

Zastosowanie modelu LISEM w badaniach naturalnych przekształceń środowiska

The application of LISEM in studies of natural environment transformations

Bogusława Kruczkowska, Ewa Kołaczowska, Edyta Regulska

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego PAN
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa
e-mail: b.przewozna@twarda.pan.pl, ekolaczk@twarda.pan.pl, eregulska@twarda.pan.pl

Abstract: The application of LISEM for water erosion intensity evaluation is very wide. This model can be successfully used by hydrologists, geomorphologists and soil scientists. The simulation results concern not only erosion, but also eroded material deposition. For this reason it is possible to track changes in soil cover and morphometry of the studied area during and after rainfall. This assessment can be used in reconstructions, which takes into account wider intervals and also to forecast future changes. LISEM is created to simulate complex processes induced by rainfall from the moment they start till runoff/rainwater sinks in the studied catchment. Water supply in the form of torrential rain is analyzed for its subsequent movement along the slope. For simulation characteristics of soil properties, rainfall, type of land use and land cover, catchment morphometry was used. This complex information allows to generate the most accurate results of soil erosion and deposition.

Słowa kluczowe: depozycja materiału glebowego, erozja gleb, model LISEM

Key words: soil material deposition, soil erosion, LISEM

Wprowadzenie

Od momentu zauważenia istoty i niebezpieczeństwa, jakie niesie ze sobą erozja gleb, uczeni na całym świecie szukają metod prognozowania tego zjawiska, określania jego natężenia w zależności od wielorakich czynników naturalnych i antropogenicznych oraz metod zapobiegania postępującej denudacji (Meyer, Wischmeier 1969). Na erozję wodną szczególnie podatne są obszary silnie urzeźbione o znacznych spadkach terenu. Jednakże na całkowitą wielkość erozji składa się szereg czynników, które odnoszą się zarówno do charakterystyk opadu, podłoża, pokrycia i użytkowania terenu, jak i morfometrii zlewni.

Badania natężenia erozji wodnej, prowadzone bezpośrednio w terenie, są skomplikowane i wymagają montażu specjalistycznego sprzętu. Ze względu na duże zagrożenia związane ze stratą wymywanego materiału glebowego oraz konieczność ciągłego monitorowania szczególnie narażonych na

erozję obszarów pojawiła się potrzeba symulacji przebiegu tego procesu przy użyciu modeli. Dobór właściwego modelu powinien być poprzedzony szczegółową analizą skali dostępnych danych, określeniem wielkości badanego obszaru oraz możliwości symulacyjnych formuł w zależności od przewidywanych wyników.

Charakterystyka wybranych modeli erozyjnych

Modelowanie procesów erozyjnych można rozpatrywać dwutorowo w zależności od rodzaju produktu finalnego, jaki chcemy uzyskać. Przy założeniu, że nie istnieją żadne ograniczenia ilości materiału glebowego, który może być transportowany po stoku wraz ze strumieniem wody, nie ma możliwości typowania wielkości i obszarów depozycji osadów (Gawrysiak 2010). Do tego typu prognoz wykorzystuje się między innymi model USLE (Wischmeier, Smith 1978) oraz jego modyfikacje (RUSLE i RUSLE 3D – *Revised Universal Soil Loss Equation*) – Renard i in. 1991, 1997. Drugi przypadek zakłada, że istnieje ograniczenie ilości materiału glebowego, który może być transportowany przez spływającą wodę, a jego ilość ściśle wiąże się ze zdolnością transportową strumienia wody spływającego po stoku. Modele uwzględniające tę zależność typują na miejsca depozycji osadów punkty, w których ta zdolność znacznie się obniża (Drzewiecki, Mularz 2001, 2005). Przykładem tego rodzaju modeli jest formuła USPED (*Unite Stream Power-based Erosion/Deposition*) – Mitasova i in. 1998. Ograniczenia związane z wykorzystaniem wyżej opisanych modeli są jednak bardzo duże. Z tego powodu powstały modele fizyczne, które redukują te niedogodności, np. WEPP (*Water Erosion Prediction Program*) – Nearing i in. 1989, Laflen i in. 1991, EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) – Morgan i in. 1998. Niestety ich zastosowanie nie jest uniwersalne, gdyż w większości przypadków analizy w nich wykonywane mogą dotyczyć jedynie jednostkowych pól, małych zlewni, bądź pojedynczych ekstremalnych zjawisk opadowych (Morgan i in. 1998). W formułach tychże modeli brakuje ponadto czynnika uwzględniającego zmienność rzeźby terenu oraz jego pokrycia, co powoduje, iż powierzchnia stoków uznawana jest za jednorodną (Mitasova i in. 1998; Drzewiecki, Mularz 2001). Jest to podejście błędne, gdyż rzeźba i pokrywa roślinna stoków jest zazwyczaj urozmaicona. Tym samym już podczas wprowadzania danych wejściowych oraz ich późniejszych transformacji powielane są błędy, które w efekcie mogą dać mało prawdopodobny obraz interpretowanego zjawiska. Model LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) należy do drugiej z wymienionych grup. Do przewidywania strat gleby dla celów specjalnych stosowane są modele fizyczne, takie, jak: ANSWERS (*Aerial Non-point Environmental Response Simulation*) – Beasley i in. 1980; CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management*) – Knisel 1980; Foster i in. 1981a, b; EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) – Williams i in. 1984; AGNPS (*Agricultural Non-Point Source*) – Young i in. 1989; CAMPS (*Computer-Assisted Management and Planning System*) oraz wiele innych. Ponadto istnieją fizyczne równania

