

Jan Kucharski, Jadwiga Wyszowska

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

ODDZIAŁYWANIE ROLNICTWA
NA WŁAŚCIWOŚCI MIKROBIOLOGICZNE GLEB

Wstęp

Mikrobiologiczne właściwości gleb charakteryzowane są wieloma parametrami. Zaliczyć do nich można skład gatunkowy mikroorganizmów, ich liczebność, wielkość biomasy wyrażoną ilością węgla i azotu mikrobiologicznego, intensywność procesów oksydacyjno-redukcyjnych, w tym procesów: amonifikacji, nityfikacji i denityfikacji, aktywność enzymów odpowiedzialnych za transformację węgla, azotu, fosforu i siarki. Jako czynniki determinujące mikrobiologiczne właściwości gleb najczęściej wymienia się: skład granulometryczny (33, 43), zawartość organicznych związków węgla (15, 39, 47) i azotu (39), pH (5, 45, 46), wilgotność (14), temperaturę (16), zasobność w składniki odżywcze oraz stan zanieczyszczenia związkami mineralnymi i organicznymi, np. metalami ciężkimi lub węglowodorami (40, 43). Właściwości biologiczne są zatem powiązane z właściwościami fizycznymi i chemicznymi gleb (30). Przy czym są mniej od nich trwałe i ulegają zmienności nie tylko sezonowej w okresie roku kalendarzowego, ale także zmieniają się w czasie wegetacji roślin (39, 41, 42, 47). Stąd wynikają trudności z prawidłową interpretacją wyników oznaczeń cech mikrobiologicznych, szczególnie wtedy, gdy liczba oznaczeń w okresie wegetacji roślin jest zbyt mała. Właściwości mikrobiologiczne mogą być także, w różnym stopniu, kształtowane sposobem użytkowania gleby (21), gatunkiem uprawianej rośliny (36, 37, 39) i jej fazą rozwojową (47, 53).

Mnogość czynników decydujących o mikrobiologicznych właściwościach gleb skłania do postawienia pytania – w jakim zakresie może je kształtować rolnictwo?

Właściwości mikrobiologiczne gleb a rolnictwo

Z wielu badań (3, 10, 20, 25, 26, 33, 38, 53) wynika, że niektóre parametry składające się na właściwości mikrobiologiczne gleb mogą być modyfikowane zarówno przez bezpośrednie oddziaływanie poszczególnych zabiegów agrotechnicznych na aktywność drobnoustrojów, jak i pośrednio poprzez zmianę właściwości fizycznych i chemicznych gleb. Takie zabiegi, jak: nawożenie, kompleksowa ochrona roślin, następstwo roślin, mechaniczna uprawa gleby mogą w różnym stopniu determinować prawi-

dłowy metabolizm gleby. Te zabiegi, które przyczyniają się do poprawy zasobności gleb w materię organiczną, np. nawożenie gnojowicą i obornikiem (tab. 1, 2) oraz słomą (tab. 3-5) w zdecydowanej większości przypadków poprawiają aktywność enzymów i zwiększają liczebność drobnoustrojów. Przy czym silniej działają w doświadczeniach wazonowych (15, 39) niż wykonanych w warunkach polowych (47). Jednak według *Carefoot i Janzen* (4) efektywność produkcyjna nawożenia słomą jest niewielka.

Nie zawsze zwiększenie ilości materii organicznej może prowadzić do korzystnych zmian we właściwościach biologicznych gleby. Przykładem może być negatywne oddziaływanie niektórych osadów ściekowych użytych do nawożenia (47). W zależności od ich pochodzenia mogą być one źródłem nie tylko składników pokarmowych, ale także źródłem metali ciężkich, WWA i PCB, a to przekłada się na poziom aktywności

Tabela 1

Aktywność enzymów w glebie nawożonej gnojowicą i obornikiem
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Nawożenie	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kontrola	5,90a	0,97c	0,31a	0,10a
Gnojowica	7,07b	0,94b	0,37b	0,10a
Obornik	7,59c	0,89a	0,40c	0,11b

Wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie
Źródło: Kucharski, 1992 (15).

Tabela 2

Liczebność drobnoustrojów w glebie nawożonej gnojowicą i obornikiem ($\text{jtk} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby)

Nawożenie	Bakterie (B) $\cdot 10^9$	Promieniowce (P) $\cdot 10^9$	Grzyby (G) $\cdot 10^5$	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^4$
Kontrola	20,50a	9,80a	70,10a	0,43a
Gnojowica	29,80b	11,80b	66,80a	0,62b
Obornik	27,50b	11,90b	86,80b	0,45a

Źródło: Kucharski, 1992 (15).

Tabela 3

Aktywność enzymów w glebie nawożonej słomą (μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Nawożenie	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kontrola	4,71a	0,48a	1,91a	0,96a
Słoma	7,99b	0,79b	2,33b	1,63b

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Tabela 4

Liczebność drobnoustrojów w glebie nawożonej słomą (jtk · kg⁻¹ s.m. gleby)

Nawożenie	Bakterie (B) · 10 ⁹	Promieniowce (P) · 10 ⁹	Grzyby (G) · 10 ⁷	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
Kontrola	12,05a	8,24a	1,00a	20,29b
Słoma	12,51a	12,87b	4,21b	6,03a

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Tabela 5

Aktywność enzymów w glebie spod pszenicy ozimej w zależności od rodzaju nawożenia organicznego (μmol lub mmol produktu · kg⁻¹ s.m. gleby · h⁻¹)

Rodzaj nawożenia organicznego	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH ₄ ⁺	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kontrola	15,27a	1,38b	2,22b	1,46a
Słoma	16,04b	1,38b	2,18a	1,47a
Słoma + wyłoki	15,14a	1,28a	2,39c	1,45a

Źródło: Wyszowska i in., 2009 (47).

niektórych enzymów glebowych. Badania własne (tab. 6) wskazują, że surowe osady ściekowe przede wszystkim hamują aktywność dehydrogenaz. Na pięć przetestowanych osadów aż cztery hamowało aktywność dehydrogenazy, a tylko jeden ureazę i żaden nie zmniejszał aktywności fosfataz, a wręcz przeciwnie – na fosfatazy, wprawdzie w różnym stopniu, osady ściekowe działały stymulująco.

