



PL0000849

CENTRALNE LABORATORIUM OCHRONY RADIOLOGICZNEJ
CENTRAL LABORATORY FOR RADIOLOGICAL PROTECTION

CLOR

RAPORT CLOR nr 133

**POBIERANIE ^{226}Ra Z GLEBY PRZEZ ROŚLINY Z RODZIN TRAW
I BALDASZKOWATYCH**

**UPTAKE OF ^{226}Ra FROM SOIL BY THE GRAMINEAE
AND THE UMBELLIFERAE**

Lidia Rosiak, Zofia Pietrzak-Flis

WARSZAWA 1998

31 - 11

Praca została zrecenzowana przez
dr inż. Leonarda Indekę z Katedry Ochrony Środowiska SGGW w Warszawie.

Streszczenie

Badano pobieranie ^{226}Ra przez rośliny z rodzin traw (trawa, pszenica, kukurydza) i baldaszkowatych (marchew, pietruszka) z gleby typu piasek lekki i piasek słabogliniasty na odkrytym polu i pod namiotem foliowym. ^{226}Ra oznaczano w częściach nadziemnych roślin po ich umyciu w wodzie destylowanej, w wodzie po myciu, w korzeniach oraz ^{226}Ra rozpuszczalny w opadzie całkowitym.

Stężenia ^{226}Ra było podobne w roślinach uprawianych na odkrytym polu i pod namiotem. Wskazuje to, że ^{226}Ra przechodzi do roślin głównie przez system korzeniowy. Pobieranie tego radionuklidu przez rośliny zależy przede wszystkim od jego dostępności (stężenia ^{226}Ra wymiennego), a nie zależy bezpośrednio od całkowitego stężenia w glebie.

Stężenie ^{226}Ra w różnych częściach roślin malało według następującej kolejności: liście i łodygi > korzenie > ziarno. Odpowiednio, w tej samej kolejności malały współczynniki przechodzenia ^{226}Ra z gleby do roślin.

Summary

Uptake of ^{226}Ra by the Gramineae (grass, wheat, maize) and the Umbelliferae (carrot, parsley) was determined for the plants growing on sandy soil and sandy loam soil in an open field and in a polyethylene tent. ^{226}Ra was determined in the above ground parts of the plants after washing in distilled water, in the rinse obtained from washing, in roots, in soils and in soluble fraction of total deposition.

Results showed that the incorporation of ^{226}Ra in the plants was similar for the open field and in the tent. This indicates that ^{226}Ra enters the plants mainly via the root system. Uptake of this radionuclide by the plants depends mainly on its bioavailability in the soil (concentration of exchangeable ^{226}Ra), whereas it did not directly depend on the total concentration of this radionuclide in the soil.

The concentration of ^{226}Ra in various parts of the plants decreased in the order: leaves and stems > roots > grains. Appropriately, in the same order decreased transfer factors.

1. Wstęp

Badania nad przechodzeniem ^{226}Ra do roślin jadalnych i wykorzystywanych jako pasza dla zwierząt prowadzone są od wielu lat [Grzybowska, 1974, McDowell-Boyer i inni, 1980, Tracy i inni, 1983, Vasconcellos i inni, 1987, Ibrahim i Whicker, 1988, Kopp i inni, 1989, Simon i Ibrahim, 1990, Penna-Franca i inni, 1968]. Rośliny są ważnym ogniwem łańcucha pokarmowego; w Polsce produkty żywnościowe pochodzenia roślinnego wnoszą ok. 70 % ^{226}Ra wprowadzanego do organizmu człowieka z pożywieniem [Pietrzak-Flis i inni, 1997, Pietrzak-Flis i inni, 1997a]. ^{226}Ra pobierany jest przez rośliny głównie przez system korzeniowy, skąd przemieszcza się do innych części roślin [McDowell-Boyer i inni, 1980, Simon i Ibrahim, 1990]. McDowell-Boyer i inni (1980) podają, że ^{226}Ra może przechodzić do roślin również w wyniku depozycji aerozoli na ich nadziemne części, co może być istotne w przypadku warzyw liściastych i roślin paszowych. Jednakże brak jest ilościowych danych na temat przechodzenia ^{226}Ra przez części nadziemne roślin [Simon i Ibrahim, 1990].

