

Radioaktywne skażenie składu pokarmu sarny europejskiej *Capreolus capreolus* na terenie Żytomierskiego Polesia Ukrainy

Radioactive contamination of dietary components of the roe deer in the forests of Zhytomirskie Polesie of Ukraine

Volodymyr Krasnov¹, Zoia Shelest², Sergii Boiko^{3*}, Igor Gulik¹, Waldemar Sieniawski³

¹Żytomierski Państwowy Technologiczny Uniwersytet, Katedra Ekologii, 10005 Żytomierz, ul. Cherniakhovskiego 103, Ukraina;

²Żytomierski Państwowy Technologiczny Uniwersytet, Katedra Nauk Przyrodniczych, 10005 Żytomierz, ul. Cherniakhovskiego 103, Ukraina; ³Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Katedra Leśnictwa i Ekologii Lasu, 10-727 Olsztyn, Pl. Łódzki 2, Polska

*Tel. +48 89 5234947, e-mail: sergii.boiko@uwm.edu.pl

Abstract. This paper presents a study on radioactive contamination of dietary components of the roe deer (*Capreolus capreolus*) in Zhytomirskie Polesie (Ukraine). Studies were conducted on two research plots in forests with similar levels of radioactive contamination, 29 ± 8 kBq/m² - 55 ± 17 kBq/m², in mixed coniferous forests and mixed broadleaved forests, which are the dominant forest types of the area. The highest level of radionuclide accumulation was observed in young oak seedlings.

The dynamics for oak sprouts indicate that the accumulation coefficient reaches a maximum in September and August in the mixed coniferous and mixed broadleaved forests respectively. A comparison of mean values of the ¹³⁷Cs accumulation coefficients in the shoots of undergrowth plants confirms that an increase in soil fertility leads to a reduction of radionuclides in plant phytomass. In the mixed broadleaved forests, average values of the coefficient of ¹³⁷Cs accumulation in phytomass of blackberry was 26% and of raspberries 58% lower compared to mixed coniferous forests. The maximum contamination of phytomass was observed in August for oak, in October for aspen, and in July for birch. The highest specific activity of ¹³⁷Cs in raspberry shoots occurs during the three summer months, whereas the peak in blackberry occurs from August to September. The dynamics of the specific activity of ¹³⁷Cs in blueberry, cranberry and heather show an increase in radioactive contamination of phytomass towards the end of the growth period. The maximum concentration of ¹³⁷Cs in shoots of heather and bilberry was recorded in October and for blueberry in August. Mushrooms in mixed coniferous forests can be ranked as follows according to the degree of ¹³⁷Cs contamination: *Cantharellus* < *Boletus edulis* < *Russula* < *Leccinum* < *Xerocomus badius* < *Paxillus involutus*. In mixed broadleaved forests the ranking is *Cantharellus* < *Boletus edulis* < *Russula* < *Xerocomus badius* < *Leccinum* < *Paxillus involutus*. Within one habitat type, we observed fairly significant variations in ¹³⁷Cs accumulation in fruit bodies of fungi species.

Keywords: radioactive contamination, roe deer diet, ¹³⁷Cs, Zhytomirskie Polesie of Ukraine

1. Wstęp

Po awarii czarnobylskiej elektrowni atomowej jednym z potencjalnych źródeł napromieniowania organizmu ludzkiego stało się mięso zwierząt pozyskiwanych w ramach odstrzałów łowieckich na terenach skażonych. Zagrożenie to dotyczy przede wszystkim myśliwych (i kłusowników) oraz odbiorców mięsa dzików i jeleniowatych, którzy w pierwszej kolejności są narażeni na zwiększenie indywidualnych skumulowanych dawek napromieniowania. Jednocześnie zwierzyzna, jako naturalny składnik ekosystemów leśnych, odgrywa ważną rolę w procesie redystrybucji radionuklidów

w czasie i przestrzeni. Z uwagi na częściową niedostępność terenu badań prezentowane badania są oryginalne i jak dotychczas niepowtórzone.

Skażenie organizmu zwierząt kopytnych przez radionuklidy odbywa się głównie poprzez konsumpcję pokarmu (Krasnov et al. 2007). Skład pokarmu sarny europejskiej zawiera rośliny drzewiaste podrostu i podszytu, krzewy i krzewinki, rośliny zielne, a także grzyby, mchy i porosty (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al. 2015). Specyfika kumulacji radionuklidów, wyrażona zawartością cezu ¹³⁷Cs w roślinach, które są konsumowane przez zwierzęta leśne, była badana w różnych krajach.

Wpłynęło: 13.06.2014 r., zrecenzowano: 30.06.2014 r., zaakceptowano: 11.07.2014 r.

Większość badań dotyczyła kumulacji ^{137}Cs w roślinach wykorzystywanych gospodarczo, szczególnie gatunków jadalnych (np. jagody) lub leczniczych (np. pączki, korzenie, część nadziemna, kwiaty). Część badaczy skupiła uwagę na roli poszczególnych gatunków w redystrybucji radionuklidów w ekosystemach leśnych różnych krajów: Białorusi (Perevolockij 2006; Bulko et al. 2013), Rosji (Šeglov, Cvetnova 2001; Mamihin et al. 2005), Ukrainy (Shelest 2004; Krasnov et al. 2007; Šitúk i in. 2010; Krasnov et al. 2015), Szwecji (Fawaris 1995) i Finlandii (Lehto et al. 2013). Uzyskane wyniki pozwalają na uogólnienie wiedzy dotyczącej poziomu radioaktywnego skażenia roślin występujących w diecie sarny, należącej do najliczniej spotykanych roślinożerców w lasach Europy. Stwierdzono, że gatunki rodziny wrzosowatych (Ericaceae) charakteryzują się znaczną kumulacją radionuklidów (Krasnov et al. 2007). Wskaźniki przejścia ^{137}Cs do roślin z tych rodzin są większe niż w większości innych gatunków roślin naczyniowych dominujących w lasach północnej i wschodniej Europy (Fawaris 1995; Perevolockij 2006; Lehto et al. 2013). Jednocześnie badania redystrybucji radionuklidów między organami i tkankami roślin drzewiastych wykazały maksymalną zawartość ^{137}Cs w igłach, liściach i pędach bieżącego przyrostu rocznego – właśnie w tych częściach, które są konsumowane przez sarnę najchętniej (Šelest 2004). Szczególną radioekologiczną rolę odgrywają grzyby, jako pokarm zwierząt leśnych. Ich owocniki nie tylko kumulują duże ilości ^{137}Cs , ale skażona grzybnia, tworząc mykoryzy, sprzyja również pośrednio skażeniu roślin przez radionuklidy (Fawaris 1995).

Badania Krasnowa potwierdzają znaczną zmienność skażenia biomasy poszczególnych składników fitocenozy w zależności od gatunku, siedliska, fenologicznej fazy rozwoju (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al. 2015). Rośliny i grzyby najczęściej analizowane są nie jako pokarm zwierząt, a jako składniki ekosystemów leśnych. Takie podejście uniemożliwia ocenę wpływu poszczególnych składników pokarmu na sezonowe zmiany poziomu kumulacji ^{137}Cs w organizmie zwierząt.

Sarna europejska *Capreolus capreolus* (L.) jest jednym z najczęściej występujących gatunków zwierząt w lasach Centralnego Polesia Ukrainy (Krasnov et al. 2007). Należy do grupy przeżuwaczy, a jej strefa pokarmowa obejmuje zasięg do 150 cm od powierzchni gleby (Prostakov 1989; Sokolov 1992), co jest związane z wymiarami zwierząt. Najbardziej intensywnie zjadane są przez sarnę młode części roślin – średnica pędów wynosi zwykle 2–4 mm, maksymalnie do 6 mm (Drożdż, Osiecki 1973; Sokolov 1992). Ze względu na swoistą budowę aparatu żębowego, sarny praktycznie nie są zdolne do spalowania drzew (Prostakov 1989). Specyfika żywienia sarny europejskiej determinuje zatem metodykę badania kumulacji ^{137}Cs w komponentach jej pokarmu.

Celem pracy było ustalenie sezonowych zmian intensywności przejścia radionuklidów z gleby do roślin konsumowanych przez sarnę.

2. Metodyka badań

Badanie sezonowej dynamiki radioaktywnego skażenia składników pokarmu sarny europejskiej przeprowadzono na

dwóch stacjonarnych powierzchniach badawczych, założonych w lasach Centralnego Polesia Ukrainy, w typowych dla sarny warunkach bytowania. Powierzchnia oznaczona nr 1 znajdowała się na północnym zachodzie, a powierzchnia nr 2 – na północy obwodu żytomierskiego.

Powierzchnię nr 1 założono na siedliskach świeżych i wilgotnych borów mieszanych z charakterystycznymi dla danych ekosystemów zespołami roślinnymi, tj. drzewostanami 30–40-letnimi składającymi się z dwóch warstw: warstwy górnej, gdzie występowała sosna zwyczajna I klasy bonitacji z 20% łącznym udziałem brzozy brodawkowatej i osiki, oraz drugiej, w której występował dąb szypułkowy w III–IV klasie bonitacji. Średni poziom radioaktywnego skażenia gleby przez ^{137}Cs wynosił 29 ± 8 kBq/m², a średnia aktywność cezu 350 ± 130 Bq/kg.

