



DOI: <https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2023.008>

**ZAWARTOŚĆ SIARKI OGÓLEM I JEJ
FRAKCJI ORAZ AKTYWNOŚĆ
ENZYMATYCZNA GLEB PŁOWYCH**

Anetta SIWIK-ZIOMEK¹, Diana YATSENKO¹

**TOTAL SULFUR AND ITS FRACTIONS
CONTENT AND ENZYMATIC ACTIVITY
OF LUVISOLS**

Streszczenie

Celem badań była ocena zawartości ogólnej, organicznej oraz przyswajalnej frakcji siarki oraz aktywności enzymatycznej (dehydrogenaz, FDA, β -glukozydazy, nitroreduktazy oraz arylosulfatazy) w glebie płowej pobranej z Minikowa (Polska) oraz Niżyna (Ukraina) spod uprawy jęczmienia zwyczajnego. Przeprowadzona analiza wariancji potwierdziła istotny wpływ lokalizacji oraz terminu pobierania próbek na zawartość siarki i jej frakcji oraz na aktywność enzymatyczną gleb. Ogólna zawartość siarki przyswajalnej dla roślin ($10,1 \text{ mg kg}^{-1}$ w Minikowie, $10,9 \text{ mg kg}^{-1}$ w Niżynie) klasyfikuje te gleby do średniej zawartości tego pierwiastka. W celu zapewnienia roślinom zbożowym właściwego zaopatrzenia w siarkę, według pokarmowych potrzeb roślin wobec tego pierwiastka, badane gleby wymagają uzupełnienia jej zawartości poprzez nawożenie tym składnikiem w ilości 10 kg S ha^{-1} . Stwierdzona istotna korelacja pomiędzy zawartością siarki ogółem oraz zawartością siarki siarczano-

¹ Katedra Biogeochemii i Gleboznawstwa, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska im. J.i.J.Śniadeckich, ul. Bernardyńska 6/8, 85-021 Bydgoszcz zimek@pbs.edu.pl

wej, a aktywnością badanych enzymów wskazuje na przydatność badań aktywności enzymatycznej jako wskaźnika przemian siarki w glebach.

Słowa kluczowe: siarka siarczanowa, dehydrogenazy, β -glukozydazy, nitroreduktaza, arylosulfataza

Abstract

The aim of the study was to assess the content of total, organic and available sulfur fractions and enzymatic activity (dehydrogenases, FDA, β -glucosidase, nitroreductase and arylsulfatase) in Luvisols collected from Minikowo (Poland) and Niżyn (Ukraine) from the cultivation of common barley. The analysis of variance confirmed the significant impact of the location and date of collecting soil samples on the sulfur content and its fractions as well as on the enzymatic activity. The total content of sulfur available to plants ($10,1 \text{ mg kg}^{-1}$ in Minikowo, $10,9 \text{ mg kg}^{-1}$ in Niżyn) classifies these soils into the average content of this element. In order to provide cereal plants with an appropriate supply of sulfur, according to the nutritional needs of plants for this element, the tested soils require supplementing its content by fertilizing with this ingredient in an amount of 10 kg S ha^{-1} . The significant correlation found between the content of total sulfur and sulfate sulfur and the activity of the tested enzymes indicates the usefulness of enzymatic activity tests as an indicator of sulfur transformation in soils.

Keywords: sulphate sulphur, dehydrogenases, β -glucosidases, nitroreductase, arylsulfatase

WSTĘP

Siarka należy do pierwiastków rozpowszechnionych w przyrodzie, występuje zarówno w skałach, glebie, wodzie jak i powietrzu. Naturalnym źródłem siarki są głębsze warstwy skorupy ziemskiej, skąd również i obecnie pierwiastek ten jest wyprowadzany na jej powierzchnię oraz do atmosfery i hydrosfery dzięki działalności wulkanicznej i erozji skał magmowych. Antropogeniczne źródła siarki to nawozy – jako wyraz świadomej i celowej ingerencji człowieka oraz związki siarki obecne w atmosferze jako jej zanieczyszczenia. Szczególnie niebezpiecznym nadmiarem siarki w

glebie, jest wzrost kwasowości, który powoduje zwiększone uruchamianie szkodliwych metali śladowych (Klikocka i in. 2015).

