

**Wojciech Zglobicki**

Zakład Geologii i Ochrony Litosfery  
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie  
e-mail: zglobek@hektor.umcs.lublin.pl

**METODY GEOCHEMICZNE I RADIOCHEMICZNE  
W BADANIACH DYNAMIKI PROCESÓW STOKOWYCH**

**Geochemical and radiochemical methods  
in studies on hillslope processes dynamics**

**Abstract:** Review of geochemical and radiochemical methods suitable in studies on hillslope processes were presented in the paper. Chemical parameters on elements and radioisotopes most frequently used in geomorphologic research –  $^{137}\text{Cs}$ , heavy metals and phosphorus were characterized. General assumptions of methods were described, as well as examples of results obtained by means of use of indicators and markers mentioned above. Limitations of geochemical and radiochemical studies were also presented. Attention was paid to the small amount of papers related to the discussed issue.

**Słowa kluczowe:**  $^{137}\text{Cs}$ , fosfor, geochemia, metale ciężkie, procesy stokowe, antropopresja  
**Key words:**  $^{137}\text{Cs}$ , geochemistry, heavy metals, hillslope processes, human impact, phosphorus

**WPROWADZENIE**

Współczesna geomorfologia dynamiczna coraz częściej korzysta z dorobku innych dziedzin wiedzy. Uzyskiwanie nowych danych możliwe jest czasem wyłącznie dzięki badaniom interdyscyplinarnym, geomorfolodzy sięgają w związku z tym po metody geochemiczne. Podstawowym celem ich zastosowania jest uzyskiwanie danych ilościowych dotyczących tempa procesów rzeźbotwórczych. Zapis trwającej przez setki i tysiące lat działalności człowieka znajduje swoje odzwierciedlenie w osadach. Analiza geochemii osadów, swoistych *geo-archiwów*, poprzez korelację podwyższonych zawartości wskaźników z umiejscowionymi w czasie fazami antropopresji pozwala na dość precyzyjne „datowanie” wieku osadów. Badanie przestrzennego zróżnicowania izotopów

umożliwia studia nad procesami prowadzącymi do ich przemieszczania. Metody geochemiczne i radiochemiczne dostarczają danych dotyczących wielkości agradacji czy degradacji w krótkiej i średniej skali czasu. Związane jest to z faktem, iż intensywna geochemiczna antropopresja jest na większości obszarów czytelna dla ostatnich 100-200 lat. Oceny w dłuższej skali czasowej, na przykład tempa sedymentacji, są wykonywane znacznie rzadziej i dotyczą tylko części metod (np. wykorzystania metali ciężkich). Możliwe jest to w rejonach intensywnej presji człowieka w pradziejach (ośrodki osadnicze, przemysłowe).

W badaniach geomorfologicznych wykorzystywane są izotopy i związki chemiczne, które nie występują w przyrodzie lub częściej substancje naturalne, których koncentracja (w wyniku działalności człowieka) wzrosła w bardzo wyraźny sposób w porównaniu do warunków naturalnych. Muszą one spełniać określone warunki pozwalające na powiązanie ich obiegu w zlewniach z dynamiką procesów rzeźbotwórczych. Do pierwiastków i izotopów stosowanych w badaniach geomorfologicznych należą:  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^7\text{Be}$ , metale ciężkie, fosfor (m. in. Wise 1980, Ritchie, Mc Henry 1990, Clemens, Stahr 1994, Foster red. 2000, Renberg i in. 2001).

Metody geochemiczne są w geomorfologii wykorzystywane przede wszystkim do badań procesów i osadów aluwialnych. Systemy stokowe (deluwialne) charakteryzują się wyraźnie większą epizodycznością procesów erozji i depozycji, co bardzo utrudnia użycie niektórych metod np.  $^{210}\text{Pb}$ . Cechują się one mniejszą koncentracją markerów takich jak na przykład metale ciężkie (Zgłobicki 2008).

Omawiane metody poprzez wykorzystanie antropogenicznych markerów stratygraficznych ( $^{137}\text{Cs}$ , metale ciężkie, fosfor) pozwalają przede wszystkim na ocenę tempa sedymentacji. Dynamika procesów na stokach czy w zlewniach określana jest więc w sposób pośredni – poprzez ocenę szybkości redepozycji uruchomionego materiału. Bezpośrednie wyznaczenie stref degradacji i akumulacji materiału w systemach stokowych czy określenie ilościowego natężenia procesów stokowych (denudacyjnych) możliwe jest natomiast przy wykorzystaniu  $^{137}\text{Cs}$ .

W pracy dokonano przeglądu wybranych metod radiochemicznych i geochemicznych, które mogą być wykorzystane do oceny tempa procesów stokowych zachodzących na stokach dojrzałych, przede wszystkim w warunkach rolniczej działalności człowieka. Procesami tymi są przede wszystkim splukiwanie, erozja wąwozowa i erozja agrotechniczna. Skupiono się na opisie możliwości i ograniczeń jakie stwarza zastosowanie:  $^{137}\text{Cs}$ , metali ciężkich i fosforu. Są to wskaźniki stosowane najczęściej w badaniach geomorfologicznych, ponieważ mają dobre poznane warunki obiegu w środowisku oraz stosunkowo łatwą metodykę oznaczania zawartości w osadach. Ze względu na obszerność zagadnień związanych z metodami geochemicznymi i radiochemicznymi niniejszą pracę traktować należy jako zarysowanie problemu.

## CHARAKTERYSTYKA ZNACZNIKÓW

Każdy izotop i pierwiastek występujący w środowisku w stężeniu większym w stosunku do jego występowania w litosferze stanowi potencjalne skażenie gleby czy osadu i potencjalny marker stratygraficzny. Do najbardziej rozpoznanych zanieczyszczeń należą: związki organiczne (substancje ropopochodne, pestycydy), metale ciężkie (ołów, rtęć) i azotany (Kabata-Pendias, Pendias 1999). Nie wszystkie z nich spełniają warunki dobrych geochemicznych wskaźników antropopresji w osadach, przede wszystkim, jeśli chodzi o aspekt czasowy. A. Stach (1996) wymienia szereg cech, które powinien spełniać znacznik stosowany w badaniach geomorfologicznych:

- a) bezpośredni i jasny związek z działalnością człowieka;
- b) stosunkowo łatwa wykrywalność;
- c) dobrze poznane warunki krążenia w środowisku;
- d) komponent związany z działalnością człowieka wyraźnie przekraczający tło geochemiczne.

Powyższe warunki muszą również spełniać pierwiastki i substancje, które są wykorzystywane w badaniach nad dynamiką procesów stokowych. Z punktu widzenia badania osadów szczególnie istotna jest również bardzo mała mobilność znacznika – po związaniu przez kompleks sorpcyjny jego naturalna migracja pionowa i pozioma powinna być znikoma. Jest to podstawowy warunek wykorzystania wskaźników jako precyzyjnych markerów stratygraficznych.

$^{137}\text{Cs}$  jest sztucznym radionuklidem, którego pojawienie się w środowisku jest związane z wybuchami jądrowymi lub emisjami z reaktorów atomowych (Wise 1980). Po raz pierwszy został wprowadzony do atmosfery ziemskiej podczas prób atomowych w końcu 1952 roku. Od 1954 roku zaczęto stwierdzać jego występowanie w środowisku na całym świecie. Lokalnie, duże znaczenie w dostawie cezu odgrywają awarie w elektrowniach jądrowych (w Polsce awaria w Czarnobylu w 1986 roku). Izotop emituje silne promieniowanie gamma, pozwala na stosunkowo proste i dokładne pomiary jego koncentracji.  $^{137}\text{Cs}$  jest silnie wiązany przez kompleks sorpcyjny gleby (głównie przez frakcję koloidalną oraz materię organiczną) i praktycznie nie podlega wymianie (Tamura, Jacobs 1960). Adsorbcja cezu przez glebę jest bardzo szybka, na co wskazuje gwałtowny spadek jego koncentracji wraz z głębokością, w niezaburzonych profilach (Froehlich, Walling 1992, Higgitt i in. 1992, Chełmicki i in. 1995). Przeprowadzane eksperymenty wskazują ponadto na jego ograniczoną mobilność w wyniku procesów chemicznych (Lomenick, Tamura 1965). W związku z silnym wiązaniem cezu przez kompleks sorpcyjny, jego możliwości przemieszczania w dół profilu glebowego są ograniczone (Campbell i in. 1982). Wszystko to sprawia, że głównymi czynnikami powodującymi poziomą redystrybucję cezu w systemach stokowych są fizyczne procesy transportu materiału.

