

ZALEŻNOŚCI MIĘDZY ZAWARTOŚCIĄ FITODOSTĘPNYCH FORM SELENU, SIARKI I FOSFORU W GLEBIE ORAZ ICH WPŁYW NA POBIERANIE SELENU PRZEZ ROŚLINY PSZENICY OZIMEJ W WARUNKACH ZRÓŻNICOWANEGO NAWOŻENIA

Katarzyna Borowska, Joanna Lemanowicz, Jan Koper,
Anetta Siwik-Ziomek, Anna Piotrowska-Długosz,
Magdalena Polkowska

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Streszczenie. Celem badań było określenie zależności między zawartością fitodostępnych form Se, S i P w glebie oraz ich wpływu na kumulację selenu przez rośliny pszenicy ozimej w warunkach zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem mineralnym. Materiał badawczy (gleba i rośliny pszenicy ozimej) pochodził z wieloletniego doświadczenia założonego w RZD w Grabowie nad Wisłą należącego do IUNG w Puławach. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększyło zawartość fitoprzyswajalnych form selenu. Największą zawartość stwierdzono w glebie z obiektów, na których zastosowano obornik w ilości $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Zastosowanie największej dawki azotu mineralnego spowodowało obniżenie zawartości tej frakcji Se w glebie. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększyło zawartość P_{E-R} , która wzrastała wraz ze wzrostem dawek. Stosowany w doświadczeniu azot mineralny zwiększył zawartość P_{E-R} w glebie tylko do dawki $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Najwyższą koncentrację $S\text{-SO}_4$ stwierdzono w glebie, na której stosowano obornik w największej dawce, zaś nawożenie azotem istotnie obniżyło zawartość tej frakcji siarki. Wyliczone współczynniki korelacji wykazały istotne zależności między zawartością fitoprzyswajalnych frakcji Se a jego zawartością w pszenicy ozimej. Stwierdzono istotną ujemną korelację między zawartością Se w roślinach a zawartością $S\text{-SO}_4$ w glebie. Zawartość P_{E-R} i $S\text{-SO}_4$ w glebie była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością węgla związków organicznych, natomiast ujemnie z frakcją łożową.

Słowa kluczowe: selen fitoprzyswajalny, fosfor Egnera-Riehma, siarka siarczanowa, obornik, azot, pszenica ozima

WSTĘP

Uważa się, że selen jest jednym z najbardziej kontrowersyjnych pierwiastków śladowych. Z jednej strony, jest on toksyczny w dużych dawkach i wiele informacji dostępnych w literaturze odnosi się do skutków środowiskowych związanych ze skażeniem selenem. Z drugiej strony, deficyt tego pierwiastka jest globalnym problemem związanym ze zwiększoną podatnością zwierząt i ludzi na wiele chorób [Lyons i in. 2007]. Obieg selenu w łańcuchu pokarmowym rozpoczyna się w glebach, skąd pobierany przez rośliny trafia do organizmu ludzkiego. Może też wraz z roślinami pastewnymi być pobrany przez zwierzęta i za pośrednictwem produktów spożywczych pochodzenia zwierzęcego trafić do organizmu człowieka. Koncentracja selenu w glebach różni się znacząco – w większości gleb zawartość tego pierwiastka występuje w zakresie od 0,1 do 2 mg·kg⁻¹ (średnio 0,5 mg·kg⁻¹) [Kabata-Pendias 2011]. W glebach, w zależności od czynników glebowych (np. potencjału oksydoredukcyjnego, pH, zawartości substancji organicznej), występują różne formy selenu: selenki, selen elementarny, seleniany IV i seleniany VI. Wzrost pH sprzyja powstawaniu selenianów VI, które są formą łatwo dostępną dla roślin, zakwaszenie środowiska prowadzi natomiast do powstawania selenu elementarnego i selenków – form trudno dostępnych dla roślin [Pyrzyńska, 2007 Kabata-Pendias 2011]. Jak podają Fageria i inni [2002], występowanie poszczególnych frakcji selenu w glebach jest zróżnicowane i określa w znacznym stopniu jego mobilność oraz dostępność dla roślin. Czynniki, takie jak zawartość substancji organicznej, zawartość i formy tlenków, a także zawartość węglanów oraz pH zmieniają właściwości gleb, bioprzyswajalność oraz transport pierwiastków śladowych w środowisku glebowym oraz agroekosystemie. Celem przeprowadzonych badań było określenie wzajemnych zależności między zawartością fitodostępnych form selenu, siarki i fosforu w glebie oraz ich wpływu na pobieranie selenu przez rośliny w warunkach zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem.