Siarka obok innych pierwiastków biogennych takich jak N, P czy K decyduje nie tylko o prawidłowym wzroście i rozwoju roślin, ale także o wysokości i jakości plonów. Rola fizjologiczna siarki wynika głównie z jej obecności w aminokwasach: metioninie i cysteinie oraz w glutationie (tripeptyd utrzymujący stały potencjał oksydoredukcyjny w komórkach), a także w ferredoksynie (przenośnik elektronów w fazie jasnej fotosyntezy). Odgrywa ona także ważną rolę w wiązaniu azotu przez bakterie brodawkowe (Marska, Wróbel 2000).

Przy ocenie zapotrzebowania roślin na ten składnik jest brana pod uwagę zawartość siarki siarczanowej (VI), która jest przyswajalna dla roślin. W rejonach, Polski w których przeważają gleby lekkie, gdzie zawartość siarczanów z reguły jest mała i jest ona podatna na wymywanie oraz przy braku zakładów przemysłowych, zawartość tej formy siarki w glebie może być poniżej poziomu krytycznego, za który uważa się $10 \text{ mg SO}_4^{2-} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Klikocka i in. 2015).

Niedobór siarki może zmniejszyć wykorzystanie pozostałych składników, głównie azotu. Zarówno N, jak i S są ważnymi składnikami białka, i odpowiednia podaż obu składników odżywczych jest ważna dla uzyskania optymalnych plonów. Niska efektywność wykorzystania makroskładników zwiększa nie tylko koszty produkcji roślin, ale także przyczynia się do zanieczyszczenia środowiska. Dlatego strategie poprawy efektywności wykorzystania składników pokarmowych obejmują stosowanie optymalnych dawek nawozu, czasu i sposobu aplikacji oraz stosowanie składników pokarmowych odpowiednich dla gatunku rośliny (Duncan i in. 2018). W wyniku nieodpowiednich dawek nawozów azotowych prawidłowe funkcjonowanie całych agrosystemów może zostać zachwiane.

Głównym źródłem siarki w glebie jest organiczna materia glebowa i minerały zawierające siarkę. W glebie odbywają się jednocześnie procesy mikrobiologicznej syntezy i mineralizacji związków siarki. Krążenie siarki w przyrodzie odbywa się dzięki procesom chemicznym, dużą rolę odgrywają także procesy biologiczne i biochemiczne, w których biorą udział organizmy glebowe auto- i heterotroficzne oraz enzymy glebowe. Aktywność enzymów glebowych okazała się czułym wskaźnikiem zmian zachodzących w glebie także pod wpływem zabiegów agrotechnicznych takich jak: orka, płodozmian, wapnowanie, nawożenie. W systemie gleba-roślina, ryzosfera jest przestrzenią, w której wszelkie zmiany w zarządzaniu nawo-

żeniem oraz ochroną gleby będą wywierały silny wpływ zarówno na glebę jak i na roślinę. A przez to i na wydajność rolnictwa i zrównoważony rozwój ekosystemu (Mandal i in. 2007).

Celem pracy było porównanie zawartości siarki ogółem i jej frakcji w glebie płowej pobranej w Minikowie (Polska) i Niżynie (Ukraina) w zależności od zróżnicowanego nawożenia mineralnego oraz określenie wpływu zastosowanego nawożenia na aktywność enzymów uczestniczących w przemianach w glebie (dehydrogenaz, FDA, β -glukozydazy, nitroreduktazy oraz arylosulfatazy), a także określenie stopnia zależności pomiędzy aktywnością enzymów a zawartością siarki ogółem i jej frakcji w glebie.

MATERIAŁ I METODY

Próbki do badań w Polsce pobrano trzykrotnie w sezonie wegetacyjnym jęczmienia zwyczajnego (odmiana Soldo) w następujących terminach: 14.04, 10.06, 26.07 w 2021 roku, z Rolniczego Zakładu Doświadczalnego (RZD) w Minikowie województwie kujawsko-pomorskim ($53^{\circ}10'02''N$ $17^{\circ}44'22''E$). Doświadczenie polowe w RZD w Minikowie założone jest na glebie płowej typowej, według międzynarodowej klasyfikacji FAO-UNESCO określana jako Albic Luvisols. Gleba ta zaliczana jest do kompleksu żytniego bardzo dobrego. Doświadczenie ułożone było w układzie losowanych podbloków w czterech powtórzeniach. Czynnikiem doświadczalnym było nawożenie azotowe: N0 – 0 kg N·ha⁻¹, N30 – 30 kg N·ha⁻¹, N60 – 60 kg N·ha⁻¹, N90 – 90 kg N·ha⁻¹ (stosowane w całości przedsięwzięcie w postaci saletry amonowej 34%).

