

Model USPED¹ jako narzędzie prognozowania efektów erozji i depozycji materiału glebowego

Model USPED¹ as a tool for assessment of soil erosion and deposition effect

Wojciech Drzewiecki, Stanisław Mularz

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej

Słowa kluczowe: erozja gleb, modelowanie numeryczne, systemy informacji geograficznej

Key words: soil erosion, digital modelling, geographical information systems

Streszczenie

W artykule omówiono genezę i rozwój modelu USPED (*Unite Stream Power-based Erosion/Deposition*) oraz przedstawiono rezultaty jego zastosowania na posiadającym charakter wyżynny obszarze zlewni rzek: Prądnika i Dłubni. Teren ten pokrywają w przeważającej części gleby pyłowe wykształcone na lessach, co determinuje ich znaczną podatność erozyjną.

Modelowanie za pomocą formuły USPED zrealizowano adaptując do przetwarzania danych w systemie Idrisi32 algorytmy zaproponowane przez Mitasovą i in. (1999) dla programów ArcView i GRASS. Dla uzyskania ilościowego oszacowania wyerodowywanego materiału glebowego zastosowano parametry (R, C, K, P), zgodnie z oryginalnym równaniem USLE (*the Universal Soil Loss Equation*).

Wskaźnik erozyjności deszczu (R) obliczono na podstawie rozkładów średniomiesięcznych sum opadów, posługując się indeksem Fourniera, w modyfikacji zaproponowanej przez Arnoldusa (1977). Wskaźnik podatności gleby na erozję wodną (K) obliczono na podstawie równania Renarda i in. (1997). Wybór metody wynikał przede wszystkim z faktu, iż wymaga ona jedynie posiadania podstawowych informacji o granulometrii utworów glebowych. Wartość wskaźnika pokrywy roślinnej (C) określono na podstawie literatury. Wartości wskaźnika zabiegów przeciwoerozyjnych (P) przyjęto za Koreleskim (1992). Do ich określenia wykorzystano ortofotomapę satelitarną uzyskaną z panchromatycznego zobrazowania satelity IRS oraz Numeryczny Model Rzeźby Terenu.

Uzyskane wyniki stanowiły podstawę dokonania podziału obszaru testowego na strefy zagrożenia erozją wodną według kryteriów zaproponowanych przez Marksa i in. (1989). Jako osobną klasę przedstawiono tereny, na których model USPED prognozował występowanie depozycji.

¹ USPED -Unite Stream Power-based Erosion/Deposition

Wysokie i bardzo wysokie zagrożenie erozyjne prognozowane jest przez model USPED na obszarze obejmującym średnio 9,6% analizowanej powierzchni (10,3 % obszaru w zlewni Dłubni i 8,5% w zlewni Prądnika), brak zagrożenia występuje natomiast na 47,2% powierzchni obszaru testowego. Zgodnie z oczekiwaniami tereny użytków zielonych narażone są na erozję w mniejszym stopniu niż obszary gruntów ornyc. Spośród gleb analizowanego obszaru w największym stopniu zagrożone erozją są rędziny i lessy.

Zastosowanie modelu USPED pozwoliło również na określenie obszarów depozycji. Ich występowanie prognozowane jest w znacznej części obszarów pokrytych madami, co pozostaje w zgodności z genezą tych gleb. Znaczący udział obszarów depozycji prognozowany jest również dla obszarów występowania gleb pyłowych i pylastych (piasek słabogliniasty pylasty, piasek gliniasty mocny pylasty).

Przeprowadzone badania wykazały, iż model USPED stanowić może narzędzie modelowania zagrożenia gleb erozją wodną. Jego zastosowanie umożliwiło wygenerowanie, dla obszaru testowego, mapy stref zagrożenia erozją wodną, w oparciu o prognozowane przez model wielkości strat pokrywy glebowej. Zaletą modelu USPED, odróżniającą go od wielu innych modeli erozyjnych, jest niewątpliwie możliwość określania obszarów depozycji erodowanego materiału glebowego.

Wprowadzenie

Z punktu widzenia waloryzacji środowiska dla potrzeb planistycznych, jak i w kontekście praktyki rolniczej, istotna jest zarówno znajomość przestrzennego rozkładu obszarów, na których zjawisko erozji wodnej już występuje, jak i terenów zagrożonych (erozja potencjalna). Erozja wodna jest bowiem głównym procesem niszczącym pokrywę glebową, stanowiącym zagrożenie dla ponad połowy arealu gleb w Europie (por. Van Lynden, 1995; van der Knijff i in., 2000).

W modelowaniu procesów erozyjnych wyróżnić można dwa główne podejścia. W pierwszym przypadku zakłada się, iż nie istnieje ograniczenie ilości materiału glebowego, który może być transportowany przez spływający po stoku strumień wody, a co za tym idzie wielkość erozji determinowana jest przez możliwość odrywania cząstek glebowych. Tak sformułowane założenie powoduje, iż w oparciu o tego rodzaju modele nie można przewidywać obszarów depozycji materiału glebowego.