Większość osadów wpływała także korzystnie na rozwój drobnoustrojów i wzajemne proporcje między poszczególnymi grupami mikroorganizmów (tab. 7). Stymu-

Tabela 6

Aktywność enzymów w glebie nawożonej osadami ściekowymi (μmol lub mmol produktu · kg⁻¹ s.m. gleby · h⁻¹)

Pochodzenie osadu	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH ₄ ⁺	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kontrola	4,40d	1,77b	1,15a	0,77a
Biskupiec	1,62a	1,80bc	1,75d	1,26d
Lidzbark	11,19e	3,71f	1,63c	1,80g
Olsztyn	4,47d	2,44e	1,61c	1,44f
Gdańsk	3,48c	2,14d	1,53b	1,35e
Katowice	3,46c	1,88c	2,03e	1,11c
Warszawa	2,20b	1,42a	1,46b	0,96b

Źródło: Kucharski i in., 2000 (22).

lowały one namnażanie bakterii niezależnie od źródła pochodzenia. Prawie wszystkie osady działały pozytywnie na promieniowce, a tylko niektóre na grzyby.

Przykładem niejednoznacznego oddziaływania zwiększonej ilości materii organicznej na mikrobiologiczne właściwości gleby jest reakcja zarówno drobnoustrojów, jak i enzymów na zanieczyszczenie gleby substancjami ropopochodnymi (40, 43). Zanieczyszczenie gleby benzyną wyraźnie hamuje aktywność enzymów (rys. 1), a olejem napędowym stymuluje (rys. 2).

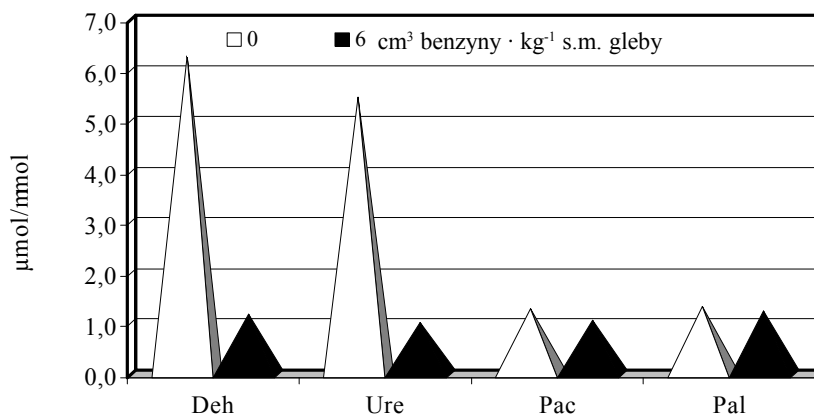
Mniejszy wpływ na drobnoustroje i enzymy glebowe wywiera nawożenie mineralne (20) niż organiczne, chociaż w niektórych doświadczeniach wazonowych (39) można

Tabela 7

Liczebność drobnoustrojów w zależności od nawożenia osadami ściekowymi
(jtk · kg⁻¹ s.m. gleby)

Pochodzenie osadu	Bakterie (B) · 10 ⁹	Promieniowce (P) · 10 ⁹	Grzyby (G) · 10 ⁶	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^3$
Kontrola	19,38a	15,67b	5,19a	6,76c
Biskupiec	45,95e	23,67d	33,40d	2,08a
Lidzbark	37,29d	27,43e	4,44a	14,57e
Olsztyn	47,29e	23,57d	8,72c	8,13d
Gdańsk	23,86b	13,24a	5,43a	6,83c
Katowice	63,86f	32,47f	6,69b	14,41e
Warszawa	30,57c	19,81c	8,47c	5,95b

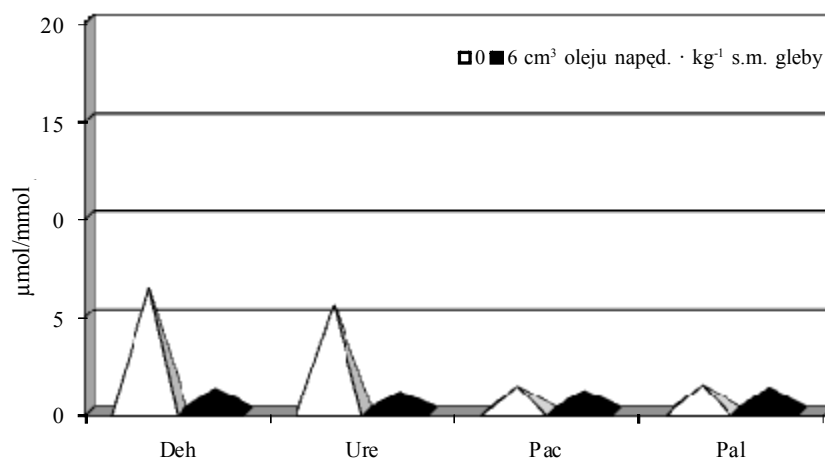
Źródło: Wyszowska i in., 2004 (48).



Rys. 1. Aktywność enzymów w glebie zanieczyszczonej benzyną
(μmol lub mmol produktu · kg⁻¹ s.m. gleby · h⁻¹).

Deh – dehydrogenazy (μmol TFF), Ure – ureaza (mmol N-NH₄⁺), Pac – fosfataza kwaśna (mmol PNP), Pal – fosfataza alkaliczna (mmol PNP)

Źródło: Wyszowska, Kucharski, 2000 (40).