Do badań była także pobrana gleba z gospodarstwa rolniczego, które znajduje się w północnej części Ukrainy, w okolicach Niżyna, Czernichowskiego obwodu ($51^{\circ}02'34''N$ $31^{\circ}52'25''E$). Na glebie płowej uprawiany był jęczmień zwyczajny (po kukurydzy i pszenicy), w nawożeniu zastosowano karbamid (mocznik) w dawce 70 kg·ha⁻¹ (32,2 kg N·ha⁻¹).

Próbki glebowe były pobrane w sezonie wegetacyjnym jęczmienia z warstwy 0-20 cm w trzech powtórzeniach z poszczególnych obiektów doświadczalnych.

Próbki glebowe zostały wysuszone w temperaturze pokojowej i przesiane przez sito o średnicy oczek 1 mm a następnie przechowywano je w plastikowych pojemnikach w temperaturze ok. 18°C. Poszczególne oznaczenia laboratoryjne wykonano w trzech powtórzeniach.

Zawartość siarki ogółem i jej frakcji

W celu oznaczenia zawartości siarki ogółem (S_{og}) próbka gleby z dodatkiem kwaśnego węgla sodu, poddana została wyżarzaniu w temperaturze 500°C. Całkowite wyekstrahowanie powstałych siarczanów dokonano za pomocą roztworu ekstrahującego (zawierającego CH_3COOH i NaH_2PO_4) i ich ilościowym turbidymetrycznym oznaczeniu w postaci siarczanu baru (Bardsley – Lancaster, 1960). Oznaczanie siarki siarczanowej (SO_4^{2-}) polegało na wyekstrahowaniu łatwo rozpuszczalnych siarczanów z gleby kwasami: CH_3COONH_4 oraz CH_3COOH i ilościowym turbidymetrycznym oznaczeniu w postaci siarczanu baru. Zawartość siarki organicznej obliczono z różnicy pomiędzy zawartością siarki ogółem a siarki siarczanowej (Bardsley – Lancaster 1960).

Aktywność enzymów glebowych

Aktywność dehydrogenazy (DH) analizowano poprzez redukcję chlorku 2,3,5-trifenyloctetrazoliowego przez 24 godzinnej inkubacji w 37°C. Produkt reakcji w postaci uwolnionego trójfenyloformazanu ekstrahowano acetonem i oznaczano przy długości fali 546 nm w spektrofotometrze UV-VIS (Thalmann 1968). Aktywność hydrolazy dioctanu fluoresceiny (FDA), stosowanej jako globalna aktywność hydrolizy gleby, oceniano za pomocą pomiaru opisanego przez Adama i Duncana (2001). Po 1 godzinie inkubacji reakcja enzymatyczna została zatrzymana przez wprowadzenie mieszaniny alkoholu metylowego i chloroformu (1:2). Po zawiesinie gleby barwny produkt końcowy fluoresceinę mierzono przy długości fali 490 nm. Aktywność nitroreduktazy glebowej (NR) określono według Kandelera (1995) jako substrat stosując KNO_3 . Po 24 godzinnej inkubacji w temperaturze 25°C próbki gleby ekstrahowano uwolnione azotany roztworem KCl, a następnie oznaczono kolorymetrycznie przy 520 nm. Aktywność β -glukozydazy glebowej oznaczono przy użyciu p-nitrofenylo- β -D-glukopiranozydu (0,05 M), zgodnie z Eivazi i Tabatabai (1988). Stężenie p-nitrofenolu oznaczano przy długości fali 400 nm po dodaniu buforu Tris/NaOH (pH 10,0) i $CaCl_2$. Aktywność arylosulfatazy wykonano zgodnie z metodyką Tabatabai i Bremnera (1970) jako substratu używając siarczanu – p-nitrofenolu.

Statystyczne opracowanie wyników

Wielopowtórzeniowe dane będące wynikiem analiz materiału glebowego uśredniono i poddano procedurom statystycznym. Dla wyników zawartości siarki ogółem i jej frakcji oraz aktywności enzymów związanych z przemianami tego pierwiastka w glebie wykonano analizę wariancji według modelu właściwego dla doświadczeń dwuczynnikowych z użyciem półprzedziałów ufności Tukey'a ($p=0,05$). Jako pierwszy czynnik przyjęto termin pobierania próbek glebowych, a drugi stanowiły obiekty nawozowe. W przypadku gleb z Ukrainy czynnikiem był tylko termin pobierania próbek glebowych. Do obliczeń wykorzystano program FR-ANALWAR na bazie Microsoft Excel.