Stopień przechodzenia zależy od gatunku roślin i rodzaju gleby oraz jej właściwości chemicznych takich jak pH, stężenie innych pierwiastków ziem alkalicznych, zawartości substancji organicznej, wilgotności gleby oraz formy chemicznej, w jakiej ^{226}Ra występuje w glebie [Markose i inni, 1993, McDowell-Boyer i inni, 1980, Grzybowska, 1974, Simon i Ibrahim, 1990, Watson i inni, 1984]. Rośliny mogą pobierać ^{226}Ra , który znajduje się w roztworze glebowym, a więc o jego dostępności decyduje stężenie ^{226}Ra wymiennego. Na skutek depozycji aerozoli rośliny są również skażone zewnętrznie. Skażenie zewnętrzne roślin pastewnych może powodować zwiększone wchłanianie tego radionuklidu przez zwierzęta.

Celem pracy było zbadanie pobierania ^{226}Ra przez rośliny z dwóch rodzajów gleby, określenie skażeń zewnętrznych spowodowanych depozycją aerozoli na ich częściach nadziemnych, określenie stopnia przechodzenia tego radionuklidu do roślin przez liście oraz wyznaczenie współczynników przechodzenia (TF) ^{226}Ra z gleby do korzeni i do części nadziemnych roślin.

2. Materiały i metody

2.1. Uprawa roślin

Doświadczenia prowadzono w latach 1994-1995 na poletku doświadczalnym, na dwóch rodzajach gleby pochodzenia antropogenicznego. Te same rośliny uprawiano jednocześnie na otwartym polu i pod namiotem foliowym. Do nawadniania roślin pod namiotem zastosowano system irygacji podziemnej. Ten sposób uprawy roślin powodował, że rośliny rosnące pod namiotem odizolowane były od mokrej i częściowo od suchej depozycji oraz od wiatru, podczas gdy rośliny rosnące na polu ekspozowane były na istniejące czynniki atmosferyczne. W sezonie wegetacyjnym oznaczano tygodniowy opad atmosferyczny za pomocą deszczomierza zainstalowanego w odległości ok. 2 m od poletka oraz zbierano opad całkowity na tacach umieszczonych na wysokości 1 m nad ziemią w takiej samej odległości jak deszczomierz. Opad całkowity zbierano w okresie wegetacji, dostosowując czas zbierania do terminów siewu i zbioru roślin. Zabiegi uprawowe przeprowadzono zgodnie z zaleceniami, odpowiednio dla każdego gatunku roślin. Badano przechodzenie ^{226}Ra do roślin z rodziny baldaszkowatych (pietruszka zwyczajna, marchew zwyczajna) i traw (ruń trawników, kupkówka pospolita, pszenica zwyczajna, kukurydza zwyczajna).

2.2. Przygotowanie próbek

^{226}Ra oznaczano w roślinach, w przesączu otrzymanym z mycia roślin, w opadzie całkowitym (^{226}Ra rozpuszczalny) oraz w glebie. W glebie oznaczano ^{226}Ra całkowity i ^{226}Ra wymienny.

2.2.1. Rośliny i opad całkowity

Po zbiorze rośliny ważono. Korzenie marchwi i pietruszki starannie myto, a następnie suszono, ważono, i spalano w piecu w temperaturze 450°C , otrzymany popiół ważono. Nadziemne części roślin myto w wodzie destylowanej, suszono, spalano, rejestrowano suchą masę i masę popiołu. Wodę po myciu części nadziemnych sączono; przesącz i osad zachowywano do dalszej analizy. Po odfiltrowaniu wody sączek przemywano wodą destylowaną, suszono i spalano w piecu w temp. 450°C . Przesącz odparowywano do objętości ok. 25 ml. Opad całkowity, zbierany na tacach, przenoszono ilościowo do zlewek, odparowywano do objętości ok. 500 ml, następnie dodawano 50 ml stężonego HNO_3 , ogrzewano pod przykryciem ok. 2 godzin, sączono na gorąco i przemywano trzykrotnie 25-ml porcjami 1 M HNO_3 . Osad odrzucano, a przesącz zachowywano do dalszej analizy.

