

BEATA HOŁUB

*Interpretacja i porównanie symulacji zagrożenia potencjalną erozją wodną gleb według modelu USLE i USPED na przykładzie okolic Drohiczyzna nad Bugiem*

---

The interpretation and comparison of simulation of the soil water erosion hazard according to the USLE and USPED models set on an example of Drohiczyn on the Bug vicinity

W S T Ę P

Rozwój teoretycznych i praktycznych badań nad erozją wodną gleb przeprowadzony długimi i kosztownymi eksperymentami w polach doświadczalnych pozwolił na opracowanie modeli deterministycznych realizowanych numerycznie. Możliwość swobodnego kształtowania abstrakcyjnej rzeczywistości stwarza nieograniczone warianty symulacji w zależności od natury rozważanego problemu. Pomimo tak wielu rozwiązań funkcje algorytmu nie zawsze spełniają oczekiwania praktyczne zrealizowanego modelowania, dlatego też bardzo ważne jest dostosowanie modelu do celu badań z uwagi na charakter interpretacji wyników.

W artykule podjęto próbę integracji danych erozyjnych uzyskanych w dwóch różnych modelach zagrożenia potencjalną erozją wodną gleb. Wybrane modele różni koncepcja tzw. czynników limitujących (Rejman, Dębicki 2002), zgodnie z którą wartości wymiarowe wielkości erozji determinowane są przez dwie sytuacje. Pierwsza sytuacja zakłada nieskończoną zdolność transportową strumienia wody ( $T < 0$ ). Zatem proces erozji kształtuje jedynie możliwość i tempo odrywania cząstek glebowych. Druga sytuacja dotyczy ograniczonej zdolności transportowania osadu ( $0 > T$  i  $T > 0$ ), a więc obraz symulacji wzbogacony został o przestrzenny rozkład erozji i depozycji. Jednakże należy zauważyć, iż w rze-

czywistości oba czynniki składają się na warunki imitujące działanie procesu erozji wodnej gleb. Ostateczne wnioski powinny zatem łączyć w sobie syntezę myśli płynących z analizy obu modeli.

Celem opracowania jest przeprowadzenie symulacji potencjalnej straty gleby w wyniku erozji wodnej zachodzącej podczas spływu powierzchniowego i oddzielnie spływu linijnego oraz w warunkach uśrednionych, tj. bez wyraźnej dominacji jednej formy erozji nad drugą. Praca ta ma charakter rozprawy metodycznej a porównanie trzech zrealizowanych modeli pomoże wskazać na zróżnicowanie otrzymanych wyników w stosunku do wybranych wartości zmiennych w obu analizowanych algorytmach. Podrzednym celem jest wskazanie na zastosowanie GIS-u jako narzędzia do opracowania modelu zagrożenia erozją wodną gleb i graficznego zobrazowania wyników.

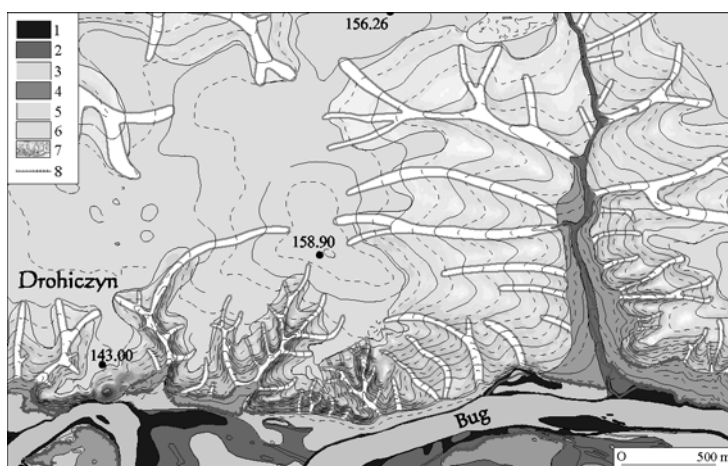
#### CHARAKTERYSTYKA OBSZARU TESTOWEGO

Badany obszar położony jest we wschodniej części Polski i obejmuje odcinek doliny Bugu wraz z przylegającą wysoczyzną morenową w granicach gminy Drohiczyń. Zgodnie z podziałem fizycznogeograficznym Polski wg Kondrackiego (2000) opisywany obszar należy do dwóch mezoregionów: Podlaskiego Przełomu Bugu będącego częścią Niziny Południowopodlaskiej oraz Wysoczyzny Drohickej, która zamyka od południa Nizinę Północnopodlaską (ryc. 1).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań na tle podziału fizycznogeograficznego (Kondracki 2000)  
Fig. 1. Localization of research area according to physico-geographical division of Poland (Kondracki 2000)

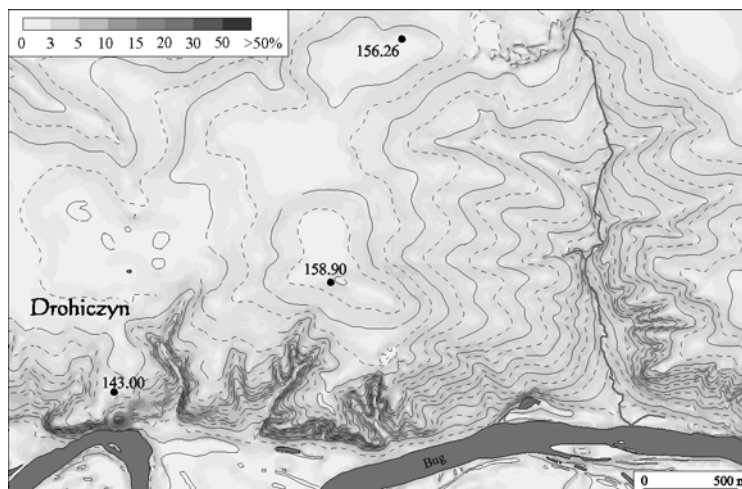
W krajobrazie morfologicznym obszaru badań dominuje wysoczyzna morenowa zbudowana głównie z piasków gliniastych, którą rozcinają rozwinięte systemy dolinek erozyjno-denudacyjnych (ryc. 2). Na stokach wysoczyzny zalegają piaski średnie (*Mapa glebowo-rolnicza...*). Północne zbocze doliny Bugu o ekspozycji południowej podcinane jest przez meandrujące koryto rzeki. W tej części występują największe spadki terenu sięgające 30% (ryc. 3). Średnie wysokości względne osiągają w strefie krawędziowej doliny 22 m, a na wysoczyźnie maleją od 7 do 3 m (Hołub 2006). Dno doliny Bugu tworzy zespół vistuliańsko-holocenijskich akumulacyjnych teras rzecznych, które w granicach obszaru badań nie są użytkowane rolniczo.