Źródłem fosforu w glebie są odchody ludzi i zwierząt, resztki żywności i inne

odpady, a jednocześnie fosforowe nawozy mineralne. Aktywność osadnicza człowieka prowadzi do wzbogacenia w fosfor gleb wokół skupisk ludzkich a następnie gleb naturalnych ekosystemów. W wyniku mineralizacji szczątków organicznych powstają nieruchliwe fosforany, a podwyższone zawartości tego pierwiastka w glebie mogą służyć do ustalania miejsc historycznego osadnictwa (Bednarek i in. 2003, Schlezinger, Howes 2000). Z kolei analiza pionowej koncentracji fosforu w profilu umożliwia odtwarzanie i datowanie faz antropopresji (Lambert 1998). Ważną cechą fosforu jest jego stabilność w glebie, praktycznie w całym zakresie pH.

Działalność człowieka prowadzi do wzrostu koncentracji metali ciężkich w środowisku. Zakres wykorzystania metali ciężkich jako wskaźników antropopresji jest bardzo szeroki. Źródłem skażenia gleb i osadów w metale ciężkie są: przemysłowa działalność człowieka (opad pyłów atmosferycznych, spływ ścieków), transport (spaliny) oraz rolnictwo (stosowanie nawozów mineralnych i środków ochrony roślin). Wśród metali ciężkich jako wskaźniki antropopresji wykorzystywane są najczęściej: kadm, ołów, miedź i cynk. Wpływ człowieka na ich dostawę do środowiska jest bowiem współcześnie wyjątkowo czytelny. Sumaryczny udział komponentu antropogenicznego w dostawie pierwiastków do Bałtyku wynosi odpowiednio: Cd (93%), Cu (82%), Pb (94%), Zn (81%) (za Kabata-Pendias, Pendias 1999, wg Matschullat 1997)

Miedź należy do pierwiastków występujących powszechnie w skorupie ziemskiej – średnia zawartość w skałach wynosi od 5 do 100 ppm. W glebach wiązana jest przez substancję organiczną oraz minerały ilaste, a wytracając się tworzy mało mobilne formy. W związku z tym mała część miedzi występuje w glebach w formach łatwo rozpuszczalnej i wymiennej. Miedź jest silnie wiązana w powierzchniowych poziomach gleb i jej przemieszczanie w głąb profilu jest znikome (Kabata-Pendias, Pendias 1999). Wpływy antropogeniczne przejawiają się poprzez znaczące emisje przemysłowe w rejonach wydobywania i przetwarzania tego pierwiastka. Koncentracje miedzi ulegają także podwyższeniu na skutek działalności rolniczej i ogrodniczej (nawozy mineralne i organiczne, środki ochrony roślin, odpady komunalne).

Cynk jest pierwiastkiem występującym powszechnie w skorupie ziemskiej – najczęściej w ilościach 10-120 ppm. Pierwiastek ten charakteryzuje się dużą mobilnością w glebach. Cynk tworzy dość trwałe wiązania z substancją organiczną, jego akumulacja następuje w powierzchniowych poziomach gleb. Człowiek powoduje wprowadzenie do gleb cynku przede wszystkim na skutek aktywności górniczo-hutniczej oraz w mniejszym stopniu działalności rolniczej i ogrodniczej. Użytkowanie rolnicze powoduje wzrost zawartości w tempie około 1,5 ppm na 10 lat (Kabata-Pendias, Pendias 1999).

Kadm charakteryzuje się niskimi koncentracjami w skałach – 0,03-0,22 ppm. Pierwiastek ten jest wiązany przez minerały ilaste, wodorotlenki żelaza oraz substancję organiczną. Kadm jest bardzo ruchliwy w glebach o pH 4,5-5,5. W przy-

padku kadmu rola emisji antropogenicznych jest bardzo istotna – jest to obecnie metal najbardziej wzbogacony w glebach w porównaniu do wartości klarkowych (Kabata-Pendias, Pendias 1999). Kadm jest również wprowadzany do gleb uprawnych w wyniku stosowania nawozów fosforowych i ścieków komunalnych, proces gromadzenia tego pierwiastka w glebach obszarów nie objętych wpływem emisji przemysłowych jest jednak powolny.

Naturalna zawartość ołowiu w skałach zależy od ich rodzaju i wynosi od 0,1-10 ppm (kwaśne skały magmowe, skały ilaste) do 10-40 ppm (zasadowe skały magmowe, utwory węglanowe). Pierwiastek ten jest dość szybko wiązany przez składniki mineralne i organiczne. Ołów charakteryzuje się bardzo powolną migracją w głąb profilu glebowego. Występowanie ołowiu w powierzchniowych warstwach gleby jest bardzo silnie związane z wpływami antropogenicznymi o charakterze globalnego zanieczyszczenia. Największa emisja pochodzi z hutnictwa i odlewnictwa metali kolorowych – najsilniejsze skażenie występuje w rejonach bezpośredniego wpływu źródeł zanieczyszczeń. Na obszarach rolniczych zwiększenie koncentracji ołowiu w glebach może być również rezultatem wykorzystania osadów ścieków komunalnych i przemysłowych do użyźniania gleb (Kabata-Pendias, Pendias 1999).

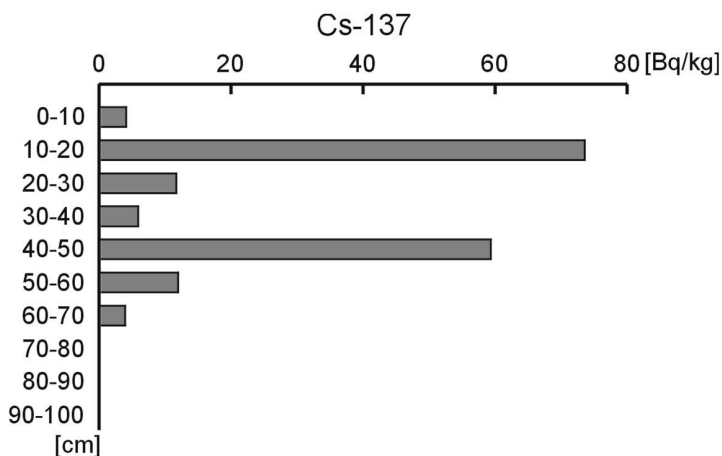
## **PIERWIASTKI I IZOTOPY JAKO MARKERY STRATYGRAFICZNE**

Koncentracja zanieczyszczeń w osadach jest wypadkową emisji lub dostawy do środowiska o charakterze globalnym jak i regionalnym czy lokalnym, a emisje te mogą mieć charakter ciągły lub epizodyczny. Wszystko to sprawia, że dokładność „datowań” z wykorzystaniem wskaźników geochemicznych jest zróżnicowana. Nie mówimy tu oczywiście o określaniu wieku bezwzględnego osadów, a jedynie korelowaniu ich cech geochemicznych z okresami podwyższonej, umiejscowionej w czasie, dostawy antropogenicznej. Dla długotrwałych emisji globalnych – wprowadzanie do środowiska metali w wyniku spalania kopaliny różnego rodzaju, emisji przemysłowych dalekiego zasięgu, czy powszechne stosowanie nawozów mineralnych, możliwa do osiągnięcia dokładność ma rząd dziesiątków czy setek lat. Z kolei w przypadku wyraźnej epizodycznej emisji, jak ma to miejsce w przypadku cezju-137 czy dostawy pierwiastka ze źródła wybitnie lokalnego (pojedynczy zakład przemysłowy) precyzja datowania może sięgać kilku lat. Wpływa na nią szereg wielu zmiennych – ilość i wielkość źródeł emisji zanieczyszczeń, rozmieszczenie przestrzenne w zlewni, charakter osadów itp. Jak zostało to wcześniej zasygnalizowane datowanie osadów wypełniających dna zagłębień bezodpływowych czy suchych dolin pozwala na pośrednią ocenę dynamiki procesów stokowych zachodzących w ich zlewniach. W przypadku wykonania analiz wielu profili i obliczenia ilości materiału osadzonego w określonej jednostce czasu możliwe jest obliczenie intensywności procesów erozyjnych w zlewni w przeliczeniu na jednostkę powierzchni.