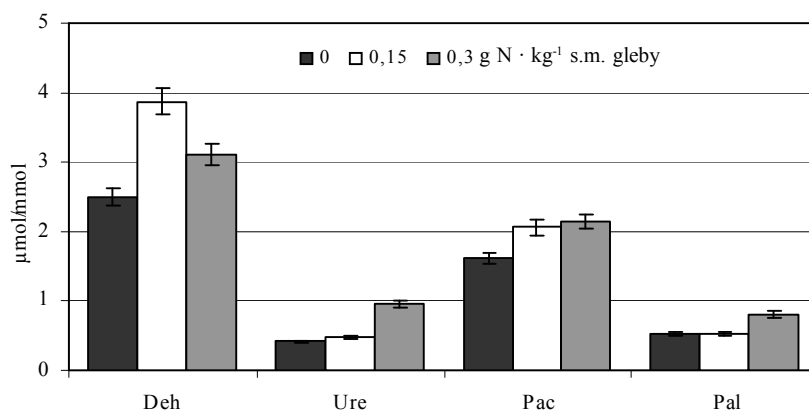


Rys. 2. Aktywność enzymów w glebie zanieczyszczonej (ON) olejem napędowym (μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Deh – dehydrogenazy (μmol TFF), Ure – ureaza (mmol N-NH_4^+), Pac – fosfataza kwaśna (mmol PNP), Pal – fosfataza alkaliczna (mmol PNP)

Źródło: Wyszowska, Kucharski, 2004 (43).

zaobserwować wysoce istotne pozytywne działanie nawożenia mocznikiem na dehydrogenazy, ureazę i fosfatazy (rys. 3) oraz na bakterie, promieniowce i grzyby (tab. 8).



Rys. 3. Aktywność enzymów w glebie w zależności od nawożenia azotem (μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Deh – dehydrogenazy (μmol TFF), Ure – ureaza (mmol N-NH_4^+), Pac – fosfataza kwaśna (mmol PNP), Pal – fosfataza alkaliczna (mmol PNP)

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Tabela 8

Liczebność drobnoustrojów w zależności od nawożenia azotem (kg^{-1} s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Dawka azotu $\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby	Bakterie (B) $\cdot 10^9$	Promieniowce (P) $\cdot 10^9$	Grzyby (G) $\cdot 10^7$	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
0	12,05a	8,24a	1,00a	20,29a
0,15	12,72b	11,56b	1,17b	20,84b
0,30	12,89 b	11,24b	1,15b	21,03b

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Oddziaływanie nawozów mineralnych, szczególnie fizjologicznie kwaśnych, może wynikać z ich bezpośredniego wpływu na drobnoustroje i enzymy oraz ze zmiany pH, które jest elementem warunkującym nie tylko rozwój mikroorganizmów (46), ale decydującym o aktywności enzymów (44).

Aktywność mikrobiologiczna gleby może być znacznie zmieniana przez uprawiane rośliny (tab. 9). Badania dowodzą, że aktywność dehydrogenaz oraz aktywność fosfatazy kwaśnej i fosfatazy alkalicznej w glebie pod uprawą jęczmienia jarego może być znacznie wyższa niż w glebie, na której uprawiano owies oraz istotnie wyższa w glebie pod uprawą gorczycy białej niż rzepaku jarego (39).

Liczebność bakterii, promieniowców i grzybów w glebie spod poszczególnych gatunków roślin chociaż wykazuje istotne zróżnicowanie, to nie układa się tak wyraźnie, jak aktywność enzymów (tab. 10). Jedynie proporcje między poszczególnymi grupami drobnoustrojów kształtują się podobnie jak właściwości biochemiczne, tj. notowano szerszy stosunek sumy liczby bakterii i promieniowców do grzybów w glebie pod uprawą jęczmienia jarego niż owsa oraz pod uprawą gorczycy białej niż rzepaku jarego. Wyniki te, uzyskane w doświadczeniu wazonowym, mogłyby sugerować, że w podobnej skali opisane zjawiska wystąpią w warunkach doświadczeń polowych (19). Ale tak nie jest. Dowodzi tego znacznie mniejsza skala zmienności aktywności enzymów (tab. 11) i liczebności drobnoustrojów (tab. 12), determinowana udziałem roślin zbożowych w zmianowaniu. Najniższą aktywność dehydrogenaz, ureazy i fos-

Tabela 9

Aktywność enzymów w glebie pod uprawą różnych gatunków roślin
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Gatunek rośliny	Dehydrogenazy $\mu\text{mol TFF}$	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Rzepak jary	2,49a	0,42a	1,61b	0,53a
Owies	4,13b	0,56c	0,84a	0,84b
Jęczmień jary	7,66d	0,47b	2,67d	1,47d
Gorzycza biała	4,58c	0,48b	2,50c	1,01c

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Tabela 10

Liczebność drobnoustrojów w glebie pod uprawą różnych gatunków roślin (jtk · kg⁻¹ s.m. gleby)

Gatunek rośliny	Bakterie (B) · 10 ⁹	Promieniowce (P) · 10 ⁹	Grzyby (G) · 10 ⁷	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
Rzepak jary	12,13c	6,39a	1,35d	13,72a
Owies	10,86b	7,48b	1,20c	15,28b
Jęczmień jary	8,03a	8,11c	0,78b	20,69c
Gorzycza biała	17,20d	10,98d	0,67a	42,06d

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

fatazy alkalicznej notowano w glebie z 50% udziałem zbóż, a wyższą i prawie identyczną w glebie z ich 25 i 75% udziałem (tab. 11). Najmniejszy udział zbóż (25%) kształtował znacznie korzystniejszy wskaźnik, mierzony ilorazem sumy liczby bakterii i promieniowców do grzybów, niż 50 i 75% udział zbóż (tab. 12).

Ważnym czynnikiem wpływającym na mikrobiologiczne właściwości gleb jest przedplon. Z badań wykonanych w warunkach polowych jednoznacznie wynika, że może on istotnie zmieniać aktywność poszczególnych enzymów (tab. 13). I tak na przykład na dehydrogenazy, fosfatazę kwaśną i fosfatazę alkaliczną najkorzystniej wpływała gorzycza biała jako przedplon pszenicy ozimej, natomiast na ureazę rzepak ozimy. Najmniej sprzyjającym enzymom przedplonem był rzepak jary.

Tabela 11

Aktywność enzymów w glebie w zależności od udziału zbóż w płodozmianie (μmol lub mmol produktu · kg⁻¹ s.m. gleby · h⁻¹)

Udział zbóż (%)	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH ₄ ⁺	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
25	8,75b	1,20b	2,05a	1,10b
50	8,33a	1,17a	2,06a	1,06a
75	8,75b	1,21b	2,06a	1,11b

Źródło: Kucharski i in., 1996 (19).