Wykonano także analizę korelacji prostej ($p\leq 0,05$), która określiła stopień zależności pomiędzy czynnikami eksperymentalnymi a badanymi cechami gleby. Analizę korelacji wykonano w programie „Statistica for Windows”.

WYNIKI I DYSKUSJA

Stwierdzono istotny wpływ zarówno terminu pobierania próbek glebowych jak i dawek nawozu azotowego na zawartość siarki ogółem w uprawie jęczmienia zwyczajnego. Najniższą ilość siarki zarówno w glebach pobranych w Minikowie, jak i Niżyna oznaczono w glebie na początku wegetacji (Tab. 1). Jej ilość zwiększała się w trakcie sezonu wegetacyjnego i w ostatnim terminie osiąga wzrost o 18% w porównaniu do jej zawartości w pierwszym terminie w obydwu miejscach pobierania próbek gleb płowych. Średnia zawartość siarki ogółem w glebie z Niżyna wyniosła $0,487 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ i była ona czterokrotnie większa od tej oznaczonej w glebie płowej pobranej z Minikowa (Tab. 1). Istotnie najwyższą zawartość siarki ogółem w glebie pod uprawą jęczmienia zwyczajnego stwierdzono w glebie pobranej z obiektów nawożonych saletrą amonową w dawce $30 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Natomiast najmniejszą jej ilość, o 11% mniej niż w obiekcie N30, oznaczono w glebie nawożonej najwyższą dawką nawozu azotowego $90 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tab.1).

Stwierdzono wzrost zawartości siarki organicznej w glebie pod uprawą jęczmienia zwyczajnego w ciągu sezonu wegetacyjnego. Wzrost zawartości tej frakcji siarki na koniec sezonu wynosi ok. 21% dla gleb pobranych z Niżyna. Natomiast zawartość siarki organicznej w glebie z Minikowa

utrzymywała się na podobnym poziomie od czerwca do lipca i była wyższa niż w pierwszym terminie o ok 15%. Stwierdzono wzrost zawartości siarki organicznej w glebie nawożonej azotem dawką $30 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ co spowodowało ok. 8% zwiększenia jej zawartości w porównaniu do gleb bez nawożenia (Tab. 1). Oznaczono spadek koncentracji tego składnika w glebie z największą dawką nawozu o ok. 12% w porównaniu do gleby nawożonej dawką $30 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Zawartości siarki siarczanowej (VI) w glebie, zarówno w przypadku jej nadmiaru jak i niedoboru ma coraz większe znaczenie we współczesnym racjonalnym nawożeniu (McGrath i in. 2003). Zawartość tej frakcji siarki wskazuje bowiem na zaopatrzenie roślin w niezbędny do ich życia pierwiastek oraz na zagrożenie ekologiczne (kwaśne deszcze powstające z emisji i imisji tlenu siarki), jakie powoduje ten składnik w glebie (Motowicka – Terelak, Terelak 1998). Zawartość siarki siarczanowej (VI) w próbkach glebowych pobrana z doświadczenia z Minikowa zawierała się w przedziale $7,1\text{-}19,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Tab. 1). W Polsce w większości gleb użytkowanych rolniczo zawartość siarki siarczanowej nie przekracza $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby. Najwięcej gleb w Polsce, tj. 70% powierzchni użytków rolnych, charakteryzuje się zawartością tej frakcji siarki w granicach $5,0\text{-}20,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Lipiński i in. 2003). Taka zawartość według granicznych zawartości siarki siarczanowej w wierzchniej warstwie gleb lekkich (0-20% frakcji $<0,02\text{mm}$) klasyfikuje ją do gleb o zawartości naturalnej (Motowicka – Terelak, Terelak 1998).

Stwierdzono podobny poziom zawartości siarki siarczanowej w glebie płowej pobranej w Minikowie ($10,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) i Niżyna ($10,9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Istotnie najwyższą zawartość siarki siarczanowej w glebie z Ukrainy stwierdzono w trzecim terminie, gdzie w porównaniu do pierwszego jej ilość wzrosła na 43%. Nie stwierdzono istotnego wpływu terminu pobierania oraz nawożenia azotem na zawartość przyswajalnej frakcji siarki w glebie płowej pobranej z Minikowa (Tab. 1).