Ryc. 2. Szkic geomorfologiczny doliny Bugu w okolicach Drohiczyzna: Terasy holocenijskie 1) 0–1 m, 2) 1–2,5 m, 3) 2,5–4,5 m; 4) Terasa plejstoceńska (4,5–10,5 m); 5) wydmy; 6) wysoczyzna morenowa; 7) dolinki erozyjno-denudacyjne; 8) krawędzie erozyjne teras (Hołub 2006)

Fig. 2. The geomorphological sketch of the Bug river valley in the vicinity of Drohiczyn: Holocene terrace 1) 0–1 m, 2) 1–2,5 m, 3) 2,5–4,5 m, 4) Pleistocene terrace (4,5–10,5 m), 5) dunes, 6) moraine highplain; 7) denudational-erosional valleys; 8) escarpments of terraces (Hołub 2006)

Gleby badanego terenu zostały wykształcone z utworów czwartorzędowych o genezie glacialnej i fluwioglacialnej. Pod względem typologicznym największe powierzchnie zajmują gleby bielcowe i płowe wytworzone z glin zwałowych oraz z piasków naglinowych i niałowych. Duże i zwarte kompleksy tworzą one w obszarach pozadolinnych na terenie wysoczyzny polodowcowej. Gleby brunatne występują w części zachodniej badanego terenu. Na obszarze akumulacyjnej terasy nadzalewowej dominują gleby torfowe, rzadziej gleby bielcowe wytworzone z piasków luźnych (ryc. 4A). Na tle rolniczej przydatności gleb wśród gruntów ornich dominują gleby kompleksu pszennego dobrego i żytniego bardzo dobrego. Użytki zielone zajmują gleby zaliczone do kompleksu użytków



Ryc. 3. Mapa spadków terenu

Fig. 3. Slope map

zielonych średnich (*Mapa glebowo-rolnicza...*). Przestrzenne zróżnicowanie klas bonitacyjnych użytków rolnych nawiązuje do rozmieszczenia typologicznego gleb i adekwatnie wiąże się z obrazem rolniczej przydatności utworów glebowych. W ogólnej strukturze dominują gleby słabej jakości, czyli klasy IV. Największe kompleksy leśne występują w części wschodniej badanego obszaru. Użytki zielone należą w większości do kompleksu słabego i bardzo słabego (w granicach pasa meandrowego koryta Bugu). Natomiast poza tym obszarem użytki zielone charakteryzuje kompleks średni (ryc. 4B). Grunty orne oraz sady zlokalizowane są poza strefą zalewowo-powodziową rzeki Bug. Pierwsze stanowią ponad 62% powierzchni obszaru gminy Drohiczyń (ryc. 4C). Sady zajmują niespełna 1% przestrzeni krajobrazu rolniczego gminy.

Na klimat danego miejsca zasadniczy wpływ mają dwie napływające masy powietrza: w lecie są to masy powietrza polnomorskiego (Pm) i w zimie masy powietrza polarno-kontynentalnego (Pk). W skali roku dominują wiatry z sektora zachodniego (46,3%), na co wpływ ma przewaga mas powietrza polnomorskiego (57,8%) (Zinkiewicz, Zinkiewicz 1975). Wiatry z sektora wschodniego stanowią 33,9%. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 7,4°C. Najcieplejszym miesiącem jest lipiec ze średnią temperaturą 18,3°C, a najzimniejszym styczeń o średniej temperaturze powietrza równej -4,3°C. Średnia roczna amplituda temperatury powietrza sięga 22–23°C. Pokrywa śnieżna utrzymuje się od 70 do 80 dni w roku. Czas trwania okresu wegetacyjnego wynosi 210 dni. Średnia roczna suma opadów z lat 1948–1967 równa jest 553 mm. Najwięcej opadów

występuje w czerwcu, lipcu i sierpniu. Ponad dwukrotnie mniej jest ich w miesiącach zimowych, w styczniu i lutym.

#### PODSTAWY TEORII ALGORYTMU USLE/USPED

Symulacja zagrożenia erozją wodną gleb przeprowadzona dla wyżej opisanego obszaru testowego bazuje na oryginalnym równaniu USLE (*Universal Soil Loss Equation*), które zostało opracowane w University of Missouri w 1978 roku przez W. H. Wischmeiera oraz D. D. Smitha. Równanie to opiera się na formule wyrażonej w postaci iloczynu logicznego:

$$E = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

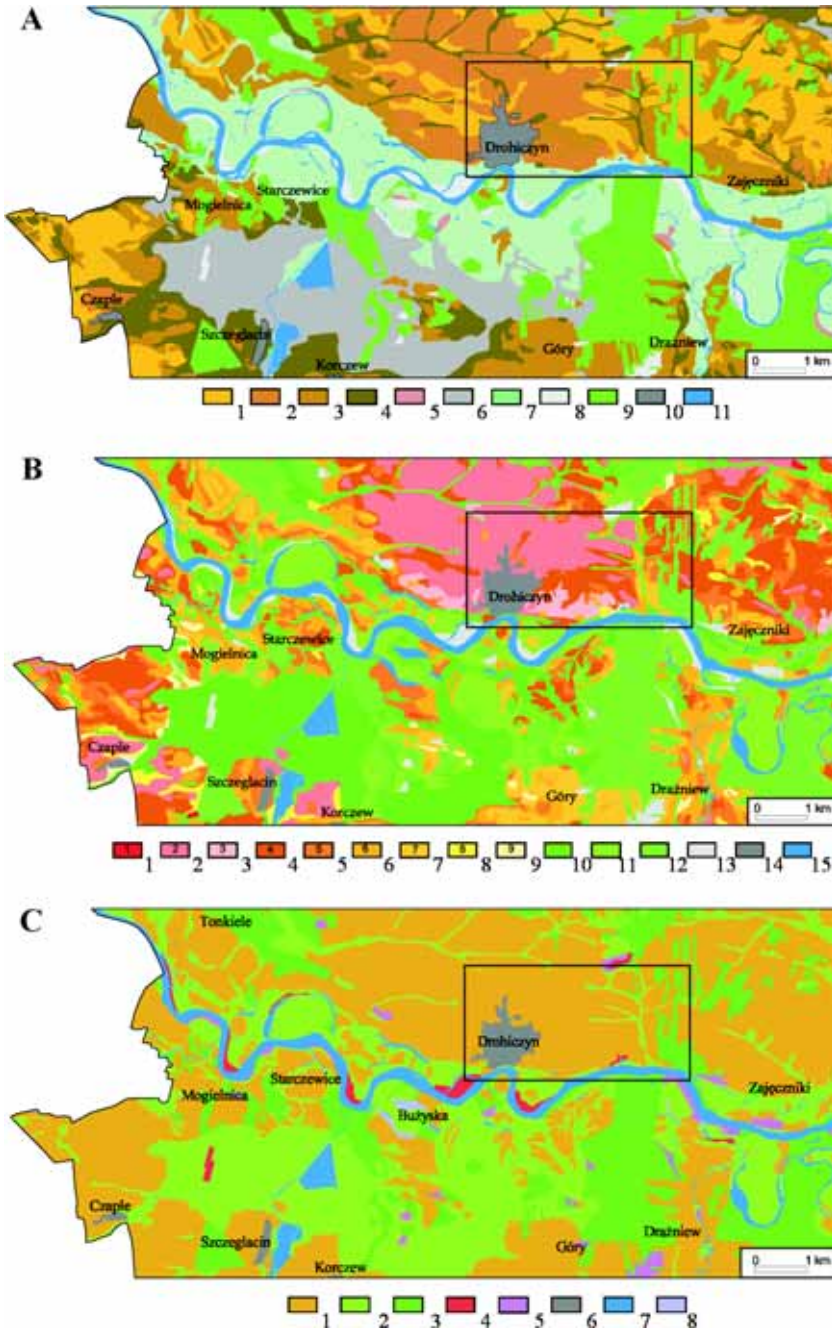
gdzie: E – strata gleby przypadająca na jednostkę powierzchni w jednostkach użytych dla czynnika R i K; R – wskaźnik rocznej erozyjności opadu i spływu powierzchniowego (jednostki US lub SI); K – wskaźnik podatności gleby na erozję (jednostki US lub SI); L – wskaźnik długości stoku (bezwymiarowy); S – wskaźnik nachylenia stoku (bezwymiarowy); C – wskaźnik ochronny roli pokrywy roślinnej (bezwymiarowy); P – wskaźnik ochronnej roli zabiegów przeciwoerozyjnych (bezwymiarowy).

