leafy green production in southern Brazil and its relationship with produce safety. Food Microbiol., 2017, **65**: 105-113.
29. Trivedi P., Delgado-Baquerizo M., Anderson I.C., Singh B.K.: Response of soil properties and microbial communities to agriculture: implications for primary productivity and soil health indicators. Front. Plant Sci., 2016, **7**: 1-990.
30. Tuomisto H.L., Scheelbeek P.F.D., Chalabi Z., Green R., Smith R.D., Haines A., Dangour A.D.: Effects of environmental change on agriculture, nutrition and health: a framework with a focus on fruits and vegetables. Wellcome Open Research, 2017, pp. 31.
31. Xie W.Y., Shen Q., Zhao F.J.: Antibiotics and antibiotic resistance from animal manures to soil: a review. Eur. J. Soil Sci., 2018, **69**: 181-195.
32. Zabłotni A., Jaworski A.: Źródła antybiotyków w środowiskach naturalnych i ich rola biologiczna. Postępy Hig. Med. Dośw., 2014, **68**: 1040-1049.
33. Zhen Z., Liu H., Wang N., Guo L. et al.: Effects of manure compost application on soil microbial community diversity and soil microenvironments in a temperate cropland in China. PLoS One, 2014, **9(10)**: 1-12.

SKĄD BIORĄ SIĘ MIKROORGANIZMY CHOROBOTWÓRCZE NA ROLINACH



GATUNKI ROŚLIN SZCZEGÓLNIE NARAŻONE NA SKAŻENIA MIKROBIOLOGICZNE

STRESZCZENIE

OCHRONA BIORÓŻNORODNOŚCI GLEBY WARUNKIEM ZDROWIA OBECNYCH I PRZYSZŁYCH POKOLEŃ

Celem niniejszego opracowania jest edukacja w zakresie ochrony zasobów naturalnych, jakim są gleby użytkowane rolniczo. Prowadzona przez wiele lat intensywna gospodarka rolna przyniosła cały szereg negatywnych skutków dla jakości gleb uprawnych w Polsce. Należy podjąć działania prowadzące do ich poprawy oraz zintensyfikować ochronę zasobów glebowych.

Prezentowana monografia przedstawia aktualną sytuację dotyczącą stanu gleb w Polsce, podaje przyczyny pogarszania ich żyzności oraz skutki degradacji. Szczególną uwagę zwrócono na znaczenie bioróżnorodności mikroorganizmów glebowych oraz ich udział w poprawie jakości i żyzności gleb. Ukazano rolę mikroorganizmów w zachowaniu właściwej struktury gleby, w obiegu pierwiastków, tworzeniu próchnicy, produkcji substancji stymulujących wzrost roślin oraz w detoksykacji i bioremediacji szkodliwych substancji. Ponadto przedstawiono wzajemne oddziaływania między mikroorganizmami a roślinami, powszechnie występujące w środowisku glebowym i istotnie wpływające na zdrowotność roślin. Dodatkowo opisane zostały mikroorganizmy wchodzące w skład biopreparatów, wykorzystywanych w ochronie biologicznej roślin.

Kolejnym problemem jest wykorzystanie materiałów odpadowych zalegających na polach uprawnych. Spośród wielu kierunków przetwarzania odpadów szczególne miejsce mają technologie ukierunkowane na przyrodnicze ich wykorzystanie (np. poprzez kompostowanie), głównie na cele nawozowe i poprawę właściwości gleb użytkowanych rolniczo.

W monografii ukazano także negatywną rolę niektórych mikroorganizmów w środowisku oraz przedstawiono metody walki z nimi. Zwrócono uwagę na mikroorganizmy zanieczyszczające produkty rolne oraz zaprezentowano działania profilaktyczne pomagające uniknąć takich sytuacji. Ponadto przedstawiono zagrożenia ze strony mikroorganizmów jako patogenów roślinnych oraz opisano metody ochrony środowiska glebowego przed tymi patogenami.

Ważnym aspektem monografii jest jej wydźwięk praktyczny. Zawarto bezpośrednie wskazówki prowadzące do utrzymania odpowiedniej bioróżnorodności mikrobiologicznej gleby, wysokiej jej aktywności oraz do poprawy żyzności i produkcyjności środowiska glebowego.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu finansowanego przez Unię Europejską z Funduszu Spójności w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014-2020 oraz dofinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Tytuł projektu: „Ochrona bioróżnorodności gleby warunkiem zdrowia obecnych i przyszłych pokoleń", Nr POIS.02.04.00-00-0082/16.

SUMMARY

PROTECTION OF SOIL BIODIVERSITY AS A CONDITION OF HEALTH OF PRESENT AND FUTURE GENERATIONS

The aim of this monograph is to increase of knowledge about the protection of natural resources, which are soils used for agricultural purposes. Intensive farming conducted for many years has brought many negative effects on the quality of cultivated soils in Poland. It should be taken some activitis to improve them and to intensify the protection of soil resources.

The monograph presents the condition of soils in Poland and describes reasons for the deterioration of their fertility and effects of degradation. Special attention is paid to the importance of biodiversity of soil microorganisms and their contribution to the improvement of soil quality and fertility. The role of microorganisms in the creation of a proper soil structure, in the circulation of elements, humus formation, production of substances stimulating plant growth, detoxification and bioremediation of harmful compounds is presented. Furthermore are presented interactions between microorganisms and plants commonly occurring in the soil environment and significantly influencing plant health. Additionally, microorganisms included in the biopreparations and application of them in biological protection of plants are described.

The other problem is the use of waste materials deposited on fields. From many directions of waste processing, technologies focused on natural use of waste (e.g. composting), mainly on fertilizer purposes and improvement of soil properties used for agricultural purposes should have a special attention.

Also the monograph shows the negative role of some microorganisms for environment and methods of their control. The attention is paid to microorganisms contaminating agricultural products and showed the preventive actions leading to the avoidance of such situations. Moreover, problems with soil borne plant pathogens are discussed and the methods of soil environment protection against these pathogens are presented.

An important aspect of the monograph is its practical relevance. Direct guidelines to help the maintenance of high activity and microbiological biodiversity of soil and the improvement of fertility and productivity of the soil environment are presented.

The monograph was completed as a result of the project funded by the European Union from the Cohesion Fund under the European Funds Infrastructure and Environment 2014–2020, and was funded by the National Fund for Environmental Protection and Water Management. Project title: Protection of soil biodiversity as a condition for the health of present and future generations, No. POIS. 02.04.00-00-0082/16.