W Polsce na podstawie szczegółowych koncentracji  $^{137}\text{Cs}$  w niezaburzonych profilach możliwe jest szacowanie tempa sedymentacji w nawiązaniu do następujących etapów jego dostawy do środowiska: a) 1954 - pojawienie się cezu w środowisku, b) 1962-64 (największa liczba próbných wybuchów jądrowych), c) 1986 - awaria w Czarnobylu (Stach 1991). A zatem najgłębsza warstwa, w której stwierdza się występowanie  $^{137}\text{Cs}$  odpowiada mniej więcej połowie lat 50 XX wieku, a wyraźne wzrosty koncentracji są związane z I połową lat 60 XX w. oraz z awarią w Czarnobylu w roku 1986.  $^{137}\text{Cs}$  jest niewątpliwie bardzo dobrym markerem ze względu na wyłącznie antropogeniczne pochodzenie oraz epizodyczny charakter dostawy do środowiska. Z tego powodu metoda jest powszechnie stosowana do oceny tempa sedymentacji aluwów i osadów jeziornych (Froehlich, Walling 1991, Walling, He 1997). oraz osadów stokowych (Higgitt i in. 1992, Stach 1991, Zgłobicki 2008, Zgłobicki i in. 2008).

A. Stach (1991) wykonał takie badania w zlewni niewielkiego zagłębienia bezodpływowego. Na podstawie wyników oznaczeń ładunku cezu oraz kartowania miąższości akumulacyjnego poziomu glebowego wyróżnił on cztery podstrefy: wierzchowin, stoków, dolnych części stoków i den zagłębień. Obliczone na podstawie zróżnicowania koncentracji cezu-137 w profilu, tempo sedymentacji w dnie zagłębienia określił on na 1,1 cm/rok (od roku 1954) a średni wskaźnik denudacji mechanicznej dla zlewni w holocenie 11,4 mm/1000 lat.

Tempo sedymentacji w dnach wąwozów, na stożkach napływowych oraz u podnóży stoków badane było na obszarze Wyżyny Lubelskiej (Zgłobicki 2002, Zgłobicki 2008, Zgłobicki i in. 2008). Przykład zróżnicowania koncentracji  $^{137}\text{Cs}$  w profilu pionowym osadów budujących stożek napływowy suchej doliny przedstawia rysunek 1. Wyraźny wzrost koncentracji na głębokości 40-50



**Rys. 1.** Pionowe zróżnicowanie koncentracji  $^{137}\text{Cs}$  w osadach stożka napływowego suchej doliny (Zgłobicki 2008)

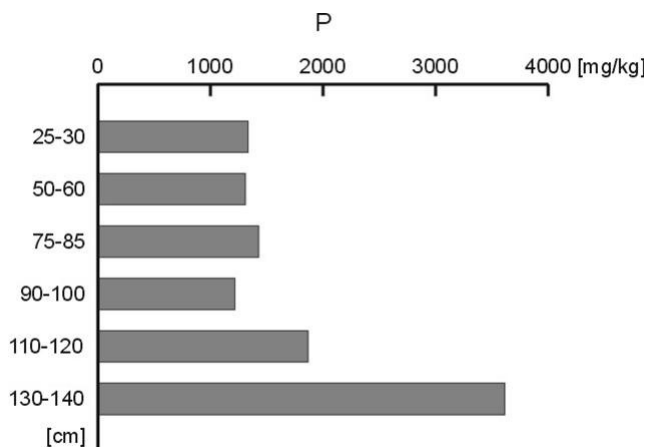
**Fig. 1.** Vertical distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in sediments of dry valley fan (Zgłobicki 2008)

cm jest związany z pierwszą połową lat 60 XX w a drugi (10-20 cm) z wybuchem reaktora w Czarnobylu w roku 1986. W opisywanym profilu średnie tempo redepozycji materiału wynosiło w ciągu ostatnich 50 lat około 1 cm rok<sup>-1</sup>.

Fosfor jako stabilny w środowisku glebowym najczęściej pozostaje w powierzchniowej warstwie gleby, do której został wprowadzony. Jest dobrym wskaźnikiem zmian (przekształceń), jakie człowiek na przestrzeni dziejów wywierał na całe środowisko przyrodnicze. W efekcie rozwoju współczesnego rolnictwa, i idącego za tym wzrostu stosowania nawozów sztucznych, gleby użytków rolnych stały się miejscem kumulacji tego pierwiastka (Zgłobicki, Ziółek 2005). W związku z tym w przypadku fosforu datowaniami objęte mogą być przede wszystkim osady stokowe na obszarze gruntów ornych. Erozja gleb bogatych w fosfor a następnie ich redepozycja powoduje wzbogacenie osadów w ten pierwiastek. Ocena tempa sedymentacji może obejmować różny przedział czasu. Przykładowo K. Gillijns i in. (2005) przyjmując założenie, że intensywne wykorzystanie nawozów fosforowych w Belgii rozpoczęło się po II wojnie światowej, dokonali oceny tempa współczesnej akumulacji materiału w dnie użytkowanego rolniczo zagłębienia bezodpływowego.

W sytuacji, gdy stanowisko archeologiczne (źródło fosforu) położone jest na wierzcholinie lub stoku – w miejscach podlegających erozji – warstwa gleby bogata w fosfor jest przemieszczana w dół formy i redeponowana u jego podnóża. Zapisem erozji w obrębie stanowiska jest wzrost koncentracji fosforu odnotowany w profilach położonych w dolnych częściach stoku. Sytuacja taka występuje w pobliżu osady neolitycznej w Karmanowicach, Wyżyna Lubelska (Zgłobicki 2008). Bardzo wyraźny zapis geochemiczny (prehistorycznej aktywności osadniczej) w postaci kilkukrotnie podwyższonych koncentracji fosforu stwierdzono w obrębie kopalnych poziomów próchnicznych (rys. 2). Na podstawie głębokości występowania warstw o wyraźnie wyższych zawartościach fosforu ogólnego, wiążanego z prehistorycznym osadnictwem, dokonano oceny tempa wypełniania dolin i zagłębień bezodpływowych osadami stokowymi (tab. 1). Wynosi ono 0,2-0,3 mm rok<sup>-1</sup> w ciągu ostatnich 5-10 tysięcy lat (Zgłobicki 2008). Należy przy tym podkreślić, że jak do tej pory zastosowanie fosforu do oceny tempa współczesnej sedymentacji było najmniejsze spośród wszystkich analizowanych w pracy wskaźników geochemicznych.

Działalność człowieka, przede wszystkim przemysłowa, prowadzi do wzrostu koncentracji metali ciężkich w środowisku, m. in. Cd, Cu, Pb, Zn. W osadach rzecznych i jeziornych zapisana jest historia dostawy metali ciężkich dostających się do zlewni z różnych źródeł (Klimek 1996, Szwarczewski 1998, Ciszewski 2002, Ciszewski, Malik 2004). Zakres czasowy prowadzonych analiz, w zależności od przeszłości gospodarczej badanego obszaru, może wynosić od kilkudziesięciu do kilkuset lat. Najczęściej tego typu badania wykonywane są dla okresu ostatnich 50 do 100 lat, ze względu na wyraźnie większą i łatwą do wydzielenia dostawę antropogeniczną. Korelacja zmian koncentracji metali cięż-



**Rys. 2.** Pionowe zróżnicowanie koncentracji fosforu całkowitego w dnie zagłębienia bezodpływowego, okolice Karmanowic, Wyżyna Lubelska (Zgłobicki 2008)

**Fig. 2.** Vertical distribution of total phosphorus content in the bottom of close depression, Vicinity of Karmanowice, Lublin Upland (Zgłobicki 2008)

**Tabela 1.** Tempo sedymentacji na podstawie pionowego zróżnicowania zawartości fosforu w osadach, okolice Karmanowic, Wyżyna Lubelska (Zgłobicki 2008)