Model USPED (Unit Stream Power based Erosion/Deposition) jest modyfikacją empirycznego równania USLE, w której formuła L (długość stoku) i S (nachylenie stoku) zostały bardziej skomplikowane (Mitas, Mitasowa 1998). Moore i Burch (1986) wprowadzili nowy bezwymiarowy współczynnik, będący miarą zdolności transportowania osadu (T). Charakter tego wskaźnika pozwolił uznać go za jednostkę wielkości potencjału erozji/depozycji, której wartości ujemne świadczą o nasileniu zjawisk erozyjnych i analogicznie wartości dodatnie – o przeważającej depozycji materiału glebowego.

Ponieważ cechy morfologiczne stoku warunkują sposób, w jaki odbywa się spływ powierzchniowy wody, w modelowaniu założono, iż proces ten dotyczy obliczeń w polach powierzchni spływu. Długość zbocza (L) zastąpiona została zatem przez komórki rastra. Jednostkowa powierzchnia obszaru zasilania rozumiana jest więc jako iloraz pola powierzchni jej obszaru zasilania i odległości, którą pokonuje woda przemieszczając się wewnątrz tej komórki (Drzewiecki, Mularz 2005). Teoretyzowanie zjawiska wzbogacone zostaje tym samym o wpływ koncentracji spływającej wody (Mitasowa i in. 1999).

Powyższą sytuację wyraża zdolność transportowa osadu (T) zdefiniowana wzorem (Moore, Wilson 1992):

$$LS = T = A^m(\sin\beta)^n$$



gdzie: A – jednostkowa powierzchnia zasilania [ $\text{m}^2/\text{m}$ ], b – nachylenie powierzchni terenu [ $^\circ$ ], m, n – współczynniki.

Wskaźnik ten został obliczony dla opadu efektywnego i niezmiennego w czasie spływu powierzchniowego.

W procesie tworzenia modelu potencjalnej straty gleby przyjęto za miarę erozji/depozycji dywergencję strumienia osadu (*vide* Mitasowa i in. 1999). Zatem ostatecznie formuła ta ma postać:

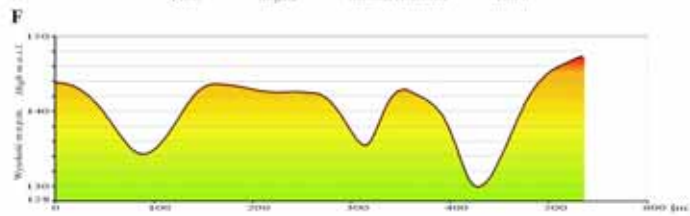
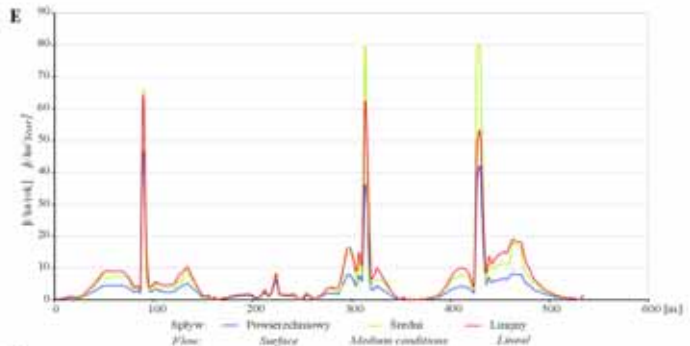
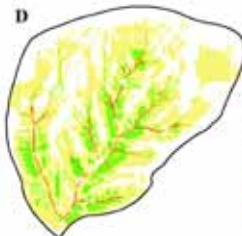
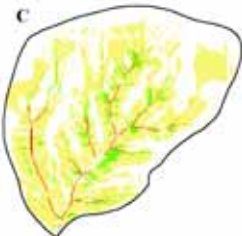
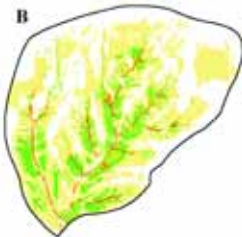
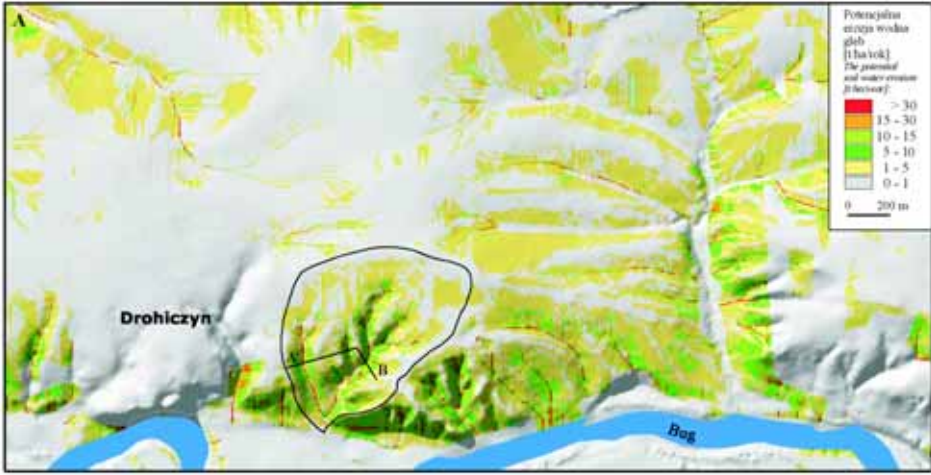
$$D = \text{div}(T \cdot s) = d(T \cdot \cos \alpha)/dx + d(T \cdot \sin \alpha)/dy$$

gdzie:  $T = A^m (\sin \alpha)^n$  – zdolność transportowania osadu, s – wektor jednostkowy w kierunku spływu,  $\alpha$  – ekspozycja powierzchni terenu [ $^\circ$ ].

Istotne znaczenie posiadają wartości współczynników  $m$  i  $n$ , które określają charakter erozji wodnej. Duże wartości  $m$  dotyczą erozji żłobinowej, zaś małe określają erozję powierzchniową (Foster 1990). Przyjmuje się, iż w przypadku sytuacji pierwszej  $m = 1,6$  i  $n = 1,3$ . Natomiast  $m = n = 1$  właściwe są dla sytuacji drugiej (Mitasowa i in. 1999). Rekalibracja warunków prowadząca do uśrednienia natężenia zjawiska erozji pozwala na zastosowanie wartości  $m = 1,4$  i  $n = 1,2$  dla większości modeli (Mitasowa i in. 2003).