Tabela 12

Liczebność drobnoustrojów w glebie w zależności od udziału zbóż w płodozmianie (jtk · kg⁻¹ s.m. gleby)

Udział zbóż (%)	Bakterie (B) · 10 ⁹	Promieniowce (P) · 10 ⁹	Grzyby (G) · 10 ⁷	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
25	21,17b	14,34c	0,40b	88,78c
50	22,60c	10,58 b	0,40b	82,95a
75	20,88a	10,16a	0,36a	86,22b

Źródło: Kucharski i in., 1996 (19).

Tabela 13

Aktywność enzymów w glebie spod pszenicy ozimej, uprawianej po różnych przedplonach
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Rodzaj przedplonu	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Rzepak ozimy	15,58 b	1,43c	2,24b	1,52a
Rzepak jary	14,41a	1,35b	2,13a	1,39b
Gorzycza biała	16,47c	1,26a	2,42c	1,47c

Źródło: Wyszowska i in., 2009 (47).

Z badań wykonanych w warunkach doświadczeń wazonowych wynika, że aktywność dehydrogenaz może być hamowana przez kwas α -naftylooctowy, kwas gibberelinowy i benzyloadeninę, natomiast stymulowana przez triacontanol (tab. 14). Ten ostatni fitohormon wpływał także korzystnie na ureazę i fosfatazę kwaśną. Aktywność fosfatazy kwaśnej i fosfatazy alkalicznej stymulował także kwas indolilomasłowy. Przy czym na fosfatazę alkaliczną dodatkowo oddziaływała również benzyloadenina.

Ta krótka charakterystyka uzyskanych wyników dowodzi, że wprawdzie fitohormony mogą częściowo kształtować enzymatyczne właściwości gleby, ale ich działanie nie jest jednoznaczne i może być różne w odniesieniu do poszczególnych enzymów. W zależności od rodzaju fitohormonu mogą je stymulować bądź hamować. Jeszcze mniej regularnie hormony wzrostu roślin wpływają na liczebność drobnoustrojów (tab. 15). Na bakterie korzystnie wpływał tylko kwas gibberelinowy, na promieniowce kwas indolilomasłowy, a na grzyby enzyloadenina.

Zabiegiem, który mógłby wpływać na mikrobiologiczne właściwości gleby jest chemiczna ochrona roślin. Z badań Wyszowskiej i Kucharskiego (44) wynika jednak, że chemiczne środki ochrony roślin są na ogół preparatami bezpiecznymi i gdy są stosowane w dawkach zgodnych z zaleceniami producenta nie wywo-

Tabela 14

Aktywność enzymów w glebie z dodatkiem fitohormonów
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Fitohormon	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kontrola	5,94b	0,43b	0,63b	1,92b
IBA	5,66b	0,44bc	0,70c	2,31c
NAA	4,79a	0,42b	0,58a	1,63a
GA ₃	4,84a	0,43b	0,56a	1,96b
BA	4,84a	0,35a	0,64b	2,14b
Tria	6,18c	0,52d	0,73d	2,01b

IBA – kwas indolilomasłowy, NAA – kwas α -naftylooctowy, GA₃ – kwas gibberelinowy, BA – benzyloadenina, Tria – triacontanol

Źródło: Wyszowska i in., 2000 (51).

Tabela 15

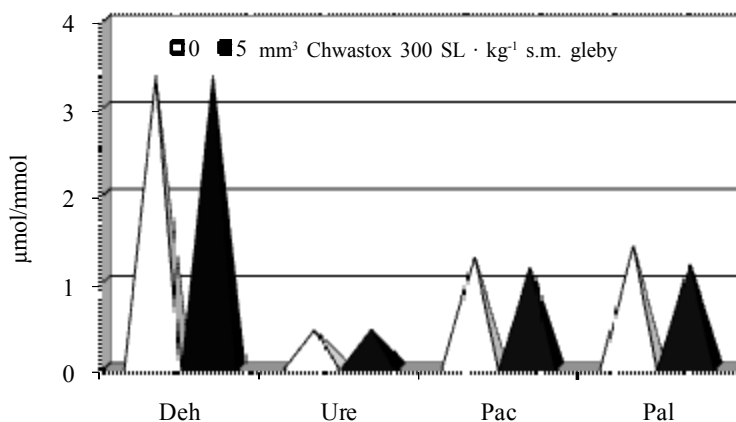
Liczebność drobnoustrojów w glebie z dodatkiem fitohormonów (jtk · kg⁻¹ s.m. gleby)

Fitohormon*	Bakterie (B) · 10 ⁹	Promieniowce (P) · 10 ⁹	Grzyby (G) · 10 ⁷	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
Kontrola	18,23c	5,73c	0,98b	24,45c
IBA	16,33b	7,96d	0,83a	29,27d
NAA	15,85b	5,00b	0,86a	24,24c
GA ₃	25,56d	4,74a	0,82a	36,95e
BA	7,01a	5,21b	1,31c	9,33a
Tria	6,03a	4,85a	0,92b	11,83b

* IBA – kwas indolilomasłowy, NAA – kwas α-naftylooctowy, GA₃ – kwas giberelinowy, BA – benzyloadenina, Tria – triacantanol

Źródło: Wyszowska i in., 2000 (51).

lują niekorzystnych zmian w metabolizmie gleby. Zakłócenia zaczynają się tylko wtedy, gdy dostaną się one do gleby w dawkach zbyt dużych, zamiast w dawkach zalecanych (rys. 4).



Rys. 4. Aktywność enzymów w glebie zanieczyszczonej herbicydem Chwastox 300 SL (μmol lub mmol produktu · kg⁻¹ s.m. gleby · h⁻¹)

Deh – dehydrogenazy (μmol TFF), Ure – ureaza (mmol N-NH₄⁺), Pac – fosfataza kwaśna (mmol PNP), Pal – fosfataza alkaliczna (mmol PNP)

Źródło: Wyszowska, Kucharski, 2004 (44).