Powierzchnia nr 2 charakteryzowała się przeważającym udziałem świeżych i wilgotnych lasów mieszanych. Drzewostan 30–40-letni składał się z trzech warstw: w pierwszej rosła sosna zwyczajna I klasy bonitacji; w drugiej – dąb szypułkowy II–III klasy bonitacji, brzoza brodawkowata i topola osika; a w trzeciej – klon zwyczajny, lipa, grab zwyczajny.

Średnia gęstość radioaktywnego skażenia gleby była niemal dwukrotnie większa niż na powierzchni nr 1 i wynosiła 55 ± 17 kBq/m², a aktywność cezu ^{137}Cs w glebie również była wyższa i wynosiła 855 ± 440 Bq/kg.

Powierzchnia nr 2 należy do strefy obowiązkowego wysiedlenia ludności (obejmuje tereny z poziomem skażenia ponad 37 kBq/m²). Powierzchnię nr 1 zaliczyć należy do terenów o nieznacznym skażeniu radioaktywnym.

Wybór gatunków do przeprowadzenia badania wynikał zarówno z ich roli w diecie zwierząt, jak i z pełnionych funkcji ekologicznych w fitocenozie. Ze względu na intensywne konsumowanie przez sarnę europejską, do badań wybrano:

- spośród roślin warstwy podrostu i podszytu: osikę (*Populus tremula* L.), dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.) oraz brzozę brodawkowatą (*Betula verrucosa* L.) i brzozę omszoną (*Betula pubescens* Ehrh.). Pierwsze dwa gatunki są pokarmem podstawowym, a brzoza – sezonowym składnikiem pokarmu, charakterystycznym dla jesieni i zimy;
- z roślin warstwy krzewów: jeżynę wyniosłą (*Rubus nessensis* W. Hall.) i malinę (*Rubus idaeus* L.). Jeżyna wyniosła jest jednym z podstawowych gatunków pokarmowych sarny w Żytomierskim Polesiu, a malina jest intensywnie konsumowana w sezonie jesiennym;
- z warstwy zielno-krzewinkowej: z rodziny wrzosowatych, jako dominanty i subdominanty w borach mieszanych i lasach mieszanych w Żytomierskim Polesiu: borówkę czarną (*Vaccinium myrtillus* L.), borówkę brusznicę (*Vaccinium vitis-idaea* L.), która jest charakterystycznym pokarmem zimowo-wiosennym oraz wrzos zwyczajny (*Calluna vulgaris* (L.) Hill), należący do pokarmów okresu jesienno-zimowo-wiosennego;

• grzyby, pomimo nieznaczej ich konsumpcji przez zwierzęta w lasach Żytomierskiego Polesia, ale z uwagi na istotną rolę w skażeniu radioaktywnym organizmu sarny.

Pobieranie prób gatunków pokarmowych przeprowadzono w granicach strefy pokarmowej sarny europejskiej do wysokości 150 cm nad poziomem gleby. Próbkę wszystkich

gatunków roślin i grzybów pobrane zostały 5-krotnie z powierzchni 1 m² (co miesiąc do 15-tego dnia miesiąca pobierano 5 próbek, łącznie pobrano 600 próbek). Pędy gatunków drzewiastych o grubości do 5 mm pobierano w stanie ulistnionym lub bezlistnym, w zależności od pory roku. Owocniki grzybów ścinano nad powierzchnią gleby i oczyszczano ze ściółki. Uwzględniając znaczną mozaikowość skażenia radioaktywnego, do każdej próbki roślin i owocników grzybów pobierano odpowiednie próbki gleby. Gleba była pobierana świdrem o średnicy 5 cm do głębokości 10 cm w granicach 1 m² dokoła rośliny lub w miejscu pobierania grzybów i krzewinek.

Pomiar aktywności ¹³⁷Cs przeprowadzono według oryginalnej metodyki w rozdrobionych powietrznie suchych próbkach gleby i roślin (ustalono poziom skażenia w przeliczeniu na 1 kg), a także w świeżych rozdrobionych próbkach grzybów za pomocą wielokanałowego analizatora AFORA LP-4900B z półprzewodnikowym detektorem DG DK-80 B-3. Błąd pomiaru wahał się w granicach 5,1–8,5%. Dla scharakteryzowania specyfiki kumulacji ¹³⁷Cs w pokarmie sarny wykorzystano wskaźnik kumulacji, obliczony jako

stosunek poziomu radioaktywności roślin do poziomu radioaktywności gleby (w Bq/kg).

Wartości wskaźników kumulacji ¹³⁷Cs (przejścia ¹³⁷Cs w pędy roślin) w jednorocznych pędach podrostu gatunków drzewiastych i roślin podszytu w ciągu roku (w różnych miesiącach) porównano z wykorzystaniem testów t-Studenta i Fishera, a dla podszytu również z wykorzystaniem wskaźnika Pearsona.

3. Wyniki badań i dyskusja

Rośliny podrostu

Porównanie średnich wartości wskaźników kumulacji ¹³⁷Cs wskazuje na to, że w próbach z lasów mieszanych ich wartości dla każdego z badanych gatunków były na ogół niższe niż dla prób pobranych z warunków borów mieszanych (tab. 1). Może to oznaczać, że wraz ze zwiększaniem się żyzności gleby kumulacja radionuklidów w roślinach zmniejsza się. Niezależnie od żyzności siedliska średnioroczne warto-

Tabela 1. Dynamika wskaźników kumulacji ¹³⁷Cs w jednorocznych pędach podrostu gatunków drzewiastych w ciągu roku (wskaźnik kumulacji nie ma jednostki)

Table 1. Dynamics of accumulation indices of ¹³⁷Cs in yearly shoots of tree undergrowth species during the year (accumulation indices has no units)

Miesiąc Month	Świeże i wilgotne bory mieszane (pow. nr 1) Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)			Świeże i wilgotne lasy mieszane (pow. nr 2) Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)		
	dąb oak	osika aspen	brzoza birch	dąb oak	osika aspen	brzoza birch
Luty February	0,70±0,08	0,56±0,21	0,44±0,11	1,59±0,20	0,53±0,37	0,29±0,01
Marzec March	–	–	–	0,93±0,34	0,74±0,18	0,86±0,17
Kwiecień April	1,32±0,26	0,44±0,11	1,16±0,27	–	–	–
Maj May	–	–	–	1,24±0,26	0,55±0,06	0,64±0,13
Czerwiec June	1,19±0,25	1,17±0,09	0,88±0,13	–	–	–
Lipiec July	–	–	–	0,70±0,16	0,44±0,09	1,57±0,33
Sierpień August	–	–	–	2,17±0,42	0,35±0,05	0,94±0,17
Wrzesień September	2,24±0,27	2,08±0,34	1,40±0,43	0,58±0,13	0,36±0,03	0,12±0,03
Październik October	0,72±0,10	0,43±0,12	1,04±0,10	0,52±0,03	1,45±0,44	0,59±0,06
Listopad November	–	–	–	–	–	–
Grudzień December	–	–	–	0,53±0,10	0,41±0,09	0,36±0,06
Średnia Average	1,23±0,10	0,93±0,09	0,98±0,12	1,03±0,08	0,60±0,08	0,72±0,06

ści wskaźnika kumulacji ^{137}Cs wzrastały w szeregu: osika > brzoza > dąb. Na powierzchni nr 1 wskaźnik kumulacji ^{137}Cs przez dąb okazał się wyższy o 24% od analogicznego wskaźnika dla osiki i o 20% dla brzozy. Na powierzchni nr 2 różnice te wynosiły odpowiednio 42 i 30%. Intensywność kumulacji ^{137}Cs przez brzozę i osikę w borach mieszanych praktycznie była jednakowa dla obu gatunków, a w lasach mieszanych dla brzozy większa o 10%.

W różnych okresach wegetacji wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs w częściach roślin podszytu, będących pokarmem sarny, zmieniały się w zależności od gatunku i warunków siedliskowych. Wskaźnik kumulacji cezu dla pędów dębu w borach mieszanych osiągał maksimum we wrześniu, a w lasach mieszanych – w sierpniu. W porównaniu z wartościami średniorocznymi dla lasów mieszanych wartość dla tego miesiąca była większa 1,82 razy, a w lasach mieszanych – 2,11 razy. Analiza dynamiki zmian wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs w pędach osiki wykazała, że w borach mieszanych maksymalną wartość wskaźnika odnotowano we wrześniu (2,24 razy przekraczała wartość średnioroczną dla tego gatunku),

a w lasach mieszanych – w październiku (2,42 razy wyższa od średniej). Z kolei maksymalne wartości wskaźnika kumulacji ^{137}Cs w pędach podrostu brzozy w borach mieszanych były stwierdzone we wrześniu (1,43 razy przekraczały wartość średnioroczną), a w lasach mieszanych – w lipcu (2,18 razy).