2.2.2. Gleba

Próbki gleby pobierano przed siewem i po zbiorach, z warstwy do głębokości 20 cm. Glebę suszono w temperaturze 105°C i przesiewano przez sito o średnicy 2 mm. Próbki mineralizowano w temperaturze 450°C . ^{226}Ra wymienny w glebie oznaczano według metody Erikssona [1987] w następujący sposób: do 50 gramowych próbek gleby dodawano 500 ml 1M roztworu octanu amonu (pH około 7) i prowadzono ekstrakcję radu, wytrąsając próbkę przez dwie godziny na wytrząsarce. Ekstrakt sączono, glebę przemywano trzykrotnie małymi porcjami octanu amonu i roztwór po przemyciu łączono z ekstraktem. Próbkę odparowywano do objętości ok. 20 ml.

2.3. Oznaczanie ^{226}Ra

Stężenie ^{226}Ra w roślinach, w przesączach po myciu roślin, osadach, opadzie i w glebie oznaczano metodą emanacyjną (Bilkiewicz i inni, 1978). Do 4-gramowych próbek popiołu, 2-gramowych próbek zmineralizowanej gleby, ekstraktu z gleby, a także próbek opadu, przesączu i osadu dodawano nośnik Ba. Próbki popiołu rozpuszczano w stężonym HNO_3 i HClO_4 , z gleby i osadów krzemionkę usuwano przy pomocy stężonego HF. Ekstrakt z gleby odparowywano i spalano części organiczne za pomocą stężonego HNO_3 . Roztwory odparowywano, a pozostałość rozpuszczano w kwasie solnym i na gorąco współstrącano ^{226}Ra z BaSO_4 . Osad siarczanów rozpuszczano w alkalicznym roztworze EDTA, przenoszono do barboterów i pozostawiano przez 14 dni do osiągnięcia stanu równowagi między powstającym ^{222}Rn i ^{226}Ra . ^{222}Rn przenoszono ilościowo do komory scyntylicyjnej typu Lucasa. Radioaktywność alfa ^{222}Rn i jego krótkożyjących produktów rozpadu mierzono po 3 godzinach. Roztwór ponownie przenoszono do barbotera i po 14 dniach powtarzano pomiar ^{222}Rn i jego produktów rozpadu w sposób opisany wyżej. Chemiczna wydajność nośnika Ba wynosiła średnio ok. 85%, a granica detekcji przy czasie pomiaru 21 600 s była równa 0,73 mBq/ próbę.

3. Wyniki

Skład mechaniczny gleby I i gleby II (Tabela 1) wskazuje, że gleba I należy do podgrupy piasek słabo gliniasty, a gleba II do podgrupy piasek gliniasty lekki. Średnia zawartość piasku wynosi w glebie I 91,4%, a zawartość części spławialnych 8,6%, w tym gliny 3,2%. W glebie II frakcje te wynoszą odpowiednio 86,2%, 13,9% i 4,4%.

Tabela 1. Skład mechaniczny gleby

Gleba	Piasek		Ił		Gлина	
	Fracja (mm)	Zawartość frakcji,%	Fracja (mm)	Zawartość frakcji,%	Fracja (mm)	Zawartość frakcji,%
Gleba I*	1-0,1	83,3	0,02-0,006	4,2	<0,002	3,2
	0,1-0,05	5,2	0,006-0,002	1,2		
	0,05-0,02	2,9				
Gleba II**	1-0,1	76,7	0,02-0,006	5,9	<0,002	4,4
	0,1-0,05	5,1	0,006-0,002	3,6		
	0,05-0,02	4,3				

*ps - piasek słabogliniasty

**pgl - piasek gliniasty lekki

Właściwości chemiczne obu gleb przedstawiono w Tabeli 2. Gleba I zawierała więcej Ca, natomiast mniej Mg i Ba oraz mniej substancji organicznej niż gleba II. Średnie stężenie ^{226}Ra całkowitego w glebie I wynosiło $8,48 \pm 0,50 \text{ Bq kg}^{-1}$, zaś w glebie II wynosiło ono $12,2 \pm 0,56 \text{ Bq kg}^{-1}$. Średnie stężenie ^{226}Ra wymiennego było podobne w glebie I i glebie II i wynosiło odpowiednio $0,62 \pm 0,07 \text{ Bq kg}^{-1}$ i $0,66 \pm 0,05 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Tabela 2. Właściwości chemiczne 20-cm warstwy gleby