Ważnym czynnikiem są także wielorakie działania doprowadzające do zakwaszenia gleby (46). W glebach kwaśnych nie tylko jest mniejsza aktywność enzymów niż w glebach obojętnych (tab. 16), ale także mniejsza liczebność bakterii i promieniowców oraz mniej korzystny stosunek sumy liczby promieniowców i bakterii do grzybów (tab. 17).

Tabela 16

Aktywność enzymów w zależności od pH gleby (μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

pH _{H2O} gleby	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
3,9	0,65a	0,06a	1,94a	0,84a
4,1	0,86b	0,09b	2,21b	0,90a
4,5	1,04b	0,32c	2,39c	1,08b
5,1	1,47c	0,76d	2,82d	1,44c
5,7	3,24d	1,54e	3,20e	2,40d
6,7	8,21e	4,18f	3,50f	3,47e

Źródło: Wyszowska i in., 2001 (46).

Tabela 17

Liczebność drobnoustrojów w zależności od pH gleby ($\text{jt} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby)

pH _{H2O} gleby	Bakterie (B) $\cdot 10^9$	Promieniowce (P) $\cdot 10^9$	Grzyby (G) $\cdot 10^7$	$\frac{B+P}{G} \cdot 10^2$
3,9	0,35a	0,30a	1,17a	0,56a
4,1	0,69b	0,30a	0,50bc	1,96b
4,5	0,76b	0,56b	0,41c	3,23c
5,1	1,28c	0,87c	0,41c	5,27e
5,7	1,39c	1,06d	0,54bc	4,55d
6,7	1,31c	1,20d	0,56b	4,53d

Źródło: Wyszowska i in., 2001 (45).

Ocena jakości gleb za pomocą wskaźników mikrobiologicznych

Na możliwość korzystania z różnych indeksów aktywności mikrobiologicznej gleb do oceny ich żyzności wskazuje N a n n i p i e r i i n. (29) – są to między innymi biologiczny indeks żyzności (**BIF**) i wskaźnik aktywności enzymów (**EAN**). Według Z a h i r'a i in. (54) pierwszy indeks do określenia żyzności gleb zaproponowali w 1950 roku H o f m a n n i S e e g e n e r. S p i e r i R o s s (35) dowodzą, że w metabolizmie gleby największą rolę odgrywają enzymy pochodzenia mikrobiologicznego. W tym samym okresie S k u j n i s (cyt. za 54) stwierdza, że uzyskanie tzw. „indeksu żyzności” tylko na podstawie aktywności enzymatycznej nie jest możliwe, gdyż aktywność enzymów, jego zdaniem, nie odzwierciedla ogólnego stanu zasobności gleby. Z kolei D i c k i T a b a t a b a i (9) udowodnili dodatnią korelację między zawartością Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} i Mn^{2+} a aktywnością glebowej pirofosfatazy, natomiast S p e i r (34) oraz D a l t o n i in. (6) zaprzeczają doniesieniom S k u j n i s (cyt. za 54).

L i u i in. (24) uważają, że użycie pomiaru aktywności enzymów do oceny rolniczej jakości gleb jest obiecujące i do tego celu rekomendują oznaczanie β -glukozydazy i α -asparaginazy. T r a s a r - C e p e d a i in. (36) oraz L e i r o s i in. (23) stwierdzili, że zawartość azotu ogółem może być opisana za pomocą równania obejmującego 5 parametrów: mikrobiologicznej biomasy, zmineralizowanego azotu, aktywności fosfomonoesterazy, aktywności β -glukozydazy i aktywności ureazy.

D e l a P a z J i m e n e z i in. (7) opracowali wzór, który pozwala na ocenę jakości gleb na podstawie aktywności arylosulfatazy, dehydrogenaz, kwaśnej fosfomonoesterazy i β -glukozydazy. Według G a r c i i i H e r n a n d e z a (11) do opracowania takiego indeksu wystarczy pomiar β -glukozydazy i arylosulfatazy, ale połączony z określeniem wielkości biomasy. P u g l i s i i in. (32) dowodzą, że różne matematyczne i statystyczne modele mogą być wykorzystywane do otrzymania indeksu określającego status gleby. D i c k i in. (8) zwracają uwagę, że nawet pomiary aktywności dwóch enzymów, takich jak aktywność fosfatazy kwaśnej i aktywność fosfatazy alkalicznej wystarczą do określenia właściwego statusu gleby.

Według M y ś k o w a (27) oraz M y ś k o w a i in. (28) mikrobiologiczny wskaźnik potencjalnej żyzności gleby można określić na podstawie zawartości węgla i aktywności dehydrogenaz lub też na podstawie aktywności biologicznej gleby mierzonej stosunkiem bakterii do grzybów, ewentualnie aktywności dehydrogenaz oraz zawartości węgla i pojemności sorpcyjnej. Dużą korelację między jakością gleby a plonem roślin wykazuje wskaźnik **Mw** (17) obliczony na podstawie zawartości węgla organicznego, dehydrogenaz, fosfatazy kwaśnej, fosfatazy alkalicznej i ureazy. K o p e r i P i o t r o w s k a (13) zaproponowali biochemiczny wskaźnik żyzności gleby obliczony na podstawie zawartości węgla i azotu oraz aktywności dehydrogenaz, fosfatazy alkalicznej, proteazy i amylazy.

Ta różnorodność wskaźników mikrobiologicznych i biochemicznych dowodzi, że nie dopracowano się optymalnego wskaźnika, który odzwierciedlałby obiektywnie stan gleby, uwzględniający wszystkie czynniki wpływające na jej żyzność (17). Wiele dotychczasowych badań z tego zakresu było niepełnych, gdyż nie uwzględniały jednocześnie oddziaływania całej gamy czynników decydujących o aktywności enzymatycznej gleb w powiązaniu z plonami roślin. Ta kompleksowość ma szczególne znaczenie w przypadku gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi i związkami organicznymi. Z reguły metale ciężkie występujące w glebie w nadmiarze hamują aktywność enzymów, a substancja organiczna, w zależności od jej rodzaju, może ją hamować lub stymulować (1, 12, 21, 31, 40, 52). Dlatego można wyciągnąć mylne wnioski o żyzności gleby zanieczyszczonej niektórymi substancjami organicznymi, gdyż zarówno zawartość węgla organicznego, azotu i pojemność sorpcyjna gleby, jak i aktywność wielu enzymów zwiększa się, natomiast zdolność plonotwórcza gleby zmniejsza się pomimo tych korzystnych parametrów. Kolejnym bardzo ważnym elementem ograniczającym poprawne wnioskowanie jest zmienność właściwości mikrobiologicznej w układzie dynamicznym (tab. 18 i 19).