Rośliny warstwy podszytu

Porównanie średnich wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs w pokarmowej części pędów podszytu potwierdza tezę, że wraz ze wzrostem żyzności zmniejsza się kumulacja radionuklidów w roślinach (tab. 2). W lasach mieszanych – w porównaniu z borami mieszanimi – średnia wartość wskaźnika kumulacji ^{137}Cs dla jeżyny wyniosłej była mniejsza o 26%, a dla maliny – o 58 %. Należy zaznaczyć, że oprócz żyzności gleby, intensywność kumulacji radionuklidów w roślinach warstwy podszytu zależy także od biologicznych i ekologicznych właściwości konkretnego gatunku. W świeżych i wilgotnych lasach mieszanych średnioroczna wartość wskaźnika kumulacji ^{137}Cs maliny przekraczała od-

Tabela 2. Dynamika wskaźników kumulacji (przejścia ^{137}Cs w pędy roślin) dla roślin podszytu w ciągu roku (wskaźnik kumulacji nie ma jednostki)

Table 2. Dynamics of accumulation indices of ^{137}Cs in plant shoots for understorey plants during the year (accumulation indices has no units)

Miesiąc Month	Świeże i wilgotne bory mieszane (pow. nr 1) Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)		Świeże i wilgotne lasy mieszane (pow. nr 2) Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)	
	jeżyna blackberry	malina raspberry	jeżyna blackberry	malina raspberry
Luty February	0,65±0,25	3,48±0,59	0,71±0,01	0,63±0,23
Marzec March	–	–	0,57±0,12	0,57±0,15
Kwiecień April	0,84±0,07	0,79±0,15	–	–
Maj May	–	–	1,03±0,23	1,11±0,28
Czerwiec June	1,01±0,13	1,13±0,33	–	–
Lipiec July	–	–	2,90±0,59	0,83±0,17
Sierpień August	–	–	0,86±0,18	0,82±0,17
Wrzesień September	1,50±0,29	2,50±0,59	0,50±0,07	0,46±0,09
Październik October	2,22±0,19	0,71±0,08	0,60±0,08	0,81±0,18
Listopad November	–	–	–	–
Grudzień December	–	–	0,15±0,02	0,51±0,06
Średnia Average	1,24±0,10	1,72±0,16	0,92±0,09	0,72±0,06

powiedni wskaźnik wyliczony dla jeżyny wyniosłej o 28%, a w świeżych i wilgotnych lasach mieszanych stwierdzono sytuację odwrotną, gdyż wartość wskaźnika kumulacji cezu dla jeżyny była o 22% wyższa niż dla maliny.

Zmiana wartości wskaźników przejścia ^{137}Cs z gleby do maliny jest stopniowa, bez gwałtownych wahań, gdyż wzrastają one wraz z rozwojem wegetatywnym i zmniejszają się przy zanikaniu aktywnej wegetacji. Zmiany wartości wskaźników przejścia ^{137}Cs do maliny w borach mieszanych w kwietniu i październiku są mniejsze niż w okresie od maja do września ($F_f = 11,22 > F_{(4;19;0,5)} = 2,90$). W lasach mieszanych sezonowe wahania wskaźników przejścia nie różniły się istotnie statystycznie. W przypadku jeżyny wyniosłej różnica w wartości wskaźników przejścia w różnych miesiącach była statystycznie istotna, zarówno na powierzchni nr 1 ($F_f = 9,08 > F_{(4;21;0,5)} = 2,84$), jak i na powierzchni nr 2 ($F_f = 11,13 > F_{(7;28;0,5)} = 2,36$). Otrzymane wyniki sugerują, iż w lasach mieszanych w lipcu kumulacja radionuklidów w roślinach wzrasta ponad trzykrotnie w porównaniu ze średnią.

Dla porównania dynamiki wskaźników kumulacji (przejścia ^{137}Cs w pędy roślin) dla roślin podszytu w ciągu roku zastosowano wskaźnik Pearsona. Wskaźnik korelacji liniowej dla borów mieszanych wyniósł 0,87, a dla lasów mieszanych – 0,72, wartość $p = 5\%$.

Warstwa krzewinek

Średnie wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs w krzewinkach rodziny Ericaceae były wyższe niż w przypadku badanych gatunków podrostu i podszytu (tab. 3). Stwierdzono również zmniejszanie się wartości tych wskaźników wraz ze wzrostem żyzności gleby, co jest zgodne z wynikami innych badaczy (Šeglov et al. 2001; Perevolockij 2006; Krasnov et al. 2007; Šitůk et al. 2010).

Analiza prób borówki czarnej i borówki brusznicy z powierzchni nr 2 wykazała znaczne sezonowe wahania wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs . Początek aktywnej wegetacji (marzec) charakteryzuje się gwałtownym wzrostem kumulacji cezu w roślinach: w borówce czarnej ilość cezu była 1,76 razy

Tabela 3. Dynamika wskaźników kumulacji ^{137}Cs w krzewinkach (wskaźnik kumulacji nie ma jednostki)

Table 3. Dynamics of ^{137}Cs accumulation indices in the shrubs (accumulation indices has no units)

Miesiąc Month	Świeże i wilgotne bory mieszane (pow. nr 1) Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)			Świeże i wilgotne lasy mieszane (pow. nr 2) Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)		
	borówka czarna bilberry	borówka brusznica lingonberry	wrzos heather	borówka czarna bilberry	borówka brusznica lingonberry	wrzos heather
Luty February	3,33±0,38	3,00±0,10	0,85±0,16	1,02±0,31	1,49±0,42	–
Marzec March	–	–	–	2,16±0,37	2,84±0,33	5,00±0,93
Kwiecień April	2,06±0,37	1,53±0,09	–	–	–	–
Maj May	–	–	–	0,46±0,07	1,39±0,25	–
Czerwiec June	1,26±0,12	1,83±0,08	1,87±0,35	–	–	–
Lipiec July	–	–	–	1,08±0,11	1,55±0,21	1,03±0,34
Sierpień August	–	–	–	2,52±0,44	2,90±0,38	3,08±0,31
Wrzesień September	1,04±0,13	1,14±0,23	2,33±0,96	0,40±0,04	0,32±0,10	4,13±0,77
Październik October	1,38±0,81	1,13±0,15	3,48±0,92	1,70±0,11	4,72±0,82	9,76±0,78
Listopad November	–	–	–	–	–	–
Grudzień December	–	–	–	0,54±0,06	1,75±0,47	3,39±0,59
Średnia Average	1,81±0,17	1,73±0,12	2,13±0,35	1,23±0,09	2,12±0,15	4,40±0,26

większa w porównaniu z wartością średnioroczną, natomiast u borówki brusznicy – 1,34 razy. Wzrost wskaźników kumulacji ^{137}Cs w roślinach stwierdzono także w okresie owocowania (sierpień). Kumulacja ^{137}Cs w borówce czarnej wzrosła 2,05 razy w porównaniu z wartością średnioroczną, a u borówki brusznicy – 1,37 razy. Wzrost wskaźników kumulacji ^{137}Cs w roślinach rodziny wrzosowatych obserwowano w końcu okresu aktywnej wegetacji (październik). Dla borówki czarnej wartość wskaźnika wzrosła 1,38 razy, a dla borówki brusznicy – 2,22 razy. Gatunki krzewinkowe mają podobne właściwości biologiczne i ekologiczne, ich systemy korzeniowe zajmują podobne mikronisze. Różnice pomiędzy gatunkami mogą być spowodowane tym, że w badanym okresie pędy borówki czarnej były w stanie bezlistnym, a borówki brusznicy – w stanie ulistnionym. We wrzosie maksymalne sezonowe wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs były notowane w końcu okresu aktywnej wegetacji. W borach mieszanych wskaźnik kumulacji cezu przekraczał wartości średnie 1,63 razy, a w lasach mieszanych 2,22 razy.

Na podstawie średnich wartości wskaźnika kumulacji rośliny wrzosowate w borach mieszanych można uszeregować wzrastająco: borówka brusznica > borówka czarna > wrzos. Z kolei w lasach mieszanych: borówka czarna > borówka brusznica > wrzos. Uwzględniając brak statystycznie istotnej różnicy w kumulacji cezu między borówką czarną i borówką brusznicą w lasach mieszanych, można wnioskować, że wielkość kumulacji ^{137}Cs w tych gatunkach nie zależy od żyzności siedliska. Wyniki uzyskane dla powierzchni zlokalizowanej w borach mieszanych wskazują, że wartości wskaźnika kumulacji ^{137}Cs we wrzosie przekraczają wartości dla borówki czarnej i borówki brusznicy 1,18 i 1,23 razy, natomiast w lasach mieszanych są one większe, odpowiednio: 3,58 i 2,08 razy.

Grzyby

W diecie sarny europejskiej udział owocników grzybów jesienną nie przekracza 1,4% (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al., w druku). Porównanie wartości wskaźników kumulacji ^{137}Cs w owocnikach grzybów różnych gatunków występujących na badanych powierzchniach wskazuje na zróżnicowaną intensywność kumulacji cezu w różnych warunkach siedliskowych (tab. 4).

W lasach mieszanych, na podstawie wzrastających wartości ^{137}Cs w owocnikach, poszczególne gatunki tworzą następujący szereg: pieprznik < borowik < gołąbek < koźlarz < podgrzybek brunatny < krowiak podwinięty. Z kolei w lasach mieszanych szereg ten przedstawia się następująco: pieprznik < borowik < gołąbek < podgrzybek brunatny < koźlarz < krowiak podwinięty. Stwierdzono dość znaczne wahania w kumulacji ^{137}Cs w owocnikach grzybów różnych gatunków rosnących w jednakowych warunkach siedliskowych. Wskaźnik kumulacji ^{137}Cs w owocnikach krowiaka w porównaniu do owocników borowika był w lasach mieszanych wyższy 5,7 razy, a w lasach mieszanych – 6,6 razy. Ogólnie, wartość wskaźnika kumulacji ^{137}Cs w owocnikach gołąbka, krowiaka i podgrzybka w lasach mieszanych była niższa niż w borach mieszanych. Różnica wyniosła odpowiednio: 3,4; 3,1 i 8 razy. Dla pieprznika, borowika i koźlarza nie wykazano statystycznie istotnych różnic średnich wartości wskaźnika kumulacji w różnych warunkach siedliskowych.