MATERIAŁ I METODY

Próbki gleby i roślin pszenicy ozimej (odmiany Korweta) pobrano w maju 2002 roku z wieloletniego statycznego doświadczenia założonego w RZD w Grabowie nad Wisłą prowadzonego od 1980 roku przez Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG w Puławach. Doświadczenie założono jako dwuczynnikowe, w układzie losowanych podbloków (split-plot) w czterech powtórzeniach z następującym doбором roślin w zmianowaniu: ziemniak – pszenica ozima + międzyplon – jęczmień jary z wsiewką – koniczyna z trawami (wariant wzbogacający glebę w substancję organiczną). Czynnikiem doświadczenia było nawożenie obornikiem pod ziemniaki w dawkach 0, 20, 40 i 60 t·ha⁻¹ świeżej masy (czynnik I) i nawożenie azotem w formie saletry amonowej w dawkach 0, 40, 80 i 120 kg N·ha⁻¹ (czynnik II) pod pszenicę ozimą. Rośliny pszenicy ozimej zebrano w fazie rozwojowej BBCH 33, oczyszczono, oddzielono ich część nadziemną, wysuszono i rozdrobniono. Zawartość selenu w biomase roślin po mineralizacji na mokro w mieszaninie stężonego HNO₃ i H₂O₂ w zamkniętym układzie mikrofalowym firmy Millestone oznaczono metodą Watkinsona [1966] przy użyciu spektrofotometry Hitaachi F-2000. Próbki gleby pobrano z warstwy ornej 0–20 cm, wysuszono, a następnie prze-

siano przez sito o oczkach 2 mm. Zawartość fitoprzyswajalnych form selenu oznaczono, wykorzystując część analizy sekwencyjnej zgodnie z metodą Chao i Sanzolone [1989] w modyfikacji Wang i Chen [2003]. W celu wyekstrahowania selenianów VI zastosowano 0,25 M roztwór KCl, a wymienne specyficznie zaadsorbowane seleniany IV wyekstrahowano, stosując roztwór 0,1 M KH_2PO_4 . Obecne w roztworze seleniany chelatowano, dodając 2,3-diaminonaftalen i oznaczano spektrofluorymetrycznie. Zawartość fosforu przyswajalnego (P_{E-R}) w glebie oznaczono metodą Egnera-Riehma – DL [1996], a zawartość siarki siarczanowej VI zgodnie z procedurą Bardsleya-Lancastera [1960]. Dodatkowo w próbkach gleby oznaczono skład granulometryczny metodą Boycousse-Cassagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego, pH w 1 mol·dm⁻³ KCl – potencjometrycznie oraz zawartość węgla związków organicznych (C_{org}) – metodą Tiurina [Lityński i in. 1976].

Obliczenia statystyczne wykonano metodą analizy wariancji za pomocą pakietu statystycznego Statistica 8.0 Windows Stat. Soft. Inc. 2007. Istotność różnic między obiektami weryfikowano testem Tukeya na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. W celu znalezienia związków pomiędzy badanymi cechami przeprowadzono analizę korelacji liniowej Pearsona.