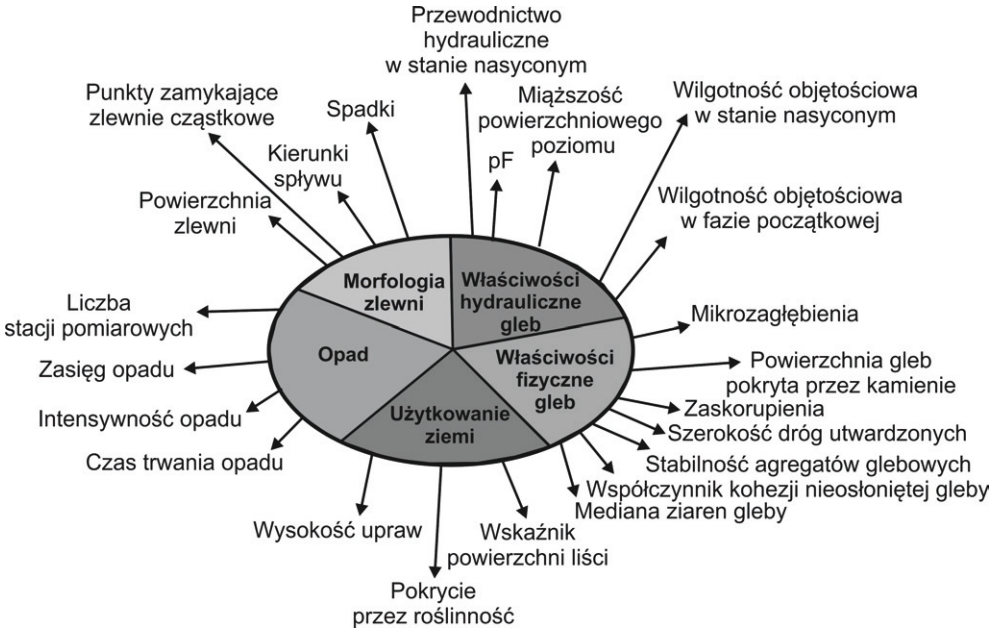
bazujące na procesie przewidywania strat glebowych czy uwzględniające depozycję materiału erodowanego: WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) – Foster, Lane 1987; Laflen i in. 1991; Cochrane, Flanagan 2004; EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) – Morgan i in. 1998; GUEST (*Griffith University Erosion System Template*) – Misra, Rose 1996; KINEROS (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) – Woolhiser i in. 1990; SWRRBWQ (*Simulator of Water Resources in Rural Basins-Water Quality*) – Arnold i in. 1990, 1991; SIMWE (*Simulation of Water Erosion*) – Mitas, Mitasova 1998; SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) – Arnold i in. 1998; Arnold, Fohrer 2005; EROSION-3D (Schmidt i in. 1997); Watem/SEDEM (Van Rompaey i in. 2003) czy LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) – Jetten i in. 1996) oraz modele prognostyczne strat materiału glebowego w wyniku erozji eolicznej: WEQ, RWEQ, WEPS (Woodruff, Siddoway 1965).