Na podstawie otrzymanych wyników można wnioskować, że głównym czynnikiem, który wyznacza wartość wskaźnika kumulacji cezu w owocnikach grzybów jest typ siedliska. Wzrost żyzności gleby powodował zmniejszenie migracji ^{137}Cs z gleby do owocników grzybów. Uwzględniając stopień kumulacji ^{137}Cs , grzyby można podzielić na słabo i intensywnie kumulujące badany radionuklid. Do pierwszej grupy należą gatunki, które mają dla sarny największe znaczenie pokarmowe, do drugiej zaś grzyby, których zasoby są dość znaczne w lasach Żytomirskiego Polesia. Konsumpcja grzybów o wysokich wskaźnikach kumulacji substancji radioaktywnej może powodować znaczny wzrost ogólnej zawartości ^{137}Cs w organach sarny europejskiej.

Dynamika zmian aktywności cezu

Analiza dynamiki aktywności ^{137}Cs w pokarmowej części roślin podrostu i podszytu w okresie aktywnej wegetacji świadczy o tym, że w kumulacji radionuklidów w pędach występują widoczne maksima (ryc. 1). Maksymalne skażenie pokarmowej części dębu odnotowano w sierpniu, osiki – w październiku, a brzozy – w lipcu. Największe wartości

Tabela 4. Wskaźniki kumulacji ^{137}Cs w owocnikach grzybów (wskaźnik kumulacji nie ma jednostki)

Table 4. Accumulation indices of ^{137}Cs in the fruiting bodies of fungi (accumulation indices has no units)

Gatunek grzyba Species of fungus	Wskaźnik kumulacji Accumulation indices		Zdolność do kumulacji The ability to accumulation
	bory mieszane mixed coniferous forests	las mieszane mixed broadleaved forests	
<i>Cantharellus</i> spp. Adans. ex Fr.	0,68±0,31	0,29±0,03	słabo kumulujące weakly cumulative
<i>Boletus edulis</i> Bull.	1,88±0,29	0,52±0,19	
<i>Russula</i> spp. Pers.	3,51±0,40	1,03±0,26	
<i>Leccinum</i> spp. Gray	4,91±1,14	2,63±0,93	intensywnie kumulujące intensively cumulative
<i>Xerocomus badius</i> (Fr.) E.-J. Gilbert	10,54±3,70	1,30±0,50	
<i>Paxillus involutus</i> Fr.	10,63±2,57	3,45±1,82	

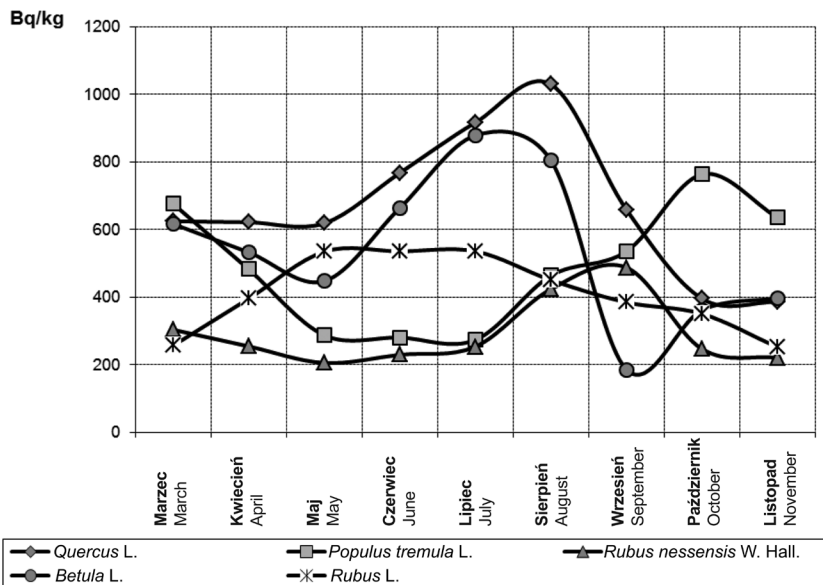
aktywności ^{137}Cs w pędach maliny wystąpiły latem, a jeżyny wyniosłej w sierpniu – wrześniu.

Uzyskane wyniki świadczą o narastającej kumulacji ^{137}Cs w pokarmowej części dębu, osiki i jeżyny wyniosłej pod koniec lata i jesienią. Właśnie te pokarmy zajmują ważne miejsce w diecie sarny europejskiej w lasach Centralnego Polesia Ukrainy. Średnioroczna zawartość pędów dębu i osiki w diecie wynosi po 13%, a jeżyny wyniosłej 12%, natomiast w jesiennej diecie udział tych gatunków wynosi odpowiednio 13, 28 i 13% (Krasnov 2007). Analiza zawartości żołądków 15 zwierząt pozyskanych jesienią wykazała obecność niestrawionych pędów. W 47% stwierdzono pędy dębu, w 73% – pędy osiki, a w 20% – pędy jeżyny wyniosłej. Intensywna konsumpcja tych roślin pokrywa się w czasie ze statystycznie istotnym wzrostem aktywności w nich ^{137}Cs .

W przeciwieństwie do dębu i osiki, pędy brzozy i maliny są pokarmem sezonowym, zjadanym przez sarnę w znacznie

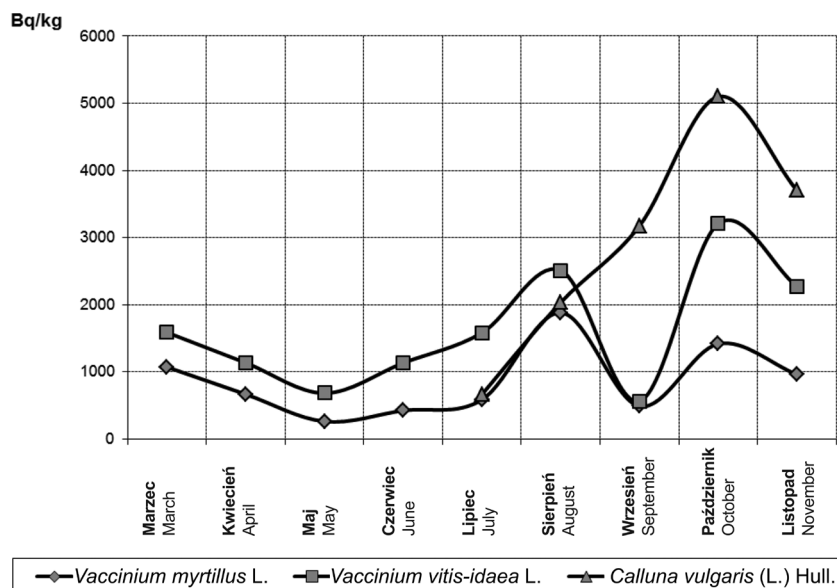
mniejszych ilościach. Zawartość brzozy w jej diecie wynosi 3,4% jesienią i 10,6% zimą, a maliny – 5 % jesienią (Krasnov et al. 2007). Tak więc maksymalna kumulacja ^{137}Cs w brzozie i malinie nie pokrywa się w czasie z jej intensywną konsumpcją. Porównanie specyfiki składu pokarmu sarny europejskiej i specyfiki radioaktywnego skażenia pokarmowej części roślin pozwala wnioskować o tym, że jedną z przyczyn wzrostu poziomu kumulacji ^{137}Cs w organizmie tego gatunku jesienią może być intensywna konsumpcja przez zwierzęta pędów dębu, osiki i jeżyny wyniosłej (Krasnov et al. 2015).

Badania dynamiki aktywności ^{137}Cs w borówce czarnej, borówce bruszniczy i wrzosie świadczą o wzroście radioaktywnego skażenia w końcu okresu aktywnej wegetacji (ryc. 2). Maksymalną zawartość ^{137}Cs w pędach wrzosu i borówki bruszniczy odnotowano bowiem w październiku, a borówki czarnej – w sierpniu. W diecie sarny europejskiej borówka czarna jest podstawowym pokarmem, który jest konsumowany w ciągu ca-



Rycina 1. Dynamika aktywności ^{137}Cs w pokarmowej części roślin podrostu i podszytu w lasach mieszanych

Figure 1. Dynamics of ^{137}Cs activity in the food plant parts of the undergrowth and understory plants in mixed broadleaved forests



Rycina 2. Dynamika aktywności ^{137}Cs w krzewinach w lasach mieszanych

Figure 2. Dynamics of ^{137}Cs activity in the shrubs in mixed broadleaved forests

tego roku. Wcześniejsze badania wykazały, że wrzos i borówka brusznica obecne są w składzie jesiennych, zimowych i wiosennych pokarmów (Krasnov et al. 2015). Jesienią udział borówki czarnej w diecie sarny europejskiej wynosi 4,7%, wrzосу – 2,3%, natomiast borówka brusznica konsumowana jest rzadko (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al. 2015). Pomimo że maksimum konsumpcji danych pokarmów przez sarnę europejską na Centralnym Polesiu Ukrainy przypada na zimę, wzrost zawartości ^{137}Cs w roślinach, stwierdzany już jesienią, może wpłynąć na ogólny poziom radioaktywnego skażenia zwierząt.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Poziom radioaktywnego skażenia roślin i grzybów, które wchodzi w skład pokarmu sarny europejskiej zależy od żyzności gleby. Najwyższą aktywność cezu ^{137}Cs w roślinach i grzybach odnotowano w warunkach ubogich siedlisk. Wraz ze wzrostem żyzności gleby intensywność migracji radionuklidów w rośliny i grzyby zmniejsza się.