Według Fazili i in. (2008) niedostateczna ilość siarki w glebie ogranicza skuteczność zastosowanego N, dlatego nawożenie S staje się konieczne, aby uzyskać maksymalną efektywność zastosowanego nawozu azotowego. W badanej glebie płowej zasobność siarki siarczanowej została zakwalifikowana do średniej ($10,1\text{-}15,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) i uprawa zbóż wymaga uzupełniającego nawożenia siarką w dawce $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Lipiński i in. 2003). Pobranie i wykorzystanie azotu, jest ściśle uzależnione od zawartości w środowisku siarki, która poprzez obecność w cysteinie i metioninie, jest

niezbędna do biosyntezy białek (Gawęcki 2003). Niedostateczne odżywienie siarką obniża zdolności rośliny do redukcji azotanów (V), przez co hamowany jest proces wytwarzania białek i następuje kumulacja azotu w formie niebiałkowej (Gaj, Klikocka 2011). Potwierdza to wyniki badań (Kaczor, Zuzanska 2009), które przemawiają za koniecznością uwzględnienia siarki w nawożeniu nie tylko roślin krzyżowych, mających duże wymagania w stosunku do tego pierwiastka, ale także i zbóż.

Tabela 1. Zawartość siarki ogółem i jej frakcji w glebie płowej pobranej w Polsce i Ukrainie.
Table 1. Total sulfur and its fractions content in the Luvisols from Poland and Ukraine.

Sog g kg ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Minikowo	N 0	107,3	127,6	115,0	116,6
	N 30	103,3	131,9	146,8	127,3
	N 60	118,0	122,0	127,6	122,5
	N 90	97,40	108,4	133,2	113,0
	Średnia	106,5	122,5	130,6	119,9
NIR _{0,05}		Czynniki interakcje	A=8,587 A/B=15,44	B=9,609 B/A=16,64	
Niżyn NIR	N30 karbamid	450,4	464,1	548,2	487,6
				39,848	
Sorg g kg ⁻¹	Nawożenie (czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Minikowo	N 0	98,40	120,0	104,5	107,6
	N 30	92,20	120,2	120,2	137,8
	N 60	107,6	111,0	111,0	116,3
	N 90	85,60	98,00	98,00	125,5
	Średnia	95,90	112,3	112,3	121,0
NIR _{0,05}		czynniki interakcje	A= 15,955 A/B= 20,879	B= 10,273 B/A= 17,794	
Niżyn NIR	N30 karbamid	442,5	454,4	533,1	476,7
				38,251	
S-SO ₄ ²⁻ mg kg ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Minikowo	N 0	8,900	7,700	10,50	9,000
	N 30	11,00	11,80	9,100	10,60
	N 60	10,50	11,00	11,30	10,90
	N 90	11,80	10,40	7,700	10,00
	Średnia	10,60	10,20	9,700	10,10
NIR _{0,05}		czynniki interakcje	A = n.i. A/B = n.i.	B = n.i. B/A = n.i.	
Niżyn NIR _{0,05}	N30 karbamid	7,900	9,700	15,00	10,90
				1,682	

n.i. – różnica nie istotna

W literaturze występują różne poglądy odnośnie roli nawożenia mineralnego w kształtowaniu aktywności enzymatycznej gleby. Kucharski (1997) wykazał, że zbyt wysokie nawożenie azotem ($240 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) prowadzi do silnego ograniczenia jej aktywności, natomiast Einland (1980) przypisuje temu nawożeniu wpływ na wysoką aktywność dehydrogenaz. Nawożenie mineralne stosowane długotrwale i w wysokich dawkach, może być inhibitorem reakcji enzymatycznych (Mnedzebele i in. 2020) przyczyniając się przez wysoką koncentrację jonów (zwłaszcza anionów) i związane z tym niskie wartości pH gleby do inaktywacji białek enzymatycznych.