Tabela 18

Aktywność enzymów w glebie spod pszenicy ozimej w zależności od terminu wykonania analiz
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Termin analiz	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
Kwiecień	10,45a	1,50a	2,33b	1,42b
Maj	12,69b	1,48a	2,76d	1,69d
Czerwiec	19,52c	1,74b	1,27a	1,21a
Sierpień	19,28d	0,67c	2,43c	1,53c

Źródło: Wyszowska i in., 2009 (47).

Tabela 19

Aktywność enzymów w zależności od terminu analizy gleby
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Termin analizy (dni)	Dehydrogenazy μmol TFF	Ureaza mmol N-NH_4^+	Fosfataza	
			kwaśna	alkaliczna
			mmol PNP	
14	5,20d	0,36a	1,15b	0,89b
28	3,74b	0,66b	1,06a	0,87a
42	3,52a	0,70c	1,16b	0,94c
56	4,19c	0,73c	1,34c	1,28d

Źródło: Wyszowska, 2002 (39).

Z badań własnych (18, 21, 49, 50) i innych autorów (2, 23, 31, 33) wynika, że pomiar aktywności enzymatycznej gleby może być wykorzystany do konstruowania mikrobiologicznych wskaźników stanu jej żyzności.

Modelowanie mikrobiologicznych wskaźników żyzności gleby powinno opierać się na enzymach uczestniczących w procesach degradacji substancji organicznej, mineralizacji azotu lub nityfikacji. Trudności w interpretacji wyników oznaczeń enzymatycznych oraz konstrukcji mikrobiologicznych wskaźników jakości gleby wynikają z dowolności stosowanych metod analitycznych i wyrażania wyników w różnych jednostkach. Zunifikowanie jednostek aktywności, np. wyrażanie w mikromolach lub milimolach produktu reakcji na 1 gram lub kilogram s.m. gleby na określoną jednostkę czasu ułatwiłoby nie tylko optymalizację mikrobiologicznych i biochemicznych wskaźników jakości gleb, ale także pozwoliłoby na tworzenie progów aktywności. Jedną z propozycji wyrażania aktywności enzymów glebowych wraz z zakresem uzyskiwanych wartości zamieszczono w tabeli 20. Korzystając z takich jednostek, można na podstawie sumy aktywności wyznaczyć wskaźnik **BA** ($\text{BA} = \text{Ure} + \text{Deh} + \text{Pac} + \text{Pal} + \text{Aryl} + \text{Cat} + \beta\text{Glu}$). Taki wskaźnik zaprezentowano w tabeli 21. Jest on ściśle powiązany z plonowaniem roślin, czego dowodzą plony teoretyczne obliczone na podstawie wielkości wskaźnika **BA**, które są zbliżone do plonów eksperymentalnych uzyskanych w doświadczeniu.

Tabela 20

Aktywność enzymów glebowych
(średnia dla 136 różnych gleb)

Rodzaj enzymu	Jednostka	Zawartość	
		średnia	zakres
Dehydrogenazy	$\mu\text{mol TFF kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	7,23	0,72-66,10
Ureaza	$\text{mmol N-NH}_4^+ \text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	0,81	0,10-9,96
Fosfataza kwaśna	$\text{mmol PNP kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	2,13	1,18-4,02
Fosfataza alkaliczna	$\text{mmol PNP kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	1,60	0,69-5,06
Arylosulfataza	$\text{mmol PNP kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	0,23	0,02-0,28
Katalaza	$\text{mol O}_2 \text{kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	0,31	0,10-0,54
β -glukozydaza	$\text{mmol PNP kg}^{-1} \text{h}^{-1}$	1,34	1,08-2,88

Źródło: badania własne.

Tabela 21

Aktywność enzymów w glebie w zależności od zanieczyszczenia jej miedzią
(μmol lub mmol produktu $\cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby $\cdot \text{h}^{-1}$)

Zanieczyszczenie gleby miedzią ($\text{mg Cu}^{2+} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby)	Deh	Ure	Pac	Pal	Aryl	Kat	BA
0	8,51	1,06	1,40	2,03	0,17	0,25	13,42
20	5,82	0,98	1,42	1,97	0,16	0,24	10,59
40	5,37	0,88	1,40	1,64	0,14	0,23	9,66
80	3,76	0,84	1,30	1,42	0,13	0,21	7,66
120	2,78	0,80	1,27	1,37	0,10	0,19	6,51
240	1,16	0,66	1,21	1,33	0,10	0,19	4,65
480	0,54	0,62	0,71	0,32	0,09	0,19	2,47

Deh – dehydrogenazy ($\mu\text{mol TFF}$), Ure – ureaza (mmol N-NH_4^+), Pac – fosfataza kwaśna (mmol PNP), Pal – fosfataza alkaliczna (mmol PNP), Aryl – arylosulfataza (mmol PNP), Kat – katalaza (mol O_2)

Źródło: opracowanie własne (materiał niepublikowany).

Tabela 22

Porównanie plonu faktycznego owsa z plonem teoretycznym obliczonym na podstawie wskaźnika biochemicznej aktywności gleby (BA = Ure + Deh + Pac + Pal + Aryl + Cat + βGlu)

Zanieczyszczenie gleby miedzią ($\text{mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. gleby)	Plon faktyczny	Plon teoretyczny
	g s.m. $\cdot \text{kg}^{-1}$ gleby	
0	8,64	8,24
20	7,95	8,61
40	7,83	8,38
80	7,71	7,30
120	7,10	6,30
240	3,91	4,15
480	0,56	0,73

Źródło: opracowanie własne (materiał niepublikowany).

