

**Ewa Smolska**

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych  
e-mail: e.smolska@uw.edu.pl

## **ZASTOSOWANIE Cs-137 DO OCENY EROZJI GLEBY NA POJEZIERZU SUWALSKIM**

### **Soil erosion assessment using Cs-137 in the Suwałki Lakeland**

**Abstract:** The aim of studies was the recognition of the contemporary denudation considering tillage translocation and water soil erosion. This study was performed in the typical last glacial relief. The Cs-137 inventory was analysed along two hillslope profiles and at their footslopes. The value of soil erosion and sedimentation was calculated using the proportional model and the simplified mass balance model. Studies showed that eroded soil from upper and middle segments of the slopes was re-deposited on concave segments of the slopes. The erosion rate was 0.5-1.6 mm on the top of hills and 0.8-3.2 mm on their slopes. The deposition occurs on the concave slope at rate of 3.8-6.6 mm per year on average. Erosion-deposition balance indicate that the small part of eroded soil was exported to the valley bottom and bottom of depression. The share of the water rill and interrill erosion in the total of topsoil erosion is range from 1 to 10% depending on used model. Tillage translocation is the main process shaped a small hills in the last glacial area.

**Słowa kluczowe:** <sup>137</sup>Cs, erozja gleby, depozycja, obszar młodoglacialny, Polska NE  
**Key words:** <sup>137</sup>Cs, soil erosion, depositon, last-glacial area, NE Poland

## **WPROWADZENIE**

Strefy erozji na stoku i depozycji podstokowej są identyfikowane przede wszystkim poprzez analizę profili glebowych (np. Ziemiński, Mazur 1956, Koćmit i in. 2001, Rejman 2006, Paluszek 2010) oraz koncentrację cezu-137 w glebie (np. Ritche, McHenry 1990, Walling, He 1998, Zgłobicki 2002). Zastosowanie cezu-137 pozwala na ocenę tempa procesów sedymentacyjnych w strefie podstokowej, a powiązanie bilansu materiału z bilansem cezu pozwala na

ocenę natężenia procesów denudacyjnych (m.in. Walling, Quine 1990, Walling, He 1998, 1999). Określenie ilości materiału, który jest odprowadzany poza mikrozlewnię stokową i gromadzony w stożku, czy w pokrywie u podstawy stoku ma duże znaczenie w poznaniu funkcjonowania systemu stokowego w krajobrazie. W Polsce takie badania prowadzono na obszarach górskich i podgórskich (Froehlich, Walling 1991, 1992, Froehlich 1997, Chełmicki i in. 1995, Święchowicz 2002a), wyżyn lessowych (Zgłobicki 2002, 2008, Poręba 2010) i młodoglacjalnych (Stach 1991, Smolska 2005). Zagadnienia metodyczne związane z ilościową oceną denudacji z zastosowaniem różnych modeli z wykorzystaniem znacznika, jakim jest cez-137 zostały omówione na podstawie badań w Polsce przez Porębę i Bluszcz (2008) oraz Porębę (2010).

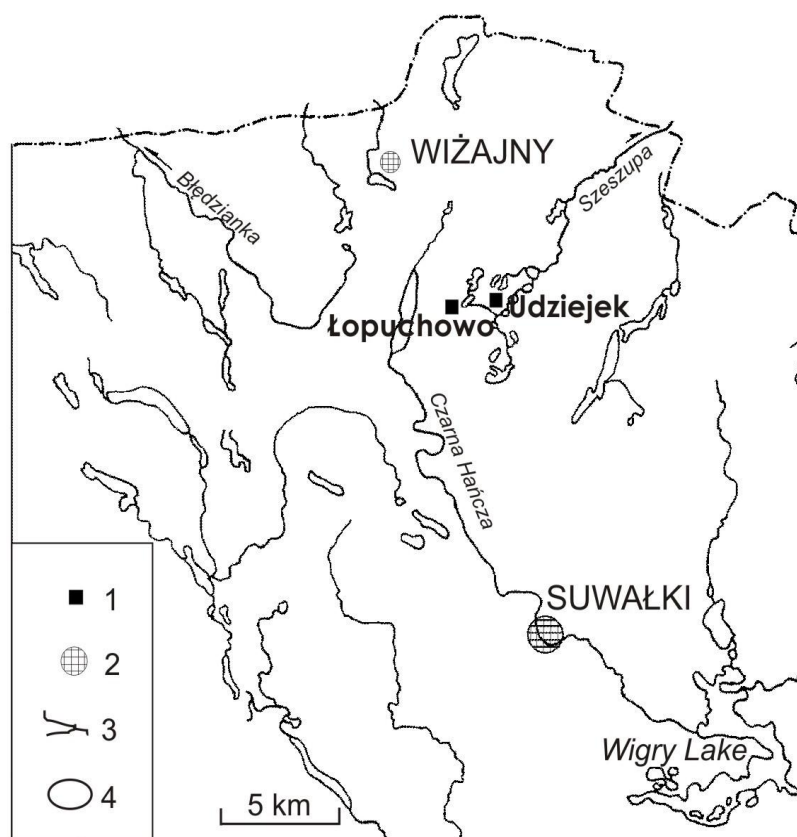
Celem prowadzonych badań na Pojezierzu Suwalskim (Polska NE) było poznanie natężenia współczesnych procesów denudacyjnych na podstawie koncentracji Cs-137 w glebie. Na przykładzie dwóch wybranych stoków analizowano zawartość cezu-137 w glebie wzdłuż profili podłużnych stoków. Aby określić efektywność erozji ornej i wodnej w denudacji stoków, porównano wyniki uzyskane na podstawie koncentracji Cs-137 w glebie i eksperymentalnych pomiarów ilościowych spłukiwania prowadzonych na tych samych stokach (Smolska 2005, 2012).

## MATERIAŁ I METODY

Na potrzeby niniejszego opracowania wybrano 2 stoki w Udziejku i Łopuchowie położone w obniżeniu Szeszupy na Pojezierzu Suwalskim (ryc. 1). Są to stoki krótkie, niewysokie, o kształcie wypukło-wklęsłym. Profile podłużne stoków przedstawiono na rycinach 2 i 3.