WYNIKI I DYSKUSJA

Z danych zamieszczonych w tabeli 1 wynika, że zawartość części ziemistych określono na następującym poziomie: frakcji piaskowej – 66–79%, frakcji pyłowej – 11–25% oraz frakcji iłowej – 6–10%. Na podstawie określonego procentowego udziału frakcji granulometrycznych stwierdzono, zgodnie z klasyfikacją według PTG, że badana gleba w większości analizowanych próbek należała do gatunku gliny piaszczystej. Badana gleba, pobrana z obiektów nienawożonych obornikiem, charakteryzowała się wartościami kwasowości wymiennej w granicach od 5,2 do 5,5 (tab. 1). Na ogół, nieznacznie wyższe wartości pH oznaczono w próbkach glebowych z obiektów, gdzie obornik zastosowano w największej ilości. Przeciętnie największe zawartości węgla w związkach organicznych w glebie, niezależnie od stosowanego nawożenia azotem, stwierdzono po zastosowaniu obornika w ilości 60 t·ha⁻¹ (tab. 1). Nawożenie azotem przyczyniło się również do zwiększenia zawartości węgla w związkach organicznych w glebie, a istotny jego wzrost stwierdzono na obiektach, na których nawóz ten stosowano w największej ilości. Zawartość azotu ogółem w badanej glebie zależała zarówno od nawożenia obornikiem, jak i azotem, wzrastała wraz ze wzrostem dawek obu nawozów (tab. 1). Największą zawartość tego składnika stwierdzono na obiektach, na których obornik stosowano w ilości 60 t·ha⁻¹.

W glebie, pod uprawą pszenicy ozimej, każda z zastosowanych dawek obornika istotnie zwiększyła zawartość frakcji fitoprzyswajalnych selenu (tab. 1) w odniesieniu do obiektów, na których tego nawozu nie stosowano. Wzrastające dawki obornika zwiększały zawartość selenianów, a największą ich zawartość stwierdzono w glebie z obiektów, na których zastosowano obornik w ilości 20 t·ha⁻¹. Wzrost ten został udowodniony statystycznie. Dalsze zwiększenie dawki nawozu naturalnego istotnie obniżyło zawartość tych frakcji w glebie. Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ nawożenia azotem w formie saletry amonowej na kształtowanie się zawartości selenianów w glebie, jednak zastosowanie azotu na poziomie 120 kg·ha⁻¹ istotnie obniżyło zawartość fitodostępnych form selenu w odniesieniu do gleby z obiektu, na którym azotu nie stosowano (tab. 1).

Tabela 1. Podstawowe właściwości oraz zawartość przyswajalnych form selenu, siarki i fosforu w glebie w warunkach doświadczenia

Table 1. General properties and phytoavailable content of selenium, sulphur and phosphorus in soil under experimental conditions

Dawki obornika FYM doses [t·ha ⁻¹] (czynnik I factor I)	Dawki azotu Nitrogen doses [kg·ha ⁻¹] (czynnik II factor II)	Frakcje granulometryczne Granulometric fractions [%]			pH KCl	C _{org} [g·kg ⁻¹]	N _{tot} [g·kg ⁻¹]	Selen przyswajalny Available selenium	S-SO ₄	Fosfor przyswajalny Available phosphorus
		piaskowa sand	pyłowa silt	iłowa clay				[mg·kg ⁻¹]		
0	0	71	20	9	5,5	7,87	0,889	0,063	11,33	84,05
	40	78	12	10	5,5	8,36	0,966	0,061	10,59	95,11
	80	69	21	10	5,4	8,44	0,924	0,056	11,31	107,5
	120	69	22	9	5,2	8,27	0,966	0,057	11,10	101,6
Średnio – Mean						8,23	0,936	0,059	11,08	97,06
20	0	74	18	8	5,3	8,84	0,980	0,069	11,44	91,87
	40	79	11	10	5,4	8,52	0,956	0,081	9,41	99,94
	80	70	21	9	5,4	8,70	0,956	0,082	10,99	114,9
	120	68	22	10	5,3	9,30	0,956	0,071	10,37	105,5
Średnio – Mean						8,84	0,962	0,076	10,55	103,0
40	0	66	25	9	5,4	9,49	0,991	0,067	10,23	98,74
	40	69	21	10	5,4	9,25	1,012	0,069	10,66	106,0
	80	75	19	6	5,4	10,44	0,942	0,064	10,55	129,0
	120	68	24	8	5,3	10,26	0,987	0,068	9,02	118,4
Średnio – Mean						9,86	0,983	0,067	10,06	113,0
60	0	71	21	8	5,4	10,36	0,931	0,067	23,15	116,1
	40	70	23	7	5,5	10,19	0,970	0,076	21,19	126,6
	80	68	23	9	5,5	10,10	0,956	0,073	19,68	130,9
	120	70	22	8	5,3	9,76	0,921	0,059	19,97	108,5
Średnio – Mean						10,10	0,945	0,069	21,00	120,5
Średnio dla dawek azotu Mean for nitrogen doses					N0	9,14	0,948	0,067	14,04	97,69
					N1	9,08	0,976	0,072	12,96	106,9
					N2	9,42	0,945	0,067	13,13	120,6
					N3	9,40	0,958	0,064	12,62	108,5
NIR 0.05	I – czynnik I nawożenie obornikiem				I	0,062	0,005	0,001	1,578	1,038
	II – czynnik II nawożenie azotem				II	0,031	0,002	0,002	1,157	0,873
	I/II – interakcja nawożenie obornikiem × × nawożenie azotem				I/II	0,080	0,004	0,003	2,313	1,793
	II/I – interakcja nawożenie azotem × nawo- żenie obornikiem				II/I	0,062	0,006	0,003	2,491	1,746