Podsumowanie

1. Właściwości mikrobiologiczne gleb mogą być zmieniane przez szeroko pojęte rolnictwo, ale zmiany te nie mają charakteru trwałego, po kilku tygodniach bowiem stan gleby powraca do stanu pierwotnego, sprzed okresu, w którym jakiś czynnik bądź zabieg spowodował ich poprawę bądź zaburzenie. Dotyczy to głównie stosowanych środków ochrony roślin i nawożenia mineralnego.

2. Wszelka działalność zubożająca glebę w substancję organiczną prowadzi do zakłóceń jej metabolizmu. Zatem dla zachowania aktualnych właściwości mikrobiologicznych bądź ich poprawy należy stosować płodozmian, w którym mineralizacja materii organicznej nie będzie dominowała nad jej dopływem do gleby.

3. Do oceny jakości rolniczej gleb mogą być przydatne wskaźniki opracowane na podstawie aktywności enzymów glebowych. Warunkiem koniecznym jest jednak szukanie korelacji między tymi wskaźnikami a plonowaniem roślin. Nie mogą to być indeksy żyzności opracowywane w oderwaniu od zdolności produkcyjnej gleb, a tak często się zdarza.

4. Aktywność enzymów glebowych powinna być przedstawiana w molach (bądź w ich podjednostkach) produktu reakcji na jednostkę masy gleby, np. na 1 kilogram lub 1 gram suchej masy na jednostkę czasu, tj. na 1 godzinę, niezależnie od zastosowanej metody analitycznej. Takie rozwiązanie ułatwi porównywanie wyników uzyskiwanych w różnych laboratoriach oraz umożliwi wyznaczenie wartości progowych dla gleb o różnej przydatności rolniczej.

Literatura

1. Barabas z W., Albińska D., Jaśkowska M., Lipiec J.: Biological effects of mineral nitrogen fertilization on soil microorganisms. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2002, **11(3)**: 193-198.
2. Bielińska E. J.: Oznaczanie aktywności fosfataz. *Acta Agroph.*, 2005, **3**: 63-74.
3. Blanco-Canqui H., Lal R.: Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil Till. Res.*, 2007, **95**: 240-254.
4. Carefoot J. M., Janzen H. H.: Effect of straw management, tillage timing and timing of fertilizer nitrogen application on the crop utilization of fertilizer and soil nitrogen in an irrigated cereal rotation. *Soil Till. Res.*, 1997, **44**: 195-210.
5. Chróst R., Siuda W.: Ecology of microbial enzymes in lake ecosystems. In: *Enzymes in the environment. Activity, ecology, and applications*. Eds. R. Burns, R. Dick. New York, 2002, 35-72.
6. Dalton D. A., Evans H. J., Hannus F. J.: Stimulation by nickel of soil microbial urease and hydrogenase activities in soybeans grown in a low-nickel soil. *Plant Soil*, 1985, **88(2)**: 245-258.
7. De la Paz Jimenez M., de la Horra A. M., Pruzzo L., Palma R. M.: Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biol. Fertil. Soils*, 2002, **35**: 302-306.
8. Dick W. A., Cheng L., Wang P.: Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, **32**: 1915-1919.
9. Dick W. A., Tabatabai M. A.: Activation of soil phosphatase by metal ions. *Soil Biol. Biochem.*, 1983, **15**: 59-363.
10. Furczak J., Turcka B.: Wpływ różnych systemów uprawy soi na rozwój mikroorganizmów i zawartość fenoli w glebie plovej. *Acta Agroph.*, 2006, **8(1)**: 59-68.

11. Garcia C., Hernandez T.: Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, **29(2)**: 171-177.
12. Hinojosa B. M., Carreria J. A. Garcia-Ruiz R., Dick R. P.: Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal-contaminated and reclaimed soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, **36(10)**: 1559-1568.
13. Koper J., Piotrowska A.: Application of biochemical index to define soil fertility depending on varied organic and mineral fertilization. *EJPAU*, 2003, **6(1)**: 06.
14. Kucharski J.: Badania nad przydatnością inhibitorów nityfikacji w nawożeniu roślin. *Acta Acad. Agricult. Techn. Olst.*, 1985, **41**: 1-59.
15. Kucharski J.: Wpływ wieloletniego nawożenia gnojowicą na biologiczne właściwości gleby. *Mat. Konf. Nauk. „Nawozy organiczne”*. AR Szczecin, 1992, 24-29.
16. Kucharski J.: Skuteczność estru fenylowego kwasu diamidofosforowego w regulowaniu tempa hydrolizy mocznika w glebie. *Acta Acad. Agricult. Techn. Olst.*, 1994, **57**: 83-90.
17. Kucharski J.: Relacje między aktywnością enzymów a żyznością gleby. W: *Drobnoustroje a życie gleby*. Red. W. Barabasz. AR Kraków, 1997, 327-348.
18. Kucharski J., Jastrzębska E., Wyszowska J.: Contamination of soil with hard coal ash as modifier of physicochemical and biological properties of soil. *EJPAU*, 2006, **9(1)**: 35.
19. Kucharski J., Nowicki J., Wanic M.: Wpływ różnego udziału roślin zbożowych w płodozmianie na aktywność enzymatyczną gleby. *Acta Acad. Agricult. Techn. Olst.*, 1996, **63**: 77-84.
20. Kucharski J., Panak H., Sienkiewicz S., Niewolak T.: Aktywność mikroorganizmów glebowych w zależności od form, terminów i sposobów stosowania nawozów azotowych. *Acta Acad. Agricult. Techn. Olst.*, 1996, **62**: 37-46.
21. Kucharski J., Wyszowska J.: Microbiological properties of soil contaminated with diesel oil. *Acta Agroph.*, 2001, **51**: 113-120.
22. Kucharski J., Wyszowska J., Nowak G., Harms H.: Activity of enzymes in soils treated with sewage sludges. *Pol. J. Soil Sci.*, 2000, **33(1)**: 29-36.
23. Leiros C., Trasar-Cepeda C., Garcia-Fernandez F., Gil-Sotres F.: Defining the validity of a biochemical index of soil quality. *Biol. Fertil. Soils*, 1999, **30**: 140-146.
24. Liu K. L., Lai C. M., Helen W.: Soil enzyme activities as indicators of agricultural soil quality. *Symposium No. 32 17th WCSS, Thailand*, 2002, 1386.
25. Malkawi A. I. H., Alawneh A. S., Abu-Safa O. T.: Effect of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. *Appl. Clay Sci.*, 1999, **14**: 257-258.
26. Manzoni S., Porporato A.: Soil carbon and mineralization: Theory and models across scale. *Soil Biol. Biochem.*, 2009, **41**: 1355-1379.
27. Myśków W.: Próby wykorzystania wskaźników aktywności mikrobiologicznej do oceny żyzności gleby. *Post. Mikrob.*, 1981, **20**: 173-192.
28. Myśków W., Stachyra A., Zięba S., Masiak D.: Aktywność biologiczna gleby jako wskaźnik jej żyzności i urodzajności. *Rocz. Glebozn.*, 1996, **47(1/2)**: 89-99.
29. Nannipieri P., Kandler E., Ruggiero P.: Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: *Enzymes in the environment. Activity, ecology, and applications*. Eds. R. Burns, R. Dick. New York, 2002, 1-33.
30. Nortcliff S.: Standarisation of soil quality attributes. *Agric. Ekosys. Environ.*, 2002, **88**: 161-168.
31. Nowak J., Szymczak J., Słobodzian T.: Próba określenia 50% progu toksyczności dawek różnych metali ciężkich dla fosfatów glebowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2003, **492**: 241-248.
32. Puglisi E., Nicelli M., Capri E., Trevisan M., Del Re A. A. M.: A soil alteration index based on phospholipid fatty acids. *Chemosphere*, 2005, **61**: 1548-1557.
33. Renella G., Landi L., Valori F., Nannipieri P.: Microbial and hydrolase activity after release of low molecular weight organic compounds by a model root surface in a clayey and a sandy soil. *Appl. Soil Ecol.*, 2007, **36**: 124-129.