Stok w Łopuchowie (N:54°15'37,92"; E:22°51'42,38") jest zbudowany z piasków pylastych z domieszką żwiru. Stok w Udziejku (N54°15'25,48"; E: 22°53'07,22") cechuje się zróżnicowaną budową: w wierzchowinowej części występują piaski gliniaste, w środkowej i dolnej glina piaszczysta. Wybrane cechy morfologiczne i litologiczne stoków zestawiono w tabeli 1. Stoki były użytkowane jako grunt orny. W czasie ostatnich 50 lat były tu prowadzone uprawy typowe dla regionu jak zboża ozime i jare, ziemniaki, a w Udziejku także buraki pastewne, kapusta, truskawki oraz sporadycznie koniczyna. Orka była prowadzona zgodnie z nachyleniem stoków. Stok w Łopuchowie po 1999 roku nie był uprawiany, użytkowano go jako naturalne pastwisko.

W 2009 roku pobrano glebę do analizy koncentracji cezu-137 wzdłuż profilu podłużnego wybranych stoków oraz poza ich podstawą: w dnie doliny (Udziejek) i w dnie zagłębienia bezodpływowego (Łopuchowo). Próbki pobierano próbnikiem żłobkowym firmy Ejikelkamp o średnicy 2,5 cm. Próbki pobierano po 7 rdzeni w kilku miejscach wzdłuż profilu podłużnego, uwzględniając zmiany jego kształtu: na wierzchowinie, w części wypukłej, prostej, wklęsłej i u



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszaru badań: 1 – badane stoki, 2 – miasta, 3 – rzeki, 4 – jeziora

**Fig. 1.** Location of study area: 1 – study hillslopes, 2 – cities, 3 – rivers, 4 – lakes

podnóża (ryc. 2 i 3). W celu określenia aktywności cezu-137 z rdzeni wydzielono 20 cm odcinek warstwy ornej i następnie odcinki 5 cm do głębokości 50 cm na stoku oraz do 60 cm u podnóża. W przypadku terasy zalewowej w Udziejku, w jej środkowej części próbki pobrano z warstw co 2,5 cm do głębokości 40 cm. Poszczególne odcinki z rdzeni były wymieszane i analizowano koncentrację radionuklidu dla uśrednionej próbki z danej głębokości z 7 rdzeni. Dodatkowo na płaskich powierzchniach w sąsiedztwie badanych stoków pobrano profile reperowe do oznaczenia całkowitej dostawy Cs-137. W okolicy Łopuchowa profil reperowy został pobrany z terasy kemowej zadarnionej, użytkowanej jako pastwisko. Drugi reper do oceny całkowitej dostawy radionuklidu był zlokalizowany na poziomie zastoiskowym w okolicy Udziejka, na płaskiej powierzchni użytkowanej cały czas jako grunt orny.

Aktywność cezu w próbkach została określona w Laboratorium Analiz Promieniotwórczości Instytutu Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego PAN w Krakowie. Pomiarzy zostały przeprowadzone na spektrometrze półprzewodnikowym typu HPGe.

**Tabela 1.** Wybrane charakterystyki badanych stoków.  
**Table 1.** Chosen characteristics of study hillslopes

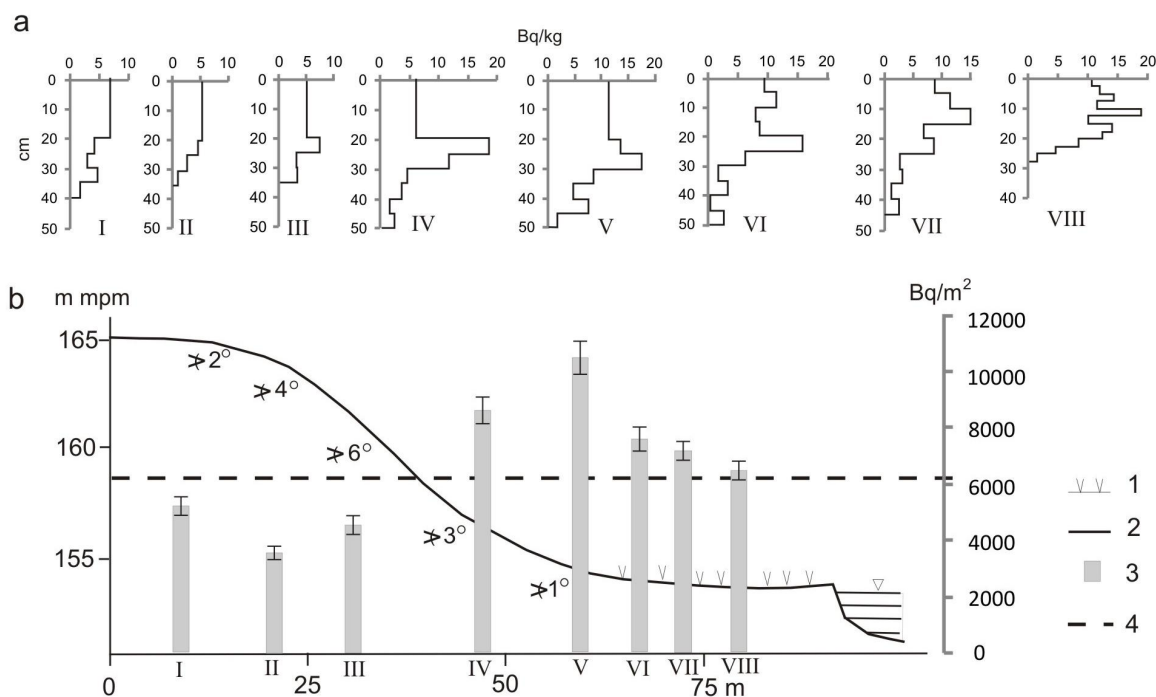
Cecha (Characteristics)	Stok (Hillslope)	
	Udziejek	Łopuchowo
Długość (Depth)	67 m	75 m
Wysokość (Height)	15 m	12 m
Spadek (Inclination)	2-6°	3-11°
Litologia (Lithology)	Glina piaszczysta (sandy loam)	Piasek (Sand)
Ciężar objętościowy gleby (Soil bulk density)	1,16 – 1,35 gm <sup>-3</sup>	1,15 – 1,41 gm <sup>-3</sup>
Zawartość materii organicznej (Organic matter content )	2,3-5,5 %	1,8-3,3 %