Do tego typu modeli erozyjnych należy najbardziej znany i powszechnie wykorzystywany w świecie model USLE (the *Universal Soil Loss Equation*) (Wischmeier i Smith, 1978) i jego późniejsza modyfikacja – model RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (Renard i in., 1991). Model USLE/RUSLE jest opracowaną w Stanach Zjednoczonych formułą empiryczną. Średni roczny ubytek gleby szacowany jest na podstawie równania:

$$A = R * K * L * S * C * P$$

gdzie:

A – masa gleby wyerodowana z jednostki powierzchni w ciągu roku [Mg/ha];

R – wskaźnik erozyjności deszczu i spływu dla danej lokalizacji [(MJ/ha)(cm/h)];

K – wskaźnik podatności gleby na erozję wodną [(Mg/ha)(MJ/ha)(cm/h)];

L – wskaźnik długości stoku (bezwymiarowy);

S – wskaźnik nachylenia stoku (bezwymiarowy);

C – wskaźnik pokrywy roślinnej (bezwymiarowy);

P – wskaźnik zabiegów przeciwoerozyjnych (bezwymiarowy).

Podjęcie to stosowane jest do oceny zagrożenia erozyjnego w wielu regionach świata, zarówno w skali pojedynczych pól jak i całych zlewni czy jednostek administracyjnych (niejednokrotnie o bardzo dużej powierzchni).

W modelach drugiego typu zakłada się, że istnieje ograniczenie ilości materiału glebowego, który może być transportowany przez spływającą wodę i że jego ilość znajduje się zawsze na granicy zdolności transportowej strumienia. W efekcie, w miejscach gdzie zdolność transportowa strumienia wody obniża się, modele te prognozują wystąpienie depozycji materiału glebowego. Przykładem tego rodzaju modeli jest analizowany w niniejszym artykule model USPED (*Unite Stream Power-based Erosion/Deposition*) (Mitasova i in., 1998).

W rzeczywistości pomiędzy przypadkami opisywanymi przez obydwa główne typy modeli występuje ciągła zmienność stanów ograniczanych częściowo jednym i drugim czynnikiem. Tą złożoność procesu uwzględniają modele fizyczne. Należą do nich m. in. WEPP (*Water Erosion Prediction Program*) (Laflen i in., 1991), EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) (Morgan i in., 1998) i SIMWE (*Simulation of Water Erosion*) (Mitas i Mitasova, 1998). Możliwości ich stosowania są jednak ograniczone z kilku względów. Po pierwsze, większość z nich opracowana została dla skali pojedynczych pól, a wiele również dla pojedynczych zjawisk opadowych. Ich zastosowanie w skali krajobrazu jest zwykle niemożliwe z powodu niemożności odpowiednio dokładnego określenia danych wejściowych (przede wszystkim parametrów gleby i pokrywy roślinnej) (por. van der Knijff i in., 2000). Po drugie wiele z tego typu modeli bazuje na jednowymiarowej analizie transportu osadu na płaskich fragmentach zbocza i w ograniczonym stopniu mogą uwzględniać wpływ zmienności rzeźby i różnic w pokryciu terenu, podczas gdy te właśnie czynniki w znacznym stopniu rzutują na przestrzenny rozkład procesów erozji i depozycji (Mitasova i in., 1998). Po trzecie wreszcie, nawet w przypadku gdy dysponujemy odpowiednimi danymi i zaawansowanymi modelami, to ich zastosowanie na znacznym obszarze wymaga mocy obliczeniowych komputerów wciąż jeszcze niedostępnych dla przeciętnego użytkownika (modele dwóch pierwszych typów są zwykle znacznie mniej wymagające obliczeniowo).

Zasadniczymi czynnikami wpływającym na wybór metody modelowania erozji jest zwykle dostępność odpowiednich danych oraz cel przeprowadzanej symulacji. Mitasova i in. (2003) podają, iż

modele ograniczone zdolnością odrywania cząstek glebowych nadają się przede wszystkim do modelowania erozji powstającej podczas dużych zjawisk opadowych oraz dla gleb o bardzo małych wymiarach cząstek glebowych. Modele ograniczane zdolnością transportową w większym stopniu nadają się do modelowania zjawiska erozji w dłuższych okresach czasu oraz dla gleb o dużych cząstkach (jak np. piaski). Dla oceny zagrożenia erozyjnego w skali krajobrazu zalecają oni łączną analizę wyników uzyskanych przy wykorzystaniu obu typów modeli.

1. Charakterystyka obszaru testowego i wykorzystane dane cyfrowe

W prezentowanej pracy przedstawiono próbę zastosowania modelu USPED do oceny zagrożenia erozyjnego na posiadającym charakter wyżynny obszarze zlewni Prądnika i Dłubni.