Ryc. 4. Położenie obszaru badań; A – na tle pokrywy glebowej terenu: 1 – bielice i płowe, 2 – brunatne właściwe, 3 – brunatne wylugowane i kwaśne, 4 – czarne ziemie i gleby szare, 5 – torfowe, 6 – glejowe aluwialne, 7 – glejowe; inne: 8 – nieużytki, 9 – lasy, 10 – tereny zabudowane, 11 – woda (na podstawie *Mapy glebowo-rolniczej Polski w skali 1:25 000*); B – kompleksów rolniczej przydatności gleb: 1 – pszeniczny bardzo dobry, 2 – pszeniczny dobry, 3 – pszeniczny wadliwy, 4 – żytni bardzo dobry, 5 – żytni dobry, 6 – żytni słaby, 7 – żytni bardzo słaby, 8 – zbożowo-pastewny mocny, 9 – zbożowo-pastewny słaby; kompleksy trwałych użytków zielonych: 10 – średnie, 11 – słabe i bardzo słabe; 12 – lasy; 13 – nieużytki rolnicze; inne: 14 – tereny zabudowane, 15 – wody (na podstawie *Mapy glebowo-rolniczej Polski w skali 1:25 000*); C – użytkowania terenu: 1 – grunty orne, 2 – trwałe użytki zielone, 3 – lasy, 4 – nieużytki rolnicze, 5 – gleby rolniczo nieprzydatne, 6 – tereny zabudowane, 7 – wody, 8 – wody nieużytki (na podstawie *Mapy glebowo-rolniczej Polski w skali 1:25 000*)

Fig. 4. Localization of research area; A – according to soil cover of the terrain: 1 – podzols and luvisols, 2 – cambisols suitable, 3 – sour cambisols, 4 – black soils and grey soils, 5 – peaty soils, 6 – alluvial soils, 7 – gley soils, Other: 8 – wastelands, 9 – forests, 10 – built-up areas, 11 – water areas (on the basis of Soil-Agronomic Map of Poland, 1:25 000); B – according to complexes of agronomic utility of soils: complexes of arable soils: 1 – wheat very good, 2 – wheat good, 3 – wheat imperfect, 4 – rye very good, 5 – rye good, 6 – rye poor, 7 – rye very poor, 8 – corny-grazing strong, 9 – corny-grazing poor; complexes of green grounds, 10 – medium, 11 – poor and very poor, 12 – forests, 13 – agronomic wastelands; Other: 14 – built-up areas, 15 – water areas (On the basis of Soil-Agronomic Map of Poland, 1: 25 000); C – according to land utilization: 1 – farming grounds, 2 – permanent green grounds, 3 – forests, 4 – agronomic wastelands, 5 – agronomical unusable soils, 6 – built-up areas, 7 – water areas, 8 – water wastelands (On the basis of Soil-Agronomic Map of Poland, 1:25 000)



Klasy zagrożenia erozją wodną gleb (wg Marksa i in. 1989)  
Classes of water erosion hazard by Marks and others (1989)





Z uwagi na charakter (szczególnie w opracowaniach geomorfologicznych) i skalę badań podane wartości współczynników  $m$  i  $n$  można wykorzystać, stosując kryterium klimatyczno-hydrologiczne. Podczas analiz wieloletnich właściwie wydaje się stosowanie wartości charakteryzujących spływ powierzchniowy dla roku suchego, a wartości określające spływ żłobinowy – dla roku wilgotnego. Natomiast w świetle badań pojedynczych zjawisk opadowych, najczęściej o charakterze ekstremalnym, dominującym sposobem ruchu wody na powierzchni stoku jest spłukiwanie liniowe.

Uzyskane wielkości potencjalnej straty gleby w modelu USPED mają charakter przybliżony, a korelacja z wynikami otrzymanymi w modelu USLE możliwa jest dopiero po przeprowadzeniu odpowiedniej korekty ilościowej. Konwersja danych może również dotyczyć jednostek miar wskaźników ujętych w dwóch układach: w układzie US (amerykański) lub SI (franc. *Système International d'Unités*) (tab. 1).

Tab. 1. Jednostki parametrów modelu USLE oraz sposób ich konwersji pomiędzy układami US i SI (Renard i in. 1996)

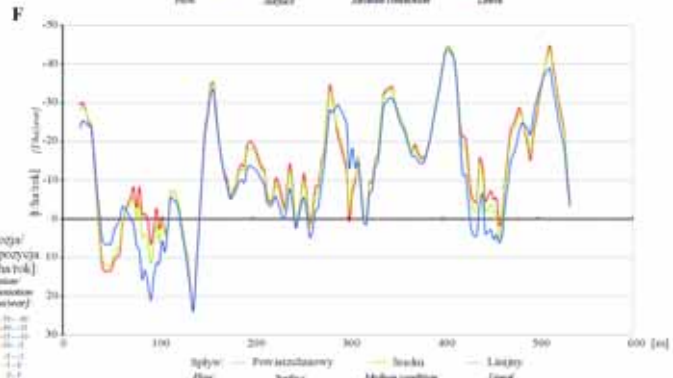
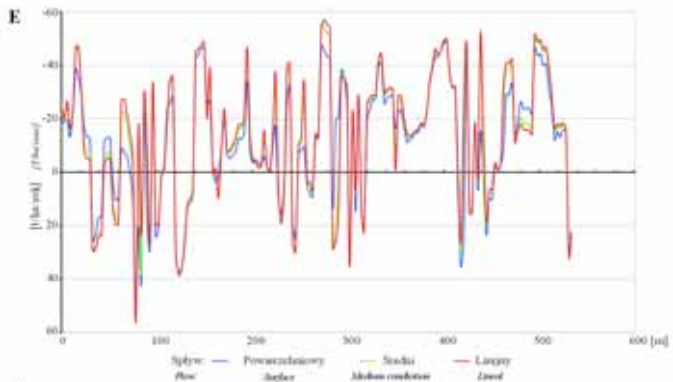
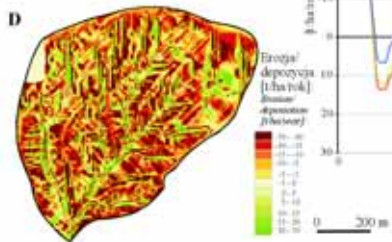
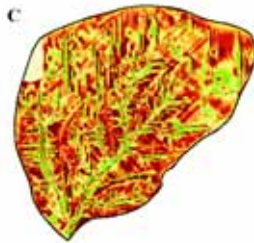
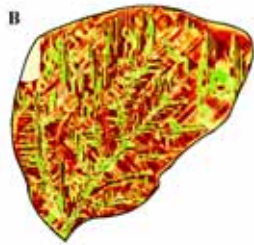
Table 1. The units of parameters of USLE model and a method of their conversion between US and SI system (Renard et alia, 1996)