Aktywność dehydrogenaz, FDA, nitroreduktazy, β -glukozydazy i arylosulfatazy zmieniały się w sezonie wegetacyjnym jęczmienia jarego zarówno w glebie pobranej w Minikowie jak i Niżynie. Intensywność procesów biochemicznych w glebie zależy od rodzaju enzymu, co wiąże się z indywidualną wrażliwością enzymu na czynniki środowiskowe oraz zawartością poszczególnych substratów do reakcji enzymatycznych w glebie (Mekich i in. 2015). W trakcie rozwoju jęczmienia aktywność poszczególnych enzymów stopniowo wzrastała i osiągała swoje maksymalne wartości pod koniec sezonu wegetacyjnego. Jedynie nitroreduktaza w glebie pobranej w Minikowie już w drugim terminie pobierania próbek (w czerwcu) osiągnęła wysoki poziom aktywności, który utrzymywał się do końca sezonu wegetacyjnego. Stwierdzono wyższe aktywności badanych enzymów w próbkach glebowych pobranych z Niżyna. Największą różnicę aktywności stwierdzono w przypadku nitroreduktazy, gdzie średnia aktywność tego enzymu była 113 razy większa w glebie płowej w Niżynie ($11,44 \text{ mg NO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$) w porównaniu do pobranej w Minikowie ($0,101 \text{ mg NO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$). Także aktywność dehydrogenaz, enzymu uważanego za wskaźnik aktywności mikroorganizmów, był 20 krotnie większy w glebie z okolic Niżyna. Aktywności pozostałych enzymów były większe odpowiednio arylosulfatazy 4 krotnie, FDA 2,3 krotnie a β -glukozydazy 1,5 raza w porównaniu do aktywności tych enzymów w glebach pobranych z Minikowa. Potwierdza to teorię, że aktywność enzymów uzależniona

jest przede wszystkim od właściwości fizykochemicznych gleby, a także zawartości materii organicznej oraz warunków pogodowych w sezonie wegetacyjnym, nawożenia organicznego oraz mineralnego, a także systemu uprawy (Nannipieri i in. 2003; Mekich i in. 2015).

Wraz ze wzrostem dawki azotu zmieniała się aktywność nitroreduktazy, β -glukozydazy i arylosulfatazy. Istotny wzrost aktywności tych nitroreduktazy, i arylosulfatazy odnotowano na obiektach kontrolnych (N0) oraz nawożonych azotem w dawce 60 kg N ha⁻¹. Natomiast β -glukozydazy osiągnęła najwyższą aktywność przy nawożeniu dawką 90 kg N ha⁻¹. Wyniki badań wskazują na wyraźne zmiany aktywności enzymatycznej gleby płowej pod wpływem zróżnicowanego nawożenia azotem.

Tabela 2. Aktywność enzymów w glebie płowej pobranej w Polsce i Ukrainie.

Table 2. The enzymes activity in the Luvisols from Poland and Ukraine.

Dehydrogenaza (DH) mg TPF kg ⁻¹ 24h ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Mnikowo	N 0	18,70	17,28	19,90	18,62
	N 30	18,23	17,52	19,08	18,27
	N 60	14,56	17,40	20,48	17,48
	N 90	13,97	18,11	22,47	18,18
	Średnia	16,36	17,58	20,48	18,14
NIR _{0,05}		czynniki A=0,867 interakcje B/A=1,942		B= n.i. A/B=1,680	
Niżyn NIR _{0,05}		266,2	313,92	528,40 62,95	369,5
Hydrolazy dioctanu fluoresceiny (FDA) mg F kg ⁻¹ h ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Mnikowo	N 0	43,66	38,63	45,16	42,483
	N 30	42,47	39,57	55,15	45,729
	N 60	34,67	39,76	53,03	42,484
	N 90	34,46	41,48	52,80	42,911
	Średnia	38,81	39,86	51,53	43,402
NIR _{0,05}		czynniki A=4,213 interakcje B/A= 9,926		B= n.i. A/B=8,501	
Niżyn NIR _{0,05}		83,11	48,60	171,10 4,805	100,9
Nitroreduktaza (NR) mg NO ₂ kg ⁻¹ 24h ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Mnikowo	N 0	0,035	0,155	0,137	0,109
	N 30	0,035	0,122	0,107	0,088
	N 60	0,049	0,127	0,146	0,107
	N 90	0,008	0,146	0,139	0,098
	Średnia	0,032	0,138	0,132	0,101
NIR _{0,05}		czynniki A=0,035 interakcje B/A=0,035		B= 0,020 A/B=0,044	
Niżyn NIR _{0,05}		6,21	13,84	14,28 3,329	11,44
β-glukozydaza (GLU) mg pNP kg ⁻¹ h ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Mnikowo	N 0	0,521	0,600	0,713	0,611
	N 30	0,533	0,586	0,675	0,598
	N 60	0,459	0,574	0,812	0,615
	N 90	0,456	0,618	1,148	0,741
	Średnia	0,492	0,594	0,837	0,641
NIR _{0,05}		czynniki A=0,071 interakcje B/A=0,049		B= 0,027 A/B=0,076	
Niżyn NIR _{0,05}		0,512	1,128	1,292 n.i.	0,977
Arylosulfataza (AR) mg pNP kg ⁻¹ h ⁻¹	Nawożenie (Czynnik B)	Termin pobierania próbek glebowych (Czynnik A)			Średnia
		1	2	3	
Mnikowo	N 0	0,105	0,074	0,106	0,095
	N 30	0,080	0,059	0,119	0,086
	N 60	0,091	0,062	0,129	0,094
	N 90	0,085	0,063	0,115	0,088
	Średnia	0,090	0,065	0,117	0,091
NIR _{0,05}		czynniki A=0,012 interakcje B/A=0,013		B= 0,008 A/B=0,014	
Niżyn NIR _{0,05}		0,282	0,314	0,494 0,041	0,363