Obszar testowy w części zachodniej stanowi, według podziału Polski na jednostki fizyczno-geograficzne, fragment Wyżyny Olkuskiej (zwanej także Krakowską) należącej do Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Kondracki, 1988). W części wschodniej, obszar ten jest fragmentem Wyżyny Miechowskiej, część południowo-wschodnia natomiast należy do Płaskowyżu Proszowickiego – obie te jednostki wchodzi w skład Wyżyny Małopolskiej. Na Wyżynie Olkuskiej przeważają gleby wytworzone z lessów. Są to głównie gleby pseudobielicowe i pseudoglejowe oraz brunatne wylugowane. Na obszarze tym występują również rędziny jurajskie i gleby piaszczyste. Na Wyżynie Miechowskiej występują wytworzone z lessów gleby brunatne, czarnoziemy oraz rędziny kredowe. Gleby te zaliczyć można do najżyźniejszych w Polsce. W dolinach rzecznych obszaru badań występują mady, których skład zbliżony jest do lessu (Komornicki, 1980). Teren ten narażony jest na występowanie intensywnych procesów erozji wodnej (por. Starkel, 1991).

W pracy wykorzystano następujące dane cyfrowe:

- Numeryczny Model Rzeźby Terenu o rozdzielczości rastra 50 m pochodzący z Komputerowego Atlasu Województwa Krakowskiego (KAWK) (Bujakowski i in., 1998);
- Mapę gatunków i typów gleb (KAWK);
- rozkłady średniomiesięcznych sum opadów wyinterpolowane na podstawie danych punktowych (w stacjach pomiarowych) o średnich opadach miesięcznych z wielolecia 1975-1995 (por. Drzewiecki, 2003);
- ortofotomapę satelitarną uzyskaną z panchromatycznego zobrazowania satelity IRS (por. Drzewiecki, 2003);
- Mapę pokrycia/użytkowania terenu – Posłużono się mapą użytkowania uzyskaną poprzez zestawienie wybranych warstw mapy sozologicznej oraz mapy użytkownika z KAWK, zaktualizowaną w oparciu o zobrazowania satelitarne (por. Drzewiecki, 2003);

2. Model USPED – zastosowana metodyka

Model USPED wywodzi się od propozycji Moore'a i Burcha (1986a, 1986b). Dążąc do modyfikacji czynnika LS w modelu USLE autorzy ci zaproponowali obliczanie bezwymiarowego wskaźnika zdolności transportowania osadu:

$$T_{cj} = \left(\sum_{i \in C_j} (\mu_i a_i) / b_j \right)^m (\sin \beta_j)^n$$

gdzie:

μ_i – współczynnik wagowania ($0 \leq \mu \leq 1$) zależny od przyjętego modelu generowania spływu powierzchniowego i właściwości gleby (przepuszczalności);

a_i – powierzchnia i-tej komórki rastra;

b_j – rozdzielczość rastra;

β_j – nachylenie w stopniach;

m, n – współczynniki;

C_j – zbiór i-elementowy komórek połączonych w sensie hydrologicznym z komórką j .

Jednocześnie przedstawili oni również propozycję (Moore i Burch, 1986b) by zmianę zdolności transportowania osadu wyrażoną poprzez zmianę wskaźnika T przyjąć za miarę potencjału erozji/depozycji. Przyrost wartości wskaźnika T oznacza pojawienie się depozycji, natomiast ujemna zmiana jego wartości – erozji.

Wpływ ukształtowania terenu na zachowanie się wody spływającej po jego powierzchni oddany jest lepiej, gdy długość stoku w czynniku LS zastąpiona zostanie poprzez powierzchnię spływu, a właściwie poprzez wielkość będącą ilorzem powierzchni obszaru zasilania i długości danego fragmentu zbocza (jednostkową powierzchnię zasilania - *unit upslope contributing area*) (por. np. Moore i Wilson, 1992). Jeżeli elementy zbocza reprezentowane są poprzez komórki rastra, to jednostkową powierzchnię obszaru zasilania dla danej komórki otrzymamy dzieląc pole powierzchni jej obszaru zasilania (położonego powyżej obszaru, z którego spływa do niej woda) przez odległość, jaką przepływająca woda przebywa przemieszczając się wewnątrz tej komórki. Zastąpienie długości stoku jednostkową powierzchnią zasilania pozwala na uwzględnienie w modelu wpływu koncentracji spływającej wody (Mitasova i in., 1999).

Dla jednolitego opadu efektywnego i stałego w czasie spływu powierzchniowego zaproponowany wskaźnik zdolności transportowania osadu wyraża się wzorem (Moore i Wilson, 1992):

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

gdzie:

A – jednostkowa powierzchnia zasilania [m^2/m].

Mitasova i in. (1999) za miarę erozji i depozycji uznają dywergencję strumienia osadu (*divergence of the sediment flow*):

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

gdzie:

$T = A^m (\sin b)^n$ – zdolność transportowania osadu;

s – wektor jednostkowy w kierunku spływu;

$\alpha [^\circ]$ – ekspozycja powierzchni terenu.