Wskaźnik	Jednostka US	Sposób konwersji (mnożenie)	Jednostka SI
Opad	inch/hour	25,4000	mm/h
Powierzchnia	acre	0,4071	Ha
Energia	foot*tonf	2,7124	MJ
EI	(foot*tonf*inch)/(acre*hour)	0,1702	(MJ*mm)/(ha*h)
R	(foot*tonf*inch)/(acre*hour year)	17,0200	(MJ*mm)/(ha*h)
K	(foot*tonf*inch)/(acre*hour year)	0,1317	(t*ha*h)/(ha*MJ*mm)
E	ton/acre	2,2420	t/ha
E	ton/acre	0,2242	kg/m <sup>2</sup>

Należy podkreślić, że zdolność transportowa osadu (T) determinuje również praktyczne zastosowanie określonego modelu. Symulacja zakładająca nieograniczoną zdolność transportowania osadu, czyli właściwa dla modelu USLE, powinna być stosowana w sytuacji analizy probabilistycznej zjawiska erozji spowodowanej przez duże i intensywne opady oraz dla gleb o bardzo małych wymiarach cząstek glebowych, głównie pyłowych. Natomiast modele opierające się na

Ryc. 5. Model USLE; A – zagrożenie potencjalną erozją wodną gleb w obszarze testowym; B – w wyniku spływu liniowego; C – w wyniku spływu powierzchniowego; D – w warunkach uśrednionych; E – wykres potencjalnej straty gleby wzdłuż przekroju poprzecznego; F – przekrój poprzeczny terenu

Fig. 5. The USLE model; A – the potential soil water erosion hazard in the research area; B – as a result of lineal flow; C – as a result of surface flow; D – in medium conditions; E – the graph of potential soil loss longwise the transversal section, F – the transversal profile



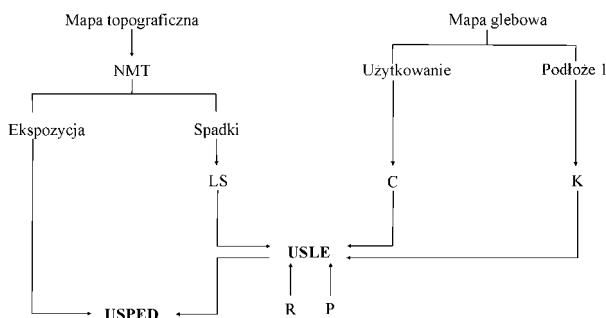
ograniczonej zdolności transportowej strumienia wody, w tym model USPED, lepiej nadają się do konstruowania potencjalnej erozji zachodzącej w dłuższych okresach czasu i w środowisku gleb o dużych cząstkach, jak na przykład piaski (Mitasowa i in. 2003).

#### METODYKA PRACY

Założona symulacja zjawiska potencjalnej erozji wodnej gleb ma wymiar teoretyczny. W związku z tym pełny opis powinien uwzględniać 3 etapy. Pierwszy etap, czyli wybór modelu oraz jego odpowiednia modyfikacja w zależności od celu i miejsca przeprowadzonej symulacji został określony powyżej. Przechodząc do etapu drugiego, należy rozwiązać model. Czynność ta polega na wyznaczeniu wielkości wskaźników składających się na zapis algorytmu USLE/USPED.

Do parametrów mierzalnych eksperymentalnie należy erozyjność opadu (R), podatność gleby na erozję (K), ochronna rola pokrywy roślinnej (C) i zabiegów przeciwoerozyjnych (P). Warstwa LS nazywana wskaźnikiem topografii terenu została obliczona na podstawie formuły, która wykorzystuje ujęcie powierzchniowe obliczeń (Moore i in. 1993). Stanowi ona jednoznacznie zdefiniowany współczynnik iloczynowy logicznego rozpatrywanego algorytmu będący integracją cyfrową cech morfologicznych określonych przez hydrologiczne parametry stoku.

Model USLE/USPED obliczono na drodze analiz w Map Calculator programu ArcView 3.2, wykorzystując pięć warstw rastrowych. Schemat postępowania analitycznego wygląda następująco:



Ryc. 6. Model USPED; A – zagrożenie potencjalną erozją wodną gleb w obszarze testowym; B – w wyniku sływu liniowego; C – w wyniku sływu powierzchniowego; D – w warunkach uśrednionych; E – wykres potencjalnej straty gleby i depozycji wzdłuż przekroju poprzecznego; F – linie trendu średniej ruchomej (okres 7)

Fig. 6. The USPED model; A – the potential soil water erosion hazard in the research area; B – as a result of line flow; C – as a result of surface flow; D – in medium conditions; E – the graph of potential soil loss and deposition longwise the transversal section, F – trend line of moving average (period 7)

Podstawową warstwę tematyczną opracowano na podstawie skalibrowanych i zwektoryzowanych analogowych map topograficznych w skali 1:10 000, digitalizując w temacie liniowym treść hipsometryczną. Numeryczny model terenu o rozdzielczości 3 m wykonano w programie ArcInfo. W celu uzyskania modelu poprawnego hydrologicznie, należy „wypełnić” dema (*fill a dem*), korzystając z rozszerzenia DNR Hydrology Extension w ArcView. Opracowany numeryczny model terenu stanowi warstwę wyjściową dla mapy spadków i ekspozycji stoków.

Dwie następne warstwy K i C stworzono na bazie danych uzyskanych z mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000 przetworzonej do postaci numerycznej. Tabela danych powinna zawierać dwie kolumny z informacją na temat utworów powierzchniowych (Podłoże 1) oraz kompleksów opisujących pokrycie powierzchni topograficznej terenu (Użytkowanie). Ekwiwalentem parametru K jest odpowiednia generalizacja utworów powierzchniowych pod względem podatności na erozję wodną dokonana na podstawie podziału zaproponowanego przez Józefaciuków (1975). Waloryzację utworów pierwszego podłoża w granicach obszaru testowego przedstawia tab. 2.

Tab. 2. Wartości wskaźnika podatności utworów powierzchniowych na erozję  
Table 2. The values of the index of susceptibility to surface erosion

Utwory powierzchniowe	Gleby	Podatność na erozję K [SI]
Pyły	Bardzo silnie podatne	0,09
Piaski	Silnie podatne	0,07
Gliny	Średnio podatne	0,05
Żwiry	Słabo podatne	0,03
Inne	Bardzo słabo podatne	0,01
Obszary nierolnicze	—	0,00

Klasyfikacja form użytkowania terenu (C) wymaga podobnej generalizacji treści i przypisania odpowiedniej wartości erozyjnej (tab. 3). W tym celu oba stworzone tematy poddano konwersji do postaci grida, a następnie dokonano reklasyfikacji, sprowadzając do wartości określonych powyżej. Wartości gridowe wskaźników K i C powinny być liczbą całkowitą, dlatego też należy pomnożyć grida przez 100 lub 1000 (*vide* Mitas, Mitasova 1998).