Parametr	Gleba I	Gleba II
pH _{KCl}	7,3±0,3	6,8±0,2
C organiczne, %	0,99±0,19	1,19±0,17
Substancja org.,%	1,73±0,33	2,07±0,30
N,%	0,086±0,014	0,101±0,020
P ₂ O ₅ , mg/100g	24,7±19,0	35,8±11,0
Ca, mg/100g	183±22,8	128±20,7
Ba, ppm	352±46,8	434±34,6
Mg, mg/100g	5,94±1,25	7,76±1,25
K ₂ O, mg/100g	3,57±1,26	3,89±0,76
^{226}Ra całkowity, Bq kg ⁻¹	8,48±0,50	12,2±0,56
^{226}Ra wymienny, Bq kg ⁻¹	0,62±0,07	0,66±0,05

Zawartość ^{226}Ra rozpuszczalnego w opadzie całkowitym zbieranym w okresie wegetacji roślin w 1994 i 1995 roku (w mBq m⁻² oraz w mBq m⁻² d⁻¹) przedstawiono w Tabeli 3. Opad ^{226}Ra był bardzo zróżnicowany i zawierał się w granicach od $0,48 \pm 0,10$ do $11,8 \pm 0,84 \text{ mBq m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Tabela 3. ^{226}Ra rozpuszczalny w opadzie całkowitym

Okres zbierania opadu miesiąc, dzień	Liczba dni	Opad mm	^{226}Ra mBq m^{-2}	^{226}Ra $\text{mBq m}^{-2} \text{d}^{-1}$
1994				
05.18 - 06.30	43	65,6	507±36,3	11,8±0,84
07.01 - 07.27	26	54,9	100±10,6	3,85±0,41
07.28 - 09.01	35	45,5	16,9±3,51	0,48±0,10
09.02 - 10.12	40	110	112±12,0	2,79±0,30
1995				
04.12 - 05.31	49	51,9	173±13,3	3,53±0,27
06.01 - 07.12	41	83,6	235±15,1	5,72±0,37
07.13 - 07.31	18	70,6	30,9±6,51	1,72±0,36
08.01 - 09.12	42	160,2	64,8±7,28	1,54±0,17
09.13 - 10.04	21	35,9	34,6±6,46	1,65±0,31
10.05 - 10.18	13	0,45	40,5±5,76	3,12±0,44

W Tabeli 4 podano średnie stężenie ^{226}Ra w roślinach rosnących na glebie I na odkrytym polu i pod namiotem, zawartość ^{226}Ra znajdującego się na powierzchni roślin w formie rozpuszczalnej (wmywanego), okresy wegetacji roślin oraz sumę opadu ^{226}Ra rozpuszczalnego w okresie wegetacji. Z tabeli tej wynika, że inkorporacja ^{226}Ra zależy od rodzaju rośliny i jest różna nawet w tej samej rodzinie roślin. Stężenie ^{226}Ra zależało również od części rośliny; u roślin baldaszkowatych było ono zawsze wyższe w częściach nadziemnych niż w korzeniach. W pszenicy i kukurydzy najniższe stężenie radionuklidu obserwowano w ziarnach, a najwyższe w łodygach i liściach. Skazenie zewnętrzne ^{226}Ra rozpuszczalnym w wodzie było niewielkie i stanowiło na ogół mniej niż 10% stężenia ^{226}Ra w roślinie i było podobne dla roślin na odkrytym polu i pod namiotem.

Tabela 5 podaje średnie stężenie ^{226}Ra w roślinach rosnących na glebie II oraz skazenie zewnętrzne roślin (^{226}Ra wymywalny). Okres wegetacji i wielkość opadu całkowitego, są takie same jak dla gleby I (Tabela 4).

Analiza statystyczna wyników wykazała brak statystycznie znamiennych różnic między stężeniem ^{226}Ra w roślinach rosnących na polu i pod namiotem. Brak różnic wskazuje, że ^{226}Ra pochodzący z opadu nie był inkorporowany w roślinach.