Do oceny tempa denudacji zastosowano model proporcjonalny (Walling, Quine 1990) i uproszczony bilansu masy, przyjmując rok 1963 jako rok odniesienia (Zhang i in. 1999) i rok 1986 (Zgłobicki 2002). W przypadku cezu „czarnobyłskiego” obliczając tempo akumulacji uwzględniono głębokość warstwy od powierzchni do największej koncentracji Cs-137 w profilu pionowym. Ciężar objętościowy gleby ustalono na podstawie próbek pobieranych próbnikiem żłobkowym, po ich wysuszeniu w temperaturze 105°C. Zawartość materii organicznej określono metodą strat po prażeniu w temperaturze 550°C.

### WYNIKI ANALIZY KONCENTRACJI CEZU-137

Wybrane do badań stoki w Udziejku i Łopuchowie są typowe dla obszaru młodoglacjalnego (ryc. 2 i 3). Rozkład koncentracji (aktywności) cezu w profilach glebowych generalnie nawiązuje do nachylenia stoków i ich kształtu. Mniejsze wartości koncentracji radionuklidu występują na górnych wypukłych segmentach obu stoków oraz w środkowej ich części o największym nachyleniu, a wyższe na wklęsłej części. Również głębokość, do której występuje Cs-137 jest mniejsza na wypukłym i prostym fragmencie stoku i wyraźnie większa na wklęsłej części i u podstawy stoku. Taki rozkład jest opisywany, jako typowy pionowy rozkład koncentracji na stokach z gruntami ornymi (np. Walling, Quine 1990, Belyaev i in. 2005). W górnej i środkowej części badanych stoków cez występuje do głębokości 30-35 cm, tj. głównie w poziomie ornym i warstwie 10-15 cm pod tym poziomem. Na wklęsłej części stoków cez występuje do głębokości 50-55 cm. Badania W. Zgłobickiego (2002) na Płaskowyżu Nałęczowskim i Świdnickim i G. Poręby (2010) na Płaskowyżu Proboszczowickim również pokazały, że na stokach cez występował w warstwie ornej,

na wierzchowinach w górnych 30 cm profilu glebowego. Natomiast w dolnych partiach stoków i w dnach suchych dolin głębokość deluwiów zawierających cez wynosiła do 140 cm w okolicach Ujazdu (Poręba 2010), a pomiary z 1998 roku na Płaskowyżu Nałęczowskim i Świdnickim wskazały na występowanie cezu do głębokości 50 cm.

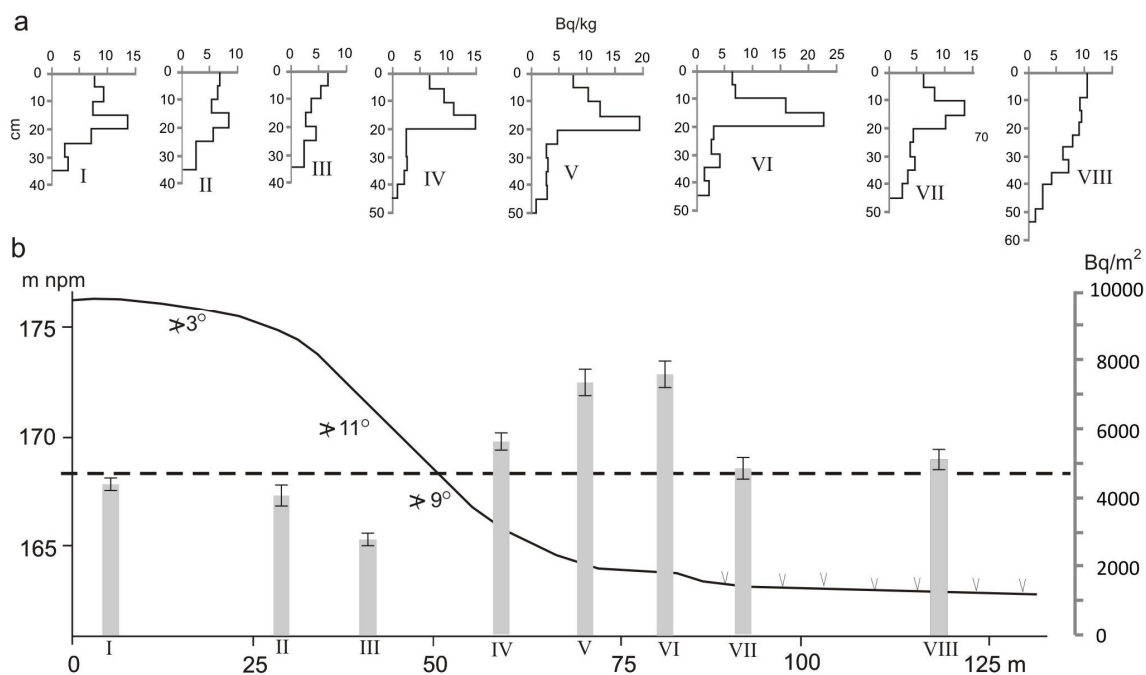


**Ryc. 2.** Aktywność  $^{137}\text{Cs}$  w profilach pionowych gleby na stoku w Udziejku (a) oraz profil podłużny stoku i zróżnicowanie aktywności powierzchniowej cezu wzdłuż profilu podłużnego oraz na dnie doliny (b): 1 – łąka, 2 – grunt orny, 3 – aktywność powierzchniowa  $^{137}\text{Cs}$ , 4 – aktywność powierzchniowa  $^{137}\text{Cs}$  w punkcie reperowym, I-VII - miejsca poboru próbek