Charakterystyka modelu LISEM

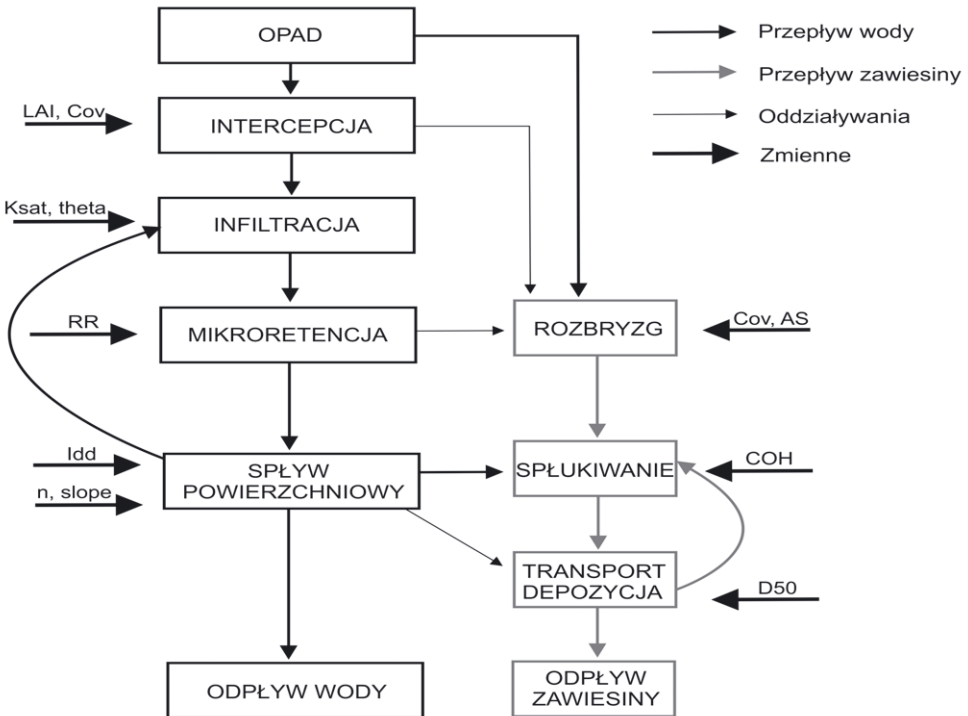
Model posiadający największe i jednocześnie najbardziej wiarygodne możliwości prognostyczne powinien uwzględniać szereg czynników dotyczących lokalnej specyfiki badanych obiektów (wskaźniki klimatyczne, geologiczne, glebowe, hydrologiczne, itp.). Dodatkowo winien odnosić się do bioróżnorodności w obrębie analizowanych zlewni oraz symulować pojedyncze opady (Gawrysiak 2010). Dobór właściwego modelu powinien być poprzedzony szczegółową analizą skali dostępnych danych, określeniem wielkości badanego obszaru oraz możliwości symulacyjnych formuł w zależności od przewidywanych wyników.

Model LISEM nie jest narzędziem nowym, bowiem już od ponad 20 lat jest wykorzystywany do wykonywania symulacji przebiegu procesu erozji i depozycji. Charakteryzuje go możliwość manipulacji danymi wejściowymi oraz wykonywanie analiz dla poszczególnych fragmentów terenu badawczego, co znacznie poprawia jakość i wiarygodność uzyskiwanych wyników. Analiza przebiegu procesów stokowych jest kluczowa w badaniach przekształceń rzeźby terenu i pokrywy glebowej. Możliwe jest w nim prognozowanie i symulowanie procesów erozyjnych związanych z opadami o różnym natężeniu w trakcie ich trwania lub bezpośrednio po, na powierzchniach nie większych niż 100 km² (De Roo 1996; De Roo, Jetten 1999; Jetten 2002). W modelu LISEM możliwe jest przeprowadzenie symulacji złożonych procesów wywołanych opadami. Do przebiegu symulacji wykorzystywany jest szereg zmiennych, które przedstawiono na rycinie 1.

Dostawa wody w postaci nawalnego deszczu analizowana jest pod kątem jej późniejszego przemieszczania się wzdłuż stoku. Pod uwagę brane są takie zjawiska jak: intercepcja, czyli zatrzymywanie wody opadowej przez szatę roślinną, infiltracja (przemieszczanie wód opadowych w głąb gleby), mikroretencja, czyli gromadzenie wody na niewielkich powierzchniach, spływ powierzchniowy oraz odpływ wody. Wraz z opadem uruchamiane zostają procesy przenoszenia zawiesiny wraz z przemieszczającą się po stoku wodą (rozbryzg, splukiwanie, transport i depozycja osadów, odpływ zawiesiny), co również jest ujęte w modelu LISEM (ryc. 2).



Ryc. 1. Dane wykorzystywane do symulacji w modelu LISEM (opracowanie własne).
 Fig. 1. The data used in LISEM simulation (own elaboration).



Ryc. 2. Schemat przebiegu symulacji w modelu LISEM (Hessel 2002; Jetten 2002; Gawrysiak 2010).
 Fig. 2. Flow chart of the simulation in LISEM (Hessel 2002; Jetten 2002; Gawrysiak 2010).