Wartość wskaźnika C jest bezpośrednio związana z fazami rozwoju roślinności a tym samym pośrednio uzależniona jest także od okresów występowania deszczy wywołujących erozję (Józefaciukowie 1996). Erozyjność deszczu, określona według kryterium USLE (Gliński 2005), wyraża się zmienną wartością w zależności od okresu rozwoju roślinności. W związku z tym przyjęte wartości ochronnej działalności roślin stanowią funkcję średniej rocznej sytuacji stanu wegetacji pokrywy roślinnej badanego regionu. Obszar upraw rolnych potrakto-

wano jako jedną grupę gruntów ornych, rezygnując z rozwarstwienia na poszczególne rodzaje roślin uprawowych. Wartość wskaźnika C modyfikuje również sposób uprawy (konwencjonalny lub inny). W kontekście natury rozważanego problemu w założonej symulacji zjawiska poziom istotności wymienionych wyżej warunków został zmarginalizowany. Natomiast w szczegółowej analizie oceny degradacji profilu glebowego w wyniku erozji wodnej wszystkie czynniki muszą być uwzględnione.

Tab. 3. Wartości wskaźnika ochronnej roli pokrywy roślinnej  
Table 3. The values of the index of vegetable cover protective role

Użytkowanie terenu	Wskaźnik C
Ugórze	1
Grunty orne	0,5
Użytki zielone	0,005
Lasy	0,003
Wody	0
Zabudowa	0

Parametry R i P na badanym obszarze nie stanowią warstwy, ale mają wymiar liczbowy. Z uwagi na dość skomplikowany charakter wskaźnika erozyjności opadu i spływu powierzchniowego (R) oraz małą powierzchnię obszaru testowego zastosowany skrót obliczeniowy nie jest sprzeczny z rozbudowaną konstrukcją matematyczną parametru, na którą składają się: erozyjność deszczów i spływów powierzchniowych ( $R_r$ ) oraz erozyjność spływów roztopowych ( $R_s$ ):

$$R = R_r + R_s$$

Erozyjność opadu określa się na podstawie wzoru wyprowadzonego z porównawczej analizy statystyczno-matematycznej wyników badań eksperymentalnych (Wischmeier, Smith 1965):

$$R_{r_j} = (E_k \cdot I_{30})/100$$

$R_{r_j}$  – erozyjność opadu [(MJ·cm)/(ha·h)],  $E_k$  – energia kinetyczna deszczu [J/m<sup>2</sup>],  $I_{30}$  – maksymalna 30-minutowa intensywność opadu deszczu [cm/h], 1/100 – współczynnik przeliczeniowy z J/m<sup>2</sup> na MJ/ha.

Czynnik ten zróżnicowany jest w skali czasu opisującej natężenie opadu. Erozyjność opadu ( $R_r$ ) jest zatem sumą indeksów erozyjności opadu (Józefaciukowie 1996). Natomiast wskaźnik erozyjności spływów roztopowych ( $R_s$ ) ma charakter orientacyjny i w przybliżeniu stanowi 1/10 sumy opadów w mm w okresie grudzień–marzec (Gliński 2005).

Na badanym obszarze testowym dla parametru R przyjęto szacunkową wartość równą 53 MJ·ha<sup>-1</sup>·cm·h<sup>-1</sup>, którą odczytano z mapy przestrzennego zróżnicowania wskaźnika erozyjności opadów w Polsce autorstwa H. Lorenc, a zamiesz-

cononą w monografii A. i Cz. Józefaciuków (1995). Wskaźnik ten został obliczony na podstawie analizy zmodyfikowanego indeksu Fourniera w oparciu o średnie miesięczne i roczne sumy opadów (Fournier 1960; Renard, Freimund 1994; Sauerborn i in. 1999; Gabriels 2003; Licznar 2005).

W granicach obszaru testowego nie stosuje się zabiegów przeciwoerozyjnych a uprawa odbywa się wzdłuż stoku. W związku z tym wskaźnik P przyjmuje najwyższą wartość równą 1 (Wischmeier, Smith 1978).

Rozwiązany model USLE/USPED zrealizowano metodą integracji analitycznej cyfrowych warstw tematycznych w sposób zaproponowany przez H. Mitasową (1999), dla trzech różnych sytuacji w zależności od charakteru spływu. Owe sytuacje otrzymano w wyniku zmiany wartości współczynników  $m$  i  $n$ , o czym była mowa w poprzednim rozdziale. Klucz obliczeń został przedstawiony poniżej:

```

Model USLE
Dane:
R= 53, P= 1, LS = „lsfac”
Grid: NMT (rozdzielczość 3 m), K, C
Obliczenia:
1. NMT
Derive slope (temat spadki)
2. Map Calculator
([[dem].FlowDirection(FALSE)].FlowAccumulation(NIL))
temat flowacc
((([flowacc]*3/22.1).Pow(0.6))*((([spadki]*0.01745).Sin)/0.09).Pow
(n))*m)
temat lsfac
3. ([K]*[C]*[lsfac]*53*1)
temat strata-gleby
4. Reklasyfikacja tematu

Model USPED
Obliczenia:
1. NMT
Derive slope (temat spadki)
Derive Aspect (temat ekspozycja)
2. Map Calculator
([[dem].FlowDirection(FALSE)].FlowAccumulation(NIL))
temat flowacc
3. (([flowacc] *3).Pow(m))*((([spadki]*0.01745).Sin).Pow(n))
temat sflowtopo
((((([ekspozycja]*(-1))+450)*0.01745).Cos)*[sflowtopo]*[K]*[C]*53)
temat qsx
((((([ekspozycja]*(-1))+450)*0.01745).Sin)*[sflowtopo]*[K]*[C]*53)
temat qsy
4. qsx
Derive slope (temat qsx-spadki)
Derive aspect (temat qsx-ekspozycja)
5. qsy
Derive slope (temat qsy-spadki)
Derive aspect (temat qsy-ekspozycja)

```

```

6. Map Calculator
((((([qsx-ekspozycja]*(-1))+450)*0.01745).Cos)*([qsx-spadki]
*0.01745).Tan)
temat qsx-d
((((([qsy-ekspozycja]*(-1))+450)*0.01745).Sin)*([qsy-spadki]
*0.01745).Tan)
temat qsy-d
[qsx-d] + [qsy-d]
temat erozja-depozycja
7. Reklasyfikacja tematu

```

Ponieważ rozpiętość skali wartości w otrzymanej symulacji straty gleby w obu założonych modelach jest znaczna, a jej wartości maksymalne osiągają wielkości realnie niemożliwe, należy dokonać reklasyfikacji tematów, która decyduje o czytelności i poprawności merytorycznej otrzymanego obrazu. Wcześniej należy pamiętać o odpowiednim pomniejszeniu wyniku ze względu na dokonany iloczyn podczas generacji warstwy K i C. Zgodnie z klasyfikacją autorstwa Marksa i in. (1989) wydzielono 6 stref, które definiują stopień zagrożenia potencjalną erozją wodną gleb (tab. 4). Powyższa propozycja została opracowana dla danych uzyskanych w modelu USLE. Natomiast osobnej klasyfikacji wymaga model USPED, która posiada zazwyczaj wymiar indywidualny dla każdego obszaru testowego.