**Table 1.** Rates of sedimentation on the basis of vertical distribution of phosphorus in sediments, vicinity of Karmanowice, Lublin Upland (Zgłobicki 2008)

Profil Profile	Głębokość [cm] Depth [cm]	Kultura Culture	Przedział Czasowy [lata] Period [years]	Tempo wypełniania [mm rok <sup>-1</sup> ] Rate of sedimentation [mm yr <sup>-1</sup> ]
Kl-4	300-310	Kultura magdaleńska	10 000	0,3
Kc-2	130-140	Kultura pucharów lejkowatych	5 000	0,3
Kr-1	140-150	Kultura pucharów lejkowatych	5 000	0,3
Kr-2	100-110	Kultura pucharów lejkowatych	5 000	0,2

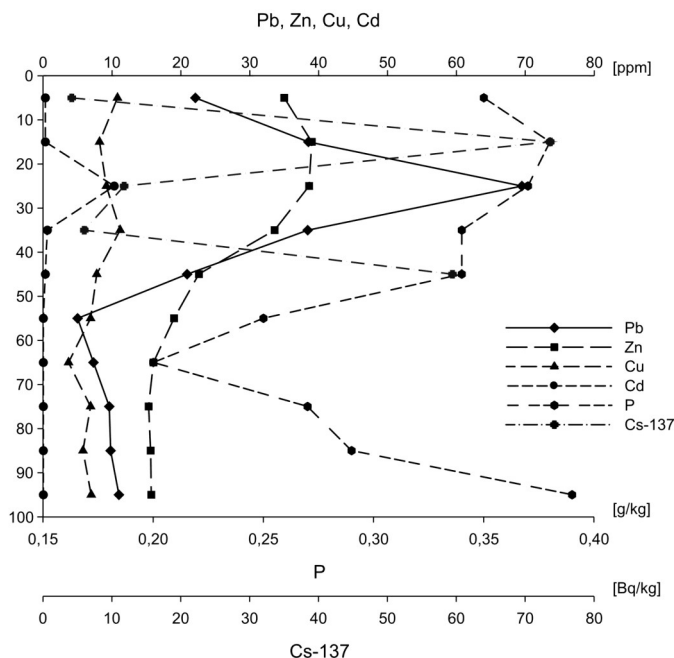
kich w profilach ze znanymi ładunkami metali ciężkich dostarczonymi do zlewni może być wykorzystana do datowania osadów (Ciszewski 2001, Korabiewski 2002). Metoda ta jest stosowana dość powszechnie dla osadów aluwialnych a precyzja uzyskiwanych wyników wysoka, niezbędnym warunkiem uzyskania wiarygodnych danych jest dobre poznanie historii dostawy metali ciężkich do środowiska zlewni (Ciszewski 2001). W przypadku osadów stokowych gdzie źródłem dostawy metali ciężkich jest przede wszystkim depozycja atmosferyczna oraz stosowanie nawozów mineralnych wzrost koncentracji metali ciężkich na większości obszarów jest niezbyt duży. Może to powodować utrudnienia w rozdzieleniu osadów deponowanych w warunkach naturalnych od warstw wy-



rażnie młodszych, tworzących się w warunkach geochemicznej presji człowieka. W związku z tym prace dotyczące wykorzystania metali ciężkich do datowania osadów stokowych są bardzo nieliczne i dotyczą okresu po II wojnie światowej.

Analiza tempa wypełniania zagłębień na obszarze lessowym użytkowanym rolniczo z wykorzystaniem wskaźników geochemicznych wykonana została dla kilku zlewni położonych w SW Niemczech (Clemens, Stahr 1994). Na podstawie wyraźnego wzrostu koncentracji fosforu, ołowiu i kadmu w górnej części profili deluwialnych, związanej ze wzrostem emisji do środowiska tych pierwiastków począwszy od lat 50 XX wieku, dokonana została ocena wielkości erozji i akumulacji w zlewni.

Nieliczne prace wykonane na obszarach słabo uprzemysłowionych wskazują na dominującą rolę czynnika naturalnego w pionowym zróżnicowaniu koncentracji metali ciężkich w profilach. Wpływ człowieka uwidacznia się przede wszystkim w górnych (najmłodszych) częściach profili lub poprzez zmiany w warunkach obiegu materii w zlewni - zmiany tempa i charakteru depozycji w dnach dolin (Roguszczak 2003, Szwarczewski 2005, Zgłobicki i in. 2008, Zgłobicki, Rodzik 2007). Przykładem opracowania, w którym wykorzystano równocześnie metale ciężkie,  $^{137}\text{Cs}$  i fosfor do oceny tempa redepozycji osadów stokowych i aluwialnych jest praca W. Zgłobickiego i in. 2008 (rys. 3, tab. 2).



**Rys. 3.** Pionowe zróżnicowanie koncentracji Cd, Cu,  $^{137}\text{Cs}$ , P, Pb i Zn w osadach stożka napływowego w Hajdowie (Zgłobicki i in. 2008)

**Fig. 3.** Vertical distribution of Cd, Cu,  $^{137}\text{Cs}$ , P, Pb and Zn in sediments of the alluvial fan in Hajdów (Zgłobicki et. al 2008)

Natomiast E. Łokas i in. (2010) zastosowali metale ciężkie,  $^{210}\text{Pb}$  oraz  $^{137}\text{Cs}$  do oceny tempa przyrostu osadów na równi zalewowej Warty.

**Tabela 2.** Ocena tempa redepozycji osadów stokowych i rzecznych (Zgłobicki i in. 2008)  
**Table 2.** Valuation of the redeposition rate for hillslope and river sediments (Zgłobicki et. al 2008)

Profil <i>Profile</i>	Tempo sedymentacji [cm rok <sup>-1</sup> ] <i>Rate of sedimentation [cm yr<sup>-1</sup>]</i>	Liczba wykorzystanych markerów <i>Number of used markers</i>
H3 (proluwia)	0,75-1,1	3
R1 (proluwia)	0,2-0,6	3
KS4 (deluwia)	0,5	1
P2 (deluwia)	0,6-0,75	2
R2 (aluwia)	0,2-0,5	2
PT1 (aluwia)	0,5	1
P1 (aluwia)	0,25	1
H1 (aluwia)	0,25	1

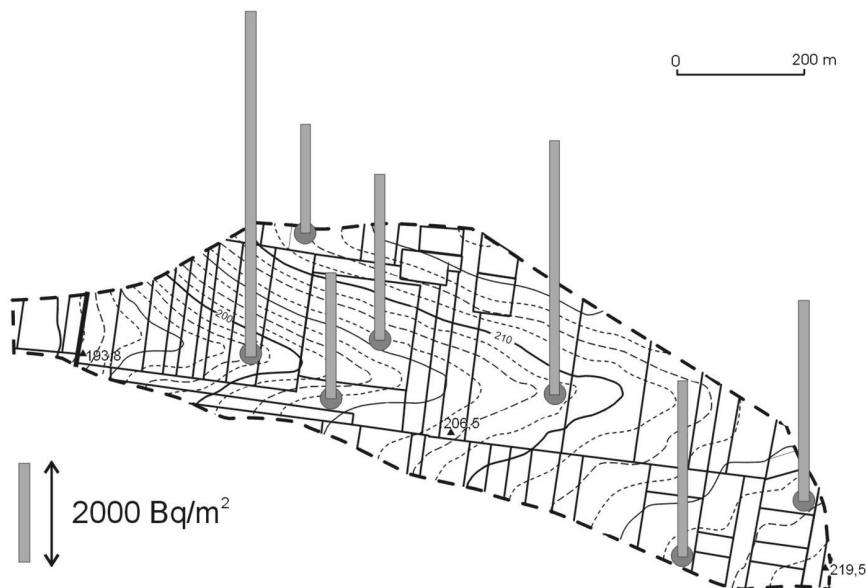
## OCENA DYNAMIKI PROCESÓW STOKOWYCH (DENUDACYJNYCH)