Ze względu na brak stosownych prac eksperymentalnych mających na celu wyznaczenie parametrów niezbędnych do ilościowego oszacowania erozji w modelu USPED, stosuje się w nim parametry opracowane dla modelu USLE (R,C,K,P) (Mitasova i in., 1998), co pozwala otrzymać przynajmniej orientacyjne wartości erozji i depozycji. Otrzymywane rezultaty należy jednak traktować z ostrożnością, ponieważ parametry te wyznaczone zostały dla stoków jednostajnie nachylonych i aby otrzymać dokładną prognozę ilościową w warunkach urozmaiconej rzeźby terenu należałoby poddać je rekaliibracji (Foster, 1990; Mitasova i in., 1997). Z drugiej jednak strony w pewnych warunkach wskaźnik zdolności transportowania osadu stosowany w modelu USPED odpowiada wskaźnikowi LS modelu USLE (Moore i Wilson, 1992).

Mitasova i in. (1999) badali wpływ stosowanych w modelu USPED współczynników m i n na wielkość i rozkład erozji. Ich zdaniem, zgodne teoretycznie z RUSLE wartości $m = 1,6$ i $n = 1,3$ zdają się oddawać przestrzenny rozkład erozji w sytuacji przeważającej erozji żłobinowej, kiedy jej wielkość gwałtownie wzrasta wraz z ilością wody; wartości $m = n = 1$ odpowiadają warunkom przeważającej erozji powierzchniowej; wartości $m < 1$ oddają przestrzenny rozkład zjawiska mogący się pojawić przy niewielkich zjawiskach opadowych. W celu oszacowania wpływu, zarówno małych jak i dużych zjawisk opadowych i warunków, w których przeważa erozja powierzchniowa bądź żłobinowa zastosowali oni średnią z wyników uzyskanych dla modeli o wartościach $m = 0,6$, $1,0$, $1,6$. Z kolei, Mitasova i in. (2003) podają, iż dla większości zastosowań, w szczególności gdy modelowanie przeprowadza się dla wartości średnich, satysfakcjonujące rezultaty daje stosowanie wartości $m = 1,4$.

Przykłady zastosowań modelu USPED znaleźć można m.in. w publikacjach Warren i in. (2000), Pistocchi i in. (2002), Kandroka i Dwivedi (2003), Šúri i in. (2003), Saaverda i Mannaerts (2005). W niniejszej pracy model USPED zrealizowano przystosowując do wykonania w programie Idrisi32 algorytmy zaproponowane przez Mitasovą i in. (1999) dla programów ArcView i GRASS, przyjmując wartości wykładników potęgowych $m = 1,4$ oraz $n = 1,2$. W obliczeniach wykorzystano wielkość powierzchni zasilania obliczoną przy użyciu programu USLE2D, stosując do określenia sieci erozyjno-drenażowej algorytm Desmeta i Goversa (*flux decomposition algorithm*) (Desmet i Govers,

1996)². Zgodnie z sugestiami autorów modelu USPED (por. Mitasova i in., 1998) dla uzyskania ilościowego oszacowania wyerodowywanego materiału glebowego zastosowano parametry (R,C,K,P) opracowane dla modelu USLE.

Ze względu na brak szczegółowych danych meteorologicznych niezbędnych do określenia wartości wskaźnika R zgodnie z metodologią USLE³, wskaźnik ten obliczono na podstawie interpolowanych dla obszaru badań rozkładów średnio-miesięcznych sum opadów według indeksu Fourniera w modyfikacji Arnoldusa (1977):

$$R = \sum_{i=1}^{12} p_i^2 / P$$

gdzie:

p_i – suma opadów w i-tym miesiącu,

P – roczna suma opadów.

Indeks ten wykazuje wysoką korelację z czynnikiem R równania USLE (Coutinho i Tomas, 1995; Loureiro i Coutinho, 1995). Jego stosowanie w obliczeniach prowadzonych przy użyciu jednostek układu SI wymaga przemnożenia przez 17 (Foster i in., 1981).

Wskaźnik erozyjności opadów jest w granicach obszaru testowego silnie skorelowany z roczną sumą opadów. Rozkłady przestrzenne obu wartości wykazują znaczne podobieństwo. Wartości maksymalne notowane są w zachodniej części obszaru testowego i maleją w kierunku wschodnim.

Wskaźnik podatności gleby na erozję wodną K określono na podstawie równania Renarda i in. (1997):

$$K = 0,0034 + 0,0405 \cdot \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]$$

przy czym

$$D_g = \exp(0,01 \cdot \sum f_i \cdot \ln \frac{d_i + d_{i-1}}{2}),$$

gdzie dla każdej frakcji granulometrycznej cząstek glebowych:

d_i – maksymalna średnica cząstek,

d_{i-1} – minimalna średnica cząstek,

f – udział masowy.