n.i. – różnica nie istotna

W badaniach w glebie płowej pobranej na Ukrainie uzyskano wysokie współczynniki korelacji pomiędzy aktywnością dehydrogenaz a zawartością: S_{og} ($r=0,999$), S_{org} ($r=0,998$) oraz SO_4^{2-} ($r=0,997$) a także aktywnością AR a zawartością: S_{og} ($r=0,999$), S_{org} ($r=0,999$) oraz aktywnością DH ($r=0,999$). Także w glebie pobranej w Minikowie zaobserwowano silną dodatnią zależność pomiędzy zawartością S_{og} a aktywnością enzymów: FDA ($r=0,607$), NR ($r=0,616$), zawartością S_{org} a aktywnością: FDA ($r=0,864$), NR ($r=0,578$), GL ($r=0,863$). Uzyskano także dodatnie korelacje pomiędzy aktywnością FDA oraz NR ($r=0,753$) a także FDA i AR ($r=0,750$).

PODSUMOWANIE

Zawartość siarki ogółem oraz organicznej zależały od terminu pobierania próbek glebowych i dawek nawożenia saletrą amonową. W trakcie sezonu wegetacyjnego jęczmienia nastąpiły w glebie procesy przyczyniające się do nagromadzenia organicznych związków tego pierwiastka co zwiększyło zawartość tej frakcji a przez to także siarki ogółem. W doświadczeniu przeprowadzonym w Minikowie optymalną dawką saletry amonowej, przy której zawartość siarki siarczanowej osiągała najwyższy poziom w glebach okazała się dawka $60 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Czterokrotnie wyższa zawartość siarki organicznej w glebie pobranej z Niżyna, w porównaniu do gleby płowej z Minikowa, wynikała najprawdopodobniej z zasobności tej gleby w materię organiczną. Podobna zawartość siarki przyswajalnej dla roślin (SO_4^{2-}) w glebie z Minikowa jak i Niżyna (mieszcząca się w przedziale od $10,1$ i $10,9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) klasyfikuje te gleby do średniej zawartości tego pierwiastka. W celu zapewnienia roślinom zbożowym właściwego zaopatrzenia w siarkę, według pokarmowych potrzeb roślin wobec siarki, badane gleby wymagają uzupełnienia jej zawartości poprzez nawożenie tym składnikiem w ilości $10 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$. Uzyskane wyniki wskazują na przydatność badań aktywności enzymatycznej jako wskaźnika reakcji gleby na nawożenie azotem. i wskazują na przydatność badań aktywności enzymatycznej jako wskaźnika przemian siarki w glebach.