**Fig. 2.** Distribution of Cs-137 activity in soil profiles on Udziejek hillslope (a) and long profile of the slope, and distribution of  $^{137}\text{Cs}$  inventory along profile and on the Szeszupa valley floor (b): 1 – meadow, 2 – arable land, 3 – inventory  $^{137}\text{Cs}$ , 4 – value of reference inventory  $^{137}\text{Cs}$ , I-VII – places of sampling

Na stoku w Udziejku zbudowanym z gliny piaszczystej wyraźnie zaznacza się największe wzbogacenie w radionuklid bezpośrednio poniżej poziomu orno-próchnicznego, co jest związane najprawdopodobniej z większą gęstością „podeszwy” płużnej. Notowano tu wartości koncentracji Cs-137 prawie dwukrotnie większe w porównaniu do poziomu ornego (ryc. 2 a). W górnej części stoku, w poziomie ornym koncentracje wyniosły  $5-7 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Na głębokości 35-40 cm zmierzone koncentracje wskazywały na śladowe ilości cezu. Wzbogacenie w radionuklid w warstwie obejmującej tzw. podeszwę płużną najłatwiej zaznacza się na wypukłej części stoku. Na wklęsłej części stoku zawartość Cs-137 w poziomie ornym wyniosła  $10-12 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$  (ryc. 2a, profile pionowe IV i V),

poniżej tego poziomu na głębokości 25-30 cm sięgały do 18 i 21 Bq kg<sup>-1</sup>. Poza granicą pola, na dnie doliny Szeszupy użytkowanej jako łąka, maksymalne wartości koncentracji występowały na głębokości 20-25 cm (16 Bq kg<sup>-1</sup>). Na dnie doliny, 15 m od granicy pola, maksymalna koncentracja wyniosła 18,5 Bq kg<sup>-1</sup> i było to na głębokości 10-12,5 cm (profil VIII, ryc. 2 a).



**Fig. 3.** Aktywność <sup>137</sup>Cs w profilach pionowych gleby na stoku w Łopuchowie (a) oraz profil podłużny stoku i aktywność powierzchniowa cezu wzdłuż profilu podłużnego oraz na dnie zagłębienia (b); objaśnienia jak na ryc. 2

**Fig. 3.** Distribution of Cs-137 activity in soil profiles on Udziejek hillslope (a) and long profile of the slope, and distribution of <sup>137</sup>Cs inventory along profile and on the bottom of depression (b); explanation on fig. 2

Na stoku w Łopuchowie, na którym zaprzestano uprawy po 1999 roku i jest on od tego czasu wykorzystywany jako naturalne pastwisko, nadal utrzymuje się wyższa koncentracja w poziomie ornym (ryc. 3a). Na wierzchowinie i w środkowej, o największym nachyleniu, części stoku zaznacza się także większa ilość cezu w podszewie płuznej. Na wklęsłym segmencie stoku oraz na terasie rolnej maksymalne koncentracje występują w dolnej części poziomu ornego lub tuż pod min, w 2009 roku wynosiły 15-23 Bq kg<sup>-1</sup>. Poniżej terasy rolnej i w zagłębieniu bezodpływowym stwierdzono występowanie radionuklidu do głębokości odpowiednio 40 cm i 55 cm, maksymalna koncentracja wyniosła 13,5 i 10,6 Bq kg<sup>-1</sup> (ryc. 3a, profile pionowe VII i VIII).

Na obu wybranych do badań stokach, szczególnie na ich wklęsłych fragmentach zaznaczało się jedno wyraźne maksimum koncentracji cezu-137 bliżej powierzchni i słabo drugie, zazwyczaj w spągu warstwy zawierającej ten radionu-

klid. Można górną część sedymentacji powiązać z 1986 r. z opadem „czarnobylskim”. Głębiej występującą kulminację można powiązać z 1963 r.

Całkowitą dostawę  $^{137}\text{Cs}$  (*fallout*) na obszarze badań ustalono na podstawie profili reperowych. W sąsiedztwie stoku w Udziejku i Łopuchowie obliczona aktywność powierzchniowa w 2009 roku wyniosła odpowiednio: 6249 i 4800  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ . Wartości te nawiązują do zróżnicowania litologicznego obu stoków: większą zawartością radionuklidu cechuje się stok z glebą gliniasto-piaszczystą. W obu punktach reperowych otrzymano wyższe wartości niż podawane przez A. Stacha (1996) czy R. Strzeleckiego i in. (1993, 1994). Obliczone sumaryczne ładunki radionuklidu wyraźnie nawiązują do profili podłużnych obu stoków (ryc. 2b i 3b). Wskazują na wklęsły segment stoku jako główną strefę depozycji. Zwraca również uwagę strefa podstokowa, gdzie zmienia się użytkowanie z gruntu rolnego na łąkowe. W odległości 4-5 m od granicy pola w Udziejku obliczony sumaryczny ładunek cezu jest niewiele mniejszy niż na wklęsłym segmencie stoku, natomiast w odległości 10-15 m od granicy pola w osadach terasy zanotowano znacznie mniejszy ładunek (ryc. 2b). Podobny rozkład sumarycznego ładunku cezu (aktywności powierzchniowej) występuje w Łopuchowie.

Przedstawiony rozkład przestrzenny sumarycznego ładunku cezu-137 w profilach pionowych gleby i deluwii wskazuje na erozję wierzchowin i wypukłych części pagórków. Erodowana gleba jest redeponowana głównie na wklęsłej części stoku, gdzie następuje jej gromadzenie zarówno w wyniku erozji ornej jak i spłukiwania. Wskazuje to na krótki transport materiału glebowego. Podwyższona powierzchniowa aktywność Cs-137 u podstawy stoku, ale wyraźnie mniejsza niż na wklęsłym fragmencie stoku świadczy o niewielkim odprowadzaniu materiału ze stoku na dno doliny czy zagłębienia w wyniku spłukiwania (ryc. 2b i 3b).