2. Największy poziom aktywności ^{137}Cs w liściach i jednorocznych pędach drzewiastych gatunków podrostu i podszyciu, krzewów i krzewinek konsumowanych przez sarnę europejską był obserwowany pod koniec lata oraz we wrześniu – październiku, co może powodować wzrost poziomu radioaktywnego skażenia organizmu sarny.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez Ministerstwo Sytuacji Nadzwyczajnych Ukrainy.

Literatura

Bulko N.I., Shabaleva M.A., Kozlov A.K., Tolkacheva N.V., Mashkov I.A. 2013. The ^{137}Cs accumulation by forest-derived products in the Gomel region. *Journal of environmental radioactivity*, 1–28. DOI 10.1016/j.jenvrad.2013.02.003

- Drożdż A., Osiecki A. 1973. Intake and digestibility of natural feeds by roe-deer. *Acta Theriologica* 18: 81–91.
- Fawaris B. 1995. Behaviour of ^{137}Cs in the boreal forest ecosystem of Central Sweden. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 1–43.
- Krasnov V.P., Orlov A.A., Buzun V.A., Shelest Z.M., Landin V.P. 2007. Prikładna radioekologia lesa. Żytomierz. Wydawnictwo Polissâ, 1–680.
- Krasnov V., Shelest Z.M., Boiko S., Gulik I., Sieniawski W. 2015. Skład pokarmu sarny europejskiej *Capreolus capreolus* w ekosystemach leśnych Żytomierskiego Polesia Ukrainy. *Leśne Prace Badawcze*. 76 (2): 184–190. DOI: 10.1515/frp-2015-0018.
- Lehto J., Vaaramaa K., Leskinen A. 2013. ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in boreal forest soil and their transfer into wild mushrooms and berries. *Journal of environmental radioactivity*, 116: 124–132. DOI 10.1016/j.jenvrad.2012.08.012
- Mamihin S.V., Nikulina M.V., Manahov D.V. 2005. Mechanizmy sezonnoj i mnogoletnej dinamiki radioaktivnyh izotopov ceziâ w ekosisteme dubovogo lesa. *Problemy radioekologii i pograničnyh disciplin*, 6: 292–308.
- Perevolockij A.N. 2006. Raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr w lesnyh biogeocenozah. Gomel'. RNIUP Institut radiologii, 1–225.
- Prostakov N. P. 1989. Kosulâ Centralnego Černozem'â: Avtoref. dis. k.b.n. Moskva, 1–19.
- Shelest Z.M. 2004. Ocenka radioaktivnogo zagrâzneniâ raciona kosuli evropejskoj. *Problemy radioekologii lesa. Les. Čelovek. Černobyl'*. Gomel', 61: 271–275.
- Sokolov V.E. (ed). 1992. Evropejskaâ i sibirskaâ kosuli. Sistematika, ekologiâ, povedenie, racional'noe ispol'zovanie i ohrana. Moskva. *Nauka*, 1–399.
- Šitûk K.F., Orlov O.O., Mel'ničuk S.D. 2010. Porivnâl'na ocinka rozpodilu ^{137}Cs w ekosystemah sosnovih i sosnovo-dubovih lisiv Ukraïns'kogo Polissâ. *Áderna fizika i energetika*, 11: 74–81.
- Šeglov A.I., Cvetnova O.B. 2001. Rol' lesnyh ekosistem pri radioaktivnom zagrâznenii. *Priroda*, 4: 23–32.

Wkład autorów

V.K. – pomysł i koncepcja, opracowanie wyników i wniosków; Z.S. – przegląd literatury, prowadzenie pomiarów terenowych; S.B. – analiza wyników, opracowanie wniosków i dyskusji; I.G. – prowadzenie pomiarów terenowych; W.S. – analiza wyników, opracowanie wniosków i dyskusji.

Radioactive contamination of dietary components of the roe deer in the forests of Zhytomirskie Polesie of Ukraine

Volodymyr Krasnov¹, Zoia Shelest², Sergii Boiko^{3*}, Igor Gulik¹, Waldemar Sieniawski³

¹ Zhytomyr State Technological University, Department of Ecology, Ukraine, 103, Chernyakhovsky str., Zhytomyr, 10005, Ukraine;

² Zhytomyr State Technological University, Department of Natural Sciences, 103, Chernyakhovsky str., Zhytomyr, 10005, Ukraine;

³ University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Department of Forestry and Forest Ecology, Pl. Łódzki 2, 10–727, Olsztyn, Poland

*Tel. +48 89 5234947, e-mail: sergii.boiko@uwm.edu.pl

Abstract. This paper presents a study on radioactive contamination of dietary components of the roe deer (*Capreolus capreolus*) in Zhytomirskie Polesie (Ukraine). Studies were conducted on two research plots in forests with similar levels of radioactive contamination, 29 ± 8 kBq/m² - 55 ± 17 kBq/m², in mixed coniferous forests and mixed broadleaved forests, which are the dominant forest types of the area. The highest level of radionuclide accumulation was observed in young oak seedlings.

The dynamics for oak sprouts indicate that the accumulation coefficient reaches a maximum in September and August in the mixed coniferous and mixed broadleaved forests respectively. A comparison of mean values of the ¹³⁷Cs accumulation coefficients in the shoots of undergrowth plants confirms that an increase in soil fertility leads to a reduction of radionuclides in plant phytomass. In the mixed broadleaved forests, average values of the coefficient of ¹³⁷Cs accumulation in phytomass of blackberry was 26% and of raspberries 58% lower compared to mixed coniferous forests. The maximum contamination of phytomass was observed in August for oak, in October for aspen, and in July for birch. The highest specific activity of ¹³⁷Cs in raspberry shoots occurs during the three summer months, whereas the peak in blackberry occurs from August to September. The dynamics of the specific activity of ¹³⁷Cs in blueberry, cranberry and heather show an increase in radioactive contamination of phytomass towards the end of the growth period. The maximum concentration of ¹³⁷Cs in shoots of heather and bilberry was recorded in October and for blueberry in August. Mushrooms in mixed coniferous forests can be ranked as follows according to the degree of ¹³⁷Cs contamination: *Cantharellus* < *Boletus edulis* < *Russula* < *Leccinum* < *Xerocomus badius* < *Paxillus involutus*. In mixed broadleaved forests the ranking is *Cantharellus* < *Boletus edulis* < *Russula* < *Xerocomus badius* < *Leccinum* < *Paxillus involutus*. Within one habitat type, we observed fairly significant variations in ¹³⁷Cs accumulation in fruit bodies of fungi species.

Keywords: radioactive contamination, roe deer diet, ¹³⁷Cs, Zhytomirskie Polesie of Ukraine

1. Introduction

After the nuclear accident that occurred in 1986 at the Chernobyl Nuclear Power Plant in Ukraine, the meat of game animals hunted in the areas exposed to radioactivity has become one of the potential sources of radioactive contamination for humans. The threat concerns mainly hunters (poachers as well) and consumers of wild boar and deer meat, who first of all are at risk of accumulation of increased radiation doses. At the same time, game animals as natural components of for-

est ecosystems have become an important factor in the process of transferring radioactive nuclides in time and space.

Radionuclide contamination of ungulates develops mainly through food consumption (Krasnov et al. 2007). European roe deer diet includes undergrowth and underbrush trees, shrubs and subshrubs, herbaceous plants as well as fungi, lichens and mosses (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al., in print). The specificity of radionuclide accumulation expressed by ¹³⁷Cs contents in plants consumed by forest animals has been studied in several countries.

Received: 13.06.2014, reviewed: 30.06.2014, accepted after revision: 11.07.2014.

For the most part, studies carried out have been focused on ^{137}Cs accumulation in forest plants utilized by humans, and especially that in edible species (e.g. berries) or those used for medicinal purposes (e.g. sprouts, roots, aboveground parts, flowers). Several authors paid special attention to a role of particular plant species in radionuclide relocation over forest ecosystems in the countries such as: Belarus (Perevolockij 2006; Bulko et al. 2013), Russia (Šeglov, Cvetnova 2001; Mamihin et al. 2005) Ukraine (Shelest 2004; Krasnov et al. 2007; Šitůk et al. 2010; Krasnov et al., in print), Sweden (Fawaris 1995) and Finland (Lehto et al. 2013). The results obtained allow to overview a level of radioactive contamination in plants in diet of the European roe deer – one of the most abundant herbivore in Europe's forests. It was found that heather species (Ericaceae) showed considerably high radionuclide accumulation (Krasnov et al. 2007). Indexes of ^{137}Cs transition into Ericaceae plants show higher values than those observed in the majority of other vascular plants prevailing in northern and eastern Europe (Fawaris 1995; Perevolockij 2006; Lehto et al. 2013). At the same time, the results of the study on radionuclide translocation all through tree organs and tissues showed the highest ^{137}Cs contents in foliage (leaves and needles) and stems of current annual increment – plant parts most readily eaten by the European roe deer (Šeleast 2004). Furthermore, fungi hold special radioecological responsibility as they frequently serve as food for forest animals. Their fruit bodies not only accumulate high amounts of ^{137}Cs , but also their contaminated mycelia can pollute plants through mycorrhizal associations with plant roots (Fawaris 1995).