Na podstawie danych o depozycji ^{226}Ra rozpuszczalnego (Tabela 3) określono wielkość opadu w okresie wegetacji poszczególnych gatunków roślin. Uwzględniając plon suchej masy i stężenie radu w roślinach uprawianych na odkrytym polu, obliczono zawartość radionuklidu w plonie. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabeli 6. Wyniki te nie wskazują na występowanie korelacji między wielkością depozycji ^{226}Ra w roślinach i zawartością tego radionuklidu w plonie. Wskazuje to, że ewentualne przechodzenie radu przez liście było w warunkach prowadzonego doświadczenia zaniedbywalne.

Brak różnic w stężeniach ^{226}Ra w roślinach uprawianych na polu i pod namiotem (Tabela 4 i 5) pozwolił na obliczenie średniego stężenia ^{226}Ra w roślinach uprawianych na glebie I i na glebie II (Tabela 7). Dla większości roślin stężenie ^{226}Ra na glebie I było większe (trawa, słoma pszenicy, liście i łodygi marchwi); w kilku roślinach stężenia były porównywalne (korzenie pietruszki, plewy, ziarno pszenicy i kwiaty męskie kukurydzy), a w mniejszości - mniejsze (korzenie marchwi, pędy i ziarna kukurydzy). Stężenie ^{226}Ra całkowitego w glebie I ($8,48\pm 0,50 \text{ Bq kg}^{-1}$) było 1,4 razy niższe niż w glebie II ($12,2\pm 0,56 \text{ Bq kg}^{-1}$). Wynika stąd, że nie ma prostej zależności między stężeniem ^{226}Ra w roślinach i jego stężeniem w glebie. Tylko

frakcja radionuklidu znajdująca się w roztworze glebowym może być przyswojona przez roślinę. Miara tej frakcji jest stężenie ^{226}Ra wymiennego w glebie. Stężenie ^{226}Ra wymiennego w glebie I wynosi $0,62 \pm 0,07 \text{ Bq kg}^{-1}$ (7,3% radu całkowitego), a w glebie II - $0,66 \pm 0,05 \text{ Bq kg}^{-1}$ (5,4% radu całkowitego); stężenia te były więc praktycznie jednakowe. Obserwowane różnice w stężeniach ^{226}Ra w roślinach rosnących na obu glebach można wytłumaczyć występowaniem czynników dodatkowych poza stężeniem radu wymiennego, które również mają wpływ na pobieranie ^{226}Ra przez rośliny.

Tabela 4. Średnie stężenie ^{226}Ra inkorporowanego w roślinach oraz wymywanego z powierzchni ich części nadziemnych ($\text{mBq kg}^{-1}_{\text{sm}}$) dla upraw na glebie I na odkrytym polu i pod namiotem

Roślina	Okres wegetacji dni	Opad ^{226}Ra w okresie wegetacji mBq m^{-2}	Pole		Namiot	
			^{226}Ra inkorporowany	^{226}Ra wymywany	^{226}Ra inkorporowany	^{226}Ra wymywany
Ruń trawników I zbiór	70	$607 \pm 37,8^{\text{a}}$	$541 \pm 68,5^{\text{b}}$	$13,2 \pm 2,03^{\text{a}}$	$530 \pm 53,8^{\text{b}}$	$12,1 \pm 1,72^{\text{a}}$
Ruń trawników II zbiór	78	$129 \pm 12,5$	$535 \pm 57,7$	$73,2 \pm 4,10$	$735 \pm 85,2$	$24,7 \pm 2,64$
Kupkówka I zbiór	69	$397 \pm 20,2$	$528 \pm 70,5$	$1,73 \pm 1,52$	$644 \pm 74,6$	<LLD
Kupkówka II zbiór	83	$138 \pm 11,7$	$908 \pm 74,1$	$27,8 \pm 2,03$	$892 \pm 58,5$	$103 \pm 2,43$
Marchew korzeń	147	$736 \pm 39,8$	$522 \pm 43,3$		$563 \pm 44,7$	
liście i łodygi			3042 ± 328	$192 \pm 5,72$	2883 ± 224	$37,5 \pm 2,23$
Pietruszka korzeń	147	$736 \pm 39,8$	$1005 \pm 99,8$		$1084 \pm 84,8$	
liście i łodygi			1331 ± 141	$116 \pm 4,18$	2624 ± 182	$75,1 \pm 2,20$
Pszenica słoma			$455 \pm 44,3$	$19,8 \pm 2,62$	$1381 \pm 94,7$	$21,1 \pm 2,49$
plewy	100	$147 \pm 20,2$	$288 \pm 31,2$	$5,13 \pm 1,48$	$319 \pm 38,4$	$20,4 \pm 1,62$
ziarno			$102 \pm 12,0$	$12,2 \pm 2,34$	$90,9 \pm 10,0$	$1,06 \pm 1,28$
Kukurydza pędy <40 cm			$131 \pm 14,8$	$12,0 \pm 1,88$	$124 \pm 16,3$	$19,2 \pm 1,77$
pędy > 40cm			$315 \pm 25,0$	$22,8 \pm 1,88$	$254 \pm 21,2$	$23,9 \pm 2,01$
kwiat męski	130	$429 \pm 19,6$	$280 \pm 38,3$	$40,2 \pm 1,46$	$500 \pm 53,5$	<LLD
ziarno			$29,8 \pm 5,49$	$1,43 \pm 1,30$	-	-