## INTENSYWNOŚĆ DENUDACJI

Do oszacowania tempa procesu denudacji zastosowano uproszczony model bilansu masy (Zhang i in. 1999) i proporcjonalny (Walling, Qiune 1990). Uwzględniono cały sumaryczny ładunek cezu i okres od 1963 r., ponieważ do praktycznych obliczeń można przyjąć wcześniejszą depozycję za mało istotną (Stach, 1996, Zhang i in. 1999). Obliczenia wykonano także uwzględniając w uproszczonym modelu bilansu masy tylko cez „czarnobylski” z 1986 r. Dla górnej części profilu glebowego, obejmującego warstwę o największej koncentracji tego izotopu w profilu pionowym, obliczono aktywność powierzchniową cezu. W punkcie reperowym w Udziejku tak obliczona aktywność powierzchniowa (udział cezu czarnobylskiego) stanowiła 82,1% całkowitej aktywności. Wzdłuż tego stoku, na poszczególnych stanowiskach różnice były większe w porównaniu z wartością reperową, mieściły się w zakresie 76-85% aktywności całkowitej

na danym stanowisku. W Łopuchowie, na drugim z badanych stoków, udział cezu czarnobylskiego w całkowitym (globalnym) określono w punkcie reperowym na 75%. Na poszczególnych stanowiskach pomiarowych wzdłuż profilu podłużnego udział ten był znacznie zróżnicowany: od 62 do 83% całkowitej aktywności. To zróżnicowanie ładunku czarnobylskiego mogło być spowodowane nierównomierną dostawą atmosferyczną, jak również słabszym związaniem radionuklidu z cząstkami gleby przed jego wymieszaniem w warstwie ornej. W Łopuchowie występuje gleba piaszczysta z dodatkiem 10-15% pyłu i iłu. Również wynoszenie gleby wraz ze zbiorami może mieć znaczenie w bilansie denudacyjnym ustalonym na podstawie metody cezowej (Wallbring i in. 2002).

Ze względu na rolnicze użytkowanie stoku i względnie dobre wymieszanie gleby w warstwie ornej do obliczeń zastosowano także model proporcjonalny. Cechuje się prostą formułą i może mieć zastosowanie do szacunkowego wyliczenia wartości erozji i akumulacji, co było weryfikowane (np. Belyaev i in. 2005, Poręba 2010). Wyniki natężenia erozji i depozycji uzyskane za pomocą powyższych modeli zestawiono w tabeli 2. Analiza powyższych wyników wskazuje na ich znaczną rozbieżność. Wyniki uzyskane na podstawie modeli uproszczonego bilansu masy przy odniesieniu całego opadu cezu do 1986 roku są najwyższe a proporcjonalnego najniższe. Na obecnym etapie są to wartości denudacji przybliżone, które wymagają jeszcze zweryfikowania innymi metodami.

Wypukłe górne i proste środkowe segmenty stoków ulegały erozji średnio od 0,5 mm ( $0,59 \text{ kg m}^{-2}$ ) do 3,2 mm ( $3,9 \text{ kg m}^{-2}$ ), natomiast na wklęsłych segmentach stoków obliczona akumulacja wyniosła od 1,1 mm ( $1,5 \text{ kg m}^{-2}$ ) do 4,8 mm ( $5,2 \text{ kg m}^{-2}$ ) średnio rocznie (tab. 2). Szczególnie intensywnie zachodziła akumulacja na terasie rolnej, jaka występuje u podstawy pagórka w Łopuchowie – od 4 mm (model proporcjonalny i bilansu masy uproszczony odniesiony do 1963 r.) do 6,6 mm (bilansu masy uproszczony, odniesiony do cezu czarnobylskiego). Otrzymane na podstawie obliczeń wartości erozji gleby dla górnej i środkowej części stoków oraz tempo depozycji na części wklęsłej dotyczą łącznie obu procesów spłukiwania i denudacji uprawowej.

W podobnym typie rzeźby tempo agradacji w brzeżnej części niewielkich zagłębień szacowane na podstawie zawartości  $^{137}\text{Cs}$  wynosiło 5 mm/rok (Frielinghaus, Vahrson 1998), a nawet 11 mm/rok na Pomorzu Zachodnim (Stach 1991). Na badanym obszarze Pojezierza Suwalskiego jest ono znacznie wolniejsze niż na Pomorzu Zachodnim, bardziej zbliżone do określonego dla zagłębienia położonego w NE Niemczech.

Poza podstawą stoku, gdzie następuje zmiana użytkowania z gruntu ornego na łąkę, obliczone tempo depozycji było znacznie wolniejsze. W Łopuchowie w pobliżu skłonu terasy rolnej wyniosło od 0,1 mm do 0,2 mm w zależności od metody obliczeń. W Udziejku pomiary wykonane na terasie zalewowej Szeszupy w odległości 5, 10 i 15 m od granicy pola wskazują na niewielki eksport materiału ze stoku i największą jego depozycję do 5 m od granicy pola (tab. 2).



**Tabela 2.** Średnia roczna intensywność denudacji w mm i [kg m<sup>-2</sup>] badanych stoków na podstawie wybranych metod z uwzględnieniem erozji (-) i akumulacji**Table 2.** Mean annual intensity of denudation in mm and [kg m<sup>-2</sup>] of study hillslopes based on chosen methods