Pierwsze próby wykorzystania  $^{137}\text{Cs}$  w badaniach procesów erozji gleb podjęto w połowie lat 60 XX w. (Rogowski, Tamura 1965, 1970). Miały one na celu znalezienie powiązań pomiędzy erozją gleb a przemieszczaniem się radionuklidów.  $^{137}\text{Cs}$  jest powszechnie wykorzystywany w badaniach współczesnych procesów geomorfologicznych, A. Stach (1991) wskazuje na następujące kierunki wykorzystania radionuklidu:

- zastosowanie cezu jako wskaźnika kierunku i tempa przemieszczania gleby na sztucznie skażonych poletkach (Rogowski, Tamura 1965, 1970)
- wyznaczanie stref degradacji i akumulacji materiału na podstawie przestrzennego zróżnicowania sumarycznego ładunku w porównaniu ze skumulowanym *fallout-em* (Longmore i in. 1983, Loughran i in. 1989, Stach 1991)
- określanie ilościowego tempa procesów stokowych przy wykorzystaniu modeli matematycznych (Kachanowski, de Jong 1984, Quine 1989, Sutherland, de Jong 1990)

Obliczanie wielkości denudacji opiera się na idei powiązania bilansu materiału z bilansem cezu, przy założeniu, że w skali pojedynczego stoku czy zlewni opad izotopu na powierzchnię terenu nie był zróżnicowany przestrzennie. W miejscach gdzie stwierdza się mniejszy sumaryczny ładunek izotopu (w porównaniu do całkowitego opadu  $^{137}\text{Cs}$  z atmosfery) występuje ubytek materiału. Odwrotna sytuacja ma miejsce, gdy sumaryczny ładunek jest większy od *fallout*, wskazuje to na akumulację osadów (rys. 4). Zastosowanie jednego z modeli (równań) opisujących w sposób ilościowy zależność pomiędzy sumarycznym

ładunkiem a bilansem materiału (modele liniowe, bilansu masy, modele empiryczne) pozwala na ilościową ocenę procesu (m. in. Wicherek, Bernard 1995, Zhang i in. 1990, Poręba, Bluszcz 2008).



**Rys. 4.** Zróżnicowanie sumarycznego ładunku  $^{137}\text{Cs}$  w małej zlewni (Zgłobicki 2002)  
**Fig. 4.** Spatial diversification of total  $^{137}\text{Cs}$  in small catchment (Zgłobicki 2002)

W Polsce badania dynamiki procesów stokowych przy wykorzystaniu cezu-137 wykonywane były w wielu ośrodkach geomorfologicznych (Stach 1991, Froehlich, Walling 1991, Chelmecki i in. 1995, Froehlich 1997, Smolska 2005, Bluszcz i in. 2007). Prowadzone badania wskazują na występowanie znaczącego przestrzennego zróżnicowania koncentracji  $^{137}\text{Cs}$  w glebach – w skali małych zlewni czy pojedynczych stoków – (Higgitt i in. 1992, Zgłobicki 2002). Jako główne czynniki wpływające na współczesne zróżnicowanie skażenia cezem w małej skali wymienić należy: zróżnicowany opad czarnobylski, ukształtowanie powierzchni oraz pokrycie terenu (decydujące o dynamice procesów stokowych). Przykładowo, w Rogalowie (Wyżyna Lubelska) aktywność  $^{137}\text{Cs}$  w wierzchniej warstwie gleb położonych na stoku wynosiła  $20 \text{ Bq kg}^{-1}$  na obszarze gruntów ornych i  $76 \text{ Bq kg}^{-1}$  w glebach leśnych. Sumaryczny ładunek izotopu zmieniał się od  $7500 \text{ Bq m}^{-2}$  na wierzchowinie, do  $10\,620 \text{ Bq m}^{-2}$  w dnie doliny.

Badania nad zróżnicowaniem sumarycznego ładunku  $^{137}\text{Cs}$  w glebach i osadach umożliwiły ocenę dynamiki współczesnych procesów denudacyjnych na obszarach lessowych Polski południowo-wschodniej (Zgłobicki 2002). Tempo degradacji terenów użytkowanych rolniczo określono na  $2 \text{ mm rok}^{-1}$  (wierzchowiny) do  $7,4 \text{ mm rok}^{-1}$  (stoki o nachyleniu  $>10^\circ$ ) (tab. 3).

**Tabela 3.** Przeciętna intensywność procesów stokowych w obrębie gruntów ornych, zachodnia część Wyżyny Lubelskiej (Zgłobicki 2002)

**Table 3.** Average intensity of hillslope processes within arable lands, western part of Lublin Upland (Zgłobicki 2002)

Forma rzeźby - <i>Type of relief</i>	Intensywność procesu [mm rok <sup>-1</sup> ] <i>Intensity of process</i> [mm yr <sup>-1</sup> ]
Powierzchnie wierzchowinowe (rozległe)	- 2,0
Powierzchnie wierzchowinowe (rozcłonkowane)	- 4,5÷6,0
Stoki wierzchowin (3-6°) orka zgodna ze spadkiem	- 6,0
Stoki wierzchowin (3-6°) orka poprzeczna do spadku	- 3,0÷5,5
Zbocza dolin (6-10°) orka poprzeczna do spadku	- 5,5
Strome zbocza dolin (>10°) orka poprzeczna do spadku	- 7,4

W zlewni Homerki (Beskidy) prowadzone były pomiary intensywności denudacji na eksperymentalnym stoku z wykorzystaniem <sup>137</sup>Cs (Froehlich, Walling 1992, Higgitt i in. 1992). Jest to stok wypukło-wklęsły o długości kilkuset metrów z licznymi terasami rolniczymi. Wyniki pomiarów na stanowiskach reperowych wskazały na duże zróżnicowanie opadu czarnobyłskiego, nawet w skali pojedynczego pola. Także zróżnicowanie koncentracji <sup>137</sup>Cs na stoku nie zawsze dało się wytłumaczyć przemieszczaniem radioizotopu w wyniku procesów erozyjnych. Badania prowadzone w zlewni Homerki potwierdziły tezę o ważnej roli teras uprawowych w funkcjonowaniu stokowych systemów geomorfologicznych. Większość materiału transportowanego w dół stoku jest redeponowana w dolnej części teras uprawowych, a tempo akumulacji w tym konkretnym przypadku wynosiło 4-5 mm rok<sup>-1</sup>.

### OGRANICZENIA METOD GEOCHEMICZNYCH I RADIOCHEMICZNYCH

Metody geochemiczne oprócz szeregu zalet posiadają pewne ograniczenia, różne dla poszczególnych pierwiastków czy izotopów, które muszą być brane pod uwagę w przypadku stosowania w/w metod:

- niejasności dotyczące zachowania pierwiastków w środowisku,
- określony horyzont czasowy dla części metod,
- trudności w wyznaczeniu tła geochemicznego (wartości odniesienia),
- konieczność specjalnego przygotowania próbek,
- wysoka cena niektórych analiz.

W przypadku metod geochemicznych niezmiernie ważne jest dokładne określenie stosowanej metodyki (Hnatyszak-Jakimowicz, Rubel 1998, Paślawski 1998).

Na dokładność uzyskiwanych koncentracji izotopów i pierwiastków w próbkach, obok ich rzeczywistej zawartości, wpływają: sposób poboru i przygotowania próbek, frakcja, w której dokonywane są oznaczenia, metoda oznaczania oraz metoda roztwarzania (w przypadku oznaczeń w roztworze).

Omawiane pierwiastki i izotopy charakteryzują się małą mobilnością pionową w glebach i osadach, jednak zupełne wykluczenie tego procesu nie jest możliwe. Stwarza to pewne ograniczenia przy wykorzystaniu badanych pierwiastków jako markerów stratygraficznych (metale ciężkie, fosfor). Postredepozycyjna migracja w dół profilu wpływa na dokładność datowań. Problem ten może jednak dotyczyć przede wszystkim aluwii. W specyficznych warunkach – pogłębiania koryta rzecznej – proces migracji metali ciężkich i cezu-137 może być zauważalny nawet w krótkim okresie i doprowadzić do sytuacji powstania wtórnych, postdepozycyjnych pików koncentracji (Ciszewski i in. 2007). Problem ten dotyczy przede wszystkim aluwii, w których występują często wahania poziomu wód gruntowych, a intensywność migracji jest wyraźnie większa w przypadku osadów piaszczystych (Ciszewski i in. 2004).