^{a)} Błąd pomiaru, przedział ufności 68%

^{b)} Odchylenie standardowe

Tabela 5. Średnie stężenie ^{226}Ra inkorporowanego w roślinach oraz wymywanego z powierzchni ich części nadziemnych ($\text{mBq kg}^{-1}_{\text{sm}}$) dla upraw na glebie II na odkrytym polu i pod namiotem

Roślina	Pole		Namiot	
	^{226}Ra inkorporowany	^{226}Ra wymywany	^{226}Ra inkorporowany	^{226}Ra wymywany
Ruń trawników I zbiór	207±35,6 ^{b)}	13,8±1,90 ^{a)}	272±57,5 ^{b)}	77,0±2,54 ^{a)}
Ruń trawników II zbiór	449±61,9	10,8±1,83	478±69,8	20,4±1,75
Kupkówka I zbiór	416±63,6	<LLD	418±52,7	<LLD
Kupkówka II zbiór	416±40,8	23,4±1,69	722±68,7	55,7±2,57
Marchew korzeń	865±73,8		812±53,4	
liście i łodygi	2374±216	108±4,47	2669±224	337±8,20
Pietruszka korzeń	1008±210		1009±78,0	
liście i łodygi	2856±201	799±6,26	2262±198	122±2,10
Pszenica słoma	562±48,7	-	546±56,1	36,2±2,86
plewy	269±18,7	9,06±1,70	395±29,8	67,5±2,43
ziarno	58,8±8,39	6,24±1,66	58,9±9,03	9,36±1,47
Kukurydza pędy <40 cm	570±54,5	26,9±2,78	125±16,7	13,2±1,83
pędy > 40cm	498±47,0	37,4±2,22	243±35,1	8,21±1,61
kwiat męski	516±49,9	43,8±1,53	203±16,3	41,4±1,55
ziarno	-	-	88,5±17,9	<LLD

^{a)} Błąd pomiaru, przedział ufności 68%

^{b)} Odchylenie standardowe

Na podstawie stężeń ^{226}Ra w roślinach oraz ^{226}Ra całkowitego i wymiennego w glebie obliczono współczynniki przejścia TF_1 i TF_2 ^{226}Ra z gleby do roślin (Tabela 8). Współczynniki te wyrażają stosunek stężeń radionuklidu w 1 kg suchej masy roślin do jego stężenia w 1 kg suchej masy gleby. TF_1 dotyczy ^{226}Ra całkowitego w glebie, natomiast TF_2 radu wymiennego. Wartości TF_1 i TF_2 były w większości przypadków wyższe dla roślin uprawianych na glebie I w porównaniu do gleby II. Przechodzenie ^{226}Ra do liści i łodyg pietruszki i marchwi było od ok. 2 do ok. 5 razy wyższe niż do ich korzeni.