Do wykonania symulacji konieczne jest przygotowanie poszczególnych warstw tematycznych w postaci rastrowej, następnie ich konwersja do pliku ASCII i .map. Należy pamiętać o tym, aby każda z map miała identyczną rozdzielczość. Pomimo dość skomplikowanej procedury przygotowania danych wejściowych, LISEM to jeden z najnowocześniejszych deterministycznych modeli hydrologiczno-geomorfologicznych opracowany na potrzeby planowania przestrzennego, zwłaszcza na obszarach zagrożonych procesami erozji, oraz właściwych prac agrotechnicznych w rolnictwie.

Dzięki wykorzystaniu szczegółowych informacji na temat zlewni, w której przeprowadzane są symulacje, model LISEM daje stosunkowo wiarygodne wyniki w porównaniu z rezultatami badań bezpośrednich. Szacuje się, że wielkość błędu wynosi średnio około 5—8%. Niewątpliwą zaletą modelu LISEM jest możliwość wykonywania symulacji dla małych zlewni, co pozwala na śledzenie zmian rzeźby terenu i pokrywy glebowej w niewielkich skalach. Dzięki temu otrzymujemy istotne informacje przydatne w rekonstruowaniu pierwotnej morfometrii pojedynczych form terenu oraz prognozowanie ich przekształceń w przyszłości. Model nie służy jednak do tworzenia długoterminowych prognoz, ale do określania wpływu jednostkowych intensywnych opadów na powierzchnię zlewni, na której mają miejsce. Zastosowanie formuły LISEM do badań nad erozją gleb oraz depozycją erodowanych osadów jest coraz powszechniej stosowane wśród gleboznawców. Niemniej jednak nadal model ten jest wykorzystywany głównie przez geomorfologów i hydrologów.

Model LISEM jest stosowany na całym świecie do przeprowadzania symulacji przebiegu erozji wodnej w zlewniach o różnej powierzchni i przy zastosowaniu odmiennych funkcji programu (Fullen i in. 1998; Hessel, van Asch 2003; Hessel i in. 2003; Stolte i in. 2003; Gawrysiak 2005; Hessel, Tenge 2008). Możliwości wykorzystania rezultatów modelowania są bardzo szerokie. Format zapisu wyników umożliwia śledzenie przebiegu procesów w dowolnym momencie przeprowadzanej symulacji oraz ich przetwarzanie.

Charakterystyka obszaru badań

Badania przeprowadzono w trzech zagłębieniach bezodpływowych zlokalizowanych na Pojezierzu Drawskim, w obrębie krajobrazu młodoglacjalnego (ryc. 3).

Stanowisko *Drawsko* w całości porośnięte jest lasem bukowym; *Siemczyno I* – na przeważającej części zlewni dominuje użytkowanie łąkowe, a niewielką powierzchnię zajmuje pole uprawne oraz las świerkowy; *Siemczyno II* – zlewnia użytkowana rolniczo.

Pokrywa glebowa tych zagłębień jest reprezentowana głównie przez gleby płowe oraz rdzawe o uziarnieniu piasków gliniastych oraz glin piaszczystych. Spadki terenu na poszczególnych stanowiskach wahają się w granicach od 0° do powyżej 35°, przy czym dominują wartości z przedziału 6-25°. Omawiane zagłębienia charakteryzują bardzo duże spadki w strefie stokowej (od 13° do



Ryc. 3. Lokalizacja obszaru badań (opracowanie: Przewoźna 2012).

Fig. 3. Location of the study area (elaborated by: Przewoźna 2012).

powyżej 35°) oraz zasadniczo płaska część dennej ($0-2^\circ$). Średnia długość analizowanych stoków wynosi 60 metrów.

Badania bezpośrednio zrealizowano przy użyciu łapaczy zlokalizowanych na poletkach otwartych (ryc. 4) w obrębie analizowanych obiektów.