Kluczowe zagadnienie w analizach geochemicznych to wyznaczenie wartości odniesienia uznawanych za stężenie naturalne. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykorzystania metali ciężkich i fosforu. Niezbędne jest bowiem oddzielenie wartości naturalnych od antropogenicznych, które w przypadku terenów rolniczych nie muszą być wyraźnie większe. Sprawę komplikuje fakt, że tło geochemiczne zmienia się w przestrzeni i w czasie i ma charakter lokalny (Zgłobicki 2008).

W przypadku wykorzystania opisywanych wskaźników do datowania osadów (określenia tempa sedymentacji) poważnym problemem jest mieszanie wierzchniej warstwy osadu wskutek orki na obszarze gruntów ornych (dominująca forma użytkowania terenu). Powoduje to zaburzenie naturalnej stratygrafii profilu do głębokości orki (20-25 cm). Otrzymane dane mają w związku z tym charakter przybliżony, a dla stref o niewielkim tempie akumulacji możliwe jest otrzymanie mało wiarygodnych wyników. Problem ten nie występuje w miejscach, które nie są użytkowane rolniczo (orane) – dnach wąwozów oraz w obrębie trwałych użytków zielonych.

Próbując określać wielkość erozji lub akumulacji na podstawie zróżnicowania przestrzennego sumarycznego ładunku cezu napotykamy na następujące utrudnienia:

- rozdzielenie cezu przed- i po- czarnobylskiego
- znalezienie stanowisk reperowych
- zastosowanie właściwego równania opisującego ubytek/przyrost cezu i materiału

Rozdzielenie cezu pochodzącego głównie z lat 60 XX w. oraz z roku 1986 jest niezbędne do określenia przedziału czasu, w którym nastąpił ubytek/dostawa izotopu w danym profilu reperowym. Bez tego niemożliwe jest przeliczenie uzy-

skanych wartości erozji/akumulacji na jednostkę czasu. Problem ten będzie jednak powoli zanikał, gdyż już obecnie w niektórych rejonach cez związany z awarią reaktora na Ukrainie stanowi od 70-90% sumarycznego ładunku (Zgłobicki 2002, Poręba, Bluszcz 2007). Możliwe jest również obliczenie rocznej oraz skumulowanej wielkości depozycji na podstawie wielkości opadu atmosferycznego przy zastosowaniu specjalnych równań (Poręba, Bluszcz 2007).

D.L. Higgitt i in. (1992) na podstawie wyników badań w zlewni Homerki, które wskazały na znaczące zróżnicowanie koncentracji cezu-137 na obszarach nie podlegających erozji, stawiają w związku z tym tezę o niemożności bezpośredniego zastosowania badań sumarycznego ładunku cezu do określania przestrzennego rozkładu erozji gleb i akumulacji na obszarach o dużej roli opadu radionuklidów pochodzących z wybuchu czarnobylskiego. Podobne problemy sygnalizują również inni autorzy (m. in. Walling, Quine 1991).

Kolejne kluczowe zagadnienia to określenie wielkości skumulowanego opadu izotopu w danym miejscu. W związku z tym, że pomiary opadu  $^{137}\text{Cs}$  prowadzone były tylko w kilku miejscach na świecie najczęściej stosowaną metodą jest wykorzystanie tzw. stanowisk reperowych, a więc stanowisk na których w ciągu ostatnich 50 lat jedynym źródłem dostawy był opad z atmosfery, a izotop nie był z tego miejsca wynoszony przez procesy denudacji. Metoda zakłada, że są to miejsca gdzie nie występują procesy erozji lub akumulacji materiału glebowego. Najlepszym miejscem lokalizacji stanowisk reperowych są trwale zadarnione wierzchowiny, nie mogą natomiast tej funkcji pełnić powierzchnie zalesione, gdzie akumulacja cezu wraz z mokrym opadem atmosferycznym jest podwyższona (Fawaris, Johanson 1994). Znalezienie powierzchni trawiastych, nie uprawianych w ciągu ostatniego półwiecza, jest jednak na niektórych obszarach Polski utrudnione (na przykład na terenach wyżynnych czy pogórskich). Kolejnym problemem jest to, czy cały ładunek izotopu, który dostał się na powierzchnię terenu jest wiązany przez glebę, prawdopodobnie jakaś jego część jest spłukiwana przez wodę przed adsorbcją (Higgitt i in. 1992).

Problem wpływu sposobu i ilości pobieranych próbek na uzyskiwane wyniki porusza praca R. A. Sutherlanda (1994). Na podstawie analizy przestrzennego zróżnicowania koncentracji  $^{137}\text{Cs}$  w obrębie niewielkiego pola (ok. 6 ha), postuluje on pobieranie co najmniej 13 próbek glebowych w celu dokładnego określenia zawartości izotopu w badanym punkcie.

Do obliczania intensywności erozji czy akumulacji stosowane są różne modele matematyczne wiążące ubytek/dostawę cezu z ubytkiem/dostawą materiału. Modele są teraz cały czas udoskonalane i kalibrowane, w dalszym jednak ciągu nie opisują przedstawionej powyżej zależności ze 100% dokładnością (Fredericks, Perrens 1998, Owens, Walling 1998, Walling, He 1999, Poręba Bluszcz 2008). W związku z tym zastosowanie różnych modeli przy takich samych danych wyjściowych dotyczących przestrzennego zróżnicowania sumarycznego ładunku cezu, skutkuje otrzymaniem różnych wielkości erozji/

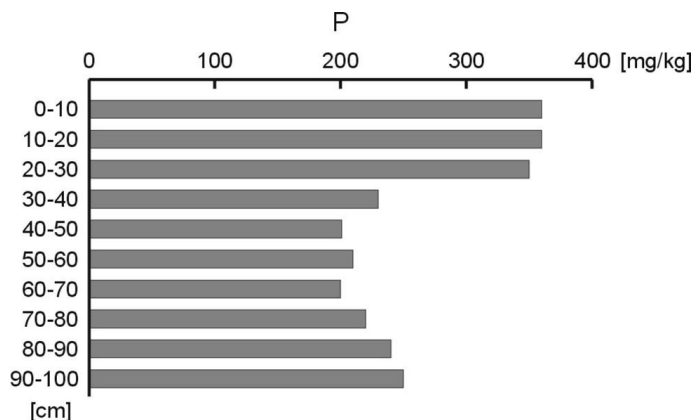
akumulacji. Dodatkowo najnowsze modele wymagają zastosowania parametrów trudnych do precyzyjnego określenia, co w poważny sposób wpływa na dokładność otrzymanych wielkości erozji (Poręba, Bluszcz 2008).

Pewnym ograniczeniem metody cezowej jest również fakt, że pozwala ona na ocenę sumarycznej dynamiki procesów zachodzących na stokach (erozji wodnej, uprawowej). Ocena natężenia pojedynczych procesów wymaga natomiast przeprowadzania eksperymentów polowych (sztuczne skażenie poletek) lub powtarzalnych pomiarów. Opisywana metoda jest natomiast warta polecenia ze względu na to, że w odróżnieniu od innych metod geochemicznych nie wymaga specjalnego przygotowania próbek. Uzyskane za jej pomocą wyniki „datowania osadów” są również najbardziej jednoznaczne i wiarygodne. W związku z dużą liczbą prac, metoda wykorzystująca  $^{137}\text{Cs}$  doczekała się dużej liczby publikacji o charakterze przeglądowym (m. in. Ritchie, Mc Henry 1990, Stach 1996, Zgłobicki 2002, Zapata 2003, Poręba 2006).