34. Speir T. W.: Urease, phosphatase, and sulphatase activities of Cook Island and Tongan soils. *N. Z. J. Sci.*, 1984, **27**: 73-79.
35. Speir T. W., Ross D. J.: Soil phosphatase and sulphatase. *Soil enzymes*. In: Ed. R. G. Burns. Academic Press, New York, 1978, 197-250.
36. Trasar-Cepeda C., Leiros C., Gil-Sotres F., Seoane S.: Towards a biochemical quality index for soils: An expression relating several biological and biochemical properties. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, **26**: 100-106.
37. Trasar-Cepeda C., Leiros M. C., Gil-Sotres F.: Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biol. Biochem.*, 2008, **40**: 2146-2155.
38. Wyczółkowski A., Wyczółkowska M., Dąbek-Szreniawska M.: Biologiczna aktywność gleb pod roślinami w wybranym płodozmianie. *Acta Agroph.*, 2006, **8(1)**: 275-284.
39. Wyszowska J.: Biologiczne właściwości gleby zanieczyszczonej chromem sześciowartościowym. *Rozprawy i Monografie, UWM Olsztyn*, 2002, **65**: 1-134.
40. Wyszowska J., Kucharski J.: Biochemical properties of soil contaminated by petrol. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2000, **9(6)**: 479-486.
41. Wyszowska J., Kucharski J.: Effect of long term soil storage on its enzymes activity. *Scientific works of the Lithuanian Institute of Horticulture and Lithuanian University of Agriculture*, 2002, **21(2)**: 98-105.
42. Wyszowska J., Kucharski J.: The effect of long term soil storage on microorganisms number. *Pol. J. Natur. Sci.*, 2002, **14(2)**: 291-298.
43. Wyszowska J., Kucharski J.: Biochemiczne właściwości gleby zanieczyszczonej olejem napędowym a plonowanie łubinu żółtego. *Rocz. Glebozn.*, 2004, **50**: 299-309.
44. Wyszowska J., Kucharski J.: Biologiczne właściwości gleby zanieczyszczonej Chwastoxem Trio 540 SL. *Rocz. Glebozn.*, 2004, **50**: 311-319.
45. Wyszowska J., Kucharski J., Benedycka Z.: Count of soil microorganisms in horticultural soils of different acidification. *Natur. Sci.*, 2001, **8**: 123-134.
46. Wyszowska J., Kucharski J., Benedycka Z.: Physicochemical properties and enzymatic activity of sulphur-acidified horticultural soil. *Polish J. Environ. Stud.*, 2001, **10(4)**: 293-296.
47. Wyszowska J., Kucharski J., Jankowski K., Kijewski Ł.: Wpływ resztek pozbiorowych na aktywność enzymów glebowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 2009, **537**: 403-412.
48. Wyszowska J., Kucharski J., Jastrzębska E.: Liczebność drobnoustrojów w glebie zanieczyszczonej osadami ściekowymi. *Acta Agr. Silv.*, 2004, **42**: 475-483.
49. Wyszowska J., Kucharski J., Kucharski M.: Interaction of cadmium with other heavy metals and its influence on the soil biochemical properties. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2006, **15(2a)**: 559-568.
50. Wyszowska J., Kucharski J., Lajszner W.: Enzymatic activities in different soils contaminated with copper. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2005, **14(5)**: 119-124.
51. Wyszowska J., Kucharski J., Nowak G.: Role of phytohormones and their precursors in modifying of enzymatic activity of soil and number of microorganisms. *Natur. Sci.*, 2000, **7**: 17-30.
52. Wyszowska J., Kucharski J., Wałdowska E.: The influence of diesel oil contamination on soil enzymes activity. *Rost. Vyr.*, 2002, **48**: 58-62.
53. Yang L, Li T., Li F., Lemcoff J. H., Cohen S.: Fertilization regulates soil enzymatic activity and fertility dynamics in cucumber field. *Scientia Horticul.*, 2008, **116**: 21-26.
54. Zahir A. Z., Malik M. A. R., Arshad M.: Soil enzymes research; a review. *J. Biol. Sci.*, 2001, **1(5)**: 299-307.

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Jan Kucharski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Katedra Mikrobiologii
pl. Łódzki 3
10-727 Olsztyn
tel.: (89) 523-48-34
e-mail: jan.kucharski@uwm.edu.pl