Studies by Krasnov et al. (2007, 20xx in print) confirm considerable variability in contamination of biomass in different phytocenosis components, depending on plant species, growth habitat and development stage. Plants and fungi are most often subject to contamination analyses as parts of forest ecosystems, but not as animal food. The results as such give no basis to evaluate the effects of particular animal diet components on seasonal changes of ^{137}Cs accumulation in animal bodies.

The European roe deer *Capreolus capreolus* (L.) is one of the most common animal species in forests of Ukrainian Central Polesie (Krasnov et al. 2007). The species belongs to Ruminantia taxon and feeds in vegetation zone 0-150 cm up from the soil surface (Prostakov 1989; Sokolov 1992), which is connected with the size of these animals. Roe deer feed most intensely on young parts of plants – those with stem diameter 2–4 mm (maximum: 6 mm) (Droždź, Osiecki 1973; Sokolov 1992). As a consequence of specific dentition, the European roe deer is not able to damage tree bark (Prostakov 1989). The feeding habits of the European roe deer decide on methodology used for evaluation of ^{137}Cs accumulation in plant components of this animal diet.

The aim of the present study was to determine seasonal changes of the intensity of radionuclide translocation from the soil into plants consumed by the European roe deer.

2. Research methods

Due to partial inaccessibility of the district where the Power Plant is situated, research described below is unique and has not been so far repeated.

Seasonal dynamics of radioactive contamination of European roe deer diet components was observed in the years 1995-1997, on two research plots established in typical roe deer habitats located in Ukrainian Central Polesie forests. The areas (sample plots) No. 1 and No. 2 were situated in north-western and northern parts of Zhytomyr region, respectively.

The plot No. 1 was covered by fresh and wet mixed coniferous forests with characteristic for given ecosystems plant associations, i.e. 30-40 years old stands, with 2 layers: (1) uppergrowth with Scots pine (I class of quality of the standing crop) along with overall 20% share of silver birch and aspen, and (2) - with pedunculate oak (III-IV class). The average level of radioactive contamination of the soil was 29 ± 8 kBq/m², and average cesium activity was 350 ± 130 Bq/kg. The plot No. 1 was classified as one with relatively low radioactive contamination.

The plot No. 2 was distinctive of a prevailing share of fresh and mixed broadleaved forests. The stand was 30-40 years of age and comprised 3 layers: (1) Scots pine (I class), (2) pedunculate oak (II-III class), silver birch, poplar and aspen and (3) with Norway maple, linden and hornbeam. The average level of radioactive contamination of the soil was almost two-fold higher than that in No. 1 plot and amounted to 55 ± 17 kBq/m², whereas average cesium activity in the soil was 855 ± 440 Bq/kg. The plot No. 2 was located in the exclusion zone (people evacuated due to contamination above 37 kBq/m²).

The choice of plant species for further analyses resulted from their roles in roe deer diet as well as functions in phytocenosis. Taking into account the intensity of roe deer feeding, there were selected:

- undergrowth and underbrush: aspen (*Populus tremula* L.), pedunculate oak (*Quercus robur* L.), silver birch (*Betula verrucosa* L.) and European white birch (*Betula pubescens* Ehrh.). Aspen and pedunculate oak are main roe deer diet components, whereas birch is a seasonal diet constituent (in the fall and winter);

- shrub layer: blackberry (*Rubus nessensis* W. Hall.) and raspberry (*Rubus idaeus* L.). Blackberry is one of the crucial species in the diet of roe deer inhabiting Zhytomyr Polesie region and raspberry is intensely fed on during the fall season;

– herbaceous plant-subshrub layer: dominant and sub-dominant species from the Ericaceae family occurring in mixed coniferous and mixed broadleaved forests in Zhytomyr Polesie, i.e. bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) as typical roe deer diet components in the winter and spring season and common heather (*Calluna vulgaris* (L.) Hill) consumed by the European roe deer in the fall, winter and spring;

– fungi: taken into account due to their noteworthy role in roe deer contamination, despite of rather low fungi consumption by animals in Zhytomyr Polesie forests.

The collection of selected plant species was carried out within the feeding zone of the European roe deer (at the height 0-150 cm above the ground). All the samples were collected 5 times from the area of 1 m² (in between 1st and 15th day of each month, there were taken 5 samples, in total 600). Depending on the season of the year, the shoots of tree species (up to 5 mm thick) were collected with or without leaves. Fungal fruit bodies were cut out above the ground and brushed off the litter. Taking into account patchy patterns of radioactive contamination, soil samples were collected together with each plant sample. The soil was sampled with the use of a drill (5 cm diameter) at about 10 cm depth on the area of 1 m² around sampled plants or else at the point of fungi and sub-shrubs collection.

Radionuclide activity of ¹³⁷Cs was measured in air-dried and crushed soil and plant samples (contamination level was calculated per 1 kg). The activity of ¹³⁷Cs in the samples of crushed fresh fungi was defined using gamma-spectrometer AFORA LP-4900B with the semiconductor detector

DG DK-80 B-3. Measurement error ranged from 5.1% to 8.5%. The accumulation coefficient (calculated as the ratio of plant radioactivity and soil radioactivity, Bq/kg) was used for description of ¹³⁷Cs accumulation characteristics in roe deer food.

The values of ¹³⁷Cs accumulation coefficients in one-year-old shoots of undergrowth trees (measured in different months) as well as those determined for shrub layer plants were compared using Student's t-test and Fisher's combined probability test. Annual dynamics of ¹³⁷Cs uptake by underbrush plants was tested using Pearson's correlation coefficient.

3. Results and Discussion

Undergrowth plants

The comparison of mean ¹³⁷Cs accumulation coefficients showed that generally all plant species samples collected in mixed broadleaved forests indicated lower values than those found in plants collected from mixed coniferous forests (tab.1). This suggests that accumulation of radionuclides in plants decreases with increasing soil fertility. Irrespective of site fertility, annual means of ¹³⁷Cs accumulation coefficients increased in the following order: aspen > birch > oak. On the sample plot No. 1, ¹³⁷Cs accumulation by oak was greater by 24% and 20% than that in aspen and birch, respectively. The differences between oak-aspen and oak-birch observed on the sample plot No. 2 were 42% and 30%, respectively. The intensity of ¹³⁷Cs accumulation by birch and aspen in mixed

Table 1. Dynamics of accumulation indices of ¹³⁷Cs in yearly shoots of tree undergrowth species during the year (accumulation indices has no units)

Month	Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)			Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)		
	oak	aspen	birch	oak	aspen	birch
February	0.70±0.08	0.56±0.21	0.44±0.11	1.59±0.20	0.53±0.37	0.29±0.01
March	–	–	–	0.93±0.34	0.74±0.18	0.86±0.17
April	1.32±0.26	0.44±0.11	1.16±0.27	–	–	–
May	–	–	–	1.24±0.26	0.55±0.06	0.64±0.13
June	1.19±0.25	1.17±0.09	0.88±0.13	–	–	–
July	–	–	–	0.70±0.16	0.44±0.09	1.57±0.33
August	–	–	–	2.17±0.42	0.35±0.05	0.94±0.17
September	2.24±0.27	2.08±0.34	1.40±0.43	0.58±0.13	0.36±0.03	0.12±0.03
October	0.72±0.10	0.43±0.12	1.04±0.10	0.52±0.03	1.45±0.44	0.59±0.06
November	–	–	–	–	–	–
December	–	–	–	0.53±0.10	0.41±0.09	0.36±0.06
Average	1.23±0.10	0.93±0.09	0.98±0.12	1.03±0.08	0.60±0.08	0.72±0.06

broadleaved forests was basically same, whereas in mixed coniferous forests radionuclide accumulation by birch was by 10% greater when compared with aspen.

In undergrowth components of roe deer diet, ^{137}Cs accumulation coefficient values changed depending on tree species and site conditions as well as vegetation season stages. Radionuclide accumulation in oak shoots in mixed coniferous forests was the highest (maximum) in September and in mixed broadleaved forests – in August. When compared to the annual mean, the maximum values in mixed coniferous forests and mixed broadleaved forests were 1.82 and 2.11 times higher, respectively. The analysis of ^{137}Cs accumulation in aspen shoots in mixed coniferous forests showed the maximum value in September (2.24 times higher than the annual mean), and that in mixed broadleaved forests – in October (2.42 higher than the annual mean). The maximum ^{137}Cs accumulation coefficient for birch shoots in mixed coniferous forests were found in September (1.43 times higher than the annual mean), and in mixed broadleaved forests – in July (2.18 times higher than the annual mean).

Underbrush plants

The comparison of ^{137}Cs accumulation coefficient values in the shoots of underbrush plants consumed by the European roe deer proved that radionuclide accumulation in plants decreases with increasing soil fertility (tab 2.). When compared with mixed broadleaved forests, in mixed coniferous forests, the mean values of ^{137}Cs accumulation coefficients for blackberry (*R. nessesensis*) and raspberry (*R. idaeus*) were by 26% and 58 % higher, respectively. It should be emphasized,

that despite of soil fertility, the intensity of radionuclide accumulation in underbrush plants also relies upon biological and ecological characteristics of a given plant species. In mixed coniferous forests, the value of ^{137}Cs accumulation coefficient in raspberry was higher by 28%, when compared to that of blackberry, in contrast to mixed broadleaved forests where the value of radioactive Cs accumulation in blackberry was by 22% higher when compared to raspberry.