Podobne wyniki uzyskano we wcześniejszych badaniach dotyczących wpływu nawożenia obornikiem i azotem w wariancie zubożającym glebę z substancji organicznej [Borowska 2010]. Kabata-Pendias [2011] oraz inni autorzy [Fageria i in. 2002, Broadley i in. 2006, Pyrzyńska 2007] podają, że w glebach o średnich warunkach oksydacyjnych i odczynie zbliżonym do obojętnego frakcją dominującą są seleniany IV, jednak połą-

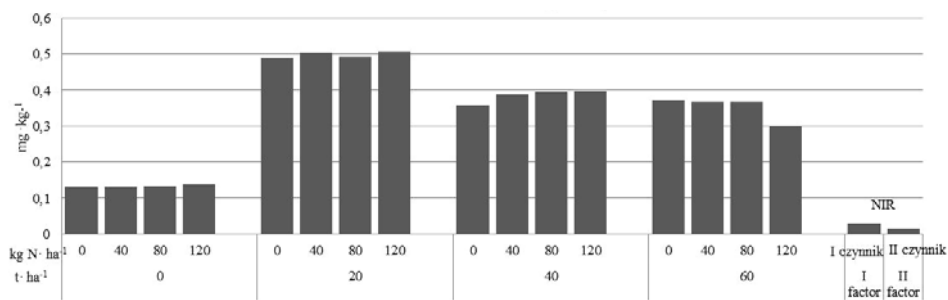
czenia tej frakcji selenu zarówno z tlenkami, jak i wodorotlenkami żelaza oraz materią organiczną są raczej stabilne i w związku z tym mogą być słabo dostępne dla roślin.