Tab. 4. Klasy zagrożenia erozją wodną wg Marksa i in. (1989)  
Table 4. Grades of water erosion hazard by Marks and others (1989)

Klasa	t/ha/rok	Zagrożenie erozja
I	< 1	brak
II	1-5	bardzo małe
III	5-10	małe
IV	10-15	średnie
V	15-30	wysokie
VI	> 30	bardzo wysokie

## INTERPRETACJA WYNIKÓW

Ostatni etap opisu dotyczy właściwej interpretacji dokonanej symulacji zjawiska. W tym celu pomocne okaże się porównanie obu modeli oraz wykazanie różnic w obrębie jednej symulacji w modyfikacji trzech założonych sytuacji. Aspekt geometryczny (przestrzenny i ilościowy) przeprowadzonego modelowania służy analizie graficznej i statystycznej uniwersalnego równania potencjalnej straty gleby.

## INTERPRETACJA EROZYJNA

W granicach obszaru testowego zagrożenie potencjalną erozją wodną gleb jest bardzo małe. Układ przestrzenny największych wartości rzędu powyżej 30 t/ha/rok ma charakter liniowy i jest związany z osiami suchych dolinek erozyjno-denudacyjnych rozcinających powierzchnię wysoczyzny morenowej. Na stokach zakładana maksymalna strata gleby waha się od 5 do 15 t/ha/rok (ryc. 5A). Symulacja USPED przedstawionego układu erozja/depozycja w postaci ilościowej wykazała wartości zawyżone w porównaniu do modelu USLE. Przyjęta relatywna skala odniesienia potencjalnej straty gleby opisuje stoki wielkością rzędu od 10 do 40 t/ha/rok, lokalnie wskazując miejsca nawet powyżej 40 t/ha/rok (ryc. 6A). Depozycja materiału glebowego charakteryzuje natomiast powierzchnie morfologicznie płaskie, jak powierzchnie teras rzecznych i zrównania podstokowe oraz dna większych dolin erozyjno-denudacyjnych. W dwóch ostatnich wymienionych miejscach procesy depozycji osiągają największe natężenie, które model opisuje wartością 30 t/ha/rok.

## INTERPRETACJA METODYCZNA

Wynik symulacji w modyfikacji trzech różnie zdefiniowanych wartości parametrów  $m$  i  $n$  jest punktem wyjścia do głębszej analizy, którą oparto na interpretacji profilu poprzecznego w uzyskanym modelu deterministycznym, w granicach wybranej zlewni obszaru testowego. Wyeksponowany obszar zlewni modelu USLE będący emanacją erozji żłobinowej (ryc. 5B), powierzchniowej (ryc. 5C) i warunków uśrednionych (ryc. 5D) wyraźnie wskazuje na zróżnicowaną przestrzenną rozpiętość klas erozyjnych. Sytuację tę potwierdza wykres liniowy przekroju poprzecznego dla każdej założonej sytuacji (ryc. 5E). Analiza biegu krzywej skorelowana z morfologią terenu (ryc. 5F) pozwala na wydzielenie trzech własności układu: na wierzchołkach linie zbiegają się ze sobą i dążą do zera; na stokach różnice w wartościach erozji są najbardziej widoczne, ale są one ze sobą kompatybilne; w osiach dolin występują największe odchylenia wartości, które prowadzą do przekłamania obrazu i wymagają odpowiedniego uśrednienia.

W interpretacji modelu USPED zamkniętego granicą zlewni o dominującym spływie liniowym (ryc. 6B), powierzchniowym (ryc. 6C) i o charakterze nieokreślonym dominantą (ryc. 6D) stopień skomplikowania własności wykresu jest duży. Krzywa erozji została zniekształcona przez model wartości depozycji (ryc. 6E). Wzajemne relacje trzech krzywych można odczytać, wykreślając linię trendu średniej ruchomej. Propozycję tę popiera argument czytelności i zachowanej poprawności matematycznej układu. Ze względu na dość chaotyczny obraz wartoś-



ci, linię trendu wyznaczono dla okresu równego 7 (ryc. 6F). Pozwoliło to na wyeliminowanie drobnych i licznych fluktuacji depozycyjnych wykresu i jednocześnie zachowanie na otrzymanym obrazie krzywej ogólnych tendencji sytuacyjnych badanego obszaru w komplikacji z powierzchnią topograficzną terenu. Z analizy wykresu wynika, iż cechą charakterystyczną krzywych jest względna korelatywność ich wartości po stronie erozyjnej wykresu. Zatem w symulacji USPED otrzymaliśmy wyniki bardziej zbliżone do siebie niż w modelu USLE.

## WNIOSKI

Powyższa analiza teoretycznych założeń opisywanych modeli zagrożenia potencjalną erozją wodną gleb pozwoliła na wybranie odpowiednich wartości parametrów algorytmów. Wszystkie one posiadają wartość uśrednioną, ponieważ wyznaczone zostały na drodze eksperymentu. Jednakże użyte przybliżenie nie może wywierać decydującego wpływu na otrzymane wyniki symulacji. Funkcję tę powinien spełniać rodzaj wybranego modelu. Zrealizowane modele potwierdzają powyższą tezę, czego dowodem jest rozpiętość skali wartości oraz przestrzenne zróżnicowanie klas erozyjnych w obszarze testowym.

Dokonana interpretacja założonej symulacji zjawiska erozji wodnej gleb upoważnia do wyciągnięcia następujących wniosków:

- Parametry  $m$  i  $n$  posiadają istotny wpływ na wynik modelowania. Małe zmiany wartości tych parametrów powodują wyraźne zmiany własności obrazu wynikowego.

- Algorytm USLE/USPED wykazuje tendencję do zawyżania maksymalnych wysokości wartości erozji, które sprowadzają się do liczb absurdalnie wysokich. Natomiast lepiej sprawdza się w klasach wartości umiarkowanych.

- W wyniku symulacji zgodnie z algorytmem USPED otrzymano większe wartości potencjalnej straty gleby niż w przypadku modelu USLE.

- Model USPED w modyfikacji trzech form spływu charakteryzuje mniejszą rozbieżność wartości erozji wodnej gleb w porównaniu do tych samych sytuacji w modelu USLE

Synteza wyników i uwag płynących z analizy obu zrealizowanych modeli jednoznacznie wskazuje na miejsca szczególnie podatne na erozję wodną gleb. Jednakże na badanym obszarze, na którym zalegają głównie utwory piaszczyste, lepsze rezultaty w kategorii zróżnicowania wartości erozji uzyskano w modelowaniu USPED. Natomiast drugi model wizualnie zapewnia łatwiejszą interpretację mającą na celu generalizację waloryzacji erozyjnej terenu.

Z uwagi na dość skomplikowane sensy teoretycznych założeń warstw obliczeniowych i wyników, stosowanie przedstawionych modeli deterministycz-

nych powinno być poparte badaniami terenowymi, które pomogą określić charakter warunków lokalnych badanego obszaru. Weryfikacja empiryczna potwierdza wiarygodność uzyskanych danych symulacyjnych, aczkolwiek nie zawsze jest możliwa do przeprowadzenia. W takiej sytuacji wyniki powinny być traktowane jako dane szacunkowe.