The change of ^{137}Cs uptake from soil into raspberry was steady and its values showed no dramatic fluctuations. The values increased during plant growth stages and started decreasing at the end of the vegetation period. In mixed coniferous forests, changes in ^{137}Cs uptake values in raspberry in April and October were lower when compared to those in the period of May-September ($F_f = 11.22 > F_{(4;19;0.5)} = 2.90$). In mixed broadleaved forests, seasonal changes were not statistically significant. However, monthly differences in accumulation coefficient values in blackberry were statistically significant both on the research area No. 1 ($F_f = 9.08 > F_{(4;21;0.5)} = 2.84$) and No. 2 ($F_f = 11.13 > F_{(7;28;0.5)} = 2.36$). The results obtained indicated that in July, radionuclide accumulation in plants growing in mixed broadleaved forests was more than 3-fold higher when compared to the annual mean.

Subshrub plants

^{137}Cs accumulation coefficient values in Ericaceae subshrubs were higher when compared with those found in undergrowth and underbrush plants (tab. 3). There was also observed a decrease of radionuclide accumulation with increasing soil fertility, which confirmed the results reported

Table 2. Dynamics of accumulation indices of ^{137}Cs in plant shoots for understorey plants during the year (accumulation indices has no units)

Month	Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)		Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)	
	blackberry	raspberry	blackberry	raspberry
February	0.65±0.25	3.48±0.59	0.71±0.01	0.63±0.23
March	–	–	0.57±0.12	0.57±0.15
April	0.84±0.07	0.79±0.15	–	–
May	–	–	1,03±0,23	1,11±0,28
June	1.01±0.13	1.13±0.33	–	–
July	–	–	2.90±0.59	0.83±0.17
August	–	–	0.86±0.18	0.82±0.17
September	1.50±0.29	2.50±0.59	0.50±0.07	0.46±0.09
October	2.22±0.19	0.71±0.08	0.60±0.08	0.81±0.18
November	–	–	–	–
December	–	–	0.15±0.02	0.51±0.06
Average	1.24±0.10	1.72±0.16	0.92±0.09	0.72±0.06

ted by other authors (Šeglov et al. 2001; Perevolockij 2006; Krasnov et al. 2007; Šitůk et al. 2010).

Dynamics of ^{137}Cs uptake by subshrub shoots was tested using Pearson's coefficient. At $p = 5\%$, the measures of the linear correlation were 0.87 and 0.72 for mixed coniferous and mixed broadleaved forests, respectively.

The results for bilberry (*V. myrtillus*) and lingonberry (*V. vitis-idaea*) growing in mixed broadleaved forests (research plot No. 2) showed considerable seasonal fluctuations of ^{137}Cs accumulation coefficient values. At the beginning of active growth (March), there was observed a dramatic increase of cesium accumulation in plants: in bilberry 1.76 times higher when compared to the annual mean, and in lingonberry -1.34 times higher. When compared to the annual mean, the increase of ^{137}Cs accumulation coefficients was observed in bilberry and lingonberry shoots also in August (developed fruit growth stage): 2.05 and 1.37 times, respectively. Similarly, increased radionuclide accumulation was observed at the end of vegetation period (October). When compared to the annual mean, accumulation coefficient values of were 1.38 and 2.22 times higher for bilberry and lingonberry, respectively. Subshrub plant species are comparable in terms of their biological features, and their root systems grow in similar ecological conditions. The differences observed between bilberry and lingonberry, could be a result of their different growth stages at sampling (bilberry shoots were leafless and lingonberry - covered with leaves). In the case of common heather (*C. vulgaris*), the maximum ^{137}Cs accumulation was observed at the end the vegetation season (October). In coniferous mixed forests, radionuclide accumulation was 1.63 times higher when compared to the annual mean and in mixed broadleaved forests – 2.22 times higher.

Based on mean accumulation coefficient values, Ericaceae plants growing in mixed coniferous forests represent the following order: lingonberry > bilberry > common heather, whereas in mixed broadleaved forest: bilberry > lingonberry > common heather. Taking into account not significant differences in cesium accumulation between bilberry and lingonberry in the forests analyzed, there can be concluded that ^{137}Cs accumulation in these species is not reliant upon site fertility. The results obtained for common heather showed that cesium accumulation in this species growing in mixed coniferous forests was 1.18 and 1.23 higher than that in bilberry and lingonberry, respectively, whereas in mixed broadleaved forests cesium accumulation in bilberry and lingonberry was 3.58 and 2.08 higher, respectively.

Fungi

In the fall, European roe diet comprises no more than 1.4% fungal fruit bodies (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al. in print). The comparison of ^{137}Cs accumulation coefficient values for fungal species found on the research plots in the present study showed differentiated cesium accumulation depending on site conditions (tab. 4).

In fungi growing in mixed coniferous forests, there was observed the following order of ^{137}Cs accumulation: chanterelle < boletus < russula < rough-stalked boletus < bay boletus < paxillus, and in mixed deciduous forest the order was as such: chanterelle < boletus < russula < bay boletus < rough-stalked boletus < paxillus. Considerable differences in ^{137}Cs accumulation in the fruit bodies of observed fungal species were found even if they occurred in similar habitat

Table 3. Dynamics of ^{137}Cs accumulation indices in the shrubs (accumulation indices has no units)

Month	Fresh and moist mixed coniferous forests (Sample plot 1)			Fresh and moist mixed broadleaved forests (Sample plot 2)		
	bilberry	lingonberry	heather	bilberry	lingonberry	heather
February	3.33±0.38	3.00±0.10	0.85±0.16	1.02±0.31	1.49±0.42	–
March	–	–	–	2.16±0.37	2.84±0.33	5.00±0.93
April	2.06±0.37	1.53±0.09	–	–	–	–
May	–	–	–	0.46±0.07	1.39±0.25	–
June	1.26±0.12	1.83±0.08	1.87±0.35	–	–	–
July	–	–	–	1.08±0.11	1.55±0.21	1.03±0.34
August	–	–	–	2.52±0.44	2.90±0.38	3.08±0.31
September	1.04±0.13	1.14±0.23	2.33±0.96	0.40±0.04	0.32±0.10	4.13±0.77
October	1.38±0.81	1.13±0.15	3.48±0.92	1.70±0.11	4.72±0.82	9.76±0.78
November	–	–	–	–	–	–
December	–	–	–	0.54±0.06	1.75±0.47	3.39±0.59
Average	1.81±0.17	1.73±0.12	2.13±0.35	1.23±0.09	2.12±0.15	4.40±0.26

conditions. ^{137}Cs accumulation in paxillus fruit body was 5.7 and 6.6 times higher than that in boletus in mixed coniferous forests and mixed broadleaved forests, respectively. In general, accumulation coefficient values obtained for russula, paxillus, and bay boletus were higher (3.4, 3.1 and 8 times, respectively) in coniferous mixed forests when compared with broadleaved mixed forests. Irrespective of habitat conditions, no statistically significant differences were found in radionuclide mean accumulation in chanterelle, boletus and rough-stalked boletus.

Based on the results obtained, it can be concluded that the main factor which determines the value of ^{137}Cs accumulation coefficient in fungal fruit bodies is the habitat type. An increase of site fertility resulted in a decrease of radionuclide uptake by fungi. The species observed can be divided in two groups with different capability of radionuclide accumulation: weakly and intensely cumulative (tab. 4). Fungi from the first group are quite important in roe deer diet and those from the second group occur commonly in Zhytomyr Polesie forests. In any case, the share of fungi in roe deer diet as well as ^{137}Cs accumulation in their fruit bodies can result in substantial radionuclide accumulation in roe deer organs.

Dynamics of cesium activity

The analysis of ^{137}Cs activity in undergrowth and underbrush plant parts of roe deer diet revealed that radionuclide accumulation showed distinct peaks during the vegetation period (fig. 1). The maximum contamination in oak shoots was recorded in August, in aspen – in October, and in birch – in July. The highest accumulation of ^{137}Cs in raspberry shoots was observed in the summer months, and in blackberry – in August and September.

The results obtained indicate that ^{137}Cs accumulation increased in oak, aspen and blackberry parts eaten by roe deer at the end of summer and during the fall. These plant species are of great importance in the diet of roe deer inhabiting forests of Central Ukrainian Polesie. Annual share of oak and

aspen shoots in roe deer diet is 13% each, whereas that of blackberry is 12%. During the fall, the share of these species is 13%, 28% and 13%, respectively (Krasnov 2007). The analysis of roe deer rumen contents (carried out on 15 animals in the fall) showed not digested oak shoots (47%), aspen shoots (73%) and raspberry shoots (20%). Intensive consumption of oak, aspen and blackberry by roe deer corresponds with statistically significant increase of ^{137}Cs activity in these plants.

Contradictory to oak and aspen shoots, those of birch and raspberry constitute seasonal roe deer food and lesser amounts of these plants are consumed. The content of birch in roe deer diet is 3.4% in the fall and 10.6% in the winter, and raspberry constitutes 5% in the fall (Krasnov et al. 2007). The maximum accumulation of ^{137}Cs in birch and raspberry does not correspond with the most intense consumption of these plant species by roe deer. The comparison of European deer diet specifics and those of radionuclide contamination of plant parts eaten by this animal allow for concluding that one of the reasons of increased ^{137}Cs accumulation in roe deer body may be intense consumption of oak, aspen and blackberry shoots (Krasnov et al., in print).