Zawartość P_{E-R} mieściła się w zakresie od 84,05 do 130,9 mg·kg⁻¹ w zależności od zastosowanych dawek obornika i azotu (tab. 1). Według kryteriów zawartych w PN-R-04023 [1996], gleby te zaliczane są do I klasy – o bardzo dużej zasobności w ten pierwiastek. Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ zastosowanych czynników doświadczenia na zmiany zawartości fosforu przyswajalnego dla roślin w glebie. Największą zawartość P_{E-R} (średnio dla nawożenia azotem) stwierdzono w glebie pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 t·ha⁻¹ i była ona o 19% większa w porównaniu do zawartości tego składnika w glebie obiektu kontrolnego. Z badań Lemanowicz i innych [2014a, b] wynika, że wieloletnie stosowanie obornika wyraźnie wpływało na zwiększenie poziomu fosforu przyswajalnego w glebie, co związane jest z faktem wnoszenia wraz z obornikiem średnio około 13,5 kg P·ha⁻¹ do gleby. Największą zawartość P_{E-R} stwierdzono w glebie pobranej z obiektów, na których nawożono rośliny azotem w dawce 80 kg·ha⁻¹ (tab. 1). Nawożenie azotem w dawce 120 kg·ha⁻¹ spowodowało istotne zmniejszenie zawartości przyswajalnej dla roślin frakcji fosforu, w porównaniu do zastosowanej dawki 80 kg·ha⁻¹ (tab. 1) średnio o 10%. W badaniach Łabudy i innych [2003] zaobserwowano również obniżenie zawartości P_{E-R} w glebie pod wpływem wzrastających dawek azotu, co autorzy wiążą ze wzrastającym pobieraniem fosforu przez rośliny. Działanie azotu z jednej strony można rozpatrywać poprzez jego oddziaływanie na wzrost plonów i wynikające stąd większe pobieranie fosforu, z drugiej zaś strony należy mieć na uwadze, że duże dawki azotu mogą powodować zwiększenie kwasowości gleby. W przypadku niskiego pH zdolność do adsorpcji fosforu przez uwodnione tlenki glinu i żelaza jest większa. Wyższe stężenie anionów fosforanowych będące konsekwencją mniejszego wiązania fosforu występuje natomiast w glebach o pH wahającym się w przedziale 6,0–7,0.

W większości gleb użytkowanych rolniczo w Polsce zawartość siarki siarczanowej nie przekracza 25 mg·kg⁻¹ gleby. Najwięcej gleb, tj. 70% powierzchni użytków rolnych, charakteryzuje się zawartością tej frakcji siarki w granicach 5–20 mg·kg⁻¹ [Lipiński i in. 2003]. Zawartość siarki siarczanowej w badanej glebie mieściła się w szerokim przedziale 9,02 do 23,15 mg·kg⁻¹ (tab. 1). Średnia zawartość siarczanów VI dla wszystkich obiektów doświadczalnych (18,42 mg·kg⁻¹) klasyfikuje badaną glebę do gleb o wysokiej zasobności w ten składnik, co gwarantuje dobre zaopatrzenie roślin [Lipiński i in. 2003]. Najmniejszą zawartość siarczanów oznaczono w glebie nawożonej obornikiem w ilości 40 t·ha⁻¹ i azotem w dawce 120 kg·ha⁻¹. Koncentracja siarczanów VI w glebie poniżej 10 mg·kg⁻¹ uważana jest za niską i nie zapewnia roślinom właściwego zaopatrzenia w siarkę. W przeprowadzonych badaniach stwierdzono wpływ obornika na zawartość siarki siarczanowej. Obornik zawiera od 0,9 do 1,2 kg·ha⁻¹ siarki i ocenia się, że przeciętnie 20% siarki całkowitej występuje w postaci siarczków przyswajalnych dla roślin, 40% stanowią połączenia organiczne, a 40% to organiczne i nieorganiczne siarczany [Kaczor i Zuzanska 2009]. Stwierdzono, że zwiększające się dawki obornika powodowały wzrost koncentracji frakcji siarki przyswajalnej dla roślin, a największą stwierdzono w próbkach glebowych pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w ilości 60 t·ha⁻¹ (tab. 1). Nawożenie azotem determinowało także zawartość siarczanów VI w analizowanej glebie (tab. 1). Zawartość siarczanów w roztworze glebowym jest zależna od obecności

w niej innych jonów głównie jonów fosforanowych, azotanów i chlorków. Zwiększająca się koncentracja jonów fosforanowych w roztworze glebowym powoduje zmniejszenie adsorpcji zarówno HPO_4^{2-} , jak i SO_4^{2-} [Scherer 2009]. Znalazło to potwierdzenie w koncentracji siarczanów VI, gdyż największą zawartość siarczanów oznaczono w próbkach gleby z obiektów nienawożonych azotem. Najprawdopodobniej nastąpiło ograniczenie adsorpcji siarczanów pod wpływem wysokiej koncentracji jonów amonowych. Niedobór siarki w glebie uniemożliwia roślinom wykształcenie odpowiedniego plonu biomasy, a równocześnie pogarsza wartość biologiczną plonu [Marska i Wróbel 2000].