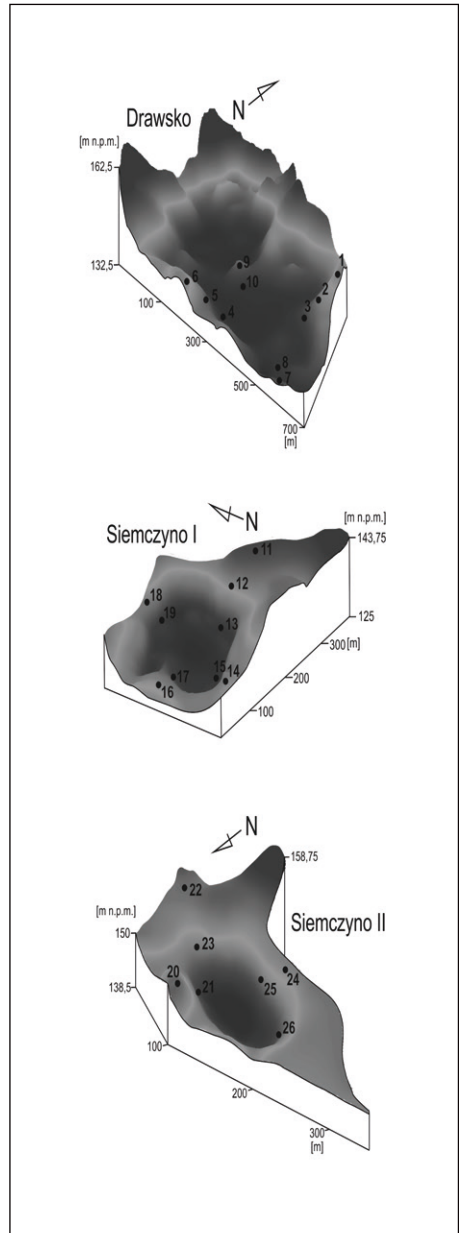
Analizę wielkości procesu erozji uzupełniono o modelowanie przy użyciu formuły LISEM. Dla potrzeb modelu dane dotyczące morfometrii zlewni zostały zmodyfikowane w taki sposób, aby podczas symulacji mieć pewność, że woda opadowa, która nie została wchłonięta przez podłoże, spłynęła ze zlewni.

Wyniki symulacji przebiegu procesu erozji wodnej w modelu LISEM dla zlewni różniących się użytkowaniem terenu

Podstawowym czynnikiem różnicującym wielkość erozji na badanych obszarach jest ich użytkowanie. Dane uzyskane z przeprowadzenia symulacji w modelu LISEM pokazują, że oprócz tej zmiennej istotna jest również wilgotność podłoża oraz czas trwania opadu i jego intensywność. Uwzględniając zmiany uwilgotnienia gleb przy jednoczesnym zachowaniu wartości pozostałych zmiennych uzyskano odmienne wyniki. W celu ukazania różnic symulacje przeprowadzono dla gleb suchych oraz wilgotnych. We wszystkich przypadkach istotną rolę w odbiorze wody opadowej odgrywała infiltracja oraz intercepcja (na obszarach osłoniętych roślinnością). Wraz ze wzrostem początkowej wilgotności gleby ilość wody możliwej

do pochłonięcia zmniejszała się, co skutkowało uruchomieniem spływu powierzchniowego i wzrostem całkowitej powierzchni strefy erozji i depozycji. Największe dobowe sumy opadów występują w okresie letnim, toteż symulacje przeprowadzono przy użyciu zmiennych charakteryzujących powierzchnię terenu w okresie wegetacyjnym. Przy interpretacji wyników symulacji należy uwzględnić warunki, w jakich pokrywa glebowa znajduje się w chwili jej przeprowadzania. Wszelkie zmiany danych wejściowych, zależnie od rzeczywistych warunków panujących na obiektach badawczych, powodują bowiem przekształcenia rezultatów modelowania.

Wyniki symulacji przeprowadzonych dla zlewni stanowiska *Drawsko* wskazują, iż na tym obszarze erozja jest znikoma i występuje jedynie w bardziej odsłoniętych partiach stoków podczas trwania bardzo silnych opadów. Dla gleb suchych przy różnym natężeniu opadów zjawisko erozji nie wystąpiło. We wszystkich przypadkach procesy infiltracji oraz intercepcji odgrywały największą rolę pochłaniając od 70% do 85% całkowitej sumy opadów. Przy zwiększonej wilgotności gleb, zasięg oddziaływania erozji obejmuje wypukłe, mniej osłonięte stoki oraz leśne dukty, jednakże dopiero przy opadach o wysokości 60 mm i czasie trwania 30 minut. Mimo wszystko, są to nadal wartości niskie, rzędu $0,2-0,4 \text{ kg ha}^{-1}$ w stosunku do powierzchni całej zlewni zagłębienia. Depozycja następuje w bliskim sąsiedztwie strefy zasilania. W rzeczywistości, ze względu na ochronną funkcję gęstej roślinności, w tym zagłębieniu nie występuje ryzyko znacznych przemieszczeń materiału glebowego w wyniku spłukiwania. Symulacja w modelu LISEM dla użytkowanego rolniczo zachodniego



Ryc. 4. Lokalizacja łapaczy w obrębie analizowanych zlewni (opracowanie: Przewoźna 2012).