The results of ^{137}Cs activity in bilberry, lingonberry and common heather indicate an increase of radionuclide accumulation at the end of the vegetation period (fig. 2). The maximum content of ^{137}Cs in lingonberry and common heather was observed in October and that in bilberry – in August. Bilberry constitutes basic food for roe deer who feed on it all year round. Earlier studies show that common heather and lingonberry are present in roe deer diet in the fall, spring and winter (Krasnov et al. in print). In the fall, the share of bilberry in roe deer diet is 4.7%, that of common heather is 2.3%, whereas lingonberry is rarely consumed (Krasnov et al. 2007; Krasnov et al., in print). Even if the furthestmost consumption of a given plant species by roe deer takes place in winter, an increase of ^{137}Cs accumulation observed already in the fall can have an effect on overall radioactive contamination in the European roe deer.

Table 4. Accumulation indices of ^{137}Cs in the fruiting bodies of fungi (accumulation indices has no units)

Species of fungus	Accumulation indices		The ability to accumulation
	mixed coniferous forests	mixed broadleaved forests	
<i>Cantharellus</i> spp. Adans. ex Fr.	0.68±0.31	0.29±0.03	weakly cumulative
<i>Boletus edulis</i> Bull.	1.88±0.29	0.52±0.19	
<i>Russula</i> spp. Pers.	3.51±0.40	1.03±0.26	
<i>Leccinum</i> spp. Gray	4.91±1.14	2.63±0.93	intensively cumulative
<i>Xerocomus badius</i> (Fr.) E.-J. Gilbert)	10.54±3.70	1.30±0.50	
<i>Paxillus involutus</i> Fr.	10.63±2.57	3.45±1.82	

4. Conclusions

1. The level of radioactive contamination in plants and fungi that compose European roe deer diet depends on site soil fertility. The highest ^{137}Cs activity in plants and fungi was recorded under the conditions of poor habitats. The intensity of radionuclide uptake by plant and fungi decreases with increasing soil fertility.

2. The highest ^{137}Cs activity in the leaves and one-year shoots of observed in the shoots of undergrowth and underbrush tree species as well as shrubs and sub-shrubs was recorded from the end of the summer to September and October. During

this period of time, the European roe deer shows feeding preferences toward the plants examined, and thus the animals can be exposed to increased radioactive contamination.

Conflict of interests

No potential conflicts are declared

Acknowledgements and financial support

The study was financed by the Ministry of Emergencies of Ukraine

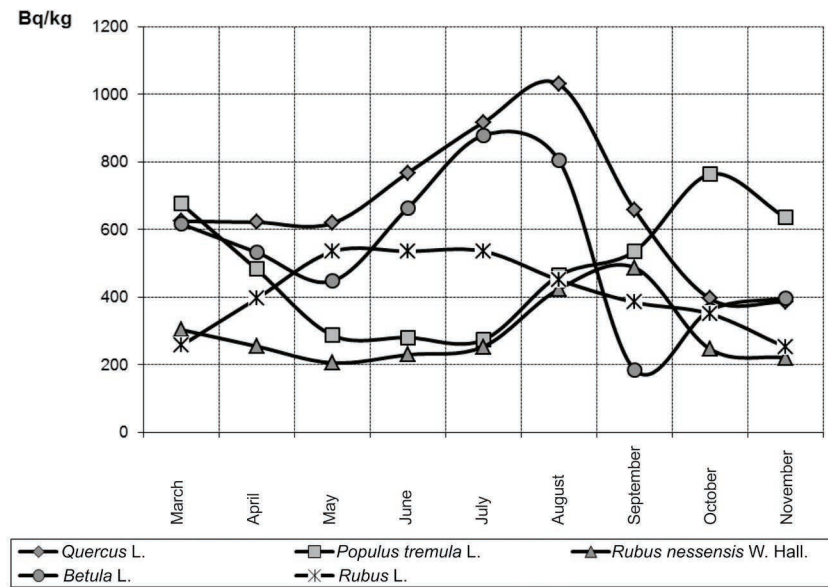


Figure 1. Dynamics of ^{137}Cs activity in the food plant parts of the undergrowth and understory plants in mixed broadleaved forests

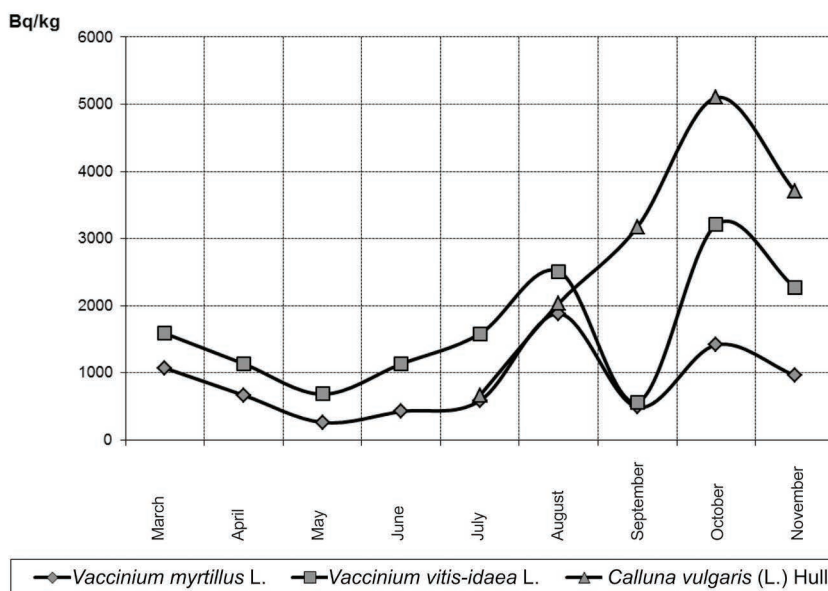


Figure 2. Dynamics of ^{137}Cs activity in the shrubs in mixed broadleaved forests

References

- Bulko N.I., Shabaleva M.A., Kozlov A.K., Tolkacheva N.V., Mashkov I.A. 2013. The ^{137}Cs accumulation by forest-derived products in the Gomel region. *Journal of environmental radioactivity*, 1–28. DOI 10.1016/j.jenvrad.2013.02.003
- Drożdż A., Osiecki A. 1973. Intake and digestibility of natural feeds by roe-deer. *Acta Theriologica* 18: 81–91.
- Fawaris B. 1995. Behaviour of ^{137}Cs in the boreal forest ecosystem of Central Sweden. Dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 1–43.
- Krasnov V.P., Orlov A.A., Buzun V.A., Shelest Z.M., Landin V.P. 2007. *Prikladnaâ radio èkologiâ lesa*. Żytomierz. Wydawnictwo Polissâ, 1–680.
- Krasnov V., Shelest Z.M., Boiko S., Gulik I., Sieniawski W. Skład pokarmu sarny europejskiej *Capreolus capreolus* w ekosystemach leśnych Żytomierskiego Polesia Ukrainy. *Leśne Prace Badawcze*. 76 (2): 184–190. DOI: 10.1515/frp-2015-0018.
- Lehto J., Vaaramaa K., Leskinen A. 2013. ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in boreal forest soil and their transfer into wild mushrooms and berries. *Journal of environmental radioactivity*, 116: 124–132. DOI 10.1016/j.jenvrad.2012.08.012
- Mamihin S.V., Nikulina M.V., Manahov D.V. 2005. Mechanizmy sezonnoj i mnogoletnej dinamiki radioaktivnyh izotopov ceziâ w ekosisteme dubovogo lesa. *Problemy radioèkologii i pograničnyh disciplin*, 6: 292–308.
- Perevolockij A.N. 2006. Raspređenje ^{137}Cs i ^{90}Sr w lesnyh biogeocenozah. Gomel'. RNIUP Institut radiologii, 1–225.
- Prostakov N. P. 1989. Kosulâ Centralnego Černozem'â: Avtoref. dis. k.b.n. Moskva, 1–19.
- Shelest Z.M. 2004. Ocenka radioaktivnogo zagrâzneniâ racional'noe evropejskoj. *Problemy radioèkologii lesa. Les. Čelovek. Černobyl'*. Gomel', 61: 271–275.
- Sokolov V.E. (ed). 1992. Evropejskaâ i sibirskaâ kosuli. Sistematika, ekologiâ, povedenie, racional'noe ispol'zovanie i ohrana. Moskva. *Nauka*, 1–399.
- Šitûk K.F., Orlov O.O., Mel'ničuk S.D. 2010. Porivnâl'na ocinka rozpodilu ^{137}Cs w ekosystemah sosnovih i sosnovo-dubovih lisiv Ukraïns'kogo Polissâ. *Âderna fizika i energetika*, 11: 74–81.
- Šeglov A.I., Cvetnova O.B. 2001. Rol' lesnyh ekosistem pri radioaktivnom zagrâznenii. *Priroda*, 4: 23–32.

Author's contribution

V.K. – conception, result analysis and conclusions; Z.S. – literature review, field work; S.B. – result analysis, discussion and conclusions; I.G. – field work; W.S. – result analysis, discussion and conclusions.