Zastosowaniu fosforu w badaniach nad dynamiką procesów stokowych (depozycji deluwialnej) poświęcono jak do tej pory zaledwie kilka prac, co zostało już wcześniej zasygnalizowane. Konsekwencją tego faktu jest bardzo mała liczba danych o charakterze metodycznym i porównawczym. Uzyskane do tej pory wyniki wskazują na możliwość wykorzystania fosforu w studiach nad tempem sedymentacji w dłuższym czasie (Zgłobicki 2008). Takie zastosowanie fosforu ograniczone jest jednak przestrzennie wyłącznie do terenów przylegających do stanowisk archeologicznych, czyli miejsc o wyraźnie podwyższonej dostawie pierwiastka do gleby. Nie stwierdzono natomiast powszechnego wzrostu koncentracji fosforu w wierzchnich warstwach profili deluwialnych na obszarach lessowych Wyżyny Lubelskiej na skutek stosowania nawozów mineralnych. Zjawisko takie wystąpiło w mniej niż połowie badanych profili, wzrost zawartości pierwiastka w warstwie ornej wynosił zazwyczaj 50% (rys. 5) Utrudnia to ocenę tempa współczesnych procesów przy wykorzystaniu tej metody. Oznaczanie ilości fosforu w glebie czy osadach wymaga zastosowania także bardziej skomplikowanej analityki i urządzeń (roztwarzanie próbek, metody spektrofotometryczne), jak również dokonania wyboru rodzaju formy pierwiastka, którą będziemy określać (fosfor organiczny, nieorganiczny, całkowity) (Holliday, Gartner 2007).

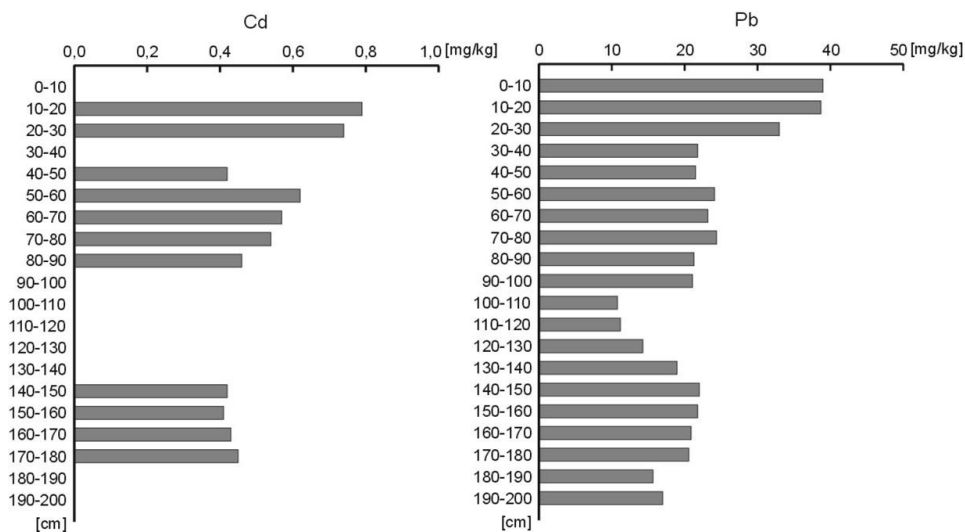
W przypadku metali ciężkich w profilach osadów stokowych obserwuje się zazwyczaj niewielki wzrost koncentracji, ograniczony przede wszystkim do warstw powierzchniowych (rys. 6) Jednocześnie badania W. Zgłobickiego (2008) wskazują, że w przypadku 50% profili osadów deluwialnych nie znaleziono wspólnych prawidłowości dla więcej niż 2 pierwiastków wskaźnikowych. W związku z tym opisywana metoda znajduje zastosowanie przede wszystkim do datowania współczesnych osadów. Potencjalnie dobre rezultaty można by również uzyskać w obszarach o wysokim stopniu zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, na przykład w pobliżu hut. Także, w tym przypadku liczba publika-

cji nie jest duża, a co za tym idzie konieczne są dalsze badania mające na celu dopracowania metodyki studiów. Pewnym ograniczeniem metody, podobnie jak w przypadku fosforu, jest konieczność specjalnego przygotowania próbek oraz zastosowania bardziej kosztownych metod analitycznych (spektrometria). Pod-



**Rys. 5.** Pionowe zróżnicowanie zawartości fosforu w profilu osadów deluwialnych (Zgłobicki 2008)

**Fig. 5.** Vertical distribution of phosphorus in profile of colluvial sediments (Zgłobicki 2008)



**Rys. 6.** Pionowe zróżnicowanie koncentracji Cd i Pb w profilu osadów deluwialnych w okolicach Karmanowic, Wyżyna Lubelska (Zgłobicki 2008)

**Fig. 6.** Vertical distribution of Cd and Pb in profile of colluvial sediments in the vicinity of Karmanowice, Lublin Upland (Zgłobicki 2008)



sumowując należy stwierdzić, że metalami najlepiej spełniającymi warunki dobrych markerów stratygraficznych są ołów, kadm i miedź (Zgłobicki 2008). Cechują się one małą mobilnością w profilach oraz istotnym związkiem z działalnością człowieka.

Wymienione wyżej ograniczenia nie powinny jednak przesłaniać faktu potencjalnych możliwości stwarzanych przez badania na pograniczu geochemii i geomorfologii. W wielu przypadkach dostarczają one danych niemożliwych do uzyskania innymi metodami („datowanie” współczesnych osadów). Bardzo często mogą również stanowić bardzo dobre uzupełnienie kartowania geomorfologicznego, stacjonarnych badań monitoringowych i datowań wieku bezwzględnego.

## Literatura

- Bednarek R., Chudziak W., Gackowski J., Kwiatkowska A., Markiewicz M., Noryśkiwicz A.M., Polcyn I., 2003, *Przekształcenia środowiska przyrodniczego pod wpływem działalności człowieka w świetle interdyscyplinarnych badań. FNP dla archeologii. Podsumowanie programów TRAKT i ARCHEO*, Lublin, 9–16.
- Blake W., Walling D., He Q., 1999, Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations, *Applied Radiation and Isotopes* 51, 5, 599–605.
- Bluszcz A., Poręba G., Śnieszko Z., 2007, The basis of the study of the age of the Holocene diluvium on loess areas of the Polish Highlands, *Geochronometria* 28, 61–66.
- Brzeziński W., Dulinicz M., Kobyliński Z. 1983, Zawartość fosforu w glebie jako wskaźnik dawnej działalności ludzkiej. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 31, 277–297.
- Campbell B. L., Loughran R. J., Elliot G. L., 1982, Caesium-137 as an indicator of geomorphic processes in a drainage system, *Australian Geographical Studies* 20, 49–64.
- Ciszewski D., 2001, Możliwości i problemy zastosowań metali ciężkich do datowania osadów aluwialnych na przykładzie środkowej Odry, *Czas. Geogr.* 72, 53–69.
- Ciszewski D., Czajka A., Błażej S., 2008, Rapid migration of heavy metals and <sup>137</sup>Cs in alluvial sediments, Upper Odra River valley, Poland, *Environmental Geology* 55, 1577–1586.
- Ciszewski D., Malik I., Wardas M., 2004, Uwarunkowania geomorfologiczne migracji metali ciężkich w osadach fluwialnych: dolina Małej Panwi, *Przeł. Geol.* 52, 2, 163–174.
- Chełmicki 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.
- Ciszewski D., 2002, Zapis działalności przemysłowej w osadach fluwialnych, [w:] P. Szwarczewski, E. Smolska (red.), *Zapis działalności człowieka w środowisku przyrodniczym*, tom I. Warszawa-Łomża, 23–28.
- Ciszewski D., Malik I., 2004, The use of heavy metal concentrations and dendrochronology in the reconstruction of sediment accumulation, Mała Panew River Valley, southern Poland, *Geomorphology* 58, 196–174.
- Clemens G., Stahr K., 1994, Present and past soil erosion rates in catchments of the Kraichgau area (SW Germany), *Catena* 22, 153–168.
- Fawaris B.H, Johanson K. J., 1994, Radiocesium in soil and plants in a forest in central Sweden, *The Science of Total Environment* 157, 133–138.