Jak wskazują dane zamieszczone na rysunku 1, największą zawartość selenu w częściach nadziemnych pszenicy stwierdzono na obiektach, na których zastosowano nawożenie obornikiem w ilości $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Rośliny z tych obiektów zgromadziły w częściach nadziemnych ponad trzykrotnie więcej selenu niż nienawożone nawozem naturalnym. Dalsze zwiększanie dawek nawozu naturalnego istotnie obniżyło jego zawartość. Zawartość selenu w biomase pszenicy ozimej istotnie zależała od nawożenia azotem, które na ogół zwiększało koncentrację tego pierwiastka w pszenicy. W przypadku łącznego zastosowania obornika na poziomie $60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i azotu w najwyższej dawce zawartość selenu w częściach nadziemnych obniżyła się.



Rys. 1. Zawartość selenu [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] w częściach nadziemnych pszenicy ozimej

Fig. 1. The selenium content [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] in above-ground parts of winter wheat

Uzyskane z obliczeń statystycznych wartości współczynników korelacji wykazały istotne zależności między zawartością fitoprzyswajalnych frakcji selenu a zawartością tego pierwiastka w pszenicy ozimej (tab. 2). Stwierdzono istotną ujemną korelację między zawartością selenu w roślinach a zawartością siarki siarczanowej w badanej glebie. Ze względu na chemiczne podobieństwo siarki i selenu rośliny pobierają, transportują i metabolizują oba pierwiastki, wykorzystując podobne mechanizmy. Pobierany w wyniku aktywnego transportu selenian VI konkuruje z siarczanami VI. Panuje pogląd, że oba aniony są przenoszone przez nośniki siarki w plazmalemmie.

Transport selenianów w innych organizmach odbywa się także za pośrednictwem transporterów siarkowych. Ponadto w warunkach niedoboru siarki zwiększa się ekspresja enzymów zaangażowanych w metabolizm Se/S, co przyczynia się do zwiększonego pobierania selenianów [Terry i in. 2000, Goh i Lim 2004]. Jak podają Sors i inni [2005] oraz Kabata-Pendias [2011], zwiększona zawartość fosforu w glebie obniża dostępność selenu, działając antagoniście w procesie pobierania go przez rośliny, co jednak nie znalazło

Tabela 2. Współczynniki korelacji dla badanych cech

Table 2. Correlation coefficients for selected traits

Badane cechy Traits examined	Selen w glebie Selenium in soil	S-SO ₄	P _{E-R}	C _{org}	N _{og}	Selen w roślinach Selenium in plants	pH	Piasek Sand	Pył Silt
S-SO ₄	0,035								
P _{E-R}	0,274	0,476							
C _{org}	0,174	0,534*	0,806*						
N _{og}	0,310	-0,284	0,109	0,207					
Selen w roślinach Selenium in plants	0,587*	-0,512*	-0,033	0,087	0,451				
pH	0,266	0,256	0,145	0,030	-0,204	-0,339			
Piasek Sand	0,125	-0,180	-0,231	-0,270	-0,136	0,135	0,222		
Pył – Silt	-0,124	0,291	0,384	0,462	0,099	-0,137	-0,222	-0,952*	
II – Clay	0,013	-0,385	-0,532*	-0,661*	0,102	0,025	0,032	-0,019	-0,288

potwierdzenia w przeprowadzonych badaniach. Na podstawie przeprowadzonej analizy korelacji stwierdzono, że zawartość fosforu przyswajalnego i siarki siarczanowej w glebie była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością węgla związków organicznych, natomiast ujemnie z frakcją iłową. Według Muralidhar i innych [2005], materia organiczna zwiększa rozpuszczalność trudno rozpuszczalnych ortofosforanów wapnia, wiąże kationy Al i Fe, jednocześnie uwalniając fosfor do roztworu glebowego. Obecne w glebie kationy są wiązane w procesie chelatowane przez związki organiczne, co prowadzi do zwiększenia się stężenia anionów fosforanowych w roztworze glebowym.