4. Dyskusja

Podobne stężenia ^{226}Ra w roślinach uprawianych na odkrytym polu i pod namiotem (Tabela 4 i 5) wskazują, że radionuklid ten pobierany jest przez rośliny przede wszystkim przez system korzeniowy. Nie wyklucza to jednak możliwości inkorporacji ^{226}Ra przez liście

w warunkach, gdy występuje depozycja ^{226}Ra w pobliżu lokalizacji otwartych składowisk odpadów z przerobu rud uranowych [Ibrahim i Wicker, 1988]. Pobieranie przez system korzeniowy roślin jest kontrolowane przez szereg fizycznych, chemicznych, biologicznych i środowiskowych procesów [Simon i Ibrahim, 1990]. Wyniki tej pracy wskazują, że w poważnym stopniu pobieranie radu zależy od stężenia radu wymiennego w glebie. Nie ma natomiast prostej zależności między stężeniem ^{226}Ra w roślinach i jego całkowitym stężeniem w glebie. Podobną zależność zaobserwowali wcześniej Markose i inni (1993). Stwierdzili oni bliską korelację między stężeniem ^{226}Ra w roślinach i radem wymiennym w glebie.

Tabela 6. Zawartość ^{226}Ra w roślinach rosnących na powierzchni 1 m^2 oraz ^{226}Ra rozpuszczalnego w opadzie w okresie wegetacji

Roślina	Opad w okresie wegetacji mBq m^{-2}	Plon suchej masy kg m^{-2}	Zawartość ^{226}Ra w plonie mBq	Plon suchej masy kg m^{-2}	Zawartość ^{226}Ra w plonie mBq
		Gleba I		Gleba II	
Ruń trawników I zbiór	607	0,48	260	0,45	93,2
Ruń trawników II zbiór	129	0,62	332	0,48	214
Kupkówka I zbiór	397	0,14	73,9	0,31	130
Kupkówka II zbiór	138	0,10	90,8	0,25	102
Marchew liście i łodygi	736	0,37	1126	0,69	1638
Pietruszka liście i łodygi	736	0,64	852	0,24	685
Pszenica słoma	147	0,26	118	0,36	201
plewy		0,13	37,4	0,21	57,0
ziarno		0,36	36,7	0,48	28,5
Kukurydza pędy <40 cm	429	0,38	49,8	0,33	187
pędy >40 cm		0,74	233	0,77	384
kwiat męski		0,02	5,60	0,02	10,3
ziarno		0,33	9,83	-	-

Zachowanie się radu w glebie zależy od obecności innych jonów w roztworze glebowym. Niniejsze badania prowadzono dla dwóch rodzajów gleby, które różniły się stężeniem radu całkowitego, natomiast mniejsze różnice występowały w stężeniu Ca i Ba. Nie jest wykluczone, że różnice te były za małe, aby wpływ powyższych kationów był zauważalny. Grzybowska (1974) nie stwierdziła korelacji między zawartością radu w trawie i lucernie, a stężeniem Ca w glebie, natomiast Penna-Franca i inni (1968) zaobserwowali korelację między stężeniem baru i radu w orzechach brazylijskich. Należy jednak dodać, że orzech brazylijski charakteryzuje się dużą zdolnością do absorpcji baru, jak podają autorzy, w takich

przypadkach bar może działać jak nośnik radu. Wyniki obecnej pracy nie wskazują na zwiększone pobieranie radu z gleby II.

Tabela 7. Średnie stężenie ^{226}Ra w roślinach rosnących na glebie I i na glebie II
 $\text{mBq kg}^{-1} \text{ s.m}$

Roślina	Gleba I	Gleba II
Ruń trawników, I zbiór	536±49,8	240±46,4
Ruń trawników, II zbiór	635±141	463±20,6
Kupkówka, I zbiór	586±82,4	417±14,3
Kupkówka, II zbiór	900±60,6	569±217
Marchew		
korzeń	542±29,1	838±37,3
liście i łodygi	2963±113	2521±208
Pietruszka		
korzeń	1044±55,9	1009±110
liście i łodygi	1977±914	2559±420
Pszenica		
słoma	918±654	554±11,8
plewy	304±21,8	332±89,1
ziarno	96,5±7,97	90,7±4,96
Kukurydza		
pędy <40 cm	128±5,18	348±314
pędy > 40cm	284±42,7	371±180
kwiat męski	390±156	359±221
ziarno	29,8±5,49	88,5±17,9

Pobieranie ^{226}Ra z gleby zależy od gatunku roślin. Występują również różnice w stężeniu radu między korzeniami, liśćmi, łodygami i owocami roślin. W niniejszej pracy wyższe stężenia ^{226}Ra obserwowano w liściach i łodygach niż w korzeniach roślin (marchew i pietruszka) oraz w słomie pszenicy i w pędach kukurydzy niż w ziarnach. Podobnie Kirchmann i inni (1988) stwierdzili wyższe stężenia w liściach buraków cukrowych w porównaniu do korzeni oraz wyższe stężenia w słomie pszenicy niż w ziarnach.