Stok/ stanowi- sko (Hillslop e/ site)	Metoda zawartości <sup>137</sup> Cs w glebie Method of Cs-137 content in soil Model			Erozja/akumulacja wodna (Erosion/ accumulation)		
	Uproszczony bilansu masy (simplified mass balance)		Proporcjonalny 1963	Rozpro- szona (interrill)	Żłobino- wa (rill)	
	1986	1963				
U d z i e j k	I	-1,63[1,87]	-1,02 [1,37]	-0,93 [1,26]	-0,13	0
	II	-3,16[3,63]	-2,77 [3,74]	-2,18 [2,94]	-0,24	-0,4
	III	-2,64[3,05]	-2,07 [2,81]	-1,73 [2,34]	-0,37	-1,2
	IV	3,8[4,63]	2,46 [3,25]	2,07 [2,73]	0,26	-0,6
	V	4,79[5,20]	4,57 [5,42]	3,74 [4,42]	0,16	-0,8
	VI	2,17[2,36]	1,97 [2,33]	1,21 [1,42]	0,015	0,1
	VII	1,71[1,92]	1,06 [1,29]	0,95 [1,16]	0,003	0,01
	VIII	0,016[0,018]	0,34 [0,40]	0,35 [0,40]	0,01	
Ł o p u c h o w o	I	-0,98 [1,11]	-0,58 [0,72]	-0,47 [0,59]	-0,12	0
	II	-1,75[1,96]	-0,74 [0,90]	-0,84 [1,03]	-0,45	0
	III	-3,18[3,85]	-2,76 [3,90]	-2,63 [3,46]	-0,9	0
	IV	3,03[3,46]	1,51 [2,00]	1,57 [2,08]	0,2	0
	V	4,60[5,26]	3,68 [4,91]	3,67 [4,95]	0,6	0
	VI	6,59[7,51]	4,00 [5,39]	3,83 [4,95]	0,09	0
	VII	0,11[0,12]	0,18 [0,21]	0,10 [0,12]	0,002	0
	VIII	*	*	*	0,001	0

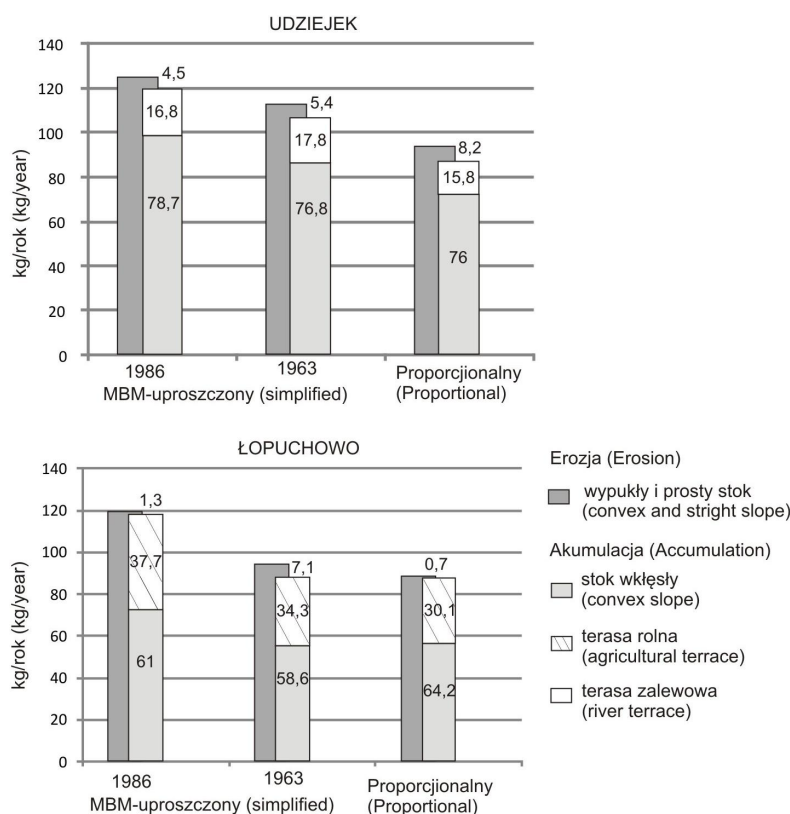
\*nie obliczono tempa sedymentacji dla torfów i namulów w dniu obniżenia bezodpływowego w Łopuchowie

Na stosunkowo słabe powiązanie systemu stokowego i dolinnego w obszarze młodoglacjalnym zwracano uwagę (Smolska 1993, 2012, Mazurek 1998). Na podstawie wcześniejszych pomiarów erozji rozproszonej i żłobinowej na Pojezierzu Suwalskim, także na stokach w Udziejku i Łopuchowie, rozpoznano intensywność procesu (Smolska 2002, 2005, 2012). Podkreślano szczególną rolę wklęsłego segmentu stoku w ograniczaniu erozji oraz trwałego zadarnienia u podstawy stoku, które wymusza depozycję spłukiwanej gleby. Wklęsły stok i strefa depozycji przy dolnej granicy pola nawiązują do wyróżnianych barier: topograficznej i roślinnej (Govers i in. 1996, Walling, He 1998, Beuselink i in.

2000, Święchowicz 2002b). Wskazywano także na proces magazynowania de-  
luwiów u podstawy stoków i ograniczoną dostawę materiału stokowego do koryt  
rzecznych i zagłębień (Froehlich 1982, Walling 1983, Smolska 1993, 2002,  
Święchowicz 2002ab, Smith, Dragovich 2008).

Zastosowane modele pokazują rozkład stref erozji i depozycji w obrębie obu  
stoków, poza tym umożliwiły przybliżone ustalenie bilansu denudacyjnego. Na  
rycinie 4 przedstawiono schematycznie bilans denudacyjny uwzględniając pas  
stoku o szerokości 1 m i długości od wierzchołku do dna doliny lub zagłębie-  
nia. Cechą badanych stoków mimo różnej litologii, jest podobna wielkość erozji.