Fig. 4. Location of the sediment-traps within analyzed catchments (elaborated by: Przewoźna 2012).

stoku na stanowisku *Siemczyno I* potwierdza wyniki uzyskane metodą badań bezpośrednich. Głównie ze względu na małe nachylenie, odporność tamtejszych gleb na erozję jest wysoka, nawet przy zwiększonej wilgotności inicjalnej. Wielkość strefy erozji i depozycji w zależności od wysokości i długości trwania opadu obejmuje od 0% do 90% powierzchni stoku. Procesy te nie są jednak intensywne, a maksymalna wielkość zjawiska dla gleb wilgotnych przy opadach o intensywności 120 mm i czasie trwania 60 minut wynosi 1,3 kg ha⁻¹. W większości badanych przypadków jako pierwsze erodowane są wierzchołki stoku. Strefa depozycji kształtuje się w bliskiej odległości od nich. Wraz ze wzrostem wysokości opadu do 120 mm, strefa erozji rozszerza się na środkowe i ostatecznie dolne partie stoku, powodując depozycję erodowanego materiału u jego podstawy. Redepozycja osadów następuje również w środkowej części, aczkolwiek większa ich masa zostaje przeniesiona na dalszą odległość.

Symulacje dla zlewni zagłębienia *Siemczyno II* ukazują, iż mimo opadów o znacznym wysokości maksymalna wielkość erozji dla opadów o wysokości 120 mm i czasie trwania 60 minut wynosi od 1,8 do 2,9 kg ha⁻¹. Zasięg strefy erozji, podobnie jak w zagłębieniu *Siemczyno I*, obejmuje od 0 do 90% powierzchni zlewni. W przypadku gleb suchych erozja zaznacza się głównie na stoku południowym oraz zachodnim i występuje przy opadach o wysokości powyżej 60 mm. Jest to uwarunkowane uziarnieniem osadów oraz mniejszym stopniem pokrycia terenu przez roślinność. Na pozostałych stokach nie jest notowana.

Przy zwiększonej wilgotności gleb, proces erozji inicjowany jest przez opad o wysokości 30 mm. Obejmuje on stok południowy i zachodni, jednak jego natężenie jest słabe i wynosi od 0,4 do 1,3 kg ha⁻¹. Depozycja następuje w bliskiej odległości od erodowanych fragmentów stoku. Zasięgi poszczególnych stref przy opadach powyżej 60 mm są znacznie większe i obejmują wszystkie stoki zagłębienia. Mimo uruchomienia spływu osadów z powierzchni wszystkich stoków, proces erozji nie powoduje dużych zmian w powierzchniowych poziomach gleb. Występowanie progów w obrębie stoków powoduje, że strefy erozji i depozycji wzajemnie się przeplatają, nie tworząc wyraźnego systemu denudacyjnego. Jak wynika z symulacji przeprowadzonych dla opadów o wysokości powyżej 60 mm, dolne partie stoków są najmniej narażone na erozję i w większości przeprowadzonych symulacji stanowią strefę depozycji.

Biorąc pod uwagę sumaryczną wysokość opadów za okres badawczy od 6.05. do 30.09.2011 r., wyniki erozji uzyskane z badań bezpośrednich są zbliżone do rezultatów pojedynczych symulacji w modelu LISEM. Zjawisko erozji w obu porównywanych przypadkach wystąpiło na stokach rolniczych. Przemieszczenie materiału glebowego odbywało się na krótkich odcinkach, w niewielkiej odległości od źródła zasilania. Podczas okresu obserwacyjnego, pomimo występowania również silnych opadów, zjawisko erozji było znikome, rzędu 0,8-1,2 kg ha⁻¹ (*Drawsko*), 2,5-2,9 kg ha⁻¹ (*Siemczyno I*) oraz 2,2-3,8 kg ha⁻¹ (*Siemczyno II*). Zmiany, jakie zaszły w tym czasie w pokrywie glebowej obu stanowisk były nieznaczne i nie wpłynęły na ogólną kondycję gleb na tym obszarze.

Wielkość depozycji, zarówno w przypadku badań bezpośrednich, jak i podczas modelowania, stanowi blisko 100% całkowitego zerodowanego materiału, co związane jest z zamkniętym charakterem zlewni obiektów badawczych. Analogicznie do rezultatów badań Klimczaka (1993), Szpikowskiego (1998, 2002), Smolskiej (2005) oraz Stasika i Szafrąńskiego (2005), proces depozycji przeważał na wklęsłych fragmentach stoków, nawet w górnych ich partiach oraz u podstaw. Transport osadów z wyższych partii stoku odbywał się głównie na krótkich odcinkach, a do redepozycji dochodziło w miejscach odległych od ich pierwotnej lokalizacji do około 100 cm, co potwierdzają również badania Smolskiej i in. (1995) oraz Smolskiej (2002, 2010). Na bardziej stromych fragmentach, głównie rolniczo użytkowanych stoków, transport zachodził również na dłuższych odcinkach, co skutkowało depozycją erodowanych osadów na granicy z dnem zagłębień bezodpływowych. Wpływ na przemieszczanie osadów ma również stosowanie zabiegów agrotechnicznych. Na stokach rolniczych orka wykonywana była w poprzek stoku, co w znacznym stopniu ograniczało zagrożenie sływem powierzchniowym. Jednakże w wyniku oddziaływania pługa dochodziło do częściowego przemieszczenia materiału glebowego oraz jego ugniatania w strefie nacisku kół.