Obliczone współczynniki przechodzenia ^{226}Ra były nieco mniejsze dla roślin uprawianych na glebie II, co wskazuje, że na pobieranie tego radionuklidu przez rośliny poza dostępnością radu w glebie (rad wymienny) może mieć wpływ szereg innych czynników.

Tabela 8. Współczynniki przechodzenia (TF₁, TF₂) ²²⁶Ra do roślin z dwóch rodzajów gleby

Roślina	Gleba I		Gleba II	
	TF ₁ x 10 ⁻² a)	TF ₂ x 10 ⁻¹ b)	TF ₁ x 10 ⁻²	TF ₂ x 10 ⁻¹
Ruń trawników, I zbiór	6,31±0,08	8,63±0,11	1,97±0,35	3,64±0,64
Ruń trawników, II zbiór	7,55±1,67	10,3±2,28	3,81±0,17	7,05±0,32
Kupkówka, I zbiór	7,31±0,97	10,1±1,34	3,44±2,10	6,36±0,21
Kupkówka, II zbiór	11,3±1,80	15,5±0,02	4,67±1,74	8,64±3,21
Marchew				
korzeń	6,37±0,33	8,71±0,46	6,84±0,29	12,7±0,54
liście i łodygi	34,6±0,92	47,4±1,26	20,7±1,74	38,2±3,21
Pietruszka				
korzeń	12,4±0,50	16,9±0,68	8,80±2,10	15,3±0,31
liście i łodygi	23,3±10,8	31,9±14,7	20,8±3,48	38,8±6,43
Pszenica				
słoma	11,5±8,13	15,9±11,2	4,55±0,06	8,41±0,11
plewy	3,81±0,27	5,27±0,37	2,70±0,70	5,00±1,29
ziarno	1,19±0,09	1,64±0,12	2,66±0,21	4,92±0,16
Kukurydza				
pędy <40 cm	1,56±0,09	2,16±0,12	2,87±2,55	5,30±4,71
pędy > 40cm	3,50±0,53	4,84±0,73	3,03±1,51	5,61±2,79
kwiat męski	4,88±1,94	6,74±2,69	2,95±1,85	5,46±3,43
ziarno	0,38±0,09	0,52±0,11	0,74±0,15	1,36±0,27

$$a) TF_1 = \frac{\text{stężenie } ^{226}\text{Ra w roślinie}}{\text{całkowite stężenie } ^{226}\text{Ra w glebie}} \left[\frac{\text{Bq kg}^{-1} \text{ sm}}{\text{Bq kg}^{-1} \text{ sm}} \right]$$

$$b) TF_2 = \frac{\text{stężenie } ^{226}\text{Ra w roślinie}}{\text{stężenie } ^{226}\text{Ra wymiennego w glebie}} \left[\frac{\text{Bq kg}^{-1} \text{ sm}}{\text{Bq kg}^{-1} \text{ sm}} \right]$$

5. Wnioski

- ²²⁶Ra pobierany jest przez rośliny przede wszystkim przez system korzeniowy; przechodzenie radu do roślin przez liście w warunkach prowadzonego doświadczenia było zaniedbywalne.
- Pobieranie ²²⁶Ra przez rośliny z gleby zależy od stężenia radu wymiennego w glebie. Nie stwierdzono zależności między stężeniem ²²⁶Ra w roślinach a jego całkowitym stężeniem w glebie.
- Skażenie powierzchni roślin radem rozpuszczalnym było niewielkie i stanowiło na ogół mniej niż 10% stężenia tego radionuklidu w roślinie.
- Stężenie ²²⁶Ra w różnych częściach roślin malało według następującej kolejności: liście i łodygi > korzenie > ziarno.
- Współczynniki przechodzenia ²²⁶Ra z gleby do roślin (TF) można uszeregować następująco: warzywa liściaste > warzywa korzeniowe > trawa > pędy kukurydzy > ziarno.