W wyniku erozji ornej i wodnej z wypukłych i środkowych, prostych frag-  
mentów stoków średnie roczne straty gleby z pasa stoku o szerokości 1 m wyno-  
szą 94-125 kg w Udziejku i 88-120 kg w Łopuchowie w zależności od zastoso-  
wanego modelu. Znaczna część tego materiału ulega re-depozycji na wklęsłej



**Ryc. 4.** Bilans denudacyjny na podstawie aktywności powierzchniowej cezu-137 z za-  
stosowaniem modeli: uproszczonego bilansu masy SimMBM z uwzględnieniem cezu  
Czarnobylskiego (1986 r.) i całkowitego (1963 r.) oraz proporcjonalnego; wartości ero-  
zji/akumulacji obliczono dla pasa stoku o szerokości 1 m i długości od działu wodnego  
oraz redystrybucja erodowanej gleby [%]

**Fig. 4.** Soil redistribution rates estimated from Cs-137 budget and conversion simplified  
mass-balance model (SimMBM) taking into account of Czarnobyl Cs-137 (1986) and of  
total Cs fallout (1963), and proportional model; mean soil losses and deposition were cal-  
culated for 1 m wide of slope and length form water divide and soil redistribution [%]

części badanych stoków, odpowiednio 76-79% i 58-61%. W przypadku Łopuchowa silną barierą w dalszym transporcie jest terasa rolna, na której pozostaje 33-38% erodowanej gleby. Z bilansu wynika, że z pagórka w Łopuchowie na dno zagłębienia bezodpływowego może dostawać się od 1,3 do 7,1% erodowanej gleby. W Udziejku, ze stoku na terasę zalewową Szeszupy docierać może 16-18% całkowitej masy erodowanej gleby, przy czym ponad połowa tej ilości jest deponowana w pasie do 5 m od granicy pola. Taki rozkład redepozycji (strefa podstokowa i wąska strefa łąki przy granicy pola) wskazuje na duże znaczenie barier: topograficznej i roślinnej w ograniczeniu transferu materiału pomiędzy systemem stokowym a fluwialnym w krajobrazie młodoglacjalnym.

Porównując powyższe składowe bilansu denudacyjnego z erozją i akumulacją w wyniku spłukiwania (Smolska 2005, 2012) (tab. 2), wyraźnie widać decydującą rolę erozji ornej we współczesnym przekształcaniu stoków w krajobrazie młodoglacjalnym. Udział spłukiwania w erozji górnych wierzchwinowych partii pagórków sięga zaledwie do 1%, a w erozji stoków o największym nachyleniu kilku procent. Natomiast na wklęsłej części stoku, maksymalnie do 25% masy zgromadzonych deluwiów może pochodzić z akumulacji w wyniku spłukiwania.

Zestawienie bilansowe (ryc. 4) informuje też, jaka ilość erodowanej ze stoku gleby została całkowicie stracona. Jest to najprawdopodobniej dostawa do transportu fluwialnego, ale także erozja wietrzna, czy wynoszenie wraz ze zbiorami.

## PODSUMOWANIE

Pomiary koncentracji cezu-137 w glebie przeprowadzone wzdłuż profili podłużnych dwóch stoków na Pojezierzu Suwalskim użytkowanych rolniczo potwierdziły ogólnie znany schemat przekształcania krótkich stoków typowych dla rzeźby młodoglacjalnej.

Zastosowanie prostych modeli (uproszczony bilansu masy i proporcjonalny) do wyznaczania wielkości erozji i sedimentacji pozwoliło na przybliżone ustalenie bilansu denudacyjnego i lepszego poznania funkcjonowania stoków w krajobrazie młodoglacjalnym. Uzyskane wyniki i ich zróżnicowanie jest zgodne z analizą porównawczą jaką przedstawił G. Poręba (2010). Na obecnym etapie można potwierdzić przydatność modelu proporcjonalnego do wstępnego rozpoznania intensywności procesów akumulacyjnych na stokach użytkowanych rolniczo w rzeźbie młodoglacjalnej.

Najsilniejszej erozji ulegały górne wypukłe oraz środkowe ich segmenty. Erozja wodna i uprawowa łącznie wynosiła od  $0,6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (0,5mm) do  $3,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (3 mm) średnio rocznie, w tym erozja wodna stanowiła od  $0,005 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (0,004 mm) do  $0,3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  (0,26 mm).

Dolne wklęsłe segmenty stoków stanowiły główną strefę depozycji. Średnie roczne tempo gromadzenia deluwiów oszacowano na 1,5-3,8 mm na początku wklęsłej części stoku do 6,6 mm na terasie rolnej. Zawartość cezu-137 w osadzie u podstawy stoku (na terasie zalewowej Szeszupy) wskazuje na depozycję około 1-1,2 mm średnio rocznie. W przypadku krótkich stoków o niedużej deniwelacji depozycja ta charakterystyczna jest jedynie dla wąskiej strefy w pobliżu stoku, gdzie zmienia się użytkowanie z gruntów ornyc na łąkę. Silną barierę w ograniczeniu przestrzennym transportu materiału ze stoku (do ok.10 m, a szczególnie na odcinku pierwszych 5 m) odgrywa roślinność trawiasta.

## Literatura

- Belyaev V.R., Walbrink V.N., Golosov V., Murray A.S., Sidorchuk A.Yu., 2005, A comparison of methods for evaluating soil redistribution in the severely eroded Stavropol region, southern European Russia, *Geomorphology* 65, 173-193.
- Beuselinck L., Govers G., Steegen A., Hairisime P.B., Poesen J., 1999, Evaluation of the simple settling theory for predicting sediment deposition by overland flow, *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 41-49.
- Beuselinck L., Steegen A., Govers G., Nachtergaele J., Takken I., Poesen J., 2000, Characteristics of sediment deposits formed by intense rainfall events in small catchments in the Belgian Loam Belt, *Geomorphology* 32, 69-82.
- Chełnicki W., Święchowicz J., Mietelski W., Klimek M., 1995, Naturalne czynniki przemieszczania izotopu Cs-137 w glebie na przykładzie stoku leśnego położonego na Pogórzu Karpackim, *Zeszyty Naukowe UJ MCLXII, Prace Geogr.* 100, 125-141.
- Frielinghaus M., Vahrson W.-G., 1998, Soil translocation by water erosion from agricultural Copland into wet depressions (morainic kettle holes), *Soil and Tillage Research* 46, 23-30.
- Froehlich W., 1982, Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin do koryta w górskiej zlewni fliszowej, *Prace Geogr. IGiPZ PAN* 143.
- Froehlich W., 1997, Natężenie erozji gleb na stokach beskidzkich w świetle badań metodami klasycznymi i radioizotopowymi, *Zeszyty Naukowe Akadem. Roln. w Krakowie*, 315, 35-46.
- Froehlich W., Walling D.E., 1991, Badania procesów erozji i sedymentacji przy użyciu izotopu cezu 137, *Conference Papers IGiPZ PAN* 14, Sesja Naukowa IGiPZ 1991, 23-34.
- Froehlich W., Walling D.E., 1992, The use of fallout radionuclides in investigations of erosion and sediment delivery in the Polish Flysh Carpathians, [w:] *Erosion, debris flows and environment in mountains regions (proceedings of the Chengdu Symposium, July 1992, IAHS Publ. 2009, 61-76.*
- Govers G., Quine T.A., Desmet P.J.J., Walling D.E., 1996, The relative contribution of soil tillage and overland flow erosion to soil erosion redistribution on agricultural land, *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 929-946.
- Kocmit A., Podlasiński M., Roy M., Tomaszewicz T., Chudecka J., 2006., Water erosion in the catchment basin of the Jeleni Brok, *Journal of Water and Land Development* 10, 121-131.
- Mazurek M., 1998, Dostawa materiału klastycznego do transport fluwialnego na obszarach młodoglacjalnych (zlewnia Kłudy na Pomorzu Zachodnim), *Bad. Fizjogr. nad Polską Zach. Seria A*, 49, 127-146