Wnioski

Wykorzystanie modelu LISEM do oceny natężenia zjawiska erozji wodnej jest bardzo szerokie. Uzyskiwane wyniki odnoszą się nie tylko do wielkości erozji, ale również depozycji erodowanego materiału. Zapis danych wyjściowych jest na tyle uniwersalny (pliki rastrowe, „txt” oraz „csv”), że istnieje możliwość ich późniejszej obróbki w zależności od celu badań. Obserwacja przebiegu modelowania w trakcie oraz po zakończeniu opadów może być wykorzystana do śledzenia zmian występujących w pokrywie glebowej oraz morfometrii terenu w czasie rzeczywistym. Ocenę tę można wykorzystać do wykonywania rekonstrukcji z uwzględnieniem szerszych przedziałów czasowych oraz prognozowania zmian w przyszłości. Z racji dużej ilości danych wejściowych, które, w jak najdokładniejszy liczbowy sposób opisują badany teren, narzędzie to może być z powodzeniem stosowane równolegle lub nawet zamiennie z badaniami bezpośrednimi w terenie.

Literatura

- Arnold J.G., Fohrer N., 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19 (3), s. 563-572.
- Arnold J.G., Williams J.R., Griggs R.H., Sammons N.B., 1990. SWRRB: a basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A & M Press.
- Arnold J.G., Williams J.R., Griggs R.H., Sammons N.B., 1991. SWRRBWQ: a basin scale model for assessing management impacts on water quality. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas.

- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R., 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34 (1), s. 73-89.
- Beasley D.B., Huggins L.F., Monke E.J., 1980. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 23 (4), s. 938-944.
- Cochrane T.A., Flanagan D.C., 2004. Effect of DEM Resolutions in the Runoff and Soil Loss Predictions of the WEPP Watershed Model. *Soil and Water Division of ASAE* 47, s. 1-12.
- De Roo A.P.J., 1996. The LISEM Project: an introduction. *Hydrological Processes* 10 (8), s. 1021-1025.
- De Roo A.P.J., Jetten V.G., 1999. Calibration and validation the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena* 37 (3), s. 477-493.
- Drzewiecki W., Mularz S., 2001. Modelowanie erozji wodnej gleb z wykorzystaniem GIS, Materiały Konferencji Naukowej „Nowoczesne technologie w geodezji i inżynierii środowiska”, 22 września 2001. Wydział 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* 3 (2), Warszawa, s. 45-54.
- Foster G.R., Lane L.J., 1987. User requirements: USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP), NSERL Report 1. National Soil Erosion Research Laboratory, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, West Lafayette.
- Foster G.R., Lane L.J., Nowlin J.D., Laffen J.M., Young R.A., 1981a. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 24 (5), s. 1253-1263.
- Foster G.R., McCool D.K., Renard K.G., Moldenhauer W.C., 1981b. Conversion of Universal Soil Loss Equation to SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation* 36 (6), s. 355-359.
- Fullen M., Zhi W.B., Brandsma R.T., 1998. A comparison of texture of grassland and eroded soils from Shropshire, UK. *Soil and Tillage Research* 46 (3-4), s. 301-305.
- Gawrysiak L., 2005. An estimation of soil erosion dynamics in arable loess catchment using LISEM model. [w:] W. Zgłobicki, J. Rejman (red.), *Human impact on sensitive geosystems*. Maria Curie-Skłodowska University Press, Lublin, s. 23-37.
- Gawrysiak L., 2010. Symulacja splywu powierzchniowego w małych zlewniach z wykorzystaniem modelu LISEM. [w:] Z. Zwoliński (red.), *GIS – woda w środowisku*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 73-85.
- Hessel R., 2002. Modelling soil erosion in a small catchment on the Chinese Loess Plateau. PhD Thesis. Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.
- Hessel R., van Asch T., 2003. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau. *Catena* 54 (1-2), s. 131-146.
- Hessel R., Tenge A., 2008. A pragmatic approach to modelling soil and water conservation measures with a catchment scale erosion model. *Catena* 74 (2), s. 119-126.
- Hessel R., Jetten V., Baoyuan L., Yan Z., Stolte J. i in., 2003. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. *Catena* 54 (1-2), s. 235-254.
- Jetten V., 2002. LISEM user manual, version 2.x. Draft version January 2002, Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics. Utrecht University. The Netherlands.
- Jetten V., Boiffin J., De Roo A., 1996. Defining monitoring strategies for runoff and erosion studies in agricultural catchments: a simulation approach. *European Journal of Soil Science* 47 (4), s. 579-592.
- Klimczak R., 1993. Splukiwanie na obszarach o zróżnicowanym użytkowaniu – przebieg i rola we współczesnym środowisku morfogenetycznym (zlewnia Młyńskiego Potoku, Pomorze Zachodnie). [w:] A. Kostrzewski (red.), *Geosystem obszarów nizinnych*. Zeszyty Naukowe