LITERATURA

1. Adam, G., Duncan, H. (2001). *Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils*. Soil Biology & Biochemistry 33: 943-951. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00244-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3).
2. Barabasz, W., Albińska, D., Jaskowska, M., Lipiec, J. (2002). *Biologiczne skutki nawożenia azotem mineralnym na mikroorganizmy glebowe*. Dziennik Nauk o Środowisku Polskim 11(3): 193-198.
3. Bardsley, C.E., Lancaster, J.D. (1960). *Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soil*. Soil Science Society of America, Proceedings 24: 265-268
<http://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400040015x>.
4. Duncan, E.G., O'Sullivan, C.A., Roper, M.M.; Biggs, J.S., Peoples, M.B. (2018). Influence of co-application of nitrogen with phosphorus, potassium and sulphur on the apparent efficiency of nitrogen fertiliser use, grain yield and protein content of wheat. Field Crops Res 226:5665 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.010>.
5. Einland, F. (1980). *The effect of manure and NPK fertilizers on the soil microorganisms in a Danish long term field experiment*. Tidskrift for Planeavl. 5: 447-454.
6. Eivazi, F., Tabatabai, M.A. (1988) *Glucosidases and galactosidases in soils*. Soil Biology and Biochemistry, 20, 5: 601-606.
7. Fazili, I.S., Jamal, A., Ahmad, S., Masoodi, M., Khan, J.S., Abdin, M.Z. (2008). *Interactive effect of sulphur and nitrogen on nitrogen accumulation and harvest in oilseed crops differing in nitrogen assimilation potential*. Journal of Plant and Nutrition 31: 1203-1220.
8. Gaj, R., Klikocka, H. (2011). *Wielofunkcyjne działanie siarki w roślinie – od żywienia do ochrony*. Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin 51(1): 33-44.
9. Kaczor, A., Zuzañska, J. (2009). *Znaczenie siarki w rolnictwie*. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie. Zamość, s. 70-75.
10. Kandeler, E. (1995). *Enzymes Involved in Nitrogen Metabolism*. W *Methods in Soil Biology*; Scinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., Margesin, R., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany: 163-184.
11. Klikocka, H., Wyłupek, T., Narolski, B. (2015). *Analiza zawartości siarki w biosferze Zamojszczyzny*. Biosfera. Ochrona Środowiska, 37 (1), 33.

12. Kucharski, J. (1997). *Relacje między aktywnością enzymów a żyznością gleby*. W: Barabasz W.(red.) *Drobnoustroje w środowisku – występowanie aktywność i znaczenie*. AR Kraków: 327-347.
13. Lipiński, W., Terelak, H., Motowicka – Terelak, T. (2003). *Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego*. Roczniki Gleboznawcze, LIV, 3: 79-84.
14. Mandal, A., Patra, A.K., Singh, D., Swarup, A., Masto, R.E. (2007). *Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages*. *Bioresource Technology*, 98, 3585-3592. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.027>.
15. Marska, E., Wróbel, J. (2000). *Znaczenie siarki dla roślin uprawnych*. *Folia Universitatis Technologiae Stetinensis*. 204, Agricultura 81: 61-76.
16. McGrath, S.P., Zhao, F., Blake – Kalff, M.M.A. (2003). *Sulphur in soils: processes, behaviour and measurement*. *Nawozy i Nawożenie (V)*, 2(15): 28-54.
17. Mekich, M.Z., Dzhura, N.M., Terek, O.I. (2015). *Enzymatic activity of oil-contaminated soils in the process of phytorecultivation by maize plants (Zea mays L.)*. *Visnyk of the Lviv University. Series Biology*. 69: 140–147.
18. Mndzebele, B., Ncube, B., Fessehazion, M., Mabhaudhi, T., Amoo, S., du Plooy, C., Venter, S., Modi, A. (2020). *Effects of cowpea-amaranth intercropping and fertiliser application on soil phosphatase activities, available soil phosphorus, and crop growth response*. *Agronomy*, 10(1): 79.
19. Motowicka-Terelak, T., Terelak, H. (1998). *Siarka w glebach Polski - stan i zagrożenie*. Warszawa, s. 7-90.
20. Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G., Renella, G. (2003). *Microbial diversity and soil functions*. *European Journal of Soil Science* 54: 655–670.
21. Tabatabai, M.A., Bremner, J.M. (1970). *Factors affecting soil aryl-sulfatase activity*. *Soil Science Society of America, Proceedings* 34: 427-429.
22. Thalmann, A. (1968). *Zur methodik der bestimmung der dehydrogenaseaktivität im boden mittels triphenyltetrazoliumchlorid (TTC)*. *Landwirtschaftliche Forschung* 21: 249–258.

Autor do korespondencji: dr hab. inż. Anetta Siwik-Ziomek,
prof. PBŚ
ORCID: 0000-0003-4008-4632
e-mail: ziomek@pbs.edu.pl

inż. Diana Yatsenko

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Wydział Rolnictwa i Biotechnologii
Katedra Biogeochemii i Gleboznawstwa
Bernardyńska 6, 85-029 Bydgoszcz

Otrzymano: 05.12.2023 r.
Zwrócono po recenzji: 17.12.2023 r.
Zaakceptowano: 18.12.2023 r.