Wybór tej metody wynikał przede wszystkim z faktu, iż wymaga ona jedynie posiadania podstawowych informacji o granulometrii utworów glebowych. Informacja taka mogła być przypisana poszczególnym wydzieleniom na mapie gatunków gleb KAWK (p. Tab. 1). W przypadku lessów

² Porównanie działania dostępnych w programie USLE2D algorytmów określania sieci erozyjno-drenażowej zawiera praca Drzewieckiego i Mularza (2001)

³ Dla pojedynczych zdarzeń opadowych obliczana jest wielkość będąca sumą energii kinetycznej deszczu i jego maksymalnej trzydziestominutowej intensywności. Wartości te zsumowane dla całego roku stanowią wskaźnik R

posłużono się badaniami Kolasy (1963), przyjmując średnią wartość wskaźnika K obliczoną dla analizowanych przez tego autora profili glebowych mieszczących się w granicach obszaru testowego.

Mady rzek przepływających przez tereny lessowe na północ od Krakowa posiadają skład zbliżony do lessu (Komornicki, 1980). Podobieństwo to potęguje się w przypadku deluwiiów zboczowych (na brzegach dolin). Biorąc pod uwagę charakter składu granulometrycznego lessów w obszarze badawczym (Kolasa, 1963) przyjęto:

- dla mady średniej skład pyłu gliniastego,
- dla mady ciężkiej i bardzo ciężkiej skład pyłu ilastego (przyjęto wartość wskaźnika K jak dla lessów).

Tabela 1. Wartości wskaźnika podatności gleb na erozję K

Gatunek gleby	Zawartość frakcji [%]			Wskaźnik K
	1-0,1 mm	0,1-0,02 mm	<0,02 mm	
pl	70-100	0-25	0-5	0.0123
ps	65-94	0-25	6-10	0.0146
psp	50-68	26-40	6-10	0.0202
pgl	60-89	0-25	11-15	0.0169
pglp	45-63	26-40	11-15	0.0230
pgm	55-84	0-25	16-20	0.0195
pgmp	40-58	26-40	16-20	0.0259
pz	0-24	56-100	0-20	0.0358
ls				0.0421
rs	25-48	26-40	26-35	0.0334
rc	10-38	26-40	36-50	0.0397
ms	0-38	41-79	21-35	0.0401
mc/mbc				0.0421

Wartość wskaźnika pokrywy roślinnej C określono na podstawie literatury (m.in. Koreleski, 1992; Molnár i Julien, 1998; Pistocchi i in., 2002). Przyjęto następujące wartości: pola uprawne – 0,2, użytki zielone – 0,015, lasy – 0,002.

Wartość wskaźnika zabiegów przeciwozyjnych P określono w oparciu o ortofotomapę satelitarną uzyskaną z panchromatycznego zobrazowania satelity IRS oraz Numeryczny Model Rzeźby Terenu. Jedynym zabiegiem przeciwozyjnym, którego istnienie stwierdzone mogło zostać na podstawie posiadanych danych było stosowanie uprawy poprzecznotokowej.

Wartości wskaźnika P przyjęto za Koreleskim (1992) w sposób następujący:

- dla uprawy wzdłuż stoku P=1;
- dla uprawy w poprzek stoku wartość P uzależniona jest od spadku terenu:

P=1 dla spadków poniżej 3%,

P=0,5 dla spadków w granicach 3-8%,

- P=0,6 dla spadków w granicach 8-12%,
P=0,7 dla spadków w granicach 12-16%,
P=0,8 dla spadków w granicach 16-20%,
P=0,9 dla spadków w granicach 20-25%,
P=1 dla spadków powyżej 25%.

Dla uprawy skośnostokowej przyjęto wartość wskaźnika P równą 1.

Określenia sposobu uprawy dokonano na drodze fotointerpretacji obrazu ortofotomapy z nałożonym rysunkiem warstwicowym uzyskanym na podstawie Numerycznego Modelu Rzeźby Terenu. Na przeważającej większości obszaru testowego dominuje wzdłużstokowy lub skośnostokowy sposób uprawy.

3. Uzyskane wyniki i ich interpretacja

Uzyskane wyniki stanowiły podstawę dokonania podziału obszaru testowego na strefy zagrożenia erozją wodną według kryteriów zaproponowanych przez Marksa i in. (1989) (p. Tab. 2). Uzyskane wyniki przedstawia Rys. 1 oraz Tab. 3. Prognozowane przez model obszary depozycji przedstawiono jako osobną klasę.

Tabela 2. Kryteria klasyfikacji zagrożenia erozyjnego (Marks i in., 1989)

Klasa	Prognozowane straty gleby [t/(ha*rok)]	Zagrożenie erozyjne	Wartość funkcji przeciwdziałania erozji
I	< 1	brak	bardzo wysoka
II	1 - 5	bardzo małe	wysoka
III	5 - 10	małe	średnia
IV	10 - 15	średnie	umiarkowana
V	15 - 30	wysokie	niska
VI	> 30	bardzo wysokie	bardzo niska

Tabela 3. Klasy zagrożenia erozją wodną - udział procentowy w powierzchni obszaru testowego

Zagrożenie erozyjne	Procent całości obszaru testowego		
	Użytki zielone	Grunty orne	Razem
Klasa 1	33.7	12.5	22.2
Klasa 2	14.2	34.3	27.1
Klasa 3	3.8	15.4	11.6
Klasa 4	1.8	5.8	4.5
Klasa 5	2.4	5.2	4.2
Klasa 6	4.2	6.3	5.4
Depozycja	39.9	20.5	25.0

Wysokie i bardzo wysokie zagrożenie erozyjne prognozowane jest przez model USPED na obszarze obejmującym 9,6% analizowanej powierzchni, małe i średnie - 16,1%, natomiast bardzo małe zagrożenie erozyjne lub jego brak występuje na blisko połowie obszaru (47,2%). Ponadto na jednej czwartej powierzchni obszaru testowego prognozowana jest depozycja materiału glebowego. Zgodnie z oczekiwaniami tereny użytków zielonych narażone są na erozję w mniejszym stopniu niż obszary gruntów orných. Tabela 4 przedstawia procentowy udział prognozowanych klas zagrożenia erozyjnego w obszarach występowania poszczególnych gatunków gleb.

Tabela 4. Klasy zagrożenia erozją wodną - udział procentowy w powierzchni wg gatunków gleb

Erozja	pl	ps	psp	pgl	pglp	pgm	pgmp	pz	ls	rs	rc	ms	mc
Klasa 1	40.3	41.9	56.9	51.6	29.0	55.5	6.9	39.4	21.6	11.4	15.0	22.8	20.7
Klasa 2	26.1	21.9	0.9	14.0	37.2	14.0	24.8	8.7	28.3	27.6	30.5	12.1	11.0
Klasa 3	3.7	2.8	0.0	2.0	4.8	1.2	11.1	1.0	12.2	15.2	14.4	4.3	4.7
Klasa 4	1.8	1.3	0.0	0.5	1.4	0.0	4.5	0.2	4.7	5.4	6.2	1.9	1.8
Klasa 5	1.2	1.8	0.0	0.7	2.9	0.0	2.2	0.3	4.4	5.0	5.2	2.0	3.4
Klasa 6	0.8	2.4	0.0	1.6	1.0	0.8	6.2	2.1	5.6	5.3	6.6	4.1	3.0
depozycja	26.1	27.9	42.2	29.6	23.7	28.5	44.3	48.3	23.2	30.1	22.1	52.8	55.3

Jak należało się spodziewać w największym stopniu zagrożone erozją są gleby o najwyższych wartościach wskaźnika K – lessy i rędziny. Co ciekawe jednak zagrożenie prognozowane przez model USPED jest wyższe dla rędzin niż dla lessów. Pomimo wysokiej wartości współczynnika K modelowanie wykazało niskie zagrożenie dla gleb pyłowych, co spowodowane jest jak należy przypuszczać niewielkimi wartościami nachylenia terenu w obszarze ich występowania.

Model USPED tym różni się od innych modeli erozyjnych, iż pozwala również na określenie obszarów depozycji. Analizując Tabelę 4 pod tym kątem zauważyć należy, iż największy procentowy udział obszarów depozycji prognozowany jest dla utworów sklasyfikowanych jako mady – co pozostaje w zgodności z ich genezą. Znaczący udział obszarów depozycji prognozowany jest również dla obszarów występowania gleb pyłowych i pylastych (piasek słabogliniasty pylasty, piasek gliniasty mocny pylasty).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, iż model USPED stanowić może narzędzie modelowania zagrożenia gleb erozją wodną. Realizacja tego modelu możliwa jest w każdym rastrowym systemie GIS. Dla obszaru testowego, zlokalizowanego w rejonie Krakowa, możliwe było wygenerowanie mapy stref zagrożenia erozją wodną w oparciu o prognozowane przez model wielkości strat pokrywy glebowej. Zaletą modelu USPED jest niewątpliwie możliwość określania obszarów depozycji erodowanego materiału glebowego. Planuje się kontynuację badań, których celem będzie sprawdzenie

w terenie rezultatów działania modelu, a w szczególności weryfikacja prognozowanych przez model obszarów depozycji.

Literatura:

1. Arnoldus H.M.J., 1977. *Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco* [w:] *Assessing Soil Degradation*. FAO Soils Bulletin 34, Rome
2. Bujakowski K., Mierzwa W., Pyka K., Trafas K., 1998. *Komputerowy atlas województwa krakowskiego – stan aktualny i przyszłość*. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej – VIII Konferencja Naukowo-Techniczna. Systemy Informacji Przestrzennej, Warszawa, 19-21 maja.
3. Coutinho M.A., Tomas P.P., 1995. *Comparison of Fournier with Wischmeier rainfall erosivity indices* [w:] *Proceedings First International Congress, European Society for Soil Conservation (ESSC), Silsoe*. CAB International
4. Desmet P. J., Govers G., 1996. *Comparison of routing algorithm for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies*. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10
5. Drzewiecki W., 2003. *Analiza krajobrazowo-ekologiczna sposobu użytkowania terenu z wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej i danych teledetekcyjnych*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska (rozprawa doktorska).
6. 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, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie
7. Foster G. R., 1990. *Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land*. [w:] Boardman J., Foster I. D. I., Dearing J. A. (red.) *Soil Erosion an Agricultural Land*. John Wiley & Sons.
8. Foster G.R., McCool D.K., Renard K.G., Moldenhauer W.C., 1981. *Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36.
9. Kandrika S, Dwivedi R.S., 2003. *Assessment of the Impact of Mining on Agricultural Land Using Erosion-Deposition Model and Space Borne Multispectral Data*. *Journal of Spatial Hydrology*, Vol.3, No. 2.
10. Kolasa M., 1963. *Geotechniczne własności lessów okolicy Krakowa*. Wydawnictwo Geologiczne. Prace Geologiczne nr 18, Warszawa.
11. Komornicki T., 1980. *Gleby miejskiego województwa krakowskiego*. *Folia Geographica Series Geographica-Physica*, Vol. XIII.

12. Kondracki J., 1988. *Geografia fizyczna Polski*. PWN, Warszawa
13. Koreleski K., 1992. *Próby oceny natężenia erozji wodnej*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, Sesja Naukowa, z. 35.
14. Laflen J. M., Lane L. J., Foster G. R., 1991. *The water erosion prediction project - a new generation of erosion prediction technology*. Journal of Soil and Water Conservation, 46.
15. Loureiro N.S., Coutinho M.A., 1995. *Rainfall changes and rainfall erosivity increase in the Algarve (Portugal)*. Catena 24.
16. 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.
17. Mitas L., Mitasova H., 1998. *Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention*. Water Resources Research, 34 (3).
18. Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M., Iverson R. L., 1997. *Reply to Comment by Desmet and Govers*. International Journal of Geographic Information Science, 11 (6).
19. 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
20. 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
21. Mitasova H., Brown W.M., Johnston D.M., 2003. *Terrain Modeling and Soil Erosion Simulation. Final Report*. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
22. Molnár D.K., Julien P.Y., 1998. *Estimation of Upland Erosion Using GIS*. Computer and Geosciences, vol. 24, nr 2
23. Moore I.D., Burch G.J., 1986a. *Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation*. Soil Science Society Journal, 50 (5).
24. Moore I.D., Burch G.J., 1986b. *Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory*. Water Resources Research, 22.
25. Moore I.D., Wilson J.P., 1992. *Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation*. Journal of Soil and Water Conservation, 47.
26. Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Posen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D., Styczeń M.E., 1998. *The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments*. Earth Surface Processes and Landforms, 23.
27. Pistocchi A., Cassoni G., Zanio O., 2002. *Use of the USPED model for mapping soil erosion and managing best land conservation practices*. IEMSS 2002, Congress Proceedings, Lugano.

28. Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Porter J.P., 1991. *RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation*. Journal of Soil and Water Conservation, 46(1)
29. Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C., 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 703.
30. Saavedra C., Mannaerts C.M., 2005. *Estimating erosion in an Andean catchment combining coarse and fine spatial resolution satellite imagery*. Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 20-24, 2005, Saint Petersburg, Russian Federation.
31. Starkel L., 1991. *Rzeźba terenu* [w:] I. Dynowska, M. Maciejewski [red.] Dorzecze górnej Wisły. PWN, Warszawa.
32. Šúri M., Cebecauer T., Hofierka J., 2003. *Digitálne modely reliéfu a ich aplikácie v životnom prostredí*. Zivotne prostredie, Vol. 37, 1.
33. Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L., 2000. *Soil Erosion Risk. Assessment in Italy*. European Commission Directorate General JRC Joint Research Centre, Space Applications Institute, European Soil Bureau.
34. Van Lynden G.W.J., 1995. *European soil resources*. Nature and Environment nr 71. Council of Europe, Strasbourg.
35. Warren S.D., Senseman G.M., Block P.R., Ruzycki T.S., Wilcox D.D., 2000. *Soil Erosion Survey for Camp Guernsey, Wyoming Using New-Generation Multi-Dimensional Soil Erosion Modeling*. Center for Ecological Management of Military Lands Technical Publication Series TPS 00-14, Colorado State University, Ft. Collins.
36. Wischmeier W. H., Smith D.D., 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses – A Guide to Conservation Planning*. USDA Handbook 537, Washington, D. C..

Summary

The origin and development of the USPED (*Unite Stream Power-based Erosion/Deposition*) model and its application to erosion-deposition modelling within catchments areas of Prądnik and Dłubnia Rivers have been presented. The test area – upland region north to Cracow – is covered with highly erode loess soils.

Algorithms proposed by Mitasowa et al. (1999) have been adopted for the Idrisi32 GIS software chosen for modelling. The USLE (*the Universal Soil Loss Equation*) model parameters (R,C,K,P) have been used for the quantitative assessment of erosion effects.

Rainfall and runoff erosivity factor (R) was approximated with Fournier index. The Renard et al. (1997) equation has been used to obtain the soil erodibility factor (K) values. This method was chosen because of its simplicity – only basic data about soil granulation was necessary. The cover and management factor values (C) were taken from different authors (Koreleski, 1992; Molnár i Julien,

1998; Pistocchi i in., 2002). Panchromatic IRS orthophotomap together with DTM (*Digital Terrain Model*) were used to assess the supporting erosion control practices factor (P). The factor values were used after Koreleski (1992).

The results of this investigation enabled us to divide the test area into soil erosion intensity zones based on predicted soil loss values. Deposition areas predicted with USPED model have been presented as a separate zone.

High and very high erosion rates have been predicted for 9,6% of the area in consideration. 47,2% of the test area has been assessed as free from the soil erosion danger. The soils with the highest erosion rates are loess soils and limestone soils.

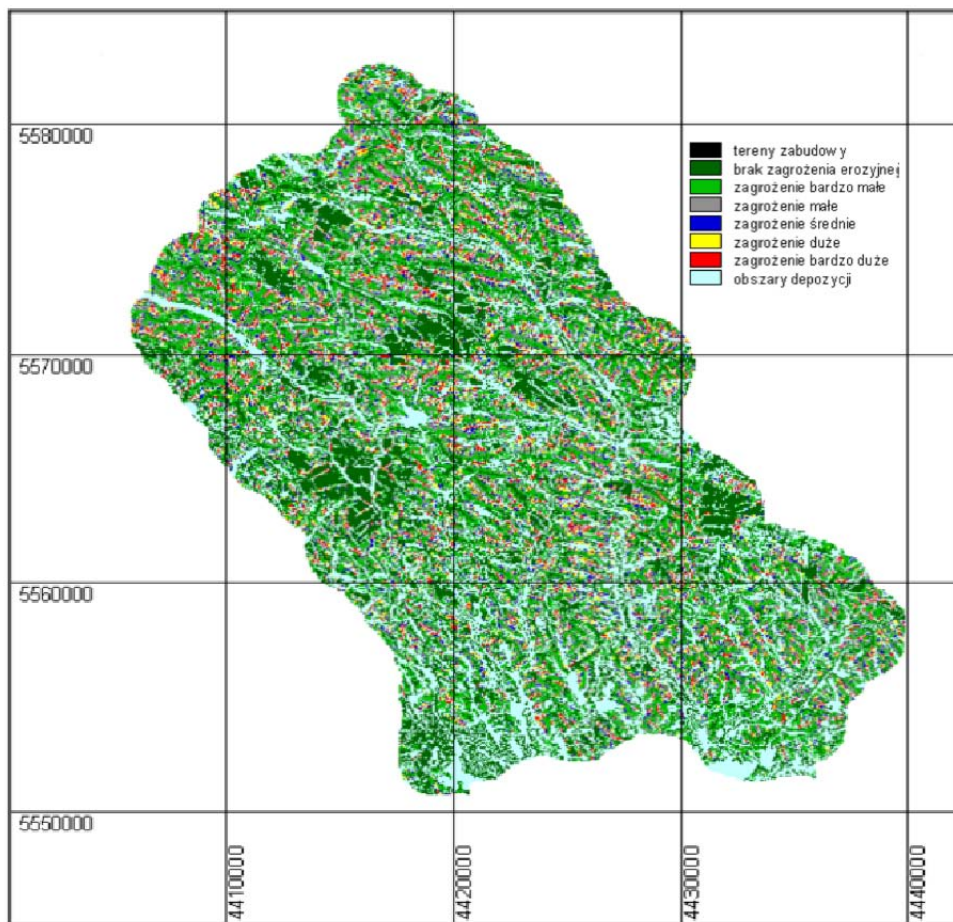
The most of alluvial soil covered areas can be found among the deposition zones, what is in accordance with these soils genesis.

The studies also indicated that USPED model seems to be very useful tool for soil erosion assessment together with deposition effect prediction of soils material within the particular catchments.

Dane do kontaktów z autorami:

Wojciech Drzewiecki: Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
tel; (012) 617 39 93, E-mail: drzewiec@agh.edu.pl

Stanisław Mularz: Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska
Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
tel; (012) 617 22 88, E-mail: mularz@uci.agh.edu.pl



Rys. 1. Wynik modelowania erozyjnego metodą USPED.