WNIOSKI

1. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększyło zawartość fitoprzyswajalnych form selenu w glebie. Największą zawartość stwierdzono w glebie z obiektów, na których zastosowano obornik w ilości 20 t·ha⁻¹. Zastosowanie nawożenia azotem w dawce 120 kg N·ha⁻¹ spowodowało obniżenie zawartości selenu w glebie.

2. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększyło zawartość P_{E-R}, która zwiększała się wraz ze wzrostem dawek, a największą jego zawartość stwierdzono w glebie z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 t·ha⁻¹. Nawożenie azotem mineralnym zwiększyło zawartość P_{E-R} w glebie tylko do dawki 80 kg N·ha⁻¹.

3. Najwyższą koncentrację siarczanów VI stwierdzono w glebie, na której stosowano obornik w największej dawce, zaś nawożenie azotem mineralnym istotnie obniżyło zawartość tej frakcji siarki.

4. Uzyskane z obliczeń statystycznych wartości współczynników korelacji wykazały istotne zależności między zawartością fitoprzyswajalnych frakcji seleniu a zawartością tego pierwiastka w roślinach pszenicy ozimej. Stwierdzono istotną ujemną korelację między zawartością seleniu w roślinach a zawartością siarki siarczanowej VI w badanej glebie. Zawartość fosforu przyswajalnego i siarki siarczanowej VI w glebie była istotnie dodatnio skorelowana z zawartością węgla związków organicznych, natomiast ujemnie z frakcją łożwą.

LITERATURA

- Bardsley C.E., Lancaster J.D., 1960. Determination of reserve sulfur and soluble sulfates in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24, 265–268.
- Borowska K., 2010. Selen w glebie i roślinach w warunkach zróżnicowanego nawożenia organicznego i mineralnego. *Rozprawy 140, UTP Bydgoszcz*, 1–108.
- Broadley M.R., White P.J., Bryson R.J., Meacham M.C., Bowen H.C., Johnson S.E., Hawkesford M.J., McGrath S.P., Zhao F.J., Breward N., Harriman M., Tucker M., 2006. Biofortification of UK food crops with selenium. *Proc. Nutr. Soc.* 65, 169–181.
- Chao T.T., Sanzolone R.F., 1989. Fractionation of soil selenium by sequential partial dissolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 2, 385–392.
- Fageria N.K., Baligar V.C., Clark R.B., 2002. Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy* 77, 185–268.
- Goh K.H., Lim T.T., 2004. Geochemistry of inorganic arsenic and selenium in a tropical soil: effect of reaction time, pH, and competitive anions on arsenic and selenium adsorption. *Chemosphere* 55, 849–859.
- Kabata-Pendias A., 2011. Trace elements in soils and plants. 4th ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- Kaczor A., Zuzañska J., 2009. Znaczenie siarki w rolnictwie. *Chemia – Dydaktyka – Ekologia – Metrologia* 14, 1–2, 69–78.
- Lemanowicz J., Siwik-Ziomek A., Koper J., 2014a. Effects of farmyard manure and nitrogen fertilizers on mobility of phosphorus and sulphur in wheat and activity of selected hydrolases in soil. *Int. Agrophys.* 28, 49–55.
- Lemanowicz J., Siwik-Ziomek A., Koper J., 2014b. How fertilization with farmyard manure and nitrogen affects available phosphorus content and phosphatase activity in soil. *Pol. J. Environ. Stud.* 23, 4, 1211–1217.
- Lipiński W., Terelak H., Motowicka-Terelak T., 2003. Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego. *Rocz. Glebozn.* 54, 3, 79–84.
- Lityński T., Jurkowska H., Gorlach E., 1976. *Analiza chemiczno-rolnicza*. PWN, Warszawa.
- Lyons M.P., Papazyan T.T., Surai P.F., 2007. Selenium in food chain and animal nutrition: lessons from nature – review. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 20, 7, 1135–1155.
- Łabuda S.Z., Mazurkiewicz I., Maćkowiak Cz., 2003. Pierwiastki zmienno-wartościowe w glebie pod wpływem nawożenia substancją organiczną i azotem w doświadczeniu polowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 493, 409–420.
- Marska E., Wróbel J., 2000. Znaczenie siarki dla roślin uprawnych. *Fol. Univ. Agric. Stetin.* 204, *Agricultura* 81, 69–76.
- Muralidhar M., Gupta B.P., Jayanthi M., 2005. Quantity-intensity relationship and fixation of phosphorus in soils from shrimp farming areas of coastal India. *Indian J. Fish.* 52, 4, 421–431.
- PN-R-04023, 1996. *Analiza chemiczno-rolnicza gleby – Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych*. Polski Komitet Normalizacji, Warszawa.