- Paluszek J., 2010, Zmiany pokrywy glebowej pod wpływem erozji, *Prace i Studia Geogr.* 45, 279-294.
- Poręba G., 2010, Zastosowanie izotopu  $^{137}\text{Cs}$  do badania erozji gleby w obszarach lessowych użytkowanych rolniczo, *Prace i St. Geogr.* 45, 125-142.
- Poręba G., Bluszcz A., 2008, Influence of the parameters of models used to calculate soil erosion based on  $^{137}\text{Cs}$  tracer, *Geochronometria* 32, 21-27.
- Ritche J.C., McHenry J.R., 1990, Application of radioactive fallout cesium for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review, *J. Environ. Qual.* 19, 215-233.
- Smith H.G., Dragovich D., 2008, Sediment budget analysis of slope-channel coupling and in-channel sediment storage in an upland catchment, southeastern Australia, *Geomorphology* 101, 643-654.
- Smolska E., 1993, Rola spłukiwania w dostawie materiału do transportu fluwialnego w obszarze młodoglacjalnym (na przykładzie górnej Szeszupy). Wstępne wyniki badań, [w:] Kostrzewski, A. (red.), *Geoekosystem obszarów nizinnych*, Zesz. Nauk. PAN „Człowiek i środowisko” 6, 159-165.
- Smolska E., 2002, The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland, *Landform Analysis*, vol. 3, 25-33
- Smolska E., 2005, Znaczenie spłukiwania w modelowaniu stoków młodo glacialnych (na przykładzie Pojezierza Suwalskiego), Wyd. WGSR UW, Warszawa, 146s.
- Smolska E., 2010, Soil erosion and sediment supply to a fluvial system in the last-glacial area on the example of the upper Szeszupa river catchment (NE Poland), *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 56, issue 3, 37-52, DOI:10.1127/0372-8854/2012/S-0010
- Stach A., 1991, Zastosowanie cezu-137 do datowania współczesnych osadów stokowych – podstawy metody i wstępne wyniki badań z Pojezierza Drawskiego, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych*, Wyd. UAM Geografia 50, 551-561
- Stach A., 1996, Możliwości i ograniczenia zastosowania cezu-137 do badania erozji gleb na obszarze Polski, [w:] A. Józefaciuk (red.), *Ochrona agroekosystemów zagrożonych erozją*, *Prace Naukowe IUNG* cz.2. K(11/1). Puławy, 203-226.
- Strzelecki R., Szewczyk J., Wołkowicz S., Jędrzejczak Z., 1992, Badania promieniowania gamma nma obszarze Polski: efekt Czarnobyli, skażenia przemysłowe, promieniotwórczość naturalna, *Przegląd Geologiczny* 6, 57-71.
- Strzelecki R., Wołkowicz S., Lewandowski P., 1993, Wyniki badań gamma-spektrometrycznych na obszarze województwa suwalskiego, *Przegląd Geologiczny*, 41 (8), 585-592.
- Świąchłowicz J., 2002a, Współdziałanie procesów stokowych i fluwialnych w odprowadzaniu materiału rozpuszczonego i zawiesiny ze zlewni pogórskiej, *Przemiany środowiska na Pogórzu Karpackim* 3, 140s.
- Świąchłowicz J., 2002b, Linkage of slope wash and sediment and solute export from a foothill catchment in the Carpathian foothills of south Poland, *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1389-1413.
- Wallbring P.J., Roddy B.P., Olley J.M., 2002, A tracer budget quantifying soil redistribution on hillslopes after forest harvestiong, *Catena* 47, 179-201.
- Walling D.E., 1983, The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology* 65, 209-237.
- Walling D.E., He Q., 1998, Use of fallout  $^{137}\text{Cs}$  measurements for validating and calibrating soil erosion and sediment delivery models, [w:] *Modelling soil erosion, sediment transport and closely related hydrological processes* (Proceeding of Symposium held in Viena, July 1998), *IAHS Publ.* 249, 267-278.

- 
- Walling D.E., Quine T.A., 1990, Calibration of cesium-137 measurements to provide Quantitative erosion rate data, *Land Degradation and Rehabilitation* 2, 161-175.
- Walling D.E., Russel M.A., Hodgkinson R.A., Zhang Y., 2002, Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchment in the UK, *Catena* 47, 323-353.
- Zgłobicki W., 2002, Dynamika współczesnych procesów denudacyjnych w północno-zachodniej części Wyżyny Lubelskiej, Wyd. UMCS, Lublin, 159s.
- Ziarnicki S., Mazur Z., 1956, Przebieg zbocza jako odzwierciedlenie erozji gleb, *Ann. UMCS*, 10,
- Zang X., Walling D.E. He Q., 1999, Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using cesium-137 measurements, *Hydrologic Science* 44 (1), 33-46.