- Fredericks D.J., Perrens S. J., 1988, Estimating erosion using caesium-137: II. Estimating rates of soil loss, [w:] *Sediment Budgets. Proceedings of the Porto Alegre Symposium*, December 1988, 233–240.
- Froehlich W., 1997, Natężenie erozji gleb na stokach beskidzkich w świetle badań metodami klasycznymi i radioizotopowymi, *Zesz. Nauk. Akad. Roln. w Krakowie*, 315, 35–46.
- Froehlich W., Walling D.E., 1991, Badania procesów erozji i sedymentacji przy użyciu izotopu cezu 137, *Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences, Conference Papers 14*, IGiPZ PAN 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. no 209, 61–76.
- Foster I.D.L. (red.), *Tracers in Geomorphology*, John Wiley & Sons.
- Gillijns K., Poesen J., Deckers J., 2005, On the characteristics and origin of closed depressions in loess-derived soils in Europe – case study from the Central Belgium, *Catena* 60, 43–58.
- Higgitt D.L., Froehlich W., Walling D.E., 1992, Applications and limitations of Chernobyl radiocaesium measurements in a Carpathian erosion investigation, Poland, *Land Degradation and Rehabilitation* 3, 15–26.
- Holliday V.T., Gartner W.G. 2007, Methods of soil P analysis in archeology. *Journal of Archaeological Science* 34, 301–333.
- Jakimowicz-Hnatyszak K., Rubel S., 1998, Wpływ przygotowania próbki na wyniki analityczne, *Przeł. Geol.* 46, 903–909.
- Kachanowski R.G., de Jong E., 1984, Predicting the temporal relationship between soil cesium-137 and erosion rate, *J. Environ. Qual.* 13, 301–304.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999, *Biogeochemia pierwiastków śladowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Klimek K., 1996, Aluwia Rudy jako wskaźnik 1000-letniej degradacji Płaskowyżu Rybnickiego, [w:] A. Kostrzewski (red.), *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych, t. II*. Wyd. UAM, 155–166.
- Korabiewski B., 2002, Wykorzystanie metali ciężkich w określaniu wieku względnego osadu na przykładzie zlewni górnej Kwisy, [w:] P. Szwarczewski, E. Smolska (red.), *Zapis działalności człowieka w środowisku przyrodniczym*, tom I, Warszawa-Łomża, 65–69.
- Lambert J.B., 1998, *Traces of the Past. Unraveling the Secrets of Archeology through Chemistry*, Perseus Publishing, Cambridge.
- Lomenick T.F., Tamura T., 1965, Naturally occurring fixation of  $^{137}\text{Cs}$  on sediments of lacustrine origin, *Soil Science of America Proceedings* 29, 383–387.
- Longmore M.E., O'Leary B. M., Rose C.W., Chandica A.L., 1983, Mapping soil erosion and accumulation with the fallout isotope Caesium-137, *Austral. J. Soil. Res.* 21, 373–385.
- Loughran R.J., Campbell B.L., Elliott G.L., Cummings D., Shelly D.J., 1989, A caesium-137-sediment hillslope model with tests from south-eastern Australia, *Z. Geomorph. N. F.* 33, 2, 235–250.
- Łokas E., Wachniew P., Ciszewski D., Owczarek P., Chau N.D., 2010, Simultaneous Use of Trace Metals,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in Floodplain Sediments of a Lowland River as Indicators of Anthropogenic Impacts. *Water, Air & Soil Pollution* 207, 57–71.
- Owens P.N., Walling D.E., 1998, The Use of a Numerical Mass-balance Model to Estimate Rates of Soil Redistribution on Uncultivated land from  $^{137}\text{Cs}$  Measurements, *J.*

- Environ. Radioactivity* 40, 185–203.
- Pasławski P., 1998, Kontrola jakości analizy jako podstawa wiarygodności wyników, *Przegl. Geol.* 46, 911–917.
- Poreba G., 2006, Caesium-137 as a soil erosion tracer: a review, *Geochronometria* 25, 37–46.
- Poreba G., Bluszcz A., 2007, Determination of the initial  $^{137}\text{Cs}$  fallout on the areas contaminated by Chernobyl fallout, *Geochronometria* 26, 34–38.
- Poreba 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.
- Quine T.A., 1989, Use of simple model to estimate rates of soil erosion from caesium-137 data. *Journal of Water Resources* 8, 54–81.
- Renberg I., Bindler R., Brännvall M.-L., 2001, Using the historical lead-deposition record as a chronological marker in sediment deposits in Europe, *Holocene* 11, 511–516.
- Ritchie J.C., Mc Henry R., 1990, Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review, *Journal of Environ. Qual.* 19, 215–233.
- Rogowski A.S., Tamura T., 1965, Movement of Cesium-137 by runoff, erosion and infiltration in the alluvial Captina silt loam, *Health Physics* 11, 1333–1340.
- Rogowski A.S., Tamura T., 1970, Erosional behavior of Cesium-137, *Health Physics* 18, 467–477.
- Schlezniger D.R., Howes B.L., 2000, Organic Phosphorus and Elemental Ratios as Indicators of Prehistoric Human Occupation, *Journal of Archeological Science* 27, 479–492.
- Smolska E., 2005, *Znaczenie splukiwania w modelowaniu stoków młodoglacjalnych (na przykładzie Pojezierza Suwalskiego)*, WGiSR UW, Warszawa.
- Stach A., 1991, Zastosowanie cezu-137 do datowania współczesnych osadów stokowych - podstawy metody i wstępne wyniki z Pojezierza Drawskiego, *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych. Geografia* 50. Wydawnictwo Naukowe UAM, 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 cz. 2. K (11/1)*, Puławy, 203–226.
- Sutherland R.A., de Jong E., 1990, Quantification of soil redistribution in cultivated fields using caesium-137, Outlook, Saskatchewan, *Catena Supplement* 17, 177–193.
- Szwarczewski P., 1998, Metale ciężkie w różnowiekowych aluwiach Wisły okolic Torunia, *Przegl. Geol.* 46, 1286–1288.
- Szwarczewski P., 2005, Geochemiczny i paleogeograficzny zapis dynamiki procesów rzeźbotwórczych w holocenie na przykładzie stoków w okolicach Płocka, [w:] A. Richling, J. Lechnio (red.), *Z problematyki funkcjonowania krajobrazów nizinnych*. WGiSR UW, Warszawa, 77–88.
- Tamura T., Jacobs D.G., 1960, Structural implications in caesium sorption, *Health Physics* 2, 391–398.
- Walling D.E., He Q., 1997, Use of fallout  $^{137}\text{Cs}$  in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains, *Catena* 29, 263–282.
- Walling D.E., He Q., 1999, Improved models for estimating soil erosion rates from caesium-137 measurements, *J. of Environ. Quality* 28, 611–622.
- Walling D.E., Quine T.A., 1991, Use of  $^{137}\text{Cs}$  measurements to investigate soil erosion on arable fields in the UK: potential applications and limitations, *Journal of Soil Science* 42, 147–165.

- Wicherek S.P., Bernard C., 1995, Assessment of soil movements in a watershed from Cs-137 data and conventional measurements (example: the Parisian Basin), *Catena* 25, 141–151.
- Wise S.M., 1980, Cesium-137 and Lead-210: a review of the techniques and some applications in geomorphology, [w:] R.A. Cullingford, D.A. Davidson, J. Levin (red.), *Timescales in Geomorphology*, 110–127.
- Zapata F., 2003, The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sediment investigations: recent advantages and future developments, *Soil and Tillage Research* 69, 3–13,
- Zglobicki W., 2002, *Dynamika współczesnych procesów denudacyjnych w północno-zachodniej części Wyżyny Lubelskiej*, Wydawnictwo UMCS, Lublin, 1–159.
- Zglobicki W., 2008, *Geochemiczny zapis działalności człowieka w osadach stokowych i rzecznych*, Wyd. UMCS, Lublin, 240 s.
- Zglobicki W., Rodzik J., 2007, Heavy metals in slope deposits of loess areas of the Lublin Upland (E Poland), *Catena* 71, 84–95.
- Zglobicki W., Ziółek M., 2006, Wybrane metody geochemiczne w badaniach środowiska. Regionalne Studia Ekologiczno-Krajobrazowe, *Problemy Ekologii Krajobrazu* XVI, 519–528.
- Zglobicki W., Kozieł M., Lata L., Plak A., Reszka M., 2008, Próba wykorzystania wskaźników geochemicznych do oceny natężenia współczesnej sedymentacji deluwialnej i aluwialnej, *Ann. UMCS*, B, LXIII, 87–103.
- Zhang X.B., Higgitt D.L., Walling D.E., 1990, Preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate soil loss in the loess Plateau of China, *Hydrological Sciences Journal* 35, 243–252.