- Pyrzyńska K., 2007. Występowanie selenu w środowisku. W: Selen pierwiastek ważny dla zdrowia, fascynujący dla badacza. Wierzbicka M., Bulska E., Pyrzyńska A., Wysocka I., Zachara B.A. (red.). Wyd. Malamut, Warszawa, 25–30.
- Scherer H.W., 2009. Sulphur in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 326–335.
- Sors T.G., Ellis D.R., Salt D.E., 2005. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis Res.* 86, 373–389.
- Terry N., Zayed A.M., De Souza M.P., Tarun A.S., 2000. Selenium in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* 51, 401–432.
- Wang M.C., Chen H.M., 2003. Forms and distribution of selenium at different depths and among particle size fractions of three Taiwan soils. *Chemosphere* 52, 585–593.
- Watkinson J.H., 1966. Fluorometric determination of selenium in biological material with 2,3-diaminonaphthalene. *Anal. Chem.* 38, 92–97.

INTERACTION BETWEEN THE CONTENT OF PHYTOAVAILABLE SELENIUM AND SELECTED MACROELEMENTS IN SOIL AND IMPACT ON THE CUMMULATION OF SELENIUM IN WINTER WHEAT IN RELATIONS TO DIFFERENTIATED FERTILIZATION

Summary. The aim of the present research was to estimate the interactions between phytoavailable forms of selenium, sulphur and phosphorus in soil and its impact on the cummulation of selenium in winter wheat under differentiated farmyard manure and nitrogen fertilization. The experiment was carried out with the crop rotation system: potato – winter wheat + intercrop – spring barley + undersown and red clover with grasses. The soil and plant samples was collected in May 2002 from long-term static experiment design by IUNG in Pulawy. The soil was fertilized with manure under potato in the doses of 0, 20, 40, 60 t·ha⁻¹ and with nitrogen in the doses of 0, 40, 80 and 120 kg N·ha⁻¹ under winter wheat. Selenium content in soils and plants was determined by the method of Watkinson using a Hitachi F-2000 spectrofluorometer. Available to plants forms of selenium were extracted from the soil by the part of sequential extraction method recommended by Chao and Sanzolone with modification of Wang and Chen. The content of P_{E-R} was estimated using Egner-Riehm's – DL method and the content of sulphate sulphur by Bardsley-Lancaster. The application of FYM increased the content of phytoavailable fractions of selenium in soil and the highest amounts of Se was obtained in soil fertilized with FYM in the dose of 20 t·ha⁻¹. Nitrogen fertilization affected the selenium content in the investigated soil in an unclear way, but applying the highest dose of nitrogen caused the decrease of this fraction of selenium in soil. We observed an increase of available phosphorus in the soil after application of FYM with increasing doses of farmyard manure. In the soil, where the highest dose of nitrogen was applied the significant decrease in its concentrations was observed. The highest concentration of sulphate sulphur was observed in soil after applying the highest dose of FYM in comparison to the control soil, but nitrogen fertilization decreased the content of sulphate sulphur in soil. Statistical analysis demonstrated a significant dependence between available selenium content in soil and the content of selenium in plants. Negative significant correlation was found between the selenium content in plants and the content of sulphate sulphur in soil. The content of available phosphorus and sulphur was positively highly correlated with organic carbon and total nitrogen and negatively correlated with clay content in soil.

Key words: phytoavailable selenium, Egner-Riehm's phosphorus, sulphate sulphur, farmyard manure, nitrogen, winter wheat