- PAN. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN Człowiek i Środowisko 6, Wrocław-Warszawa-Kraków, s. 61-77.
- Knisel W.G., 1980. CREAMS: a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Report 26.
- Lafren J.M., Lane L.J., Foster G.R., 1991. WEPP – a new generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil and Water Conservation* 46 (1), s. 34-38.
- Meyer L.D., Wischmeier W.H., 1969. Mathematical simulation of the process of the soil erosion by water. *Transactions on American Society of Agricultural and Biological Engineers* 12 (6), s. 754-758.
- Misra R.K., Rose C.W., 1996. Application and sensitivity analysis of process-based erosion model GUEST. *European Journal of Soil Science* 47 (4), s. 593-604.
- Mitas L., Mitasova H., 1998. Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. *Water Resources Research* 34 (3), s. 505-516.
- 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 at Urbana-Champaign.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A. i in., 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 (6), s. 527-544.
- Nearing M.A., Foster G.R., Lane L.J., Finckner S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 32, s. 1587-1893.
- Przewoźna B., 2012. Zmiany właściwości gleb zagłębień bezodpływowych w krajobrazie młodoglacjalnym jako efekt denudacji antropogenicznej i procesów erozyjnych. Maszynopis pracy doktorskiej IGiPZ PAN, Warszawa.
- 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), s. 30-33.
- 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 Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook 703.
- Schmidt J., Michael A., Schmidt W., von Werner M., 1997. EROSION 2D/3D – Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- Smolska E., 2002. The intensity of soil erosion in agricultural areas in North-Eastern Poland. *Landform Analysis* 3, s. 25-33.
- Smolska E., 2005. Znaczenie splukiwania w modelowaniu stoków młodoglacjalnych. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Smolska E., 2010. Splukiwanie gleby na użytkowanych rolniczo stokach młodoglacjalnych na przykładzie Pojezierza Suwalskiego. [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*. Instytut Geografii Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce, s. 137-149.
- Smolska E., Mazurek Z., Wójcik J., 1995. Dynamika procesów geomorfologicznych na stoku pojeziernym jak czynnik środowiskotwórczy. *Zeszyty Naukowe PAN. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN Człowiek i Środowisko* 12, s. 205-220.
- Stasik R., Szafrąński C., 2005. Zmiany w pokrywie glebowej erodowanych terenów Pojezierza Gnieźnieńskiego. *Acta Agrophysica* 5 (2), s. 447-454.
- Stolte J., Liu B.Y., Ritsema C.J., van den Elsen H.G.M., Hessel R., 2003. Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China. *Catena* 54 (1-2), s. 117-130.

- Szpikowski J., 1998. Wielkość i mechanizm erozji wodnej gleb na stokach użytkowanych rolniczo w zlewni młodoglacjalnej (Górna Parsęta, Chwalimski Potok). *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 4A, s. 113-124.
- Szpikowski J., 2002. Contemporary processes of soil erosion and the transformation of the morphology of slopes in agricultural use in the postglacial catchment of the Chwalimski Potok (upper Parsęta, Drawskie Lakeland). *Quaestiones Geographicae* 22, s. 79-90.
- Williams J.R., Renard K.G., Dyke P.T., 1984. EPIC: a new model for assessing erosion's effect on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 8, s. 381-383.
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture. *Agricultural Handbook* 537.
- Woodruff N.P., Siddoway F.H., 1965. Wind erosion equation. *Soil Science Society of America, Proceedings* 29, s. 602-608.
- Woolhiser D.A., Smith R.E., Goodrich D.C., 1990. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. U.S. Department of Agriculture. *Agricultural Research Service ARS-77*.
- Van Rompaey A., Krasa J., Dostal T., Govers G., 2003. Modeling sediment supply to rivers and reservoirs in Eastern Europe during and after the collectivisation period. *Hydrobiologia* 494 (1), s. 169-176.
- Young R.A., Onstad C.A., Bosch D.D., Anderson W.P., 1989. AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 44 (2), s. 168-173.