Zaprezentowana metoda może być wykorzystywana do oceny geometrycznej struktury przestrzennej zjawiska erozji wodnej w opracowaniach geomorfologicznych, zwłaszcza w morfodynamice i przekształcaniu powierzchni stokowych (redukowanie i nadbudowywanie). Ważną bazę danych stanowi w zakresie oceny skutków geomorfologicznych będących konsekwencją zdarzeń ekstremalnych, np. gwałtownych ulew lub roztopów w obszarach szczególnie istotnych dla rolnictwa.

#### LITERATURA

- Drzewiecki W., Mularz S. (2001): *Modelowanie erozji wodnej gleb z wykorzystaniem GIS. Materiały Konferencji Naukowej nt. „Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska”, 22 września 2001*, Wyd. Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.
- Drzewiecki W., Mularz S. (2005): *Model USPED jako narzędzie prognozowania efektów erozji i depozycji materiału glebowego*, Roczniki Geomatyki (Annals of Geomatics), t. III, z. 2, Warszawa: 45–54.
- Foster G. R. (1990): *Process-based modeling of soil erosion by water on agricultural land*, [w:] J. Boardman, I. D. Foster, J. A. Dearing (red.), *Soil Erosion an Agricultural Land*, John Wiley&Sons.
- Fournier F. (1960): *Climat et erosion*, Presse Univ., de France, Paris.
- Gabriels D. (2003): *Rainfall erosivity and rainfall concentration in Europe. COST 623 Final Conference ‘Soil Erosion and global Change’, July 5–8, Budapest, Hungary*.
- Gliński P. (2005): *Model transportu zanieczyszczeń oraz gleby (erozja) z wodami powierzchniowymi w obrębie obiektu. Zintegrowany system zabezpieczeń przeciwoerozyjnych i ochrony wód terenów wyżynnych intensywnie użytkowanych rolniczo*, Acta Agrophysica, 121: 49–62.
- Hołub B. (2006, niepublik.): *Morfologia doliny Bugu w okolicach Drohiczyzna*, INoZ UMCS, Lublin, praca magisterska (Archiwum Zakładu Geomorfologii).
- Józefaciuk A., Józefaciuk Cz. (1975): *Komentarz do instrukcji w sprawie inwentaryzacji gruntów zagrożonych erozją*, Wyd. IUNG, Puławy.
- Józefaciuk A., Józefaciuk Cz. (1995): *Erozja agroekosystemów*, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Józefaciuk A., Józefaciuk Cz. (1996): *Mechanizm i wskazówki badania procesów erozji*, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Kondracki J. (2000): *Geografia regionalna Polski*, PWN, Warszawa.
- Licznar P. (2005): *Ocena możliwości stosowania sztucznych sieci neuronowych dla określania średniej rocznej wartości wskaźnika erozyjności deszczy*, Acta Agrophysica, 5 (1): 65–74.
- Mapa glebowo-rolnicza Polski w skali 1:25 000, ark. Łosice, 1, 2.*

- Mapa glebowo-rolnicza Polski w skali 1:25 000, ark. Siemiatycze, 4, 5, 9.
- Marks R., Müller M. J., Leser H., Klink H.-J. (red.) (1989): *Anleitung zur Bewertung des Leistungsvermögens des Landschaftshaushaltes (BA LVL)*, Forschungen zur Deutschen Landeskunde Band 229, Zentralaussuss für deutsche Landeskunde, Selbstverlag, Trier.
- Mitas L., Mitasova H. (1998): *Distributed erosion modeling for effective erosion prevention*, Water Resources Research, 34, 3: 505–516.
- Mitasova H., Mitas L. (1999): *Modeling soil detachment with RUSLE 3D using GIS*, University of Illinois, Urbana – Champaign, IL.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Johnston D. M. (1998): *Multidimensional soil erosion/deposition modeling and visualization using GIS, Final report for USA CERL*, University of Illinois, Urbana – Champaign, IL.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Johnston D. M. (1999): *Terrain modeling and Soil erosion simulations for Fort Hood and Fort Polk test areas*, Annual report for USA CERL. University of Illinois, Urbana – Champaign, IL.
- Mitasova H., Brown W. M., Johnston D. M. (2003): *Terrain Modeling and Soil Erosion Simulation*, Final Report. University of Illinois, Urbana – Champaign, IL.
- Moore I. D., Burch G. J. (1986): *Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory*, Water Resources Research, 22.
- Moore I. D., Wilson J. P. (1992): *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplifield method of estimation*, Journal of Soil and Water Conservation, 47.
- Moore I. D., Turner A. K., Wilson J. P., Jenson S. K., Band L. E. (1993): *'GIS and land-surface-subsurface process modelling'*, [in:] M. F. Goodchild, B. O. Parks, L. T. Stayaert (red.), *Environmental modelling with GIS*: 213–230.
- Rejman J., Dębicki R. (2002): *Postęp metodyczny w opisie i badaniach procesów erozji wodnej gleb*, Acta Agrophysica, 63: 159–177.
- Renard K. G., Freimund J. R. (1994): *Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE*, Journal of Hydrology, 157: 287–306.
- Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C. (1996): *Predicting soil erosion by water. A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, Agricultural Handbook No. 703, USDA, Washington, DC.
- Sauerborn P., Klein A., Botschek J., Skowronek A. (1999): *Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models – methods and scenarios for a humid region*, Geoderma, 93: 269–276.
- Wischmeier W. H., Smith D. D. (1965): *Rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Guide for selection of practices for soil and water conservation*, Agriculture Handbook, No 282, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Wischmeier W. H., Smith D. D. (1978): *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*, Agricultural Handbook No. 537, USDA, Washington, DC.
- Zinkiewicz W., Zinkiewicz A. (1975): *Atlas klimatyczny woj. lubelskiego 1951–1960*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin.

## SUMMARY

The following article has a methodical character. There were made two models of water erosion hazard in three different modifications: surface flow, line flow and in medium conditions.

The research area is situated in the east part of Poland and comprises the Bug valley tract with an adjoining morainic plateau in a boundary of Drohiczyn borough. According to physico-geographical division of Poland (Kondracki 2000) this area involves two mesoregions: Wysoczyzna Drohicka and the Podlaski Gorge of the Bug River.

The USLE/USPED model was based on the analysis in Map Calculator (Arc View program) using a method of H. Mitasowa (1999) for three different situations depending on the character of the flow. Those situations were gained as a result of change of coefficient "m" and "n" value.

The result of simulations in modifications of three different defined values of parameters "m" and "n" is a starting point to precise analysis which had been based on interpretation of the transversal profile in gained deterministic model, in the boundaries of chosen drainage catchment of tested area. The analysis of the course of curved line correlated with terrain morphology allowed to show the differentiation of spatial extent of erosion classes depending on topographic area of terrain. However, a comparison of curved line course in three modifications in the model shows the rank of "m" and "n" factors as a result of final simulations.

Synthesis of the analysis results of two executed models unambiguously indicates zones of particular hazard of soil water erosion. Though on the study area, on which sandy materials are mainly deposited, better results in a category of value differentiation of erosion were obtained in USPED model. However, the second model gives an easier interpretation aiming at generalization of erosional evaluation. On account of pretty complicated assumptions of computable and resultant strata, the exertion of featured deterministic models should be supported by the field research which will help to define the character of local conditions of the study area.