

POSTĘP METODYCZNY W OPISIE I BADANIACH PROCESÓW EROZJI WODNEJ GLEB

J. Rejman¹, R. Dębicki²

¹Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: rejman@demeter.ipan.lublin.pl

²Zakład Gleboznawstwa, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, ul. Akademicka 19, 20-033 Lublin

S t r e s z c z e n i e. W pracy przedstawiono i omówiono główne koncepcje modelowe stosowane w opisie procesów erozji wodnej gleb. Scharakteryzowano podstawowe elementy wybranych modeli prognostycznych oraz omówiono problemy związane z doświadczalną weryfikacją ich założeń. Przedstawiono nowe metody badań doświadczalnych stwarzające możliwość weryfikacji podstawowych założeń modeli prognostycznych.

S ł o w a k l u c z o w e: erozja wodna gleb, modele prognostyczne, metody badań

WSTĘP

Erozja wodna jest uważana za jeden z podstawowych procesów prowadzących do degradacji gleb oraz zanieczyszczenia wód powierzchniowych. Jednak pomimo uznania znaczenia tego procesu dla ochrony środowiska, określenie ilości materiału glebowego przenoszonego w wyniku erozji nadal sprawia wiele problemów. Są one związane z trudnością opisu złożonych procesów fizycznych równocześnie zachodzących na powierzchni gleby podczas opadu, do których należą m.in. infiltracja, spływ powierzchniowy, tworzenie skorupy powierzchniowej i erozja (odrywanie cząstek, przenoszenie i sedimentacja). Natężenie tych procesów zmienia się wraz ze zmianą intensywności opadu (i w konsekwencji spływu) oraz warunkami panującymi na powierzchni gleby i w jej przypowierzchniowej warstwie – wilgotnością, szorstkością powierzchni, roślinnością, nachyleniem stoku, itd. Co więcej, inne procesy erozyjne dominują w skali stoku, a inne w całej zlewni. Na stoku przeważają procesy odrywania cząstek przez opad i procesy ich transportu przez rozproszony spływ powierzchniowy. W skali zlewni przeważają procesy odrywania i transportu cząstek przez skoncentrowany spływ powierzchniowy,

którego rezultatem jest powstawanie żłobin i kanałów erozyjnych. Wszystko to sprawia, że proces erozji wodnej staje się niezwykle trudny do opisanego i prognozowania. W ostatnich latach zaobserwowano jednak istotny postęp zarówno w samym opisie procesu erozji wodnej, jak i metodach badawczych umożliwiających weryfikację teoretycznych założeń modelowych.

W niniejszej pracy zebrano i przedstawiono jedynie główne koncepcje stosowane w opisie procesów erozji wodnej oraz problemy związane z weryfikacją ich założeń.

GIÓWNE KONCEPCJE STOSOWANE W MODELACH EROZYJNYCH

Koncepcja stworzenia modelu uniwersalnego [45]

Koncepcja ta polega na wyodrębnieniu głównych czynników decydujących o natężeniu procesu erozji wodnej oraz wyznaczeniu zależności w ich obrębie na podstawie badań empirycznych. Koncepcja ta, rozwijana w USA od lat 40-tych, doprowadziła do powstania modelu USLE (Universal Soil Loss Equation). Głównym celem modelu było uwzględnienie strat gleby w wyniku erozji w kalkulacji kosztów produkcji rolniczej. Generalnie model USLE jest przeznaczony do prognozowania rocznych strat gleby i ma następującą postać:

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

gdzie: A - średni roczny zmyw gleby (Mg ha^{-1}); R - wskaźnik erozyjności opadu i spływu powierzchniowego ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$); K - wskaźnik podatności gleby na erozję ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); LS - wskaźnik długości i nachylenia stoku; C - wskaźnik okrywy roślinnej; P - wskaźnik zabiegów przeciwoerozyjnych.

Podstawę modelu stanowią pomiary ilości gleby (straty gleby) przemieszczanej podczas opadów ze standardowego poletka erozyjnego o długości 22,1 m, położonego na równomiernie nachylonym zboczu o skłonie 9%, uprawianego wzdłuż stoku oraz utrzymywanego stale w czarnym ugorze. Straty gleby z poletka standardowego są przeliczane do powierzchni 1 ha. Głównymi parametrami modelu są wskaźnik erozyjności opadu i spływu powierzchniowego (przedstawiany jako R - dla całego roku lub jako EI_{30} - dla poszczególnych opadów), będący sumą iloczynów energii kinetycznej poszczególnych opadów i maksymalnej ich intensywności w ciągu 30 minut oraz wskaźnik podatności gleby na erozję (K), będący ilorazem strat gleby i wskaźnika R . Pozostałe parametry modelu (LS , C , P), oryginalnie wyliczane są ze stosunku strat gleby z poletka o innych parametrach aniżeli standardowe do strat gleby z poletka standardowego. Na

podstawie obszernej bazy danych eksperymentalnych wyprowadzono równania regresji wielokrotnej pozwalające wyznaczyć poszczególne parametry równania w oparciu o ogólnie dostępne dane glebowo-klimatyczno-topograficzne.

Model USLE ulegał kolejnym modyfikacjom, które poprawiają jego zdolność prognozowania zmywu gleby, do których należą:

- RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), [35],
- MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), [43],
- Modyfikacja Onstada i Fostera [26],
- USLE-M [17].

Najważniejszymi nowymi elementami w RUSLE było m.in. wprowadzenie 15-dniowych okresów prognostycznych (odzwierciedlających zmienność podatności gleby na erozję w ciągu roku), zaproponowanie nowych równań opisujących zależności między stratami gleby i parametrami topograficznymi oraz symulacja wskaźnika podatności gleby na erozję w oparciu o rozkład temperatury powietrza. W modelach MUSLE [43], Onstada i Fostera [26] oraz USLE-M [17] zastosowano zmodyfikowany wskaźnik erozyjności opadu, który pozwolił na przystosowanie modelu do prognozowania erozji na podstawie pojedynczych opadów i poprawienie jego zdolności prognostycznych (Tabela 1).

Tabela 1. Metody wyznaczania wskaźnika erozyjności opadu i spływu powierzchniowego (R) w głównych modyfikacjach modelu USLE

Table 1. Methods of rainfall and runoff erosivity factor (R) determination in modifications of USLE

Modyfikacja USLE	Zmodyfikowany wskaźnik R
MUSLE	$R_e = \alpha EI_{30} (Q_e q_p)^{0,56}$
Onstad i Foster	$R_e = 0,646 EI_{30} + 0,45 (Q_e q_p)^{0,33}$
U-USLE	$R_e = Q_e EI_{30}$

α - współczynnik; Q_e - spływ powierzchniowy (mm), q_p - maksymalna chwilowa wartość spływu powierzchniowego podczas opadu (mm h^{-1})

Koncepcja czynników limitujących (rate-limiting concept) [21]

Podstawą koncepcji czynników limitujących stało się wydzielenie w procesie erozji wodnej procesów zachodzących na powierzchniach międzyżłobinowych i w żłobinach. Podstawę tego wyodrębnienia stanowiły badania wskazujące, że na powierzchniach międzyżłobinowych materiał jest odrywany przede wszystkim przez krople deszczu i transportowany przez spływ powierzchniowy, natomiast w żłobinach zarówno odrywanie cząstek gleby, jak i ich transport odbywa się

głównie pod wpływem spływu powierzchniowego. Proces odrywania cząstek gleby na powierzchniach międzyżłobinowych opisuje następujące równanie:

$$D_i = K_i I^b \quad (2)$$

gdzie: D_i - ilość cząstek gleby oderwana na powierzchniach międzyżłobinowych ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i - podatność gleby na odrywanie cząstek (s m^{-1}); I - intensywność opadu (mm s^{-1}) - b parametr.

Wyznaczona eksperymentalnie wartość parametru b wynosi średnio 1,98 (w przybliżeniu 2,0) [20].

Proces odrywania cząstek w żłobinach opisuje następujące równanie (detachment capacity):

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (3)$$

gdzie: D_c - potencjalna ilość cząstek gleby oderwana w żłobinach ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_r - podatność gleby na odrywanie przez spływ (s m^{-1}); τ_f - aktualne naprężenie ścinające spływu powierzchniowego (Pa); τ_c - krytyczne naprężenie ścinające gleby (Pa).

Pojemność transportowa spływu powierzchniowego (T_c) jest wyznaczana z równania:

$$T_c = a s^{5/3} q^{5/3} \quad (4)$$

gdzie: s - sinus kąta nachylenia zbocza; q - objętość spływu w przeliczeniu na jednostkę szerokości zbocza (m s^{-1}); a - współczynnik uwzględniający zdolność gleby do przenoszenia materiału glebowego oraz wpływ szorstkości powierzchni gleby pokrywy roślinnej na siły transportowe spływu.

Koncepcja czynników limitujących polega na założeniu, że ilość materiału przenieszonego w procesie erozji (sediment delivery) może być ograniczana zarówno przez tempo odrywania cząstek (detachment rate), jak i pojemność transportową spływu powierzchniowego (transport capacity), w zależności od tego, który z czynników limitujących posiada mniejszą wartość.

Koncepcja połączenia odrywania cząstek i transportu (rate-coupling concept) [6]

Podstawę koncepcji stanowi model różniczkowy pierwszego rzędu łączący odrywanie cząstek gleby z ich transportem w żłobinach, przy zachowaniu odrębnych procesów erozyjnych na powierzchniach międzyżłobinowych (zależnego od opadu) i w żłobinach (zależnego od spływu).

$$D_f = \beta V_f / q (T_c - G) \quad (9)$$

gdzie: V_f - efektywna prędkość opadania sedymentu (m s^{-1}); q - objętość spływu w przeliczeniu na jednostkę szerokości ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); β - współczynnik turbulencji wywołanych przez krople deszczu.

W modelu WEPP, dla analizowanego opadu erozyjnego otrzymujemy średnią masę gleby wyniesioną z danej powierzchni w jednostce czasu. Model nie uwzględnia chwilowych zmian w ilości sedymentu w czasie opadu, związanych z różnicą intensywności opadu.

Koncepcja siły strumienia (stream power) [10,11,37]

Koncepcja siły strumienia (stream power) została zastosowana do oceny ilości sedymentu (oderwanych cząstek gleby) włączanego do spływu powierzchniowego w modelu opisującym zachodzące równocześnie procesy erozji i depozycji. Model wykorzystuje uproszczoną teorię analityczną spływu powierzchniowego na płaszczyźnie, zakładając przepływ kinematyczny.

Zaproponowana forma analizy redukuje równanie różniczkowe pierwszego rzędu, wyrażające zasadę zachowania masy sedymentu do zwykłego równania różniczkowego, które można rozwiązać analitycznie. Rozwiązaniem równania jest koncentracja sedymentu c w dowolnym czasie t podana w funkcji odległości x na analizowanej płaszczyźnie. W oparciu o koncentrację sedymentu c i strumień wody q obliczany jest strumień sedymentu q_s w dowolnym czasie i położeniu (odległości) na analizowanej płaszczyźnie. Wynikiem zsumowania wartości strumienia sedymentu po czasie jest całkowita masa gleby przeniesiona w wyniku erozji wodnej.

Koncentrację sedymentu (c) opisuje równanie:

$$c(x, t) = a P^p C_e (R_f I)^{-1} \sum_{i=1}^I (1/\gamma_i) + \rho g SK C_r (I-x_*/x) \quad (10)$$

gdzie: c - koncentracja sedymentu ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); a - zdolność do odrywania cząstek gleby przez krople deszczu ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); P - intensywność opadu (m h^{-1}); p - bezwymiarowa stała o wartości 2; C_e - udział powierzchni gleby nie osłoniętej przed uderzeniami kropli; R_f - spływ powierzchniowy (m s^{-1}); I - liczba klas wielkości sedymentu; γ_i - parametr wyliczany jako $(1 + v_i/R_f)$; v_i - prędkość osiadania cząstek sedymentu o klasie wielkości i (m s^{-1}); ρ - gęstość wody (kg m^{-3}); g - przyspieszenie grawitacyjne (m s^{-2}); S - nachylenie zbocza (\sin kąta nachylenia); $K = 0,276 \eta$, gdzie η - efektywność włączania sedymentu przez spływ powierzchniowy; C_r - udział powierzchni gleby nieosłoniętej przed włączaniem

Model ten łączy tempo odrywania cząstek oraz ich sedymentacji (D) z różnicą między pojemnością transportową (T_c) i ładunkiem sedymantu (ilością cząstek oderwanych), (G):

$$D = a (T_c - G) \quad (5)$$

gdzie a jest wartością stałą kontrolującą proces.

Pojemność transportowa sedymantu (T_c) jest definiowana jako maksymalna ilość sedymantu, którą może przetransportować spływ powierzchniowy. Gdy $G < T_c$, przepływ spowoduje dodatkowe odrywanie sedymantu, natomiast gdy $G > T_c$, nadmiar przetransportowanych cząstek ulegnie depozycji. Hipotetycznie przyjęta wartość pojemności transportowej (T_c) ma decydujące znaczenie dla określenia, który z procesów (odrywanie cząstek lub depozycja) będzie zachodził w danej chwili.

Koncepcja ta znalazła zastosowanie w modelu WEPP (Water Erosion Prediction Project), [4]. Podstawę modelu stanowi równanie ciągłości sedymantu dla ustabilizowanych warunków (steady-state) opisujące przemieszczanie sedymantu w żłobinach:

$$dG/dx = D_f + D_i \quad (6)$$

gdzie: x - odległość w dół zbocza (m); G - ładunek sedymantu ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); D_i - ilość sedymantu z powierzchni międzyżłobinowych dostarczana do żłobin ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); D_f - ilość sedymantu oderwana w żłobinach ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Ilość sedymantu z powierzchni międzyżłobinowych dostarczana do żłobin (D_i , $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$) jest opisywana równaniem:

$$D_i = K_i I I_e S_f SDR \quad (7)$$

gdzie: K_i - parametr podatności gleb na erozję (kg s m^{-4}), (parametr wyznaczany przy pomocy symulatora opadów); I - intensywność opadu (m s^{-1}); I_e - spływ powierzchniowy (m s^{-1}); S_f - parametr skłonu [3]; SDR - współczynnik dopływu sedymantu z powierzchni międzyżłobinowych.

Odrywanie cząstek gleby w żłobinach zachodzi kiedy naprężenie ścinające wody przekracza krytyczną wartość naprężenia gleby na ścinanie i kiedy ładunek sedymantu jest mniejszy od pojemności transportowej:

$$D_f = D_c (1 - G/T_c) \quad (8)$$

gdzie: D_c - potencjalna ilość cząstek gleby oderwana w żłobinach ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); T_c - pojemność transportowa sedymantu w żłobinach ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

Osadzanie cząstek w żłobinach występuje, gdy ładunek sedymantu G jest większy aniżeli pojemność transportowa spływu T_c :

sedymentu do spływu; x_* - wartość odległości x , powyżej której zachodzi włączanie cząstek do spływu.

W równaniu opisującym koncentrację sedymentu, pierwszy człon równania reprezentuje udział netto z odrywania cząstek ponad depozycję sedymentu (reprezentowaną przez wyrażenie $(R_I I)^{-1} \sum_{i=1}^I (I/\gamma_i)$), natomiast drugi człon równania reprezentuje udział netto z wprowadzania sedymentu do spływu powierzchniowego (entrainment) ponad depozycję sedymentu.

Odległość x_* , powyżej której zachodzi włączanie cząstek do spływu powierzchniowego jest opisywana równaniem:

$$x_* = \Omega_0 / \rho g S R_I \quad (11)$$

gdzie: Ω_0 (W m^{-2}) - wartość krytyczna siły strumienia potrzebna do włączenia sedymentu do spływu [2].

Uproszczony strumień wody przechodzący przez jednostkę szerokości płaszczyzny (q_I) w czasie t i odległości od górnej krawędzi płaszczyzny x opisuje równanie:

$$q_I(x, t) = R_I x \quad (12)$$

gdzie $R_I(t)$ - spływ powierzchniowy (m s^{-1}).

Po zmierzeniu spływu powierzchniowego z płaszczyzny o długości L (oznaczonego jako $q(L)$), R_I jest wyliczane z równania:

$$R_I = q(L)/L \quad (13)$$

Wartość strumienia wody q_I jest zatem dokładnie określona w $x = L$ oraz $x = 0$ (kiedy strumień jest równy zero), ale jest aproksymowana do średniej wartości x .

Pomijając rozbryzg gleby jako nieistotny dla transportu sedymentu, strumień sedymentu przypadający na jednostkę szerokości płaszczyzny (q_s) opisuje równanie:

$$q_s = c q \quad (14)$$

gdzie: q - objętościowy strumień wody (m); c - koncentracja sedymentu ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$).

Całkowita masa sedymentu (Q_s) z płaszczyzny o szerokości W równa się:

$$Q_s = W \int_0^{tR} q_s(L) dt = WL \int_0^{tR} c(L) R_I dt \quad (15)$$

gdzie: tR - czas trwania spływu powierzchniowego (s); W - szerokość płaszczyzny (m); L - długość płaszczyzny (m).

W koncepcji siły strumienia (stream power) zastosowano opis transportu ładunku sedymentu wleczonego po dnie małych cieków wodnych [2] do procesu włączania cząstek gleby do splywu powierzchniowego (entrainment). Uzasadnienie takiego podejścia stanowiły obserwacje wskazujące na to, że przeważająca ilość materiału glebowego oderwanego przez krople deszczu i wprowadzona początkowo do splywu powierzchniowego powraca na jego dno, tworząc pozbawioną sił kohezji warstwę depozycyjną, która ponownie może zostać wprowadzona do splywu. Stąd w opisie wyodrębniono czynniki erodujące działające na glebę nieosłoniętą i związaną siłami kohezji oraz czynniki erodujące ponownie wprowadzające materiał z warstwy depozycyjnej i pozbawione sił kohezji. Koncepcja siły strumienia opiera się na równoczesnym porównaniu naprężeń ścinających zachodzących między powierzchnią gleby i splywem powierzchniowym. Przy krytycznej wartości siły strumienia (Ω_0), cząstki gleby nie są wprowadzane do splywu powierzchniowego (entrainment), a cząstki gleby już oderwanej (sedymetu) i znajdujące się w warstwie przydennej (podłoża gleby) nie są ponownie wprowadzane do splywu (reentrainment). Za wartość krytyczną (brzegową) strumienia siły, Proffitt i Rose [31] przyjmują $0,1 \text{ W m}^{-2}$.

W porównaniu do wcześniej opisanych koncepcji, ilość przenoszonego materiału (sediment delivery) stanowi równowagę 3 procesów (odrywanie cząstek przez opad, włączanie cząstek do splywu powierzchniowego i depozycję sedymetu) i nie wymaga uprzedniego wyznaczenia pojemności transportowej (T_c) oraz konieczności wyodrębniania procesów zachodzących na powierzchniach międzyżłobinowych i w żłobinach.

Koncepcja transportu modyfikowanego uderzeniami kropli (RIFT - rain impacted flow transport) [15,16]

Koncepcja transportu modyfikowanego uderzeniami kropli (RIFT) jest częścią opisu procesu erozji zaproponowanego przez Kinnela [15,16]. Opis ten wyodrębnia transport modyfikowany uderzeniami kropli deszczu (RIFT) zachodzący na powierzchniach międzyżłobinowych oraz transport modyfikowany przez splyw powierzchniowy (RD-FT) zachodzący na powierzchniach międzyżłobinowych oraz w żłobinach. Przejście z jednego typu transportu do drugiego jest związane przede wszystkim z głębokością warstwy splywu powierzchniowego.

Koncepcja RIFT powstała na podstawie obserwacji wskazujących, że dla szerokiego zakresu prędkości splywu (od 9 do 182 mm s^{-1}), stosunek koncentracji sedymetu do głębokości splywu posiadał zbliżoną wartość, sugerując istnienie bezpośredniej zależności między prędkością splywu i odległością przemieszczenia

cząstek. W koncepcji RIFT, podczas odrywania cząstek pod wpływem uderzeń kropli, jak i ich opadania po włączeniu cząstek do spływu rozważane są siły horizontalne wywierane przez spływ.

W płytkim spływie powierzchniowym, cząstki oderwana od powierzchni gleby tworzą warstwę na powierzchni gleby (cloud), która zapobiega odrywaniu cząstek przez spływ. Oddziaływanie tej ochronnej warstwy jest dynamiczne. Warstwa wykazuje większą zdolność ochronną przy małych prędkościach spływu i większych cząstkach, w porównaniu do większych prędkości i drobniejszych cząstkach. Oderwane cząstki gleby są w większości przenoszone na ograniczoną odległość od punktu uderzenia kropli. Odległość przemieszczenia cząstek wzrasta wraz z prędkością spływu i maleje wraz z prędkością opadania cząstki, zaś same cząstki mogą być transportowane bądź jako ładunek w zawieszynie lub wleczone po podłożu.

Ilość sedymentu przemieszczana przez przekrój odległości granicznej przemieszczenia cząstek w jednostce czasu T_{Dz} opisywana jest równaniem:

$$T_{Dz}(\rho, d) = F_d \chi_{pz} D_{pdz} W_f \quad (16)$$

gdzie: ρ - wielkość cząstki (mm); d - wielkość kropli (mm); F_d - uśredniona w przestrzeni częstość uderzeń kropli o średnicy d ; χ_{pz} - odległość przemieszczenia cząstki w strefie aktywnej (m); D_{pdz} - masa cząstek podniesionych na wysokość z wskutek uderzeń kropli (kg); W_f - głębokość spływu w strefie aktywnej (m).

Koncentracja sedymentu w spływie powierzchniowym opisywana jest równaniem:

$$c_D(\rho, d) = T_D(\rho, d) Q^{-1} = 6 R_d t'_{pd} D_{pd} (\pi d^3 h)^{-1} \quad (17)$$

gdzie: c_D - koncentracja sedymentu ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$); T_D - masa materiału przeniesionego przez przekrój odległości granicznej przemieszczenia cząstek w jednostce czasu w wyniku uderzenia kropli ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$); Q - woda przepływająca przez przekrój odległości granicznej przemieszczenia cząstek ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$); R_d - intensywność opadu o wielkości kropli d (mm h^{-1}); t'_{pd} - średnia ważona masa cząstek w warstwie ochronnej zawieszonych w warstwie spływu (kg); D_{pd} - masa cząstek o wielkości ρ przeniesionego do spływu przez kroplę o wielkości d uderzającą w strefę aktywną (kg).

WERYFIKACJA KONCEPCJI MODELOWYCH

Pomimo znacznego postępu w teoretycznym opisie procesów erozji wodnej, podstawowym problemem badawczym pozostaje empiryczna weryfikacja założeń

modelowych. Ze względu na dużą dynamikę czasowo-przestrzenną procesów erozyjnych oraz złożoność interakcji między procesami odrywania cząstek i transportu bardzo trudno jest opracować procedury eksperymentalne, które dostarczyłyby rzetelnych danych niezbędnych zarówno do weryfikacji założeń teoretycznych już istniejących modeli, jak i poznania samych procesów. Największe trudności sprawia ocena sedymentacji materiału glebowego przenieszonego przez spływ powierzchniowy. Większość modeli wykorzystuje w tym celu koncepcję pojemności transportowej, wyznaczanej bądź to z: (1) formuły przenoszenia ładunku, która pierwotnie została opracowana dla transportu sedymentu w rzekach lub (2) empirycznych zależności łączących pojemność transportową z parametrami spływu (Tabela 2). Jednakże w obu przypadkach zależności te zostały opracowane dla warunków przepływu wody po powierzchniach charakteryzujących się małą szorstkością (mikroreliefem), podczas gdy spływ powierzchniowy (w przeciwieństwie do przepływu w rzekach) przemieszcza się po zboczu charakteryzującym się dużą szorstkością powierzchni w stosunku do masy przepływającej wody, co w znaczącym stopniu może zmniejszać jego pojemność transportową [1].

Poniżej przedstawiono wybrane, najbardziej obiecujące metody badawcze, które mogą przyczynić się do pełniejszego poznania procesów erozyjnych.

Metoda kubków erozyjnych (splash cup) stosowana w ocenie rozbryzgu gleby

Podstawową metodą oceny rozbryzgu gleby (ilości gleby oderwanej przez krople deszczu) jest metoda z zastosowaniem kubków erozyjnych (splash cups), [23]. W metodzie tej, oderwane cząstki gleby w wyniku uderzeń kropli deszczu są zbierane wewnątrz powierzchni kubka, a zebrana ilość gleby jest odnoszona do powierzchni kubka. Jednak, jak wykazują pomiary prowadzone przy pomocy kubków o różnej średnicy, wielkość rozbryzgu gleby przeliczonego na jednostkę powierzchni jest uzależniona od powierzchni kubka [30]. W związku z tym, Torri i Poesen [39] zaproponowali model, w którym wyodrębnili: (1) ilość gleby oderwanej przez krople deszczu oraz (2) średnią odległość przemieszczenia gleby (mean jump length). Jednakże sam program załączony w aneksie do powyższej pracy zawiera liczne błędy uniemożliwiające skorzystanie z niego. Przybliżone wartości rozbryzgu można odczytać z nomogramu będącego graficzną interpretacją modelu.

Metody stosowane w ocenie zmywu gleby i spływu powierzchniowego

Pomiary zmywu gleby i spływu powierzchniowego prowadzone są zarówno w warunkach naturalnego (poletka/zlewnie), jak i symulowanego opadu deszczu

Tabela 2. Zestawienie wybranych modeli prognostycznych erozji wodnej nowszej generacji
Table 2. Some characteristics of soil erosion prediction models

Nazwa modelu	Podstawowe komponenty modelu	Skala operacyjna modelu	Moduł erozyjny		Metoda obliczenia spływu powierzchniowego lub wyznaczenia infiltracji ^b	Wynik otrzymany z modelu
			Odrywanie cząstek	Sedymentacja ^a		
EPIC [44]	Symulacja pogody Hydrologia Erozja Chemia (N,P, pestycydy) Rozwój roślin	Zlewnia w postaci jednego uśrednionego jednorodnego obszaru (zbocza), (do 100 ha)	Modyfikacje USLE [45]	Brak	Metoda CN [41]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby
AGNPS [42]	Hydrologia Erozja/Sedymentacja Chemia (N,P)	Zlewnia podzielona na komórki o powierzchni 0,4 ha, dla których wyliczane są oddzielnie parametry erozji	MUSLE [43]	Dynamiczny bilans masy sedymentu ^c (5)	Metoda CN [41]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby
CREAMS [18]	Hydrologia Erozja/Sedymentacja Chemia (N,P, pestycydy)	Zlewnia w postaci uśrednionych ale wewnątrz jednorodnych segmentów	Z podziałem na erozję międzyżłobinową (MUSLE) i żłobinową	Dynamiczny bilans masy sedymentu ^c (5)	(a) Metoda CN [41] (b) infiltracja wg Greena i Ampta [9]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby

Tabela 2. ciąg dalszy

Table 2. continuation

Nazwa modelu	Podstawowe komponenty modelu	Skala operacyjna modelu	Moduł erozyjny		Metoda obliczenia spływu powierzchniowego lub wyznaczenia infiltracji ^b	Wynik otrzymany z modelu
			Odrywanie cząstek	Sedymentacja ^a		
ANSWERS [48]	Hydrologia Erozja/Sedymentacja	Zlewnia podzielona na komórki o powierzchni 0,4 ha (max do 1700 komórek), dla których wyliczane są oddzielnie parametry erozji	Połączenie koncepcji Meyera i Wischeiera [21] z USLE [45]	Dynamiczny bilans masy sedymentu ^c (5)	Zmodyfikowane równanie infiltracji Holtana [Beasley i wsp., 1980]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby
WEPP [4]	Symulator pogody Hydrologia, Erozja/sedymentacja, Wzrost roślin	Zlewnia w postaci wyodrębnionych jednostek (zbocze, kanał erozyjny, miejsca sedymentacji)	Z podziałem na erozję międzyżłobinową i żłobinową	Dynamiczny bilans masy sedymentu ^c (5)	Infiltracja wg. Greena i Ampt [9]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby
EUROSEM [24]	Hydrologia Erozja/Sedymentacja	Zlewnia reprezentowana jako połączona sieć erozji międzyżłobinowej i kanałowej	Odrywanie cząstek przez: - krople deszczu - spływ powierzchniowy	Dynamiczny bilans masy sedymentu ^c (1)	Infiltracja wg Smitha i Parlange [38]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby i sedymentograf
GUEST [22]	Hydrologia Erozja/Sedymentacja	Poletka	Odrywanie cząstek pod wpływem spływu powierzchniowego	Koncepcja siły strumienia ^d	Model Yu i wsp. [47]	Ogólna ilość przemieszczonej gleby i sedymentograf

Objaśnienia: ^a - ilość klas sedymentu (w nawiasach); ^b - spływ powierzchniowy wyznaczany jest na podstawie opadów dobowych w oparciu o metodę CN lub na podstawie intensywności opadu w czasie z bilansu między opadem, infiltracją, perkolacją i ewapotranspiracją; ^c - numeryczne równania dynamicznego bilansu masy gleby są oparte o pojemność transportową spływu, ładunek sedymentu i prędkość opadania cząstek glebowych; ^d - sedymentacja określana na podstawie wartości granicznej siły strumienia (stream power) poniżej, której zachodzi

(poletka/pojemniki). Z reguły w badaniach prowadzonych z symulatorami opadów, energia kinetyczna symulowanego opadu jest mniejsza od energii kropli opadu naturalnego. W obu metodach pomiarowych ilość materiału erodowanego jest zbierana w przekroju poletka/zlewni, a następnie przeliczana do powierzchni poletka/zlewni, czyli stanowi wielkość zintegrowaną w przestrzeni i czasie. Jednakże w ten sposób mierzona jest jedynie ilość materiału przemieszczana przez krawędź poletka, nie obejmując materiału podlegającego sedymentacji w obrębie poletka/zlewni.

Tymczasem, w przeciwieństwie do danych eksperymentalnych, większość procedur modelowych oparta jest na równaniach bilansu masy, wyznaczonych dla rzeczywistej a nie przeliczeniowej jednostki powierzchni gleby. Wobec trudności z oceną procesu sedymentacji na poletkach o jednakowej powierzchni, alternatywnym rozwiązaniem wydaje się być określenie ilości przenoszonego materiału w różnej skali przestrzennej i czasowej. W praktyce oznacza to prowadzenie badań w (1) systemie poletek połączonych ze sobą [8,13,14], (2) na poletkach o zróżnicowanej długości [33,34] lub (3) z wykorzystaniem różnego typu znaczników [27-29].

Badania te pozwoliły na weryfikację założeń modelowych związanych z pojemnością transportową spływu, sedymentacją oraz odległością przemieszczenia materiału glebowego:

1. Huang i wsp. [13] stwierdzili, że odrywanie cząstek w żłobinach, pomimo wzrostu pojemności transportowej przepływu, zostało ograniczone do pewnej wielkości, sugerując brak bezpośredniej zależności między procesami odrywania cząstek i transportu. Tym samym, koncepcja czynników limitujących lepiej opisywała dane eksperymentalne w porównaniu do koncepcji połączenia odrywania cząstek i ich transportu (zastosowanej w modelu WEPP). W dalszych pracach badano wpływ gradientu hydraulicznego w przypowierzchniowej warstwie gleby na interakcję między transportem cząstek i ich sedymentacją [8,12] oraz starano się określić warunki decydujące o przejściu oderwanego materiału glebowego ze stanu, w którym dominuje sedymentacja w stan, w którym dominuje transport cząstek [13]. Badania te wykazały, że pojemność transportowa spływu nie jest jedynie funkcją właściwości sedymentu i hydrauliki przepływu, ale zależy od warunków przypowierzchniowej warstwy gleby, które stymulują lub hamują tempo odrywania cząstek.

2. Rejman i wsp. [34], analizując zmyw gleby z poletek o różnej długości, zaproponowali interpretację danych eksperymentalnych w oparciu o wyodrębnienie: (1) maksymalnej ilości zmywu jednostkowego gleby i (2) efektywnej odległości przemieszczenia gleby. Wydzielenie to w praktyce oznaczało, że zmyw gleby jest

zbierany jedynie z pewnej odległości (efektywnej) poletka, podczas gdy na pozostałej powierzchni przeważają procesy sedymentacji (Tabela 3). Maksymalne ilości zmywu jednostkowego gleby były wartościami zbliżonymi do wartości prognozowanych na podstawie modelu USLE, co wyjaśniało uzyskane rozbieżności między danymi eksperymentalnymi ze standardowych poletek erozyjnych i wartościami prognozowanymi na podstawie modelu. Efektywna odległość przemieszczenia gleby podczas pojedynczych opadów zawierała się w zakresie od 2 do 13 m i była uzależniona od sumy opadów z wartością progową 3 mm h^{-1} , stan powierzchni gleby oraz początkowej wilgotności gleby [33].

3. Badania przeprowadzone przez Parsonsa i wsp. [29], ze znacznikami magnetycznymi pozwoliły na ustalenie, że większość sedymentu podczas pojedynczego opadu jest przenoszona na bliskie odległości do maksymalnie 10,5 m, przy czym depozycja materiału zmniejsza się wykładniczo od linii wprowadzenia znaczników. Stosując jako znacznik ziarna kwarcu o różnej średnicy, Parsons i wsp. [28] stwierdzili, że ilość materiału glebowego przeniesionego przez spływ powierzchniowy zależy nie tylko od pojemności transportowej spływu, ale również od maksymalnej wielkości dostępnych cząstek. Należy przy tym nadmienić, iż ze wcześniejszych badań Parsonsa i wsp. [27] wynika, że wielkość cząstek przenoszonych przez spływ posiada mniejsze średnice w porównaniu do wielkości cząstek oderwanych w wyniku uderzeń kropli deszczu.

Metody stosowane w ocenie przemieszczenia materiału glebowego w obrębie zlewni

Do oceny przemieszczenia materiału glebowego w obrębie zlewni stosowane są (1) metody znacznikowe, z których najczęściej stosowana jest metoda pomiaru koncentracji cezu (^{137}Cs) oraz (2) analiza budowy profili glebowych.

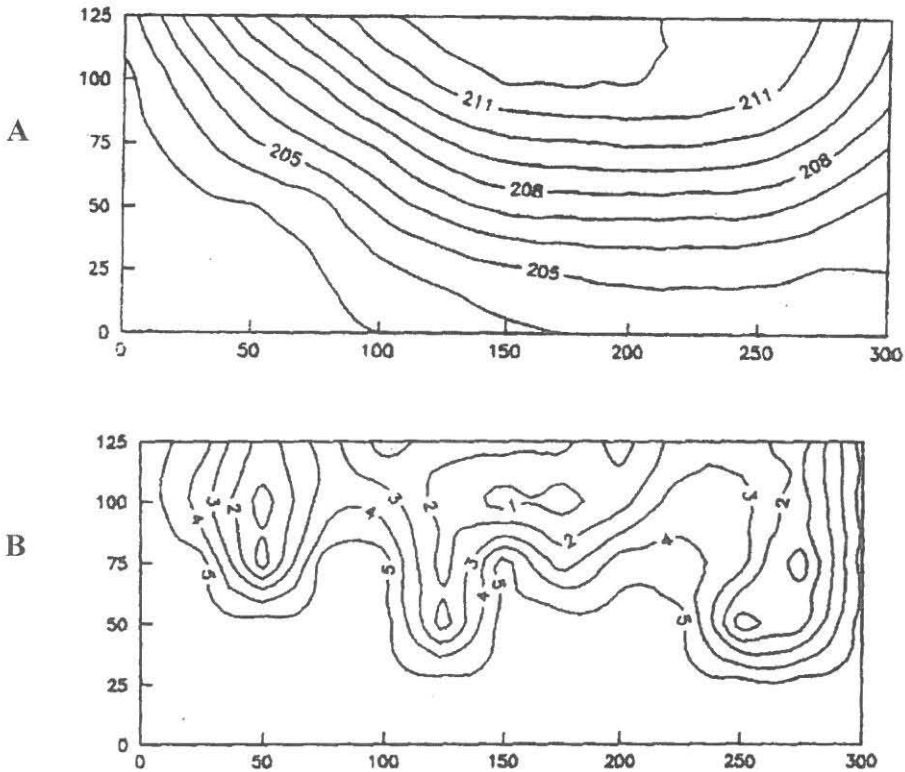
1. W metodach znacznikowych, przyjmuje się założenie, że opad radioaktywny w obrębie zlewni był jednorodny, a różnice w koncentracji izotopu w glebach na terenie zlewni związane są głównie z erozją i depozycją materiału glebowego, a zatem przestrzenne zróżnicowanie koncentracji ^{137}Cs w obrębie zlewni jest odzwierciedleniem przestrzennego zróżnicowania stref erozji i akumulacji [19]. Badania przeprowadzone przez Froehlicha i Wallinga [7], wskazują jednak, że analiza rozkładu przestrzennego radioaktywnego opadu z Czarnobyli wykazała duże zróżnicowanie koncentracji w obrębie zlewni, co oznacza, że zróżnicowanie koncentracji ^{137}Cs na stoku nie zawsze daje się wytłumaczyć przemieszczeniem radioizotopu jedynie na skutek procesów erozyjnych.

Tabela 3. Przykłady analizy danych eksperymentalnych z poletek o zróżnicowanej powierzchni (szerokość poletek 3 m), utrzymywanych w czarnym ugorze [33]

Table 3. Working examples of analysis of data from plots of different size (plots width 3 m), maintained in continuous black fallow

Parametry erozji wodnej	Okres pomiarowy											
	03.08.1998				05.04.2000				29.07.2000			
	Poletko, m ²				Poletko, m ²				Poletko, m ²			
	7,5	15	30	60	7,5	15	30	60	7,5	15	30	60
Zmyw gleby, kg/poletko	0,90	1,61	1,81	2,18	2,60	5,93	7,97	8,88	2,62	6,14	17,65	18,29
Zmyw gleby, kg m ⁻²	0,120	0,107	0,060	0,036	0,347	0,395	0,266	0,148	0,349	0,409	0,588	0,305
Maksymalny zmyw gleby, kg m ⁻²	0,120	-	-	-	-	0,395	-	-	-	-	0,588	-
Powierzchnia zbiorcza, m ² (zmyw gleby [kg/poletko]/maksymalny zmyw gleby [kg m ⁻²])	-	13,42	15,08	18,17	-	-	20,18	22,48	-	-	-	31,11
Odległość efektywna, m (powierzchnia zbiorcza/szerokość poletka)	-	4,47	5,03	6,06	-	-	6,72	7,49	-	-	-	10,37
Średnia odległość efektywna, m			5,19				7,10				10,37	
Parametr opadu:												
Suma opadu, mm			29,2				26,7				64,4	
Energia kinetyczna, MJ ha ⁻¹			7,236				2,861				7,297	
EI ₃₀ , MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹			354,56				11,13				50,81	
Suma opadu >3 mm h ⁻¹ , mm			29,0				9,4				35,4	

2. W metodzie analizy budowy profilu glebowego, stopień zerodowania gleby określany jest na podstawie utraty poszczególnych poziomów genetycznych gleby. Turski i wsp. [40], stosując tę metodę w obrębie zlewni lessowych stwierdzili duże zróżnicowanie przestrzenne gleb, z mozaikowym występowaniem gleb nieerodowanych, zerodowanych i deluwialnych na zboczach zlewni. Według wspomnianych autorów, zróżnicowanie to może wiązać się z intensywnością erozji w przeszłości lub historią użytkowania gleby. Sugestie te potwierdza mapa glebowa przygotowana dla zbocza zlewni w Czesławicach z wykorzystaniem metody krigingu [32]. Mapa wyraźnie wskazuje na występowanie obszarów nasilonej erozji na obszarze obecnie jednorodnym topograficznie (Rys. 1). Badania poletkowe



Rys. 1. Mapa topograficzna zbocza lessowego w Czesławicach (A) i zasięgi występowania gleb o różnym stopniu zerodowania (B), gleby nieerodowane <1, słabo zerodowane 1-2, średnio zerodowane 2-3, silnie zerodowane 3-4, bardzo silnie zerodowane 4-5, deluwialne >5 [32]

Fig. 1. Topographic map of loess hillslope (A) and spatial distribution of soils of different erosion degree (B) at Czesławice site, soils: non eroded <1, weakly eroded 1-2, moderately eroded 2-3, severely eroded 3-4, very severely eroded 4-5, colluvial >5

przeprowadzone na tym obszarze wskazują na duże zróżnicowanie w ilości zerodowanego materiału glebowego między glebami charakteryzującymi się różnym stopniem zerodowania. Największe ilości zmywu gleby stwierdzono na glebie bardzo silnie zerodowanej (warstwa orna wytworzona bezpośrednio z lessu węglanowego) i deluwialnej. Były one prawie 2-krotnie większe od ilości zmywu gleby na glebie słabo i średnio zerodowanej (warstwa orna wytworzona z poziomu iluwialnego Bt2). Tak zróżnicowana reakcja analizowanych gleb (charakteryzujących się niewielkimi zmianami w składzie granulometrycznym) na opad i duże zróżnicowanie przestrzenne gleb na jednorodnym topograficznie obszarze wyraźnie świadczy jak trudne może być prognozowanie erozji wodnej w obrębie zlewni.

PIŚMIENNICTWO

1. **Abrahams A.D., Gary L., Krishnan C., Atkinson J.F.:** Predicting sediment transport by interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 1087-1099, 1998.
2. **Bagnold R.A.:** An approach to the sediment transport problem from general physics, p. 231-291. In: *The physics of sediment transport by wind and water* (Eds C.R. Thome *et al.*). Am. Soc. Civ. Eng., New York, 1996.
3. **Elliot W.J., Liebienow A.M., Laflen J.M., Kohl K.D.:** A compedium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988. NSERL Report No.3, West Lafayette, Indiana, USDA-ARS-NSERL, 1989.
4. **Flanagan D.C., Nearing M.A.:** USDA - Water Erosion Prediction Project. Hillslope profile and watershed model documentation. NSERL report No. 10, USDA-ARS, West Lafayette, Indiana, 1995.
5. **Foster G.R., Meyer L.D.:** Transport of soil particles by shallow flow. *Trans. ASAE*, 15(1), 99-102, 1972.
6. **Foster G.R., Meyer L.D.:** Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. ARS-S-40, USDA-ARS, 190-207, 1975.
7. **Froehlich W., Walinig D.E.:** The uses of fallout radionuclides in investigations of erosion and sediment delivery in the Polish Flysh Carpathians. *IAHS Publ.*, 209, 61-76, 1992.
8. **Gabbard, D.S., Huang C., Norton L.D., Steinhardt G.C.:** Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 83-93, 1998.
9. **Green W.A., Ampt G.A.:** Studies on soil physics. I. The flow of air and water through soils. *J. Agri. Sci.*, 4, 1-24, 1911.
10. **Hairsine P.B., Rose W.C.:** Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow. *Water Resour. Res.*, 28, 237-243, 1992.
11. **Hairsine P.B., Rose C.W.:** Modeling water erosion due to overland flow using physical principles, 2. Rill flow. *Water Resour. Res.* 28:245-250, 1992b.
12. **Huang C.:** Sediment regimes under different slope and hydrologic conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62, 423-430, 1998.
13. **Huang C., Bradford J.M., Laflen J.M.:** Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 734-739, 1996.
14. **Huang C., Wells L.K., Norton L.D.:** Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 503-516, 1999.

15. **Kinnel P.I.A.:** The mechanics of raindrop induced flow transport. *Aust. J. Soil Res.*, 28, 497-516, 1990.
16. **Kinnel P.I.A.:** The effect of flow depth on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. *Trans. ASAE*, 34, 161-168, 1991.
17. **Kinnel P.I.A.:** Runoff ratio as a factor in the empirical modeling of soil erosion by individual rainstorms. *Aust. J. Soil Res.*, 35, 1-13, 1997.
18. **Knisel W.G.:** CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report No. 26, USDA-ARS, Washington, DC, 1-643, 1980.
19. **Longmore M.E., O'Leary B.M., Rose C.W., Chandica A.L.:** Mapping soil erosion and accumulation with the fallout isotope caesium-137. *Aust. J. Soil Res.*, 21, 373-385, 1983.
20. **Meyer L.D., Harmon W.C.:** Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1152-1157, 1984.
21. **Meyer L.D., Wischmeier W.H.:** Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Trans. ASAE*, 12, 754-758, 762, 1969.
22. **Misra R.K., Rose C.W.:** Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *European J. of Soil Sci.*, 47, 593-604, 1996.
23. **Morgan, R.P.C.:** Field studies of rainsplash erosion. *Earth Surface Processes*, 3, 295-299, 1978.
24. **Morgan R.P.C., Quinton J.N, Smith R.E., Govers G, Poesen J.W.A., Auerswald K., Chisci G., Torri D.:** Styczeń M.E. 1998. The European soil erosion prediction model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 527-544, 1998.
25. **Nearing M.A.:** Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses. *Catena*, 32, 15-22, 1998.
26. **Onstad C.A., Foster G.R.:** Erosion modeling on a watershed. *Trans. ASAE*, 18(2), 288-292, 1975.
27. **Parsons A.J., Abrahams A.D., Luk S.H.:** Size characteristics of sediment in interrill overland flow on a semi-arid hillslope, southern Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 143-152, 1991.
28. **Parsons A.J., Stromberg S.G.L., Greener M.:** Sediment-transport competence of rain-impacted interrill overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 365-375, 1998.
29. **Parsons A.J., Wainwright J., Abrahams A.D.:** Tracing sediment movement in interrill overland flow on a semi-arid grassland hillslope using magnetic susceptibility. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 721-732, 1993.
30. **Poesen J., Torri D.:** The effect of cup size on splash detachment and transport measurements. Part I: field measurements. In: *Geomorphic Processes in Environments with Strong Seasonal Contrasts* (Eds A.C. Imeson, M. Sala). I. Hillslope Processes. *Catena Supplement* 12, 113-126, 1988.
31. **Proffitt A.P.B., Rose C.W.:** Soil erosion processes. 1. The relative importance of rainfall detachment and runoff entrainment. *Austr. J. Soil Res.*, 29, 671-683, 1991.
32. **Rejman J., Turski R., Paluszek J.:** Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil. *Soil and Tillage Res.*, 46, 61-68, 1998.
33. **Rejman J., Usowicz B.:** Evaluation of soil loss contribution areas on loess soils in southeast Poland. *Earth Surface Processes and Landforms* (w druku), 2002.
34. **Rejman J., Usowicz B., Dębicki R.:** Source of errors in prediction of silty soil erodibility Polish *J. Soil Sci.*, 32(1), 13-22, 1999.
35. **Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., McCool D.K., Yoder, D.C.:** Predicting soil erosion by water - a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agric. Handb.* 703. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C., 1997.
36. **Ritchie J.T.:** A model for predicting evaporation for a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.*, 8(5), 1204-1213, 1972.

37. **Rose C.W., Williams J.R., Sander G.C., Barry D.A.:** A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I. Theory for a plane land element. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 991-995, 1983.
38. **Smith R.E., Parlange J.:** A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 14, 533-538, 1978.
39. **Torri D., Poesen J.:** The effect of cup size on splash detachment and transport measurements, Part II: theoretical approach. In: *Geomorphic Processes in Environments with Strong Seasonal Contrasts* (Eds A.C. Imeson, M. Sala). I. Hillslope Processes. *Catena Supplement* 12, 127-137, 1988.
40. **Turski R., Słowińska-Jurkiewicz A., Paluszek J.:** Wpływ erozji na fizyczne właściwości gleb wytworzonych z lessu. *Roczniki Gleboznawcze*, 38, 1:37-49, 1987.
41. USDA SCS. *National Engineering Handbook, Hydrology, Section 4.* US Government Printing Office, Washington, D.C., 1-548, 1972.
42. **Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D.:** AGNPS: An agricultural nonpoint source model. [w:] V.J. Singh (Ed) *Computer models of watershed hydrology.* Water resources Publications, Colorado, 1001-1019, 1995.
43. **Williams, J.R.:** Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. ARS, S-40, USDA, Washington, 1975.
44. **Williams J.R.:** The EPIC model. In: *Computer models of watershed hydrology* (Ed. V.J. Singh). *Water Res. Publ.*, Colorado, 909-1001, 1995.
45. **Wischmeier W.H., Smith D.D.:** Predicting rainfall erosion losses. *USDA Agric. Handb.* 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C., 1-58, 1978.
46. **Woolhiser, DA, Smith R.E., Goodrich D.C.:** KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA Agricultural research service, ARS-77, 1990.
47. **Yu B., Rose C.W., Ciesiolka C.A.A., Coughlan K.J, Fentie B.:** Plot-scale rainfall-runoff characteristics and modelling at six sites in Australia and South-east Asia. *Trans. ASAE*, 40, 1295-1303, 1997.
48. **Beasley D.B., Huffins L.F., Monke E.J.:** ANSWERS: A model for watershed planning. *Tarns. ASAE*, 23, 938-944, 1980.

METHODOLOGICAL PROGRESS IN DESCRIPTION AND STUDIES OF WATER EROSION PROCESS

J. Rejman¹, R. Dębicki²

¹Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27, Poland

²University of Maria Curie-Skłodowska, Akademicka 19, 20-033 Lublin, Poland

S u m m a r y. This paper presents the examples of model investigations and the systems of natural environment monitoring applied in the agrophysical studies. The aim of giving these examples was to show that these two research methods are universal, i.e., they refer to all the disciplines being a part of natural sciences and they constitute a modern and effective research working methods. It should be also stressed that both methods are complementary to each other.

K e y w o r d s: water erosion